

62-83(075)
Б50

Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко,
П.І. Савченко, О.Ю. Синявський,
Д.Г.Войтюк, В.П. Лисенко

ЕЛЕКТРОПРИВОД

Підручник



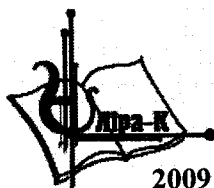
**Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко,
П. І. Савченко, О. Ю. Синявський,
Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко**

ЕЛЕКТРОПРИВОД

Видання друге, доповнене і перероблене

*За редакцією кандидата технічних наук
Лавріненка Юрія Миколайовича*

*Допущено Міністерством аграрної політики України
як підручник для підготовки фахівців у вищих аграрних
навчальних закладах освіти II — IV рівнів акредитації
зі спеціальності «Енергетика сільськогосподарського
виробництва»*



УДК 631.3-83(075.8)

ББК 40.76я73

Е 45

*Гриф надано Міністерством аграрної політики України
(Лист № 18-12813/1294 від 12.08.08 р.)*

Рецензенти:

М. О. Корчемний — д-р техн. наук, проф.,
(Тернопільський Державний педагогічний університет)
А. А. Катюха — канд. техн. наук, доцент,
(Таврійський Державний агротехнологічний університет)
Ю. В. Герасимчук — канд. техн. наук,
старший науковий співробітник
(Національний науковий центр ІМЕСГ)
М. Т. Лут — канд. техн. наук, проф.
(Національний аграрний університет)

469357

Е 45 Електропривод: Підручник / Ю. М. Лаврінченко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лаврінченка. Видавництво «Ліра-К». — К., 2009. — 504 с.

ISBN 978-966-96938-8-4

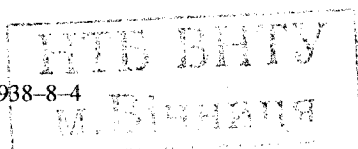
Викладені основи електропривода та питання керування автоматизованими електроприводами. Розглянуті механічні та електромеханічні властивості електродвигунів постійного і змінного струму, регулювання координат електропривода, динаміку, перехідні процеси і енергетику при перехідних процесах, розрахунок потужності електродвигунів, апарати керування і захисту, системи керування електроприводами, вибір електроприводів в цілому.

Для викладачів і студентів енергетичних спеціальностей вищих аграрних навчальних закладів II — IV рівнів акредитації.

УДК 631.3-83(075.8)

ББК 40.76я73

ISBN 978-966-96938-8-4



© Лаврінченко Ю. М.,
Марченко О. С.,
Савченко П. І. та ін., 2009
© «Ліра-К». 2009



ЗМІСТ

Передмова	10
Вступ	12
В1. Стан та основні напрями розвитку електропривода	12
В2. Привод. Електропривод та його елементи. Основні поняття і визначення	15
В3. Класифікація електроприводів	16
1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА	19
1.1. Статичні та динамічні сили і моменти, що діють у системі електропривод — робоча машина	19
1.2. Зведення моментів статичного опору і моментів інерції до вала електродвигуна	21
1.3. Рівняння руху електропривода	26
1.4. Механічні характеристики робочих машин	31
1.5. Механічні характеристики електродвигунів	32
1.6. Статична стійкість системи електродвигун-робоча машина	34
1.7. Методи експериментального визначення моменту інерції системи електродвигун-робоча машина	36
1.8. Приклади	41
1.9. Питання для самоконтролю	44
2. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	45
2.1. Електромеханічні та механічні характеристики електродвигунів постійного струму	45
2.1.1. Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження. Рівняння статичних електромеханічної та механічної характеристик	45

2.1.2. Механічні характеристики ДПС НЗ у відносних одиницях	50
2.1.3. Енергетичний режим роботи ДПС НЗ. Гальмівні режими	51
2.1.4. Способи пуску ДПС НЗ. Розрахунок опорів пускових і гальмівних резисторів	57
2.1.5. Схема вмикання, статичні електромеханічні та механічні характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження	62
2.1.6. Гальмівні режими ДПС ПЗ	65
2.1.7. Розрахунок і побудова природних і штучних електромеханічних та механічних характеристик ДПС ПЗ. Розрахунок опорів пускових резисторів ...	67
2.1.8. Схема вмикання, рівняння електромеханічних та механічних характеристик, режими роботи двигуна постійного струму змішаного збудження ..	71
2.1.9. Приклади	73
2.1.10. Питання для самоконтролю	79
2.2. Електромеханічні та механічні характеристики двигунів змінного струму	79
2.2.1. Схеми вмикання та заміщення трифазного асинхронного двигуна	79
2.2.2. Рівняння статичних електромеханічної та механічної характеристик трифазного асинхронного двигуна у параметричній формі та його аналіз	81
2.2.3. Природні та штучні характеристики трифазного асинхронного двигуна, їх розрахунок і побудова	87
2.2.4. Гальмівні режими трифазних асинхронних двигунів	94
2.2.5. Способи пуску, обмеження пускових струмів і моментів трифазних асинхронних двигунів	98
2.2.6. Розрахунок пускових резисторів, увімкнених в коло статора та ротора	100
2.3. Механічні характеристики однофазних та універсальних колекторних двигунів	101
2.2.4. Механічна та кутова характеристика синхронного двигуна	104
2.5. Приклади	108
2.6. Питання для самоконтролю	111

3. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ	113
3.1. Загальні положення	113
3.2. Визначення часу пуску і гальмування системи електродвигун — робоча машина	115
3.3. Механічні перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінних статичному моменті і моменті інерції	121
3.4. Механічні перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінному моменті інерції і моменті статичних опорів, лінійно залежним від швидкості	127
3.5. Перехідні процеси в електроприводах з трифазними асинхронними електродвигунами	130
3.5.1. Перехідні процеси на ділянках з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінних статичному моменті і моменті інерції	130
3.5.2. Перехідні процеси на ділянках з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінному моменті інерції і моменті статичних опорів, лінійно залежним від швидкості	134
3.5.3. Аналітичне визначення часу перехідного процесу пуску та електричного гальмування	136
3.6. Динамічні характеристики асинхронних електродвигунів ..	142
3.7. Перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою при $\omega_0 = f(t)$	144
3.8. Приклади	148
3.9. Питання для самоконтролю	149
4. РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ У РОЗІМКНЕНИХ СИСТЕМАХ	151
4.1. Загальні питання про регулювання координат електропривода	151
4.2. Основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів	152
4.3. Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму	157
4.3.1. Регулювання кутової швидкості ДПС НЗ зміною напруги на якорі	157
4.3.2. Реостатне регулювання кутової швидкості ДПС НЗ ..	170

4.3.3. Регулювання кутової швидкості ДПС НЗ зміною магнітного потоку	177
4.3.4. Імпульсний спосіб регулювання кутової швидкості ДПС НЗ	182
4.3.5. Регулювання кутової швидкості ДПС ПЗ	187
4.3.6. Контрольні питання	191
4.4. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів ...	191
4.4.1. Загальні відомості	191
4.4.2. Частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів	192
4.4.3. Перетворювачі частоти для керування асинхронними двигунами	200
4.4.4. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною числа пар полюсів	209
4.4.5. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною опору роторного кола	215
4.4.6. Асинхронний регульований електропривод у каскадних схемах	219
4.4.7. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною напруги на статорі	226
4.4.8. Приклади	228
4.4.9. Питання для самоконтролю	230
5. АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	232
5.1. Загальні відомості	232
5.2. Системи автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС НЗ	233
5.3. Системи автоматичного регулювання моменту ДПС НЗ ..	238
5.4. Обмеження струму і моменту ДПС НЗ у замкненій системі з нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму	241
5.5. Автоматичне регулювання положення	243
5.6. Автоматичне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною напруги живлення з від'ємним зворотним зв'язком по швидкості	245
5.7. Автоматичне частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів	248
5.8. Питання для самоконтролю	250

6. ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА	252
6.1. Основні енергетичні показники роботи електропривода ..	252
6.2. Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в нерегульованому електроприводі при роботі в усталеному режимі	254
6.3. Втрати потужності в регульованому електроприводі при роботі в усталеному режимі	258
6.4. Втрати енергії в нерегульованому електроприводі в перехідних режимах роботи і способи їх зниження	264
6.4.1. Визначення енергетичних показників роботи електропривода в перехідних режимах	264
6.4.2. Втрати енергії в двигунах постійного та змінного струму при роботі без навантаження ($M_c = 0$)	265
6.4.3. Втрати енергії при роботі з навантаженням ($M_c \neq 0$)	267
6.5. Втрати енергії в регульованому електроприводі у перехідних процесах і способи їх зниження	271
6.6. Шляхи енергозбереження в електроприводі	274
6.7. Приклад	275
6.8. Питання для самоконтролю	277
7. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА ПОТУЖНІСТЮ	278
7.1. Класи нагрівостійкості ізоляції обмоток електродвигунів	278
7.2. Нагрівання та охолодження електродвигунів	280
7.3. Навантажувальні діаграми	289
7.4. Класифікація номінальних режимів роботи електричних двигунів	290
7.5. Вибір електродвигунів за потужністю для тривалого режиму роботи	297
7.6 Вибір двигунів за потужністю для короткочасного режиму роботи	312
7.7. Вибір двигунів за потужністю для повторно- короткочасного режиму роботи	320
7.7.1. Визначення допустимого числа вмикань асинхронного двигуна	327
7.8. Визначення потужності двигуна для регульованого електропривода	330
7.9. Приклади	333
7.10. Питання для самоконтролю	339

8. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ	340
8.1. Класифікація електричних апаратів та вимоги до них	340
8.2. Нормовані параметри електричних апаратів	341
8.3. Контакти електричних апаратів	345
8.3.1. Режими роботи контактів	347
8.3.2. Матеріали контактів	348
8.3.3. Конструкції контактів	350
8.3.4. Електрична дуга	352
8.3.5. Умови горіння та гасіння дуги постійного струм	353
8.3.6. Дугогасні пристрої електричних апаратів	359
8.3.7. Електромагніти електричних апаратів	364
8.4. Апарати керування	368
8.4.1 Апарати ручного керування	368
8.4.2. Шляхові вимикачі і перемикачі	373
8.4.3. Контактори	376
8.4.4. Електромагнітні пускачі	383
8.4.5. Електричні реле	387
8.4.6. Напівпровідникові електричні апарати	397
8.4.7. Приклади вибору апаратів керування	404
8.4.8. Питання для самоконтролю	406
8.5. Апарати захисту електроприводів від аварійних і аномальних режимів	407
8.5.1. Плавкі запобіжники	408
8.5.2. Електротеплові реле	414
8.5.3. Автоматичні вимикачі	418
8.5.4. Пристрої температурного захисту	424
8.5.5. Пристрої захисного вимикання	427
8.5.6. Пристрої захисту з електронними блоками	431
8.5.7. Приклади вибору апаратів захисту	435
8.5.8. Питання для самоконтролю	437
9. СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ	438
9.1. Функції систем автоматичного керування електроприводом	438
9.2. Правила виконання електричних схем	441
9.3. Типові вузли і блокування у схемах керування електроприводами	445
9.4. Типові схеми автоматизованого керування двигунами змінного струму	451

9.5. Типові схеми керування двигунами постійного струму ...	470
9.6. Типові структури замкнених систем автоматичного керування електроприводами	476
9.7. Програмне керування електроприводами	482
9.8. Питання для самоконтролю	483
10. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	484
10.1. Загальна методика вибору електропривода	484
10.2. Розрахунки надійності електропривода	494
10.3. Техніко-економічна оцінка електропривода	497
10.4. Питання для самоконтролю	497
Бібліографія	498
Предметний покажчик	500



ПЕРЕДМОВА

Пропонований читачам підручник написано у відповідності з типовою програмою навчальної дисципліни «Електропривод» для підготовки фахівців у вищих навчальних аграрних закладах II — IV рівня акредитації зі спеціальності 091901 «Енергетика сільськогосподарського виробництва».

Книга може бути корисною студентам, що навчаються за напрямками підготовки 6.100101 «Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі», 6.050701 «Електротехніка та електротехнології», 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 6.050101 «Комп'ютерні науки».

В 1995 р. видавництвом «Урожай» був випущений підручник «Електропривод. Частина I» за редакцією, на жаль, покійного професора Марченка О.С., яким і понині успішно користуються студенти і викладачі аграрних навчальних закладів України. У 2002 р. колективу його авторів була присуджена третя премія Міністерства агропромислової політики за кращий підручник серед видань з енергетики і електрифікації сільськогосподарського виробництва.

У порівнянні з попереднім в це видання внесено ряд змін і доповнень. В розділі 2 наведено нові методи розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів, в яких враховані особливості сучасних серій двигунів з короткозамкненим ротором. Зважаючи на розширення застосування регульованих електроприводів в аграрному виробництві, доповнені розділи 3, 4, 6 і 7 та суттєво перероблений розділ 5. Книга доповнена розділами 8 — «Електричні апарати», 9 — «Системи керування електроприводів» та 10 — «Вибір електроприводів», завдяки чому може бути рекомендована як основний підручник з дисципліни.

З метою полегшення опановування студентами матеріалу дисципліни в книзі наведено приклади розрахунків характеристик елек-

тродвигунів, вибору їх потужності, вибору та перевірки апаратів керування і захисту та питання для самоконтролю.

Оскільки підручник призначений для підготовки фахівців, які будуть займатися експлуатацією електроустановок в аграрному виробництві, в ньому багато уваги приділено властивостям і енергетичним характеристикам електроприводів як споживачів електроенергії та питанням її раціонального використання.

Розділи підручника написали: 1.1; 1.2; 1.5; 1.6; 3; 8 — Лавріненко Ю.М.; 1.3; 1.4; 1.6 — Войтюк Д.Г.; 2.1; 9.6; 9.7 — Лисенко В.П.; 2.2; 6; 7 — Савченко П.І.; 4 — Марченко О.С.; 5; 9.1 - 9.5; 10 — Сиявський О.Ю.

Автори висловлюють глибоку подяку доктору технічних наук Корчемному М.О. і кандидатам технічних наук Герасименку Ю.В., Катюсі А.А. та Луту М.Т. за велику працю з рецензування книги та цінні зауваження, які враховано при доопрацюванні.

Всі зауваження і побажання читачів просимо направляти на адресу видавництва.



ВСТУП

В1. Стан та основні напрями розвитку електропривода

Сучасний стан розвитку виробництва характеризується широким застосуванням електрифікованих машин і агрегатів. Агропромисловий комплекс України є потужним споживачем електроенергії на виробничі потреби. Проте в останні роки у зв'язку з системною кризою рівень електрифікації сільськогосподарського виробництва різко знизився. Так, у 2006 р. агропромисловим комплексом було спожито на виробничі потреби 2,52 млрд. кВт·год електроенергії, що склало всього 1,4 % від загального її виробництва. Для порівняння, в 1990 р. ці цифри були відповідно 30,1 млрд. кВт·год і 10,1 %. Це свідчить про різке зниження електроозброєності праці, яка в 1990 р. складала 4817 кВт·год, а в 2006 р. — біля 1700 кВт·год. Проте намітилися тенденції інтенсифікації виробництва із застосуванням новітніх технологій та технологічного і електротехнічного обладнання, в тому числі електроприводів, що відповідає світовому рівню техніки.

Найбільшу кількість електроенергії в агропромисловому виробництві — біля 70 % — споживає електропривод. Всі стаціонарні робочі машини та значна кількість мобільних приводяться електродвигунами. Це обумовлено рядом суттєвих переваг електричного привода над приводом від теплових і механічних двигунів:

1) можливість виготовлення електродвигунів на найрізноманітніші потужності та частоти обертання. Діапазон потужностей сучасних електроприводів знаходиться в межах від тисячних долей вата до десятків тисяч кіловат, а діапазон частот обертання — від долей оберту за хвилину до сотень тисяч обертів за хвилину;

2) можливість створення електроприводів, здатних працювати в різноманітних умовах оточуючого середовища та в різних поєднаннях з робочою машиною;

3) можливість за допомогою простих засобів реалізувати різноманітні види рухів та змінювати їх параметри;

4) легкість автоматизації технологічних процесів і простота керування виробництвом;

5) високі ККД і експлуатаційна надійність електропривода, сприятливі умови для обслуговуючого персоналу, практична відсутність забруднення оточуючого середовища.

Розвиток електропривода розпочався з 1838 р., коли петербурзький академік Б. С. Якобі провів на Неві випробування електродвигуна постійного струму, встановленого на невеликому катері. Тривалий час пошуки науковців і конструкторів велися в напрямку розробки нових економічних джерел постійного струму та нових конструкцій електродвигунів. Але існуюча тоді система постійного струму не давала задовільного рішення з передачі та розподілу електроенергії і гальмувала розвиток електропривода. Не дало достатнього поштовху у розвитку електропривода і відкриття однофазного постійного струму та застосування однофазних електродвигунів, оскільки останні не розвивали пускового моменту.

До революційних змін у розвитку електропривода спонукали відкриття у 80-х роках XIX сторіччя Г. Феррарісом і Н. Тесла явища обертового магнітного поля та розробки в 1889 — 1891 р.р. М.О. Доливо-Добровольським системи трифазного змінного струму і створення ним же в 1889 р. трифазного асинхронного двигуна. Система трифазного змінного струму стала тим новим технічним засобом, який дозволив розв'язати весь комплекс проблем з виробництва, передачі розподілу та споживання електроенергії. Трифазні асинхронні двигуни стали основними двигунами привода стаціонарних робочих машин.

Подальший розвиток електропривода можна розділити на кілька етапів. На початковій стадії вдосконалювалися його елементи: електродвигуни, апарати керування і захисту, передаточні ланки між двигуном і виконавчим органом робочої машини. Основною тенденцією цього етапу став перехід від групового привода до індивідуального та багатодвигунного. В останньому випадку кожний виконавчий орган робочої машини приводиться окремим двигуном. Наслідком стало наближення електродвигунів до виконавчих органів машини, а в окремих випадках вузли двигунів стали складовою частиною механізму машини. Спрощення за рахунок цього кінематичної схеми привода обумовило значне ускладнення електропривода в цілому, а особливо — системи керування.

Неавтоматичне (ручне) керування в багатьох випадках стає практично неможливим. Тому наступним етапом у розвитку електропривода стало створення пристроїв і систем для виконання операцій автоматичного керування власне електроприводом. До них відносяться операції пуску, реверсування, гальмування, зміни швидкості тощо.

Розвиток техніки і технологій спонукав до створення та впровадження електроприводів із системами автоматичного керування технологічними процесами і виробництвами. З метою якнайточнішого підтримання і регулювання параметрів технологічних процесів в таких системах передбачається глибоке регулювання координат електропривода. Впровадження вказаних систем стало можливим завдяки бурхливому розвитку напівпровідникової техніки, широкому застосуванню напівпровідникових приладів, мікропроцесорів і комп'ютерних технологій. Появилися програмно керовані, адаптивні, слідкуючі та інші види складних приводів. Поряд з розвитком систем керування розроблялися і нові типи та модифікації електродвигунів. На базі лінійних і тихохідних електродвигунів створюються безредукторні приводи. Широкого застосування набувають комплектні електроприводи, що обслуговують окремі технологічні процеси або цілі комплекси.

І все ж основна доля споживання електроенергії — до 50 % — припадає на масовий найпростіший нерегульований електропривод, що складається з асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором та пристрою вмикання-вимикання і захисту, виконаного на релейно-контактних елементах. В сільськогосподарському виробництві такі електроприводи є переважними як за кількістю, так і за споживанням електроенергії.

Як уже зазначалося вище, електроприводи працюють з високим ККД. Але зважаючи на значні об'єми споживаної ним електроенергії, проблема енергозбереження в електроприводі зараз є дуже гострою. Тому спеціалісти і науковці, які займаються розробкою, проектуванням, монтажем або експлуатацією електроприводів, повинні бути всебічно обізнані з їх будовою, енергетичними та іншими характеристиками, режимами роботи, способами регулювання і керування, правилами вибору. Ґрунтовні знання стануть запорукою того, що спроектовані та експлуатовані ними електроприводи будуть перетворювати електроенергію раціонально, з найвищим економічним ефектом.

Мета цього підручника полягає в озброєнні майбутніх бакалаврів та фахівців-електриків необхідними теоретичними і практични-

ми знаннями з основ автоматизованого електропривода, вмінням творчо вирішувати завдання проектування і експлуатації електроприводів сільсько-господарських машин і агрегатів, проводити дослідження та випробування їх в умовах експлуатації.

В2. Привод. Електропривод та його елементи.

Основні поняття і визначення

Сільськогосподарське виробництво використовує різноманітні машини, агрегати та потокові лінії. Ту частину робочої машини (РМ) або агрегату, яка безпосередньо виконує заданий технологічний процес або операцію, називають виконавчим органом (ВО) РМ.

Для виконання технологічної операції ВОРМ має здійснювати механічний рух з потрібною швидкістю і долати при цьому силу опору. Тому до ВОРМ повинна бути підведена механічна енергія (МЕ), яку вироблює двигунний пристрій. ***Привод** — це система пристроїв, призначених для перетворювання різних видів енергії на механічну, що використовується для приведення в рух ВОРМ і керування цим рухом.* Залежно від виду первинної енергії розрізняють ручний, паровий, пневматичний, гідравлічний, тепловий і електричний приводи.

Електропривод є основним у промисловості, на транспорті, в сільському господарстві. Він дає можливість регулювати швидкість ВОРМ у потрібних діапазонах, швидко пускати і зупиняти, змінювати напрямок руху, ефективно гальмувати, витримувати тривалі незначні перевантаження без спеціального регулятора подачі енергії з мережі.

Електроприводом (ЕП) називають електромеханічну систему, що складається з електродвигунного (ЕДП) (рис. В.1), перетворювального (ПП), механічного передавального (МПП) і керуючого (КП) пристроїв і призначена для приведення в рух ВОРМ та керування цим рухом. Основою будь-якого ЕП є ЕДП, призначений для перетворення електричної енергії (ЕЕ) в МЕ. Складається він з одного або кількох електродвигунів (ЕД) постійного або змінного струму. У сільськогосподарському виробництві здебільшого застосовують ЕП з асинхронними короткозамкненими двигунами. Електродвигун отримує живлення від джерела електричної енергії (ДЕЕ) через перетворювальний пристрій, який перетворює і регулює параметри ЕЕ (струм, напругу, частоту).

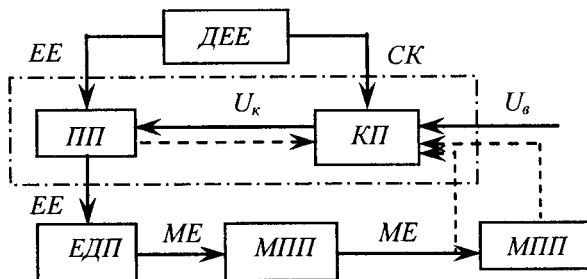


Рис. В.1. Структурна схема автоматизованого електропривода

Як ППЕЕ в ЕП використовують: автономні генератори з регулюванням в широких межах напруги на їх затискачах, керовані тиристорні випрямлячі, автотрансформатори, перетворювачі частоти та ін.

Механічний передавальний пристрій (МПП) передає МЕ від ЕД до ВОРМ та узгоджує вид та швидкість їх руху. В сучасних сільськогосподарських ЕП найбільш поширені клинопасові, зубчасті та ланцюгові передачі, а також різноманітні за своєю конструкцією з'єднувальні муфти.

Керування процесом перетворення ЕЕ виконується керуючим пристроєм (КП), який виробляє керуючий сигнал U_k в функції вхідного сигналу U_v і різних додаткових електричних сигналів, що містять інформацію про процес перетворення енергії, реальні параметри механічного руху ЕД і ВОРМ та ін. Перетворювальний та керуючий пристрої утворюють систему керування (СК), яка разом з обмотками ЕД складає електричну частину ЕП. До КП належать апарати керування, захисту, сигналізації та різні підсилювачі, вимірювальні елементи, блоки порівняння дійсних і заданих значень робочих параметрів тощо.

В3. Класифікація електроприводів

Сучасні електроприводи класифікують за такими основними ознаками:

1. За видом руху електродвигуна і можливістю зміни його напрямку відрізняють ЕП обертального і поступального руху. При цьому швидкість ВО може бути регульованою або нерегульованою, а сам рух — неперервним або дискретним, нереверсивним або реверсивним.

2. За кількістю робочих машин або виконавчих органів однієї робочої машини, які приводяться в рух одним електроприводом, — групові та індивідуальні електроприводи. Груповим називають електропривод, який забезпечує рух виконавчих органів кількох робочих машин чи кількох виконавчих органів однієї робочої машини, а індивідуальним — електропривод, що забезпечує рух одного виконавчого органу робочої машини.

3. За наявністю зв'язків з іншими електроприводами — незалежні, режими роботи яких практично не залежать від режимів роботи інших електроприводів і взаємозв'язані, в яких два або кілька електроприводів електрично і механічно зв'язані між собою. При роботі взаємозв'язаних електроприводів підтримується задане співвідношення їх швидкостей, навантажень або положення виконавчих органів робочих машин. Розрізняють два види взаємозв'язаних електроприводів: багатодвигунні, в яких електродвигунні пристрої працюють разом на загальний вал, і електричні вали, в яких забезпечується синхронне обертання двох і більше електродвигунів, вали яких не мають механічного зв'язку.

4. За причиною зміни параметрів — регульовані електроприводи, параметри яких змінюються під впливом керуючого пристрою, і нерегульовані електроприводи, параметри яких змінюються в результаті збудовуючих впливів (зміна навантаження, напруги, частоти, опору окремих кіл).

5. За рівнем автоматизації керування — неавтоматизовані, автоматизовані та автоматичні.

Неавтоматизованим називають електропривод, усі операції керування яким виконуються з участю людини. В автоматизованому електроприводі людина бере участь у створенні початкової керуючої дії, а керування автоматичним електроприводом здійснюється без участі людини.

Автоматизовані електроприводи поділяються на програмнокеровані, якими керують відповідно до заданої програми, і слідкуючі, що переміщують виконавчі органи робочих машин відповідно до заданого сигналу.

6. За видом перетворювального пристрою — вентильні, автотрансформаторні, по системі генератор — двигун, каскадні та ін.

Вентильні електроприводи, в свою чергу, поділяються на системи випрямляч — двигун і перетворювач частоти — двигун. Перетворювальними пристроями цих електроприводів відповідно є вентильно-напівпровідникові перетворювачі електричної енергії або

регульовані випрямлячі та інвертори і регульовані перетворювачі частоти.

В системі «генератор-двигун» перетворювальним пристроєм є електромашинний перетворювальний агрегат.

Каскадним називають регульований електропривод змінного струму з асинхронним двигуном, в якому потужність ковзання за допомогою перетворювачів повертається в електромережу змінного струму або на вал двигуна.

7. За родом механічного передавального пристрою розрізняють редукторний електропривод і безредукторний, привод з варіатором, з пасовою передачею, з фрикційною муфтою.

8. За родом струму — електроприводи постійного струму, в яких електродвигунними пристроями є електродвигуни постійного струму (незалежного, послідовного та змішаного збудження), і електроприводи змінного струму. В електроприводах змінного струму електродвигунними пристроями є асинхронні або синхронні електродвигуни.



1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Статичні та динамічні сили і моменти, що діють у системі електропривод — робоча машина

Механічна частина системи електропривод — робоча машина складається з ротора (якоря) електродвигуна, механічного передавального пристрою (системи передач) і виконавчого органу робочої машини, зв'язаних між собою кінематично.

Залежно від режиму роботи електродвигуна його ротор (якір) може бути джерелом або споживачем механічної енергії.

Механічний передавальний пристрій передає механічну енергію від електродвигуна до виконавчого органу робочої машини і навпаки. Крім того, за допомогою механічного передавального пристрою відбувається перетворення механічної енергії: обертальний рух перетворюється в поступальний або зворотно-поступальний, збільшується або зменшується швидкість руху і т. д. Механічними передавальними пристроями є ланцюгові, пасові, зубчасто-рейкові та інші передачі, редуктори, муфти, шатунно-кривошипні механізми та ін.

Виконавчий орган робочої машини реалізує підведену до нього механічну енергію в корисну роботу, являючись таким чином споживачем механічної енергії. Іноді він може бути і джерелом механічної енергії, віддаючи, наприклад, на вал електродвигуна енергію, запасену обертовими частинами, піднятим вгору вантажем тощо.

Робота, яку виконує електродвигун або виконавчий орган робочої машини, визначається з рівняння:

при обертовому русі:

$$W_{\omega} = \int_0^t M \omega dt; \quad (1.1)$$

при поступальному русі:

$$W_v = \int_0^t F v dt, \quad (1.2)$$

де M — обертовий момент, Нм; ω — кутова швидкість, рад/с; F — сила, Н; v — лінійна швидкість, м/с; t — час, с.

Механічна потужність визначається як похідна роботи за часом і при обертovому русі становить:

$$P = \frac{dW_\omega}{dt} = M\omega; \quad (1.3)$$

при поступальному русі:

$$P = \frac{dW_v}{dt} = Fv. \quad (1.4)$$

Сили і моменти, що розвиваються двигунним пристроєм (обертovим або лінійним електродвигуном), можуть бути рушійними або гальмівними. Рушійними вони бувають у двигунному режимі роботи, коли двигун приводить у рух виконавчий орган робочої машини, а гальмівними — у гальмівних режимах, коли виконавчий орган робочої машини є джерелом механічної енергії.

Сили і моменти статичних опорів, створюваних виконавчими органами робочої машини, поділяються на реактивні і активні.

Реактивними називають сили і моменти статичних опорів, які виникають внаслідок руху як протидія механічної ланки на рух. До них належать сили і моменти, зумовлені тертям, опором матеріалу при обробці різанням, опором потоку повітря у вентиляторах або рідини у насосах і т. п. Реактивні сили і моменти завжди спрямовані проти руху і при зміні напрямку руху змінюють свій знак (рис. 1.1). Елементи механічної системи, які створюють реактивні сили і моменти, можуть бути тільки споживачами енергії.

Активні сили і моменти статичних опорів створюються сторонніми джерелами механічної енергії і виникають у механічній системі незалежно від її руху. До них належать сили і моменти, зумовлені тяжінням, стисканням, розтягуванням і скручуванням пружних тіл, силою вітру чи потоку падаючої води. Напрямок дії активних сил і моментів не залежить від напрямку руху і при зміні останнього вони зберігають свій знак (рис. 1.1). Джерело активної сили або моменту може споживати або віддавати механічну енергію. Так, вантаж, переміщуваний підйомником, при підніманні споживає механічну ене-

ргію від електродвигуна, а при опусканні віддає її електродвигунові, внаслідок чого останній працює в гальмівному режимі.

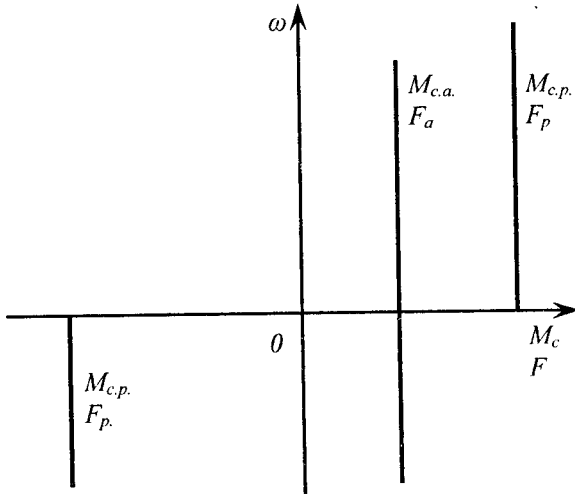


Рис. 1.1. Залежність статичних активних і реактивних сил та моментів від напрямку обертання

Всі елементи механічної частини системи електропривод — робоча машина мають певну масу, значить, і відповідну інертність. Завдяки інертності при переході системи від одного усталеного стану до іншого виникають динамічні сили або моменти, дія яких перешкоджає зміні стану системи. Всяке порушення усталеної швидкості системи супроводжується зміною запасеної в ній кінетичної енергії. Так, при розгоні рухомі елементи накопичують кінетичну енергію, а при уповільненні руху віддають її. Тому при стрибкоподібній зміні сили чи моменту двигуна та сил або моментів статичних опорів система не може миттєво перейти від одного усталеного стану до іншого. Детальніше про це йдеться при розгляді рівнянь руху електропривода та перехідних режимів.

1.2. Зведення моментів статичного опору і моментів інерції до вала електродвигуна

Механічна частина значної кількості систем електродвигун — робоча машина має складну кінематичну схему з багатьма ланками,

які рухаються з різними швидкостями. Рух окремих ланок може бути обертовим, поступальним або складним. Кожний елемент кінематичної схеми має певну пружність, а в з'єднаннях елементів наявні зазори. При теоретичному аналізі такої системи потрібно скласти рівняння руху кожного елемента з урахуванням впливу одного елемента на інший, а потім розв'язати ці рівняння разом. Розрахунок систем таким методом досить складний і проводиться в тих випадках, коли потрібна дуже висока точність (слідкуючі системи металообробних верстатів, радіотелескопів, механізми з гнучкими в'язами, довгими валами тощо).

У більшості випадків розрахунки ведуть з допущеннями, що механічна система складається з абсолютно жорстких елементів, які не деформуються і між якими немає зазорів. При такому допущенні за рухом одного елемента можна одержати інформацію про рух решти елементів системи. Найчастіше таким елементом вважають вал електродвигуна. При цьому реальну багатомасову систему замінюють найпростішою одномасовою без зазорів системою з обертальним рухом, еквівалентною в енергетичному відношенні реальній. Розрахункова схема системи зводиться до узагальненої жорсткої механічної ланки, яка має еквівалентну масу з моментом інерції J , на яку діє електромагнітний момент двигуна M_d і сумарний зведений до вала електродвигуна момент статичних опорів M_c , до якого входять всі механічні втрати в системі.

В основу принципу зведення моментів статичних опорів до вала електродвигуна покладена рівність потужності системи до і після зведення.

При зведенні систем з обертовим електродвигуном до найпростішого вигляду можливі наступні випадки:

- а) зведення обертового руху до обертового;
- б) зведення поступального руху до обертового.

Для системи, яка складається з електродвигуна M (рис. 1.2), одноступінчастої передачі та одного виконавчого механізму BM рівняння балансу потужностей буде:

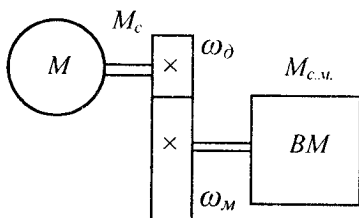


Рис. 1.2. Кінематична схема з обертовим виконавчим механізмом

$$P_2 \eta = P_m, \quad (1.5)$$

де P_2 — потужність на валі електродвигуна, Вт; P_M — потужність, що передається на вал виконавчого механізму, Вт; η — ККД передачі.

Підставивши значення потужностей з виразу (1.3), одержимо:

$$M_c \omega_d \eta = M_{c.M} \cdot \omega_M, \quad (1.6)$$

Звідки зведений до вала двигуна момент статичних опорів:

$$M_c = M_{c.M} \frac{\omega_M}{\omega_d \eta}, \quad (1.7)$$

або

$$M_c = \frac{M_{c.M}}{i \eta}, \quad (1.8)$$

де $i = \frac{\omega_d}{\omega_M}$ — передаточне відношення передачі.

Якщо в системі є наявні елементи з поступальним рухом, наприклад, у підйомних механізмах вантаж масою m піднімається із швидкістю v (рис. 1.3.), то з врахуванням (1.4) рівняння балансу потужностей буде:

$$M_c \omega_d \cdot \eta = F v, \quad (1.9)$$

де F — сила тяжіння вантажу, Н·м; v — швидкість руху вантажу, м/с.

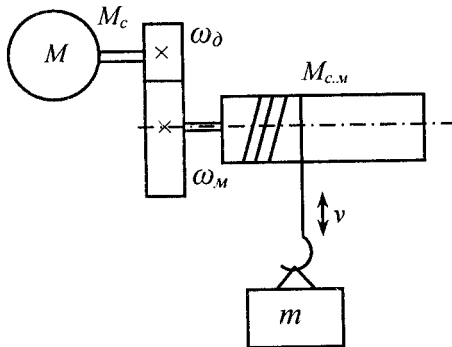


Рис. 1.3. Кінематична схема з ланкою, що рухається поступально

Але

$$F = mg, \quad (1.10)$$

де m — маса вантажу, кг; g — прискорення земного тяжіння, м/с².

Зведений до вала двигуна момент статичних опорів знайдеться за виразом:

$$M_c = \frac{mgv}{\omega_o \eta}. \quad (1.11)$$

При опусканні вантажу із швидкістю v двигун працює в гальмівному режимі, момент від сил тертя в механізмах теж має гальмівний характер, тому вираз зведеного моменту має вигляд:

$$M_c = \frac{mgv\eta}{\omega_o}. \quad (1.12)$$

Рівняння балансу потужностей складних систем, які мають обертові виконавчі органи та елементи, що рухаються поступально (рис. 1.4), запишеться:

$$P_\partial = P_{c1} + P_{c2} + \dots + P_{cn} + P_{noc}, \quad (1.13)$$

де P_∂ — потужність на валі двигуна, Вт; P_{c1} , P_{c2} , P_{cn} — потужність, яка витрачається на обертання i -го механізму, Вт; P_{noc} — потужність, яка витрачається на привод механізму, що рухається поступально, Вт.

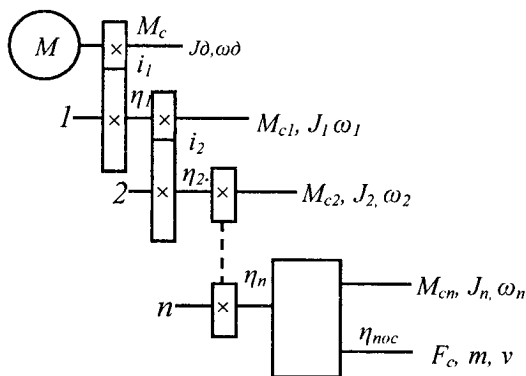


Рис. 1.4. Кінематична схема багатоланкової системи

Підставивши значення потужностей з виразів (1.3) і (1.4) і врахувавши втрати потужностей у передачах, рівняння (1.13) запишемо:

$$M_c \cdot \omega_o = \frac{M_{c1}\omega_1}{\eta_1} + \frac{M_{c2}\omega_2}{\eta_1 \cdot \eta_2} + \dots + \frac{M_{cn}\omega_n}{\eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n} + \frac{F_c v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n \cdot \eta_{noc}}, \quad (1.14)$$

де M_c — зведений до вала електродвигуна момент статичних опорів системи, Нм; $M_{c1}, M_{c2}, \dots M_{cn}$ — момент статичних опорів окремих елементів системи, які рухаються обертально, Нм; ω_o — кутова швидкість електродвигуна, рад/с; $\omega_1, \omega_2, \dots \omega_n$ — кутові швидкості обертання окремих елементів системи, рад/с; F_c — статичне зусилля елемента, що рухається поступально, Н; v — лінійна швидкість елемента, що рухається поступально, м/с; $\eta_1, \eta_2 \dots \eta_n, \eta_{noc}$ — відповідно коефіцієнти корисної дії передач між валами системи та передачі до елемента, що рухається поступально.

Розділивши рівняння (1.14) на ω_o , одержимо:

$$M_C = \frac{M_{C1} \cdot \omega_1}{\eta_1 \cdot \omega_o} + \frac{M_{C2} \cdot \omega_2}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \omega_o} + \dots + \frac{M_{cn}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_o} + \frac{F_c v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n \cdot \eta_{noc} \cdot \omega_o}, \quad (1.15)$$

або

$$M_C = \frac{M_{C1}}{\eta_1 \cdot i_1} + \frac{M_{C2}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot i_1 \cdot i_2} + \dots + \frac{M_{cn}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n \cdot i_1 \cdot i_2 \dots i_n} + \frac{F_c v}{\eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n \cdot \eta_{noc} \cdot \omega_o}, \quad (1.16)$$

де $i_1, i_2, \dots i_n$ — передаточні відношення передач між валами системи.

Зведення до вала електродвигуна моментів інерції системи і механічних її мас, що рухаються поступально, виконують на основі рівності запасів кінетичної енергії системи до і після зведення.

Для системи, зображеної на рис. 1.4, рівняння балансу кінетичної енергії буде:

$$J \frac{\omega_o^2}{2} = J_o \frac{\omega_o^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (1.17)$$

де J — зведений до вала електродвигуна момент інерції системи, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; J_o — момент інерції ротора (якоря) електродвигуна і частин, що обертаються на його валу, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $J_1, J_2 \dots J_n$ — моменти інерції елементів, що обертаються з валами 1, 2, $\dots$, n , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; m — маса елементів, кг , що рухаються поступально з швидкістю v , м/с.

Розділивши рівняння (1.17) на $\omega_o^2/2$ і замінивши відношення кутових швидкостей на відповідні передаточні числа, одержимо:

$$J = J_o + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_1^2 \cdot i_2^2 \dots i_n^2} + \frac{mv^2}{\omega_o^2}. \quad (1.18)$$

Для оцінки динамічних властивостей електропривода при перехідних процесах — пуску, гальмуванні, реверсуванні, переході від однієї швидкості до іншої тощо — користуються показником, який називають *коефіцієнтом інерції системи FJ*. Коефіцієнт інерції — це величина, яка показує, у скільки разів зведений до вала електроприводу момент інерції системи J_{Σ} більший за момент інерції ротора двигуна J_D :

$$FJ = \frac{J_{\Sigma}}{J_D}. \quad (1.19)$$

Відповідно до величини показника FJ всі види приводів поділяють на чотири категорії:

FJ	Динамічні властивості привода
$\leq 1,2$	Легкі
1,6; 2,0	Середні
2,5	Важкі
$\geq 4,0$	Дуже важкі

1.3. Рівняння руху електропривода

При роботі системи електропривод — робоча машина стан її рухомих частин обумовлений співвідношеннями між рушійними і гальмівними силами та моментами статичних опорів. Під їх дією система може рухатися рівномірно або нерівномірно. Рівномірний рух або усталений режим роботи спостерігається при рівності рушійних і гальмівних сил і моментів. У протилежному випадку виникають інерційні сили та моменти, які спричиняють до прискорення або сповільнення системи. При цьому порушується усталена швидкість електропривода, яка супроводжується зміною кінетичної енергії, накопичуваної в системі.

Для виводу рівняння руху електропривода скористаємося рівнянням балансу потужностей в системі електропривод — робоча машина:

$$P_D - P_c = P_{\text{дин}}, \quad (1.20)$$

де P_D — потужність, що розвивають рушійні сили, Вт; P_c — потужність, яка витрачається на подолання корисних і шкідливих опорів у

системі, Вт; $P_{\text{дин}}$ — динамічна потужність, що характеризує зміну кінетичної енергії системи, Вт.

Потужність визначається як похідна роботи по часу, тому динамічна потужність дорівнює похідній від запасу кінетичної енергії по часу:

$$P_{\text{дин}} = \frac{dA_{\text{дин}}}{dt}. \quad (1.21)$$

З курсу теоретичної механіки відомо, що запас кінетичної енергії системи, що обертається з кутовою швидкістю ω , дорівнює:

$$A = J \frac{\omega^2}{2}, \quad (1.22)$$

де J — момент інерції системи, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Якщо допустити момент інерції незмінним, що характерно для більшості сільськогосподарських електроприводів, то підставивши (1.22) в (1.21), одержимо:

$$P_{\text{дин}} = \frac{dA_{\text{дин}}}{dt} = \frac{dJ \frac{\omega^2}{2}}{dt}. \quad (1.23)$$

Розв'язок рівняння (1.23) буде:

$$P_{\text{дин}} = J\omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.24)$$

Підставимо (1.24) в (1.20):

$$P_o - P_c = J\omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.25)$$

Розділивши (1.25) на кутову швидкість ω , одержимо шукане рівняння руху:

$$M_o - M_c = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.26)$$

де M_o — рушійний момент, Нм; M_c — момент статичних опорів, Нм; $M_{\text{дин}}$ — динамічний момент, який виникає в системі при зміні швидкості обертання, Нм; ω — кутова швидкість обертання, рад/с; $d\omega/dt$ — кутове прискорення, рад/с².

При аналізі систем, в яких елементи рухаються поступально, замість рівняння моментів розглядають рівняння сил, що діють на си-

стему. В цьому випадку запас кінетичної енергії описується рівнянням:

$$A_{\text{дин}} = \frac{mv^2}{2}, \quad (1.27)$$

де m — маса рухомих елементів, кг; v — лінійна швидкість елементів, м/с.

В більшості сільськогосподарських електроприводів маса елементів не залежить від шляху і є величиною незмінною. В такому випадку динамічна потужність визначиться:

$$P_{\text{дин}} = \frac{dA_{\text{дин}}}{dt} = \frac{dm \frac{v^2}{2}}{dt} = mv \frac{dv}{dt}. \quad (1.28)$$

Підставимо (1.28) в (1.20):

$$P_{\text{д}} - P_{\text{с}} = P_{\text{дин}} = mv \frac{dv}{dt}. \quad (1.29)$$

Розділивши (1.29) на лінійну швидкість v , одержимо рівняння руху системи з елементами, що рухаються поступально:

$$F_{\text{д}} - F_{\text{с}} = F_{\text{дин}} = m \frac{dv}{dt}, \quad (1.30)$$

де $F_{\text{д}}$ — рушійна сила системи, Н; $F_{\text{с}}$ — сила статичних опорів, Н; $F_{\text{дин}}$ — динамічне зусилля, яке виникає в системі при зміні швидкості її руху, Н; m — маса рухомих частин, кг; v — лінійна швидкість елементів, які рухаються поступально, м/с; $\frac{dv}{dt}$ — лінійне прискорення системи, м/с².

Слід враховувати, що стосовно електропривода рівняння (1.26) і (1.30) належать до двигунного режиму, коли сила $F_{\text{д}}$ і момент $M_{\text{д}}$ двигунного пристрою є рушійними, а сила $F_{\text{с}}$ і момент $M_{\text{с}}$ статичних опорів — гальмівними, спрямованими проти дії двигуна. При такому припущенні напрямки динамічного зусилля і динамічного моменту завжди співпадають з напрямком прискорення електропривода.

З аналізу рівнянь (1.26) і (1.30) видно, що:

1) при $F_{\text{д}} > F_{\text{с}}$ та $M_{\text{д}} > M_{\text{с}}$ прискорення $\frac{dv}{dt}$ і $\frac{d\omega}{dt}$ мають позитивний знак, тобто система працює з прискоренням;

2) при $F_\partial < F_c$ та $M_\partial < M_c$ $\frac{dv}{dt} < 0$, $\frac{d\omega}{dt} < 0$ і рух системи уповільнюється;

3) при $F_\partial = F_c$ та $M_\partial = M_c$ $\frac{dv}{dt} = 0$, $\frac{d\omega}{dt} = 0$, тобто привод працює в усталеному режимі.

Як відомо, електродвигуни можуть працювати у двигунному і в гальмівному режимах, тобто знак моменту двигуна може бути додатнім і від'ємним ($\pm M_\partial$). Активні моменти статичних опорів також можуть змінювати свій знак, тому рівняння (1.26) матиме такий вигляд:

$$\pm M_\partial \pm M_c = \pm J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.31)$$

Аналіз рівняння (1.31) показує, що механічна система або її окремий елемент буде прискорюватися, коли різниця моментів двигуна M_∂ і статичних опорів M_c додатня, і уповільнюватися, коли ця різниця стане від'ємною.

Розглянемо це на прикладі роботи багатошвидкісного асинхронного двигуна з виробничим механізмом, момент статичних опорів M_c якого не залежить від швидкості (рис. 1.5). Припустимо, що система працює в усталеному режимі з швидкістю ω_2 (точка А на характеристиці 2). Якщо обмотку статора перемкнути на нижчу швидкість, то двигун перейде в режим рекуперативного гальмування, різниця $M_\partial - M_c$ стане від'ємною і рух системи уповільниться до усталеної швидкості ω_1 (точка Б на характеристиці 1). При перемиканні на вищу швидкість момент двигуна буде більшим за момент статичних опорів і рух системи прискориться до усталеної швидкості ω_3 (точка В на характеристиці 3).

Якщо момент інерції механізму не постійний і є функцією кута повороту $J = f(\alpha)$, наприклад, у кривошипно-шатунному механізмі (рис. 1.6), то рівняння руху електропривода має складніший вигляд. Для його виведення скористаємося рівнянням балансу кінетичної енергії в механічній системі:

$$\int_0^t P_{\text{дин}} dt = J \frac{\omega^2}{2} - J_{\text{поч}} \frac{\omega_{\text{поч}}^2}{2}, \quad (1.32)$$

де $J \frac{\omega^2}{2}$ — запас кінетичної енергії в системі у певний момент часу;

$J_{\text{поч}} \frac{\omega_{\text{поч}}^2}{2}$ — початковий запас кінетичної енергії в системі.

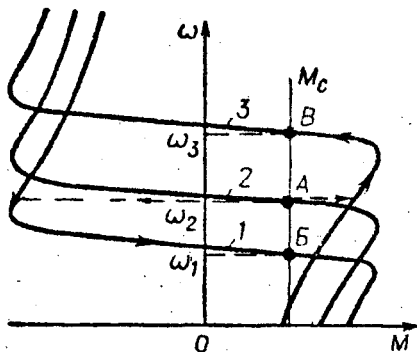


Рис. 1.5. Зміна співвідношень між M_0 і M_c у багатошвидкісному електродвигуні при перемиканні з середньої швидкості на нижчу і вищу

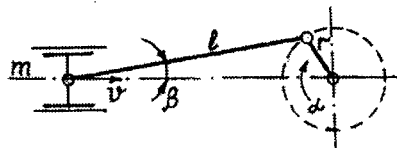


Рис. 1.6. Кінематична схема шатунно-кривошипного механізму

Враховуючи, що момент інерції J є функцією кута повороту вала електродвигуна φ , продиференціюємо рівняння (1.31) за часом:

$$P_{\text{дин}} = \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + J\omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.33)$$

Оскільки $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, то:

$$P_{\text{дин}} = \frac{\omega^3}{2} \frac{dJ}{d\varphi} + J\omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.34)$$

Але динамічний момент $M_{\text{дин}} = M_0 - M_c = \frac{P_{\text{дин}}}{\omega}$, тому

$$M_0 - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{d\varphi}. \quad (1.35)$$

Якщо момент інерції є постійною величиною, то $\frac{dJ}{d\varphi} = 0$, і рівняння (1.35) набуває вигляду (1.26).

Розв'язок рівнянь (1.26), (1.30) та (1.35) був би досить простим, якби величини моментів чи сил двигуна M_0 і F_0 та статичних опорів M_c і F_c були незмінними. Проте насправді ці величини є змінними в залежності від швидкості обертання. Для кожного типу електродвигуна або робочої машини існують свої функціональні залежності, які

називаються механічними характеристиками відповідно електродвигуна $M_o = f(\omega)$ або робочої машини $M_c = f(\omega)$. Вивчення механічних характеристик електродвигунів і робочих машин пропонується в наступних розділах підручника.

1.4. Механічні характеристики робочих машин

Високопродуктивний, надійний і економічно вигідний тільки такий виробничий агрегат, у якого приводний електродвигун має електромеханічні властивості, що відповідають характеристикам і технологічним вимогам робочої машини. Найважливішими характеристиками двигунів і робочих машин є їх механічні характеристики.

Механічною характеристикою робочої машини називають залежність моменту статичних опорів від кутової швидкості її приводного вала $M_c(\omega)$. Механічні характеристики робочих машин описують такою емпіричною формулою:

$$M_c = M_o + (M_{c,ном} - M_o) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^x, \quad (1.36)$$

де M_c — момент опору при швидкості ω , Нм; M_o — момент опору тертя в рухомих частинах, який не залежить від швидкості, Нм; $M_{c,ном}$ — момент опору при номінальній швидкості $\omega_{ном}$, Нм; x — показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості.

Незважаючи на різноманітність робочих машин, їх механічні характеристики орієнтовно можна поділити на такі групи:

1. Незалежна від швидкості механічна характеристика (пряма 1, рис. 1.7). При цьому $x = 0$ і момент опору M_c не залежить від швидкості. Такі механічні характеристики мають підйомні крани, стрічкові конвеєри, поршневі насоси, лебідки тощо.

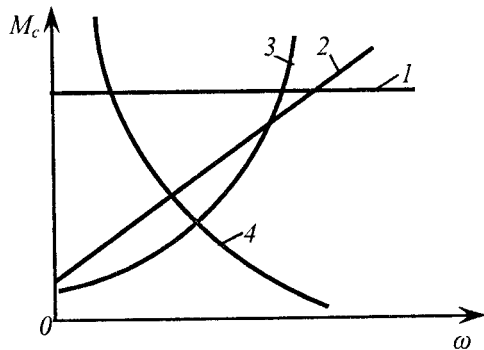


Рис. 1.7. Механічні характеристики робочих машин

2. Прямолінійно-зростаюча механічна характеристика (пряма 2, рис. 1.7). У цьому випадку $x = 1$ і момент опору M_c лінійно залежить від швидкості. Таку механічну характеристику має, наприклад, генератор постійного струму з незалежним збудженням, який працює з незмінним зовнішнім навантаженням.

3. Нелінійно-зростаюча (параболічна) механічна характеристика (крива 3, рис. 1.7). У цьому випадку $x = 2$ і момент опору M_c залежить від квадрату швидкості.

Параболічні механічні характеристики мають робочі машини, що працюють за відцентровим принципом: вентилятори, відцентрові насоси, гребні гвинти тощо.

4. Нелінійно-спадаючі механічні характеристики (крива 4, рис. 1.7). У цьому випадку $x = -1$ і момент опору M_c обернено пропорційний швидкості, а потужність, споживана робочою машиною, залишиться сталою. Нелінійно-спадаючі механічні характеристики мають деякі токарні, розточувальні та фрезерні верстати тощо.

1.5. Механічні характеристики електродвигунів

Механічною характеристикою електродвигуна обертового руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту ω (M).

Механічні характеристики можуть бути природними і штучними. *Природною механічною характеристикою електродвигуна називають залежність швидкості обертання двигуна від створюваного ним моменту при номінальних параметрах живильної мережі (номінальних значеннях напруги і частоти), номінальному магнітному потоці і при відсутності додаткових опорів у колі якоря (ротора, статора).*

Якщо природна механічна характеристика не задовольняє тих або інших вимог виробничого механізму, використовують штучні механічні характеристики. Вони також являють собою залежність кутової швидкості двигуна від його моменту, але при неномінальних параметрах.

Крім механічної характеристики, в теорії електропривода є поняття електромеханічної характеристики. *Електромеханічною характеристикою електродвигуна називають залежність його кутової швидкості від струму якоря ω (I).*

Електродвигуни можуть працювати в двигунному режимі, приводячи в рух робочі машини, та в гальмівних режимах. Майже всі

електродвигуни характеризуються тим, що у двигунному режимі роботи при збільшенні обертового моменту кутова швидкість зменшується, а в гальмівних — при збільшенні швидкості гальмівний момент зростає.

Величина зміни швидкості при зміні моменту різних двигунів неоднакова і залежить від коефіцієнта жорсткості β механічної характеристики:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}. \quad (1.37)$$

Для прямолінійних механічних характеристик диференціали dM і $d\omega$ можна відповідно замінити скінченними приростами ΔM і $\Delta\omega$, тоді:

$$\beta = \frac{M_1 - M_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\Delta M}{\Delta\omega}. \quad (1.38)$$

Абсолютно жорсткою (рис. 1.8, пряма 1), $\beta = \infty$, називають механічну характеристику, при якій із зміною обертового моменту швидкість двигуна не змінюється. Таку характеристику мають синхронні двигуни.

Жорстка (рис. 1.8, пряма 2) — механічна характеристика, коли із зміною обертового моменту в широких межах кутова швидкість двигуна змінюється дуже мало. Таку характеристику мають електродвигуни постійного струму незалежного (паралельного) збудження та асинхронні двигуни, що працюють при ковзаннях, менших від критичного (рис. 1.8, крива 3).

М'якою (рис. 1.8, крива 4) називають механічну характеристику, де невелика зміна обертового моменту викликає значну зміну швидкості двигуна (електродвигуни постійного струму послідовного збудження).

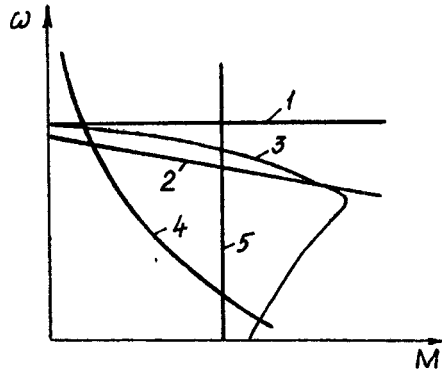


Рис. 1.8. Механічні характеристики електродвигунів

Абсолютно м'якою (рис. 1.8, пряма 5) називають механічну характеристику, коли момент двигуна при зміні швидкості залишається сталим ($\beta = 0$). Таку характеристику мають електродвигуни постійного струму незалежного збудження при живленні їх від джерела струму або при роботі в замкнених системах ЕП в режимі стабілізації струму якоря.

Жорсткі і м'які механічні характеристики мають від'ємний коефіцієнт жорсткості, тобто $\beta < 0$. На неробочій частині характеристики асинхронного двигуна (рис. 1.9, а, б) при ковзаннях, більших від критичного, коефіцієнт $\beta > 0$.

1.6. Статична стійкість системи електродвигун-робоча машина

Під статичною стійкістю системи електродвигун – робоча машина розуміють здатність електропривода повертатися в усталений режим без допомоги регулятора, а тільки завдяки механічним характеристикам двигуна і робочої машини після того, як система під дією збурювання була виведена з цього режиму. Збурювання надходить в систему як від РМ у вигляді зміни навантаження, так і від ЕП при зміні напруги, частоти, опору окремих кіл.

Умову статичної стійкості електрифікованого агрегату можна записати у вигляді:

$$\operatorname{tg} \varphi < \operatorname{tg} \psi, \quad (1.39)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$, $\operatorname{tg} \psi$ — відповідно тангенси кутів нахилу відносно осі швидкості механічної характеристики двигуна і механічної характеристики робочої машини.

Таким чином, робота електрифікованого агрегату в точці усталеного режиму буде стійкою, якщо біля цієї точки тангенс кута нахилу механічної характеристики двигуна відносно осі швидкості буде меншим від тангенса кута нахилу механічної характеристики робочої машини.

Можливість стійкої роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на ділянці механічної характеристики, де ковзання понад критичне, цілком залежить від характеру змінювання статичного моменту при зміні швидкості. Якщо статичний момент не залежить від швидкості (рис. 1.9, а), то робота двигуна в точці А буде нестійкою, оскільки $\operatorname{tg} \varphi_A > \operatorname{tg} \psi_A$. Тобто, якщо швидкість двигуна

відхилиться від швидкості, що відповідає точці А, то виникає додатний або від'ємний надмірний момент і двигун переходить або в точку В, де робота електрифікованого агрегату буде стійкою, або в точку С, де електродвигун зупиниться.

Якщо статичний момент має характер вентиляторного (як показано на рис. 1.9, б), то при швидкості $\omega_A \operatorname{tg} \varphi_A < \operatorname{tg} \psi_A$ і робота електрифікованого агрегату буде стійкою. При відхиленні швидкості від ω_A в бік збільшення або зменшення виникає надмірний момент, що повертає двигун у точку А.

Стійкість роботи системи електродвигун — робоча машина можна визначити за допомогою коефіцієнтів жорсткості механічних характеристик електродвигуна і робочої машини β і β_c . Умову статичної стійкості системи електродвигун — робоча машина можна записати у вигляді $\beta - \beta_c < 0$ або $\beta < \beta_c$. В розглянутому випадку (рис. 1.9, а) $\beta_c = 0$, тому стійкість системи електродвигун — робоча машина визначиться знаком коефіцієнта жорсткості механічної характеристики асинхронного двигуна β : для точки В $\beta < 0$ і робота системи стійка, для точки А $\beta > 0$ і робота системи нестійка.

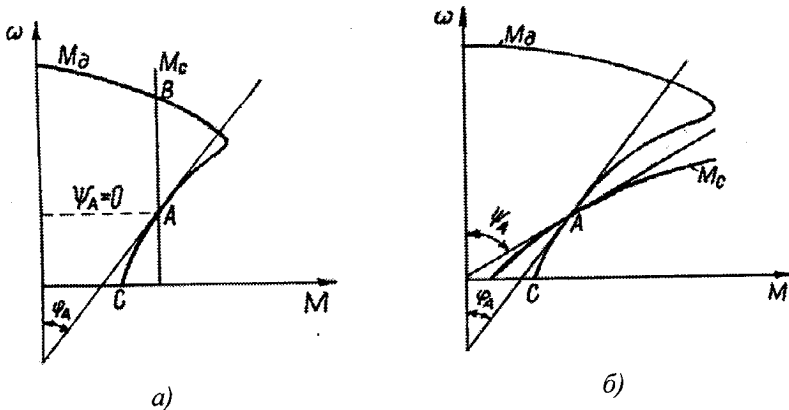


Рис. 1.9. Механічні характеристики системи електродвигун — робоча машина:

а — статичний момент не залежить від швидкості; б — статичний момент РМ нелінійно зростаючи залежить від швидкості

1.7. Методи експериментального визначення моменту інерції системи електродвигун — робоча машина

Момент інерції системи електродвигун – робоча машина можна визначити, знаючи моменти інерції кожного її елемента. Моменти інерції простих тіл визначають за формулами:

для суцільного однорідного циліндра (рис. 1.10, а):

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (1.40)$$

для порожнистого циліндра (рис. 1.10, б):

$$J = \frac{m(R^2 - r^2)}{2}, \quad (1.41)$$

де m — маса циліндра, кг; R і r — відповідно зовнішній і внутрішній радіуси циліндра, м.

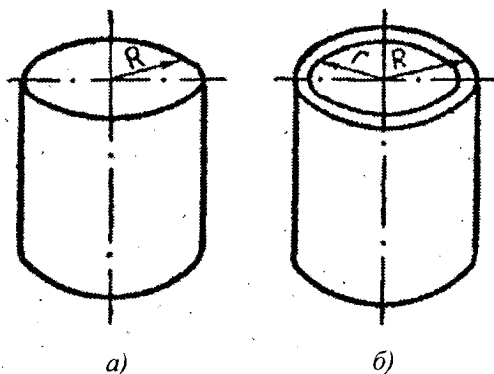


Рис. 1.10. До визначення моменту інерції циліндрів:
а — суцільного; б — порожнистого

Але на практиці тіла такої простої форми зустрічаються рідко. Так, ротор електродвигуна виготовлений з різних матеріалів, шків має маточину, спиці, обід. Тому моменти інерції окремих тіл або системи в цілому краще визначати дослідним шляхом.

Відомі кілька методів експериментального визначення моменту інерції: метод крутильних коливань, метод допоміжного маятника, метод падаючого вантажу, метод вільного вибігу та ін.

Метод крутильних коливань придатний для визначення моменту інерції симетричних відносно осі деталей або вузлів, наприклад, якорів (роторів) електродвигунів, робочих коліс вентиляторів тощо. Досліджувану деталь підвішують на сталюму дроті, другий кінець якого закріплюють в опорі (рис. 1.11). При цьому необхідно забезпечити строгу вертикальність осі деталі. Дріт з підвішеною деталлю приводять у крутильний коливальний рух і визначають період коливань T . Діаметр і довжину дроту слід вибирати такими, щоб період коливань T був не меншим 1 с. Потім до цього ж дроту підвішують деталь-еталон з відомим моментом інерції J_e і визначають період його крутильних коливань T_e .

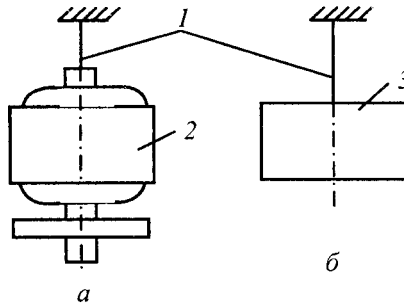


Рис. 1.11. Визначення моменту інерції симетричних тіл методом крутильних коливань:

а) з досліджуваним тілом; б) з деталлю-еталоном; 1 — підвіска із сталюгого дроту; 2 — досліджуване тіло; 3 — деталь-еталон

Момент інерції досліджуваної деталі визначають з виразу:

$$J = J_e \left(\frac{T}{T_e} \right)^2. \quad (1.42)$$

Методом допоміжного маятника зручно користуватися при визначенні моментів інерції вузлів або деталей, що вільно обертаються в підшипниках навколо горизонтальної осі, наприклад, роторів і якорів електродвигунів, роторів дробарок, робочих коліс вентиляторів та ін. До вала досліджуваного вузла прикріплюють на важелі довжиною a (рис. 1.12) допоміжний маятник з масою m_m . Маятник приводять у коливний рух з відхиленням від вертикалі не більше 15° і визначають період коливання. Маса важеля повинна бути якнайменшою. У дробарок, вентиляторів та інших машин допоміжний маят-

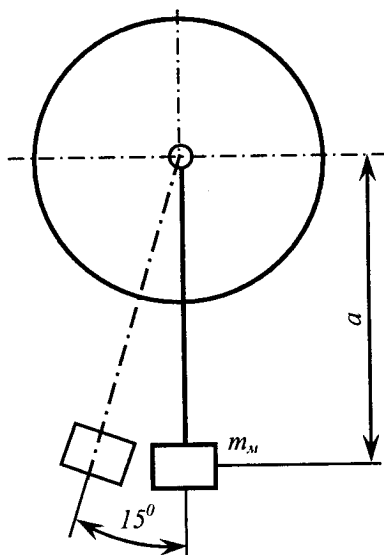


Рис. 1.12. Визначення моменту інерції тіла обертання за методом допоміжного маятника

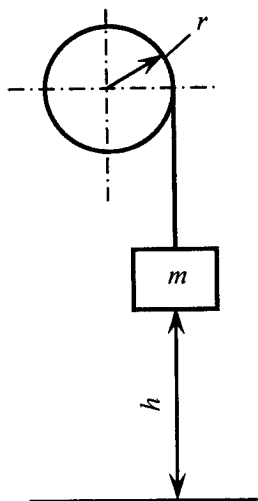


Рис. 1.13. Визначення моменту інерції тіла обертання за методом падаючого вантажу

ник можна прикріплювати безпосередньо до їх роторів або до шківів. За вихідну точку відліку часу при визначенні періоду коливань краще брати момент проходження маятника через середнє положення.

Момент інерції досліджуваного вузла визначають з виразу:

$$J = m_m a \left(\frac{T^2 g}{4\pi^2} - a \right), \quad (1.43)$$

де m_m — маса допоміжного маятника, кг; a — відстань центра ваги допоміжного маятника від осі обертання, м; T — період коливання маятника, с; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — прискорення вільного падіння.

Для більшої достовірності результатів дослід рекомендується повторити з різною довжиною маятника a .

Метод падаючого вантажу. На кінець вала досліджуваного механізму або шків, насаджений на цей вал, намотують кілька витків шнура. До вільного кінця шнура підвішують вантаж з такою масою m , щоб момент, створений його вагою, був більшим за момент сил тертя в механізмі (рис. 1.13). Під час експерименту відпускають вантаж і вимірюють час t , за який вантаж, обертаючи вал механізму, опуститься з висоти h .

Момент інерції досліджуваного механізму визначають за формулою:

$$J = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right), \quad (1.44)$$

де m — маса вантажу, кг; r — радіус кінця вала чи шківів, на який намотаний шнур, м; t — час опускання вантажу, с; h — висота опускання вантажу, м; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — прискорення вільного падіння.

Метод вільного вибігу (метод холостого ходу і самогальмування) дає найдостовірніші результати для приводів великої потужності або механічних систем з складною кінематичною схемою, які мають кілька ланок передач і вузли, що обертаються та рухаються поступально чи зворотно-поступально. При цьому проводять два досліди: холостого ходу і самогальмування.

У першому досліді механічну систему розганяють на холостому ходу до усталеної швидкості і записують споживану електродвигуном потужність, частоту обертання його вала n_1 та інші показники, необхідні для визначення потужності механічних втрат $P_{\text{мех}}$ у системі. Потім електродвигун вимикають з мережі і самописним приладом або осцилографом записують залежність швидкості від часу $n = f(t)$ при самогальмуванні системи до повної зупинки.

Оскільки при самогальмуванні системи момент двигуна відсутній, то рівняння руху електропривода (1.26) матиме вигляд:

$$-M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.45)$$

Помноживши (1.45) на ω , одержимо залежність потужності, витрачуваної системою на подолання сил тертя, від прискорення:

$$P_{\text{мех}} = -J\omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.46)$$

Оскільки в досліді приладами записується не швидкість, а частота обертання n , то для зручності рівняння (1.46) краще записати так:

$$P_{\text{мех}} = -\frac{Jn}{91,2} \frac{dn}{dt}, \quad (1.47)$$

звідки

$$J = -\frac{91,2}{n} \frac{P_{\text{мех}}}{\frac{dn}{dt}}. \quad (1.48)$$

Якщо умовно прийняти, що під час самогальмування потужність механічних втрат $P_{\text{мех}}$ незмінна, то прискорення системи буде також постійним, тобто $dn/dt = \text{const}$, і залежність швидкості обертання сис-

теми від часу буде лінійною. Провівши через точку А кривої вибігу (рис. 1.14) дотичну до перетину з віссю абсцис, одержимо відрізок ОВ, довжина якого пропорційна часу зупинки системи від швидкості n_l до нуля при незмінних механічних втратах.

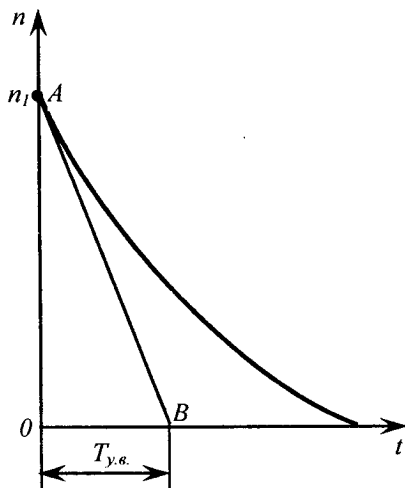


Рис. 1.14. Визначення умовного часу вибігу механічної системи

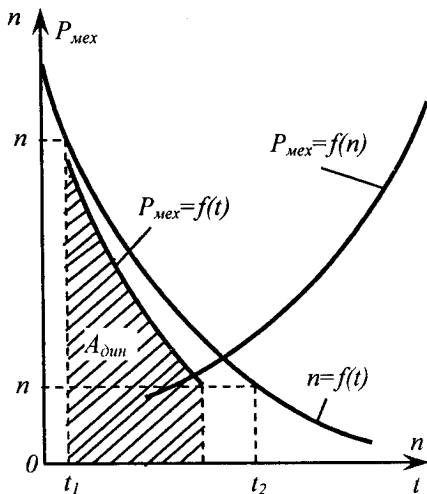


Рис. 1.15. Визначення роботи сил гальмування $A_{дин}$ за дослідів холостого ходу і самогальмування

Цей час називається умовним часом вибігу системи $T_{y.g.}$. Таким чином, прискорення системи можна виразити відношенням:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{0 - n_l}{T_{y.g.}} = -\frac{n_l}{T_{y.g.}}. \quad (1.49)$$

Підставивши (1.49) у (1.48), одержимо:

$$J = \frac{91,2 P_{mex} T_{y.g.}}{n_l^2}, \quad (1.50)$$

де n_l — швидкість обертання, при якій з досліду холостого ходу відома величина механічних втрат у системі, об/хв.

Якщо приводний двигун допускає регулювання швидкості обертання (наприклад, двигун постійного струму з незалежним збудженням), то у досліді холостого ходу визначають залежність

$P_{\text{мех}} = f(n)$. Криві $P_{\text{мех}} = f(n)$ і $n = f(t)$ креслять на одному графіку (рис. 1.15), за якими будують залежність $P_{\text{мех}} = f(t)$. Інтегруючи площу під кривою $P_{\text{мех}} = f(t)$, знаходять роботу сил гальмування $A_{\text{дин}}$ за час від t_1 до t_2 :

$$A_{\text{дин}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{мех}} dt. \quad (1.51)$$

Відомо, що кінетична енергія, запасена механічною системою з моментом інерції J при зміні її швидкості від ω_1 до ω_2 , визначається з виразу:

$$A_{\text{кин}} = J \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2}. \quad (1.52)$$

Кінетична енергія, запасена в системі, при самогальмуванні витрачається на роботу сил гальмування, тому $A_{\text{кин}} = A_{\text{дин}}$ і

$$\int_{t_1}^{t_2} P_{\text{мех}} dt = J \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2}, \quad (1.53)$$

звідки можна визначити момент інерції системи:

$$J = \frac{2A_{\text{дин}}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}. \quad (1.54)$$

Оскільки в дослідях вимірюється частота обертання, то зробивши заміну $\omega = \pi n/30$, одержимо:

$$J = \frac{2A_{\text{дин}}}{\left(\frac{\pi n_1}{30}\right)^2 - \left(\frac{\pi n_2}{30}\right)^2} = 182,4 \frac{A_{\text{дин}}}{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.55)$$

1.8. Приклади

Приклад 1. Розрахувати та побудувати механічну характеристику відцентрового насоса КМ90/20, у якого номінальна частота обертання $n_n = 2900$ об/хв, продуктивність $Q = 90$ м³/год, напір $H = 20$ м, ККД = 78%, момент зрушення $M_0 = 0,05M_{\text{с,ном}}$. Густина води $\gamma = 1000$ кг/м³.

Розв'язок

1) Потужність насоса:

$$P_{\text{ном}} = \frac{Q_l H_g}{3600 \cdot 1000 \eta_{\text{ном}}} = \frac{90 \cdot 1000 \cdot 20 \cdot 9,81}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,78} = 6,3 \text{ кВт.}$$

2) Номінальний момент:

$$M_{\text{с.н}} = 9550 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = (9550 \cdot 6,3) / 2900 = 20,7 \text{ Н·м.}$$

3) Момент зрушення:

$$M_0 = 0,05 M_{\text{с.ном}} = 0,05 \cdot 20,7 = 1 \text{ Н·м.}$$

4) Номінальна кутова швидкість обертання:

$$\omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30 = (3,14 \cdot 2900) / 30 = 303 \text{ рад/с.}$$

5) Рівняння механічної характеристики:

$$M_c = M_0 + (M_{\text{с.ном}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = 1 + (20,7 - 1) \left(\frac{\omega}{303} \right)^2.$$

6) Розраховуємо параметри механічної характеристики, дані за-
носимо в таблицю 1.1 і на рис. 1.16 будуємо графік $M = f(\omega)$:

Таблиця 1.1

$\omega, \text{рад/с}$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$M, \text{Н·м}$	1,0	1,2	1,8	2,7	4,1	5,8	8,0	10,5	13,4	16,6	20,3	24,4

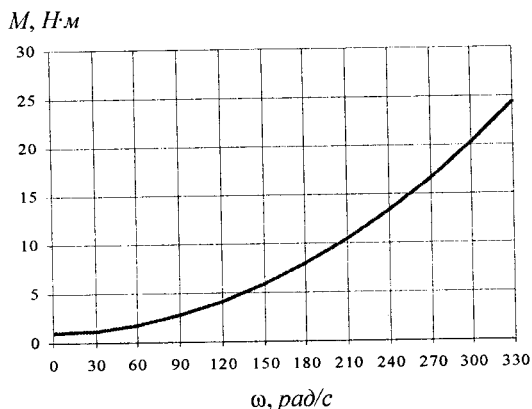


Рис. 1.16. Механічна характеристика насоса KM 90/20

Приклад 2. Звести до вала електродвигуна моменти статичних опорів і моменти інерції механізму підйому лебідки (рис. 1.17). Вихідні дані: частота обертання ротора двигуна $n_{дв} = 1500$ об/хв; момент інерції двигуна $J_{дв} = 0,25$ кг·м²; момент інерції барабана $J_б = 0,5$ кг·м²; частота обертання барабана $n_б = 50$ об/хв; діаметр барабана $D_б = 0,6$ м; маса вантажу $m = 1500$ кг; коефіцієнти корисної дії: пари шестерень $\eta_{ш} = 0,95$; пари барабан-трос $\eta_{б-т} = 0,97$.

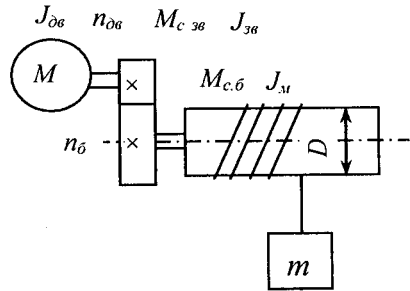


Рис. 1.17. Кінематична схема приводу механізму підйому лебідки

Розв'язок

1) швидкість піднімання і опускання вантажу:

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 50}{60} = 1,57 \text{ м/с};$$

2) момент статичних опорів на валу барабана при підніманні вантажу:

$$M_{б.п.} = \frac{mgD}{2\eta_{б-т}} = \frac{1500 \cdot 9,81 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,97} = 4551 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

3) зведений до вала двигуна момент статичних опорів при підніманні вантажу:

$$M_{с.зв.п.} = \frac{M_{б.п.} n_б}{n_{дв} \eta_{ш}} = \frac{4551 \cdot 150}{1500 \cdot 0,95} = 479 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

4) момент статичних опорів на валу барабана при опусканні вантажу:

$$M_{б.оп.} = \frac{mgD\eta_{б-т}}{2} = \frac{1500 \cdot 9,81 \cdot 0,6 \cdot 0,97}{2} = 4282 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

5) зведений до вала двигуна момент статичних опорів при опусканні вантажу:

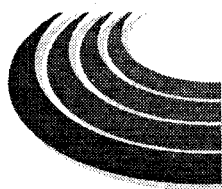
$$M_{с.зв.оп.} = \frac{M_{б.оп.} n_б \eta_{ш}}{n_{дв}} = \frac{4282 \cdot 150 \cdot 0,95}{1500} = 407 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

6) зведений до вала двигуна момент інерції системи:

$$J_{ze} = J_{дв} + \frac{J_6}{i^2} + \frac{mv^2}{\omega_{дв}^2} = 0,25 + \frac{0,5}{10^2} + \frac{1500 \cdot 1,57^2}{157^2} = 0,405 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

1.9. Питання для самоконтролю

1. Чим зумовлюються в механічних системах активні сили і моменти?, реактивні сили і моменти?
2. Які сили і моменти в механічних системах можуть споживати або віддавати енергію?, тільки споживати механічну енергію?
3. Як звести до вала електродвигуна моменти статичних опорів механічної системи, що рухається поступально?, що обертається?
4. Як звести до вала електродвигуна моменти інерції механічної системи, що рухається поступально?, що обертається?
5. Що таке коефіцієнт інерції механічної системи?
6. Якими рівняннями описуються процеси нерівномірного поступального та оберткового руху механічної системи з постійним моментом інерції?
7. Яким рівнянням описується процес нерівномірного поступального оберткового руху механічної системи з моментом інерції, залежним від кута повороту механізму?
8. При якій умові система електродвигун-робоча машина працює в усталеному режимі?
9. Як визначити момент інерції методом крутильних коливань?, методом допоміжного маятника?, методом падаючого вантажу? Для яких вузлів і деталей придатні вказані методи?
10. Як визначити момент інерції механічної системи методом вільного вибігу?
11. Що таке умовний час вибігу механічної системи?



2. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

2.1. Електромеханічні та механічні характеристики двигунів постійного струму

2.1.1. Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження. Рівняння статичних електромеханічної та механічної характеристик

На рис. 2.1 наведено принципову схему вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ), де $I_{\text{я}}$ і $I_{\text{з}}$ — струми відповідно обмоток якоря і збудження двигуна (ОЗ); E і ω — відповідно електрорушійна сила (ЕРС) і кутова швидкість якоря; $R_{\text{д.з}}$ і $R_{\text{д}}$ — відповідно додаткові опори в колах ОЗ і якоря. Напряму струму $I_{\text{я}}$ і ЕРС E відповідають двигунному режиму роботи. Якщо обмотку збудження ввімкнути паралельно обмотці якоря, то одержимо ДПС паралельного збудження. Оскільки ЕД мають однакові властивості, то розглядати будемо тільки ДПС НЗ.

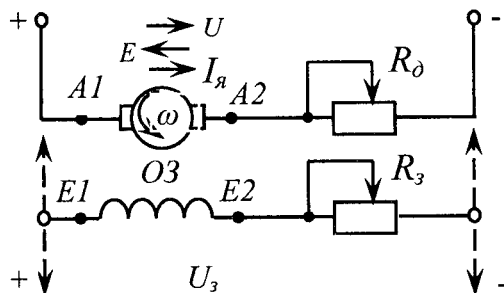


Рис. 2. 1. Схема вмикання двигуна постійного
струму незалежного(паралельного) збудження

Скористаємося відомими з курсу електричних машин рівняннями, що описують усталені (статичні) режими ДПС:

$$U = E + I_{\text{я}} R, \quad (2.1)$$

$$E = k\Phi\omega, \quad (2.2)$$

$$M = k\Phi I_{\text{я}}, \quad (2.3)$$

де U — напруга, прикладена до якірного кола, В; $I_{\text{я}} R$ — спад напруги в якірному колі, В; $I_{\text{я}}$ — струм у колі якоря, А; $R = R_{\text{об}} + R_{\text{д}}$ — сумарний опір якірного кола, який складається з внутрішнього опору двигуна $R_{\text{об}}$ та додаткового опору $R_{\text{д}}$, Ом. Внутрішній опір двигуна складається з опору обмотки якоря $r_{\text{я}}$, обмотки додаткових полюсів $r_{\text{оп}}$, компенсаційної обмотки $r_{\text{к}}$ і щіткового контакту $r_{\text{щ}}$, тобто $R_{\text{об}} = r_{\text{я}} + r_{\text{оп}} + r_{\text{к}} + r_{\text{щ}}$; E — ЕРС якоря, В, яка залежить від параметрів машини, магнітного потоку Φ , Вб, і кутової швидкості ω , рад/с ;

$k = \frac{pN}{2\pi a}$ — конструктивна стала двигуна; p — число пар полюсів; N — кількість активних провідників обмотки якоря; a — кількість синхронних витків обмотки якоря.

Перемноживши ліву і праву частини рівняння (2.1) на величину $I_{\text{я}}$, одержимо рівняння балансу потужностей в двигунному режимі роботи: $P_1 = P_2 + \Delta P = E I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R$, де $P_1 = UI_{\text{я}} = M\omega_0$ — потужність, яка споживається з джерела живлення і частково перетворюється на електромагнітну $E I_{\text{я}} = P_{\text{ем}}$ і в формі механічної $P_2 = M\omega$ передається на вал ЕД, а частково втрачається в опорах якірного кола $\Delta P = I_{\text{я}}^2 R$.

В практичних розрахунках потрібно знати номінальний момент на валу:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (2.4)$$

Номінальна кутова швидкість двигуна (рад/с) визначається:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} \approx 0,105 n_{\text{ном}}. \quad (2.5)$$

Номинальний електромагнітний момент $M_{\text{ем.ном}} = k\Phi_{\text{ном}} I_{\text{я.ном}}$ в двигунному режимі роботи більший, ніж номинальний момент на його валу $M_{\text{ном}}$ на величину, яку називають моментом холостого ходу ($M_{\text{х.х}}$) або моментом втрат на тертя в підшипниках і вентиляцію та втрат в сталі:

$$M_{\text{х.х}} = M_{\text{ем.ном}} - M_{\text{ном}}. \quad (2.6)$$

Момент холостого ходу $M_{\text{х.х}}$ порівняно малий, тому з достатньою для практики точністю при розрахунках МХ можна ним нехтувати і вважати, що момент на валу ЕД дорівнює його електромагнітному моменту. З метою спрощення позначення електромагнітної потужності і моменту індекс цих величин не пишемо.

Аналітичний вираз статичної ЕМХ $\omega = f(I_{\text{я}})$ ДПС з будь-яким збудженням одержимо після сумісного розв'язання рівнянь (2.1) і (2.2) відносно ω :

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} R}{k\Phi} = \frac{U - I_{\text{я}} (R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{k\Phi}. \quad (2.7)$$

Підставивши в рівняння (2.4) значення струму з формули (2.3) одержимо рівняння статичної МХ $\omega = f(M)$ ДПС з будь-яким збудженням:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{(R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(k\Phi)^2}. \quad (2.8)$$

При використанні аналітичних виразів МХ ЕД момент втрат відносять до моменту навантаження, тобто вважають, що підшипники ЕД і його вентилятор є елементами РМ. У цьому випадку заміна моменту на валу ЕД електромагнітним не дає суттєвих відхилень в результатах розрахунків.

ДПС НЗ, як правило, працюють при незмінному номинальному магнітному потоці $\Phi_{\text{ном}}$, тому добуток $k\Phi_{\text{ном}}$ є постійною величиною, яку позначають $C_{\text{ном}}$. В рівнянні (2.2) вона зв'язує ЕРС та швидкість обертання і називається коефіцієнтом ЕРС, а в рівнянні (2.3) – момент і струм якоря і називається коефіцієнтом моменту. Розмірність коефіцієнта ЕРС – В/с⁻¹, а коефіцієнта моменту – Н·м/А. З врахування сказаного рівняння електромеханічної характеристики ДПС НЗ має вигляд:

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{c_{\text{ном}}} = \omega_0 - \frac{I_{\text{я}}(R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{c_{\text{ном}}}, \quad (2.9)$$

а рівняння механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{c_{\text{ном}}} - M \frac{(R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(c_{\text{ном}})^2} = \omega_0 - M \frac{(R_{\text{дв}} + R_{\text{д}})}{(c_{\text{ном}})^2}, \quad (2.10)$$

де $\omega_0 = \frac{U}{c_{\text{ном}}}$ — швидкість ідеального холостого ходу, яка має місце при $I_{\text{я}} = 0$ для ЕМХ і $M = 0$ для МХ.

З рівнянь (2.9) і (2.10) випливає, що при параметрах $U_{\text{ном}}, \Phi_{\text{ном}}$ і $R_{\text{дв}}$ ЕМХ і МХ ДПС НЗ у прямокутній системі координат зображаються прямими лініями (рис. 2.2. і рис. 2.3) з ординатами ω_0 та кутовими коефіцієнтами $\frac{R_{\text{дв}}}{c_{\text{ном}}}$ і $\frac{R_{\text{дв}}}{(c_{\text{ном}})^2}$, які є тангенсами кутів нахилу ліній ЕМХ і МХ до осі абсцис.

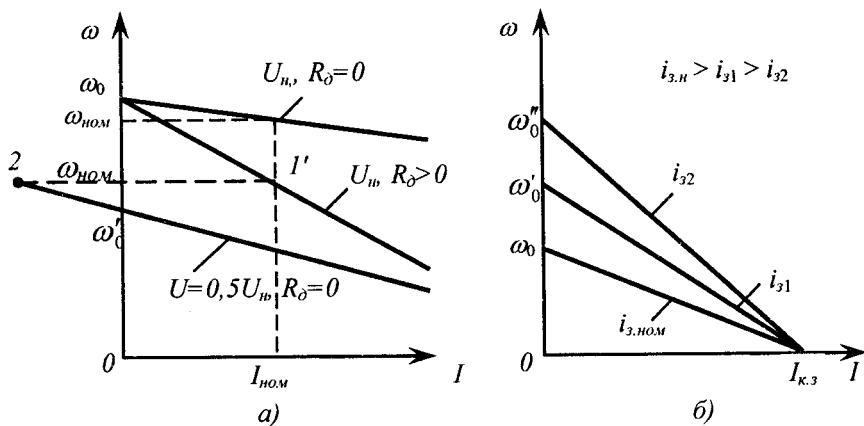


Рис. 2.2. Електромеханічні характеристики ДПС НЗ:

а) при номінальному магнітному потоці;

б) при ослабленому магнітному потоці

При постійному магнітному потоці кут нахилу ліній ЕМХ і МХ пропорційний опору якірного кола.

Коефіцієнт $c_{ном}$ можна визначити з рівняння (2.9), записаного для точки номінального режиму роботи двигуна:

$$c_{ном} = \frac{U_{ном} - I_{я.ном} R_{я}}{\omega_{ном}}. \quad (2.11)$$

ЕМХ і МХ бувають природними і штучними. Природні характеристики одержують при номінальних значеннях напруги і магнітного потоку та відсутності додаткового опору в колі якоря. При інших значеннях вказаних величин характеристики штучні. Кожний двигун має по одній природній ЕМХ і МХ та безліч штучних характеристик.

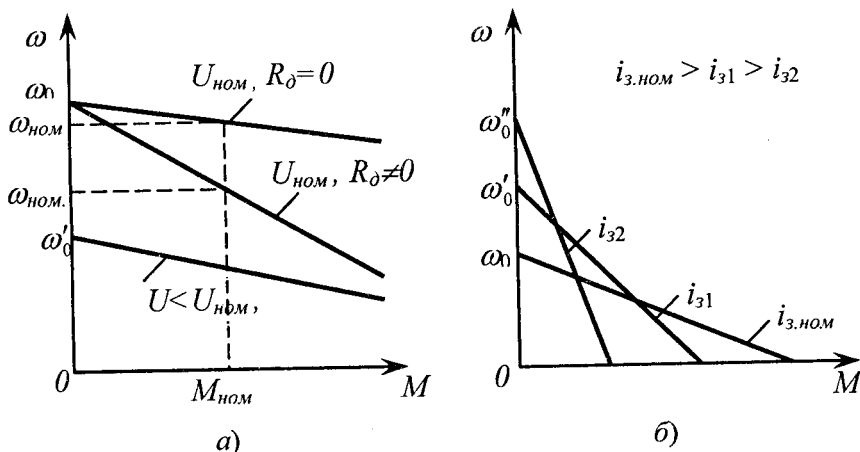


Рис. 2.3. Механічні характеристики ДПС НЗ:

а) при номінальному магнітному потоці;
б) при ослабленому магнітному потоці

Інколи рівняння (2,9) і (2.108) записують у такій формі:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (2.12)$$

де $\Delta\omega$ — перепад кутової швидкості, який визначається :

$$\Delta\omega = \frac{I_{я}(R_{\delta\phi} + R_{\delta})}{c_{ном}} = M \frac{(R_{\delta\phi} + R_{\delta})}{c_{ном}^2}. \quad (2.13)$$

Оскільки природні ЕМХ (рис. 2.2, а) і МХ (рис. 2.3, а)) зображуються похилими прямими лініями, то їх можна побудувати за двома

із трьох точок, координати яких найлегше визначити. Координати точок відповідають: першої — $I_{\text{я}}(M)=0, \omega=\omega_0$; другої — $I_{\text{я}}(M)=I_{\text{ном}}(M_{\text{ном}})$, $\omega=\omega_{\text{ном}}$; третьої — $I_{\text{я}}(M)=I_{\text{к.з}}(M_{\text{к.з}})$, $\omega=0$. При побудові природних характеристик краще користуватися координатами перших двох точок.

Якщо внутрішній опір кола якоря ЕД невідомий і заводські дані відсутні, то його величину можна приблизно визначити, припускаючи, що половина номінальних втрат потужності $\Delta P_{\text{ном}}$ — це втрати в міді обмотки, тобто постійні та змінні втрати при номінальному навантаженні однакові: $0,5\Delta P_{\text{ном}} = I_{\text{я.ном}}^2 R_{\text{я}}$, звідки :

$$R_{\text{я}} \approx 0,5(1-\eta_{\text{ном}}) \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{я.ном}}} = 0,5(1-\eta_{\text{ном}}) R_{\text{ном}}, \quad (2.14)$$

де $\eta_{\text{ном}}$ — номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД); $R_{\text{ном}}$ — номінальний опір ДПС, тобто такий опір, який при нерухомому якорі і номінальній напрузі обмежує струм в якорі до номінального значення.

Штучні МХ ДПС НЗ розглядаються в розділі 5.

2.1.2. Механічні характеристики ДПС НЗ у відносних одиницях

При номінальному магнітному потоці збудження ДПС відносні значення струму якоря та моменту однакові:

$$M^* = c_{\text{ном}} I / c_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = I^*. \quad (2.15)$$

У цьому випадку ЕМХ і МХ ідентичні.

Рівняння ЕМХ ДПС НЗ у відносних одиницях можна одержати, якщо формулу (2.9) записати у вигляді:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{IR}{U_{\text{н}}}\right). \quad (2.16)$$

Поділивши обидві частини рівняння (2.16) на ω_0 , маємо:

$$\omega^* = \left(1 - \frac{IR}{U_{\text{ном}}}\right). \quad (2.17)$$

Після заміни напруги $U_{ном}$ виразом $I_{ном} R_{ном}$ одержимо:

$$\omega^* = 1 - \frac{IR}{I_{ном} R_{ном}} = 1 - I^* R^*, \quad (2.18)$$

або

$$\omega^* = 1 - M^* R^*. \quad (2.19)$$

Статичний спад швидкості двигуна, зумовлений наявністю навантаження на його валу:

$$\Delta\omega^* = I^* R^* = M^* R^*. \quad (2.20)$$

Рівняння (2.20) спрощує розрахунок МХ ЕД. Для точок МХ, які відповідають номінальному моменту, $I_{ном}^* = 1$ і $M_{ном}^* = 1$, а рівняння (2.20) набуває вигляду:

$$\Delta\omega^* = R^*. \quad (2.21)$$

Отже, при номінальному моменті відносний статичний спад кутової швидкості чисельно дорівнює відносному опору якірного кола двигуна. У цьому випадку природну МХ у відносних одиницях будують за точками ідеального холостого ходу: $\omega_o^* = 1$, $M^* = 0$ і номінального режиму: $\omega_{ном}^* = 1 - \Delta\omega_{ном}^*$, $M^* = 1$.

Пряма, проведена через ці дві точки, буде природною МХ ЕД у відносних одиницях.

2.1.3. Енергетичний режим роботи ДПС НЗ. Гальмівні режими

Енергетичний режим роботи ЕД залежить від механічних (M , ω) і електричних (E , I) координат ЕД, які визначають його механічну $M\omega$ і електромагнітну EI потужності.

При одному напрямі кутової швидкості й моменту і протилежному напрямі струму і ЕРС має місце двигунний режим роботи, а при протилежному напрямі кутової швидкості й моменту та однаковому напрямі ЕРС і струму — генераторний. Між двигунним і генераторним режимами роботи є режими ідеального холостого ходу і короткого замикання, в яких одна з електричних і механічних змінних дорівнює нулю.

При ідеальному холостому ході струм і момент дорівнюють нулю, а при короткому замиканні нульові значення мають ЕРС і швидкість.

Розглянемо режим роботи ДПС НЗ на різних ділянках його характеристик (рис. 2.4) при позитивній полярності напруги.

1. Режим ідеального холостого ходу (точка ω_0 на осі ординат). Двигун не одержує енергії ні з мережі живлення (за винятком струму збудження), ні з вала ЕД $I = 0$; $U = E$; $M = 0$; $\omega = \omega_0$. Якір двигуна обертає робоча машина.

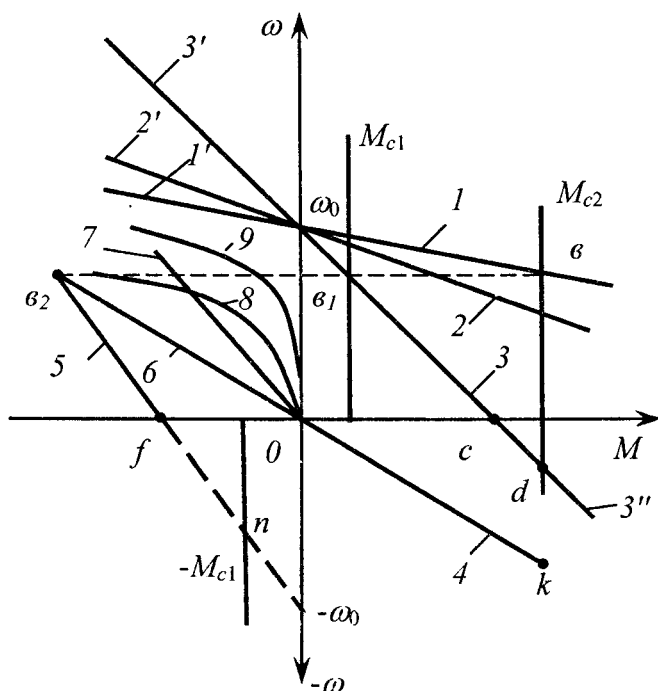


Рис. 2.4. Механічні характеристики ДПС НЗ у двигунному і гальмівних режимах: 1, 2, 3- режим двигуна, при 1- $R_{\partial}=0$; 2- $R_{\partial 1}>0$; 3- $R_{\partial 2}>R_{\partial 1}>0$; 1', 2', 3' — режим рекуперативного гальмування; 4 — режим гальмування противмиканням (гальмівний спуск); 5 — режим гальмування противмиканням до зупинки; 6, 7 — режим динамічного гальмування з незалежним збудженням; 8, 9 — режим динамічного гальмування з самозбудженням

2. Двигунні режим роботи мають місце у першому (прямий напрямок обертання) і третьому (зворотній напрямок обертання) квадрантах. Межі зміни кутової швидкості $0 < \omega < \omega_0$ або $0 < -\omega < -\omega_0$. В цьому режимі $E < U$, струм I_a і напруга U мають однаковий напрямок, а ЕРС якоря — протилежний. Електроенергія надходить з електричної мережі, а механічна енергія віддається з вала ДПС НЗ робочій машині.

3. Режим короткого замикання здійснюється тоді, коли $\omega = 0$ і $E = 0$. При цьому $I = I_{k.з} = \frac{U}{R}$, а споживана з мережі ЕЕ витрачається на нагрівання опорів кола якоря.

4. Гальмівні режими роботи мають місце у другому і четвертому квадрантах — це генераторні режими, оскільки МЕ, що поступає з вала машини, перетворюється в ЕЕ і передається на виводи машини. В залежності від способу використання ЕЕ, розрізняють три гальмівних режими.

4.1. Рекуперативне гальмування (генераторний режим роботи ДПС НЗ паралельно з електричною мережею) здійснюється тоді, коли при незмінній схемі вмикання ЕД його якорі під дією активного моменту статичних опорів РМ обертається з швидкістю, більшою за швидкість ідеального холостого ходу $\omega > \omega_0$. При цьому ЕРС якоря вища за прикладену напругу, тому струм якоря і обертовий момент змінюють свій напрямок. Рівняння МХ в режимі рекуперативного гальмування записується так:

$$\omega = \omega_0 + \frac{M(R_{\partial\theta} + R_{z.p})}{C_{ном}^2}, \quad (2.22)$$

де $R_{z.p}$ — опір рекуперативного гальмування.

Графічно ці характеристики $1'$, $2'$, $3'$ (рис. 2.4) зображують прямими лініями, які є продовженням МХ двигунного режиму в зоні другого квадранту. Гальмівний момент або швидкість гальмування регулюють зміною опору $R_{z.p}$. Рекуперативне гальмування економічне, оскільки супроводжується перетворенням МЕ, що надходить з вала робочої машини, в ЕЕ, яка віддається (крім втрат в ЕД) в електричну мережу. Перехід з двигунного режиму в гальмівний відбувається плавно без перемикачів у колі якоря і колі збудження ЕД.

Його застосовують, наприклад, у приводах підйомних і транспортних механізмів.

Застосування рекуперативного гальмування обмежується тим, що для його здійснення ЕД повинен обертатися з швидкістю, вищою за швидкість ідеального холостого ходу. Рекуперативне гальмування можливе і при низьких швидкостях, коли останню регулюють зміною напруги, оскільки $\omega_0 \equiv U$. Так, якщо ЕД в двигунному режимі працював в точці 1 (рис. 2.2), то при зниженні напруги робоча точка переходить на нову ЕМХ, відрізок якої 2 — ω'_0 відповідає рекуперативному гальмуванню.

4.2. Режим гальмування противмиканням або режим генератора послідовно з електричною мережею має місце, коли напрямок дій обертового моменту ЕД протилежний напрямку обертання його якоря. Може бути три випадки цього виду гальмування.

Перший випадок реалізується в ЕП машин з активним моментом статичних опорів, наприклад, в вантажопідйомних механізмах при спуску вантажу. Двигун з активним моментом на валу M_{c_2} (рис. 2.4) працює на точці «в» природної МХ 1 в режимі двигуна. Для переходу з режиму двигуна в режим гальмування противмиканням досить увімкнути в коло якоря достатню величину зовнішнього додаткового опору $R_{z.n}$. Робоча точка ЕД переходить на штучну МХ 3 (точка v_1). Виникає від'ємний динамічний момент, внаслідок чого знижується швидкість і на відрізку $c — d$ здійснюється режим гальмування противмиканням. Під дією активного моменту змінюється напрямок обертання ЕД ($\omega < 0$) і напрямок ЕРС якоря, яка буде діяти узгоджено з напругою мережі. При цьому якір двигуна споживає енергію як з мережі, так і від вала машини. Ця енергія у вигляді тепла виділяється в опорах кола якоря. Оскільки напруга, прикладена до якірного кола, і ЕРС якоря мають однаковий напрямок, то струм у колі якоря різко зростає. Момент двигуна, напрямок дії якого не змінюється, буде гальмівним. Усталеному режиму спуску вантажу відповідає точка d , коли зрівнюються статичний і гальмівний моменти. Механічна характеристика двигуна, що працює в режимі гальмування противмиканням у випадку зміни напрямку обертання описується рівнянням:

$$-\omega = \omega_0 - \frac{M(R_{\partial\partial} + R_{z.n})}{c_{ном}^2}, \quad (2.23)$$

де $R_{z.n}$ — опір гальмування противмиканням.

Другий випадок: ЕД працює на штучній МХ 3 в точці e_1 . Збільшення величини статичного моменту від $M_{c,1}$ до $M_{c,2}$ спричинить виникнення від'ємного динамічного моменту, внаслідок чого почнеться зниження швидкості до зупинки у точці c , а потім — реверс якоря до швидкості в точці d . Графічно МХ 3'' зображається прямою, яка є продовженням лінії МХ 3 двигунного режиму в зоні IV квадранта (рис. 2.4).

Третій випадок гальмування противмиканням використовується в приводах машин з реактивним моментом статичних опорів і здійснюється шляхом зміни полярності напруги, підведеної до якоря двигуна, що працює в двигунному режимі (точка e на рис. 2.4). Це призведе до зміни напрямків струму в колі якоря і електромагнітного моменту. Робоча точка переміщується в другий квадрант (точка e_2). Поки напрямок обертання не змінився (якір під дією кінетичної енергії системи «ЕД — РМ» продовжує обертатися в попередньому напрямку), електромагнітний момент ЕД діє в протилежному напрямку, тобто гальмує привод. В цьому випадку напруга мережі і ЕРС якоря діють узгоджено і рівняння МХ має вигляд:

$$\omega = -\omega_o + \frac{M(R_{\partial a} + R_{z,n})}{c_{ном}^2}. \quad (2.24)$$

Графічно ця МХ зображує прямою лінією $e_2 — f$. В момент зупинки (точка f) двигун необхідно вимкнути з мережі, інакше він знову перейде у двигунний режим і буде обертати РМ в протилежному напрямку.

Позитивними якостями гальмування противмиканням ДПС НЗ є: значна інтенсивність гальмування до повної зупинки; висока надійність гальмування при будь-якій кутовій швидкості обертання якоря двигуна; наявність гальмівного моменту при нерухомому двигуні; порівняно сталі значення гальмівного моменту.

Основними недоліками цього способу гальмування є значні зусилля на передавальний пристрій і вал двигуна та великі втрати енергії.

4.3. Режим динамічного гальмування або режим генератора, незалежного від мережі, створюється шляхом вимикання якоря з мережі і замикання його на зовнішній опір або накоротко (відзначимо, що закорочування накоротко якоря двигуна не означає для нього режиму короткого замикання). Можливі два способи динамічного гальмування: із самозбудженням та з незалежним збудженням.

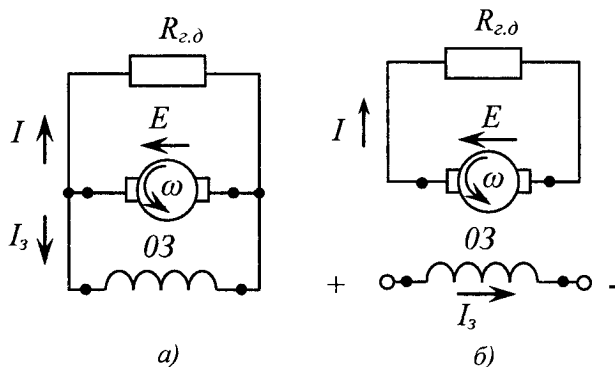


Рис. 2.5 Схеми вмикання ДПС НЗ при динамічному гальмуванні:
а) при самозбудженні; б) при незалежному збудженні

Двигун працює як генератор, перетворюючи МЕ, що надходить від вала РМ, в ЕЕ, яка потім витрачається на нагрівання якоря ЕД і гальмівного резистора. Оскільки якір ЕД вимикається з мережі, то $U = 0$ і $\omega_o = \frac{U}{k \cdot \Phi_{ном}} = 0$, а $I_{z.d} = \frac{0 - E}{R} = -\frac{E}{R}$. Тоді рівняння МХ двигуна, що працює в режимі динамічного гальмування, має вигляд:

$$\omega = -M \frac{R_{я} + R_{z.d}}{c_{ном}^2} \quad (2.25)$$

Із рівняння видно, що МХ є прямими лініями які незалежно від величини опору проходять через початок координат (рис. 2.4). Жорсткість характеристик при сталому потоці збудження цілком залежить від величини гальмівного опору $R_{z.d}$.

При гальмуванні ЕД, на валу якого діє реактивний момент, двигун переходить з точки e в точку e_2 (рис. 2.4) і гальмується до зупинки. При активному моменті M_{e2} на валу ЕД може працювати в точці k , яка відповідає усталеній гальмівній швидкості, наприклад, при опусканні вантажу.

При динамічному гальмуванні із самозбудженням (рис. 2.5, а) ЕД працює в режимі генератора з самозбудженням на зовнішній опір $R_{z.d}$. Характерною рисою цього режиму є те, що в процесі гальмування при деякій критичній швидкості, залежній від опору кола обмотки збудження, гальмівний момент практично зникає (криві 8

і 9 на рис. 2.4). Пояснюється це тим, що при швидкостях, менших від критичної, не відбувається самозбудження.

До позитивних якостей динамічного гальмування ДПС НЗ можна віднести простоту і економічність (у гальмівному режимі енергія з мережі витрачається тільки на живлення обмотки збудження), надійність, плавність гальмування. Гальмування при відсутності напруги в мережі є основними перевагами цього гальмівного режиму, тому він застосовується як аварійний. Недоліком є зникнення гальмівного моменту при швидкостях двигуна, менших від критичної.

2.1.4. Способи пуску ДПС НЗ.

Розрахунок опорів пускових і гальмівних резисторів

Пуск ДПС НЗ може бути прямим або непрямим. Прямий пуск застосовують тільки для ЕД, які мають порівняно великий внутрішній опір кола якоря і виконується умова:

$$I_{\text{пр.пус}} \leq I_{\text{я.доп}} = k I_{\text{я.ном}},$$

де $k = 2 \text{ — } 3$ — кратність допустимого струму якоря.

Для ЕД потужністю понад 0,5 кВт прямий пуск не рекомендується, оскільки при вмиканні безпосередньо на повну напругу електромережі через значний пусковий струм на колекторі ЕД може з'явитися сильне іскріння або навіть коловий вогонь. При цьому на валу ЕД виникає значний динамічний момент, на який можуть бути не розраховані передавальний пристрій і РМ, в живильній мережі відбувається значний спад напруги, ускладнюється робота захисної і вимірювальної апаратури.

Непрямий пуск здійснюється шляхом введення в коло якоря опору пускового реостата або зміни напруги від значення, при якому в колі якоря проходить пусковий струм, не більший допустимого, з подальшим підвищенням її до номінального значення. При одноступінчастому пуску опір пускового реостата визначають за формулою:

$$R_p = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{я.доп}}} - R_{\text{яв}}. \quad (2.26)$$

Реостатний пуск двигуна можна здійснювати при плавному зменшенні опору резистора і постійних за величиною значеннях пускового моменту і пускового струму або при ступінчастому зменшенні

опору і коливаннях пускового моменту і пускового струму в межах від максимальних до мінімальних значень, допустимих за умовами роботи ЕП.

На практиці найчастіше застосовують ступінчастий пуск. Кількість пускових ступенів, а також межі коливання струмів і моментів при пуску залежать від вимог технологічного процесу. Звичайно пусковий реостат має не більше 5 ступенів.

На рис. 2.6 зображена принципіальна схема реостатного пуску ДПС НЗ у два ступені та пускова діаграма двигуна. Пусковий реостат має дві секції опорів r_1 і r_2 . Величину пускового струму I_1 приймають за умовами комутації в межах: $I_1 = (2 \dots 2,5)I_{ном}$. Струм перемикавання обов'язково повинен задовольняти нерівність $I_2 > I_c$. Мінімальне його значення приймають залежно від навантаження на валу ЕД в межах:

$$I_2 = (1, 1 \dots 1, 2) I_c,$$

де I_c — струм якоря при моменті статичних опорів M_c .

Чим менша різниця між I_1 і I_2 , тим більшою буде кількість пускових ступенів. Величини опорів пускових і гальмівних резисторів ДПС НЗ можна визначити аналітичним або графоаналітичним методом.

Графоаналітичний метод визначення опорів пускових резисторів.

За каталожними даними двигуна будують природну МХ або ЕМХ у відносних одиницях. Оскільки вони ідентичні (2.15), то на рис. 2.6, б) побудована електромеханічна характеристика I . На осі абсцис відкладають значення пускового струму I_1 і струму перемикавання I_2 і через них проводять вертикалі.

Після цього будують штучну характеристику III, за якою відбувається пуск двигуна при найбільшому опорі кола ротора R_1 . В момент пуску двигун розвиває пусковий момент M_1 і в колі його якоря проходить пусковий струм I_1 . Двигун розганяється, його швидкість зростає, а пусковий струм зменшується і в т. б досягає значення I_2 .

Контактором прискорення $K1$ закорочують (шунтують) першу секцію r_1 пускового реостата. При цьому швидкість двигуна через інерційність системи ЕД — РМ не може змінитися раптово, а величина струму, якщо не враховувати впливу індуктивності якоря,

зростає миттєво до величини I_1 . Далі двигун буде розганятися відповідно до характеристики ($e - a - \omega_0^*$), при опорі кола якоря R_2 . Пусковий струм знову зменшується до значення I_2 , при якому контактор $K2$ шунтує другу секцію r_2 пускового реостата. Перехід на природну ЕМХ в точку f здійснюється по лінії $a - f$. Якщо в результаті побудови точка f не попадає на природну характеристику I , то слід змінити величини струму I_2 або I_1 і повторити побудову з тим, щоб значення струмів перемикавання на всіх характеристиках були однаковими.

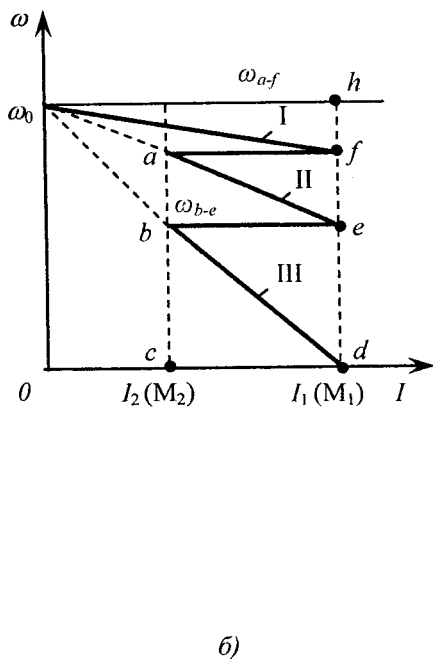
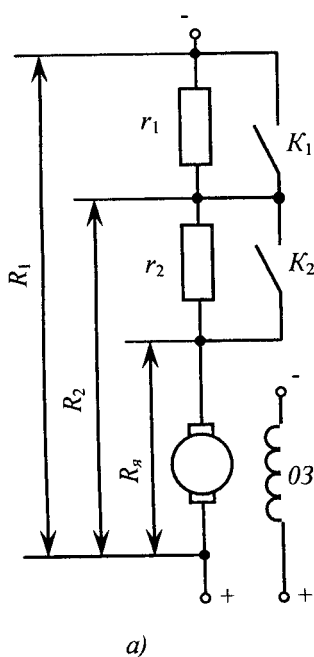


Рис. 2.6. Спрощена схема вмикання пускових резисторів ДПС НЗ (а); пускова діаграма та характеристики для розрахунку опорів пускових резисторів (б)

Після побудови пускової діаграми проводять горизонталь через ω_0 . Відрізок dh в масштабі дорівнює пусковому опору R_1 кола якоря. Величини опорів ступенів пускового реостата знаходять безпосередньо з рис. 2.6, б):

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= U_{ном} / I_1; \\ R_2 &= eh / dh \cdot R_1; \\ R_p &= df / dh \cdot R_1; \\ r_1 &= de / dh \cdot R_1; \\ r_2 &= ef / dh \cdot R_1; \\ R_{\pi} &= fh / dh \cdot R_1. \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Внутрішній опір двигуна δ

Аналітичний метод визначення опорів пускових резисторів

Швидкість ω_{b-e} , спільна для електромеханічних характеристик III і II (рис. 2.6, б), знайдеться за виразом:

$$\omega_{b-e} = \frac{U_{ном}}{C_{ном}} - \frac{I_2 R_1}{C_{ном}} = \frac{U_{ном}}{C_{ном}} - \frac{I_1 \cdot R_2}{C_{ном}}. \quad (2.28)$$

Звідси $I_2 R_1 = I_1 R_2$. Так само складають вираз для швидкості ω_{a-f} і визначають:

$$\left. \begin{aligned} I_2 R_1 &= I_1 R_2 \\ I_2 R_2 &= I_1 R_3; \\ \dots\dots\dots \\ I_2 R_m &= I_1 R_{\delta\pi} \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Помноживши між собою обидві частини системи рівнянь (2.29) і скоротивши загальні множники, одержимо:

$$I_2^m R_1 = I_1^m R_{\delta\pi},$$

Звідси

$$R_{1cm} = \lambda^m \cdot R_{\delta\pi}, \quad (2.30)$$

де m — кількість пускових ступенів; λ — коефіцієнт пропорційності:

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (2.31)$$

Кількість пускових ступенів знаходять за формулою:

$$m = \frac{\lg \left(\frac{R_1}{R_{\delta\pi}} \right)}{\lg \lambda}. \quad (2.32)$$

Якщо m не ціле число, то його округляють до цілого і за нижче-наведеною формулою знаходять нове значення λ :

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{R_1}{R_{\text{дв}}}}. \quad (2.33)$$

Коли кількість пускових ступенів є заданою величиною, то спочатку знаходять λ , а потім, задаючи I_1 , визначають I_2 ; при цьому повинна задовольнятися нерівність $I_2 > I_c$. Користуючись величинами $R_{\text{дв}}$ і λ , знаходять опір кола якоря на кожному пусковому ступені:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \lambda^m \cdot R_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_1}; \\ R_2 &= R_1 / \lambda = \lambda^{m-1} \cdot R_{\text{дв}}; \\ R_3 &= R_2 / \lambda = \lambda^{m-2} \cdot R_{\text{дв}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Опори секцій пускового реостата розраховують за формулами:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= R_1 - R_2, \\ r_2 &= R_2 - R_{\text{дв}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Аналітичний метод визначення опорів гальмівних резисторів

Рекуперативне гальмування. В усталеному режимі гальмівний момент двигуна дорівнює статичному, тому опір додаткового резистора знаходять, розв'язавши рівняння (2.22) відносно $R_{\text{з.р}}$:

$$R_{\text{з.р}} = \frac{(\omega_{\text{з.р}} - \omega_0) c_{\text{ном}}^2}{M_{\text{з.р}}} - R_{\text{дв}}, \quad (2.36)$$

або

$$R_{\text{з.р}} = \frac{c_{\text{ном}} (\omega_{\text{з.р}} - \omega_0)}{I_{\text{з.р}}} - R_{\text{дв}}, \quad (2.37)$$

де $\omega_{\text{з.р}}$, $M_{\text{з.р}}$ та $I_{\text{з.р}}$ — відповідно швидкість, момент і струм на статичній механічній характеристиці рекуперативного гальмування.

Гальмування противмиканням. Щоб визначити опір, який треба ввести в коло якоря для обмеження гальмівного моменту в режимі противмикання, задають початкове значення гальмівної

швидкості $\omega_{\varepsilon, n}$ (при реактивному статичному моменті) або усталене її значення (при активному статичному моменті) та необхідну величину гальмівного моменту $M_{\varepsilon, n}$ двигуна. Додатковий гальмівний опір знаходять за формулою:

$$R_{\varepsilon, n} = \frac{(\omega_{\varepsilon, n} + \omega_0) c_{ном}^2}{M_{\varepsilon, n}} - R_{\partial в}. \quad (2.38)$$

Електродинамічне гальмування. Задаючи бажані величини кутової швидкості $\omega_{\varepsilon, d}$ і гальмівного струму $I_{\varepsilon, d}$, знаходять потрібний додатковий опір:

$$R_{\varepsilon, d} = \frac{\omega_{\varepsilon, d} \cdot c_{ном}}{I_{\varepsilon, d}} - R_{\partial в}. \quad (2.39)$$

2.1.5. Схема вмикання, статичні електромеханічні та механічні характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження

Схема вмикання двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) (рис. 2.7) відрізняється від схеми ДПС НЗ тим, що обмотка ввімкнена послідовно з обмоткою якоря, тому його магнітний потік Φ залежить від сили струму в якорному колі, тобто змінюється із зміною навантаження. Залежність між струмом збудження і магнітним потоком (крива намагнічування, рис. 2.8), має нелінійний характер і не має точного аналітичного виразу, тому не можна одержати аналітичного виразу МХ. Оскільки співвідношення (2.1) при $I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon, ном}$ справедливе і для ДПС ПЗ, то рівняння його ЕМХ аналогічне рівнянню (2.7) тобто:

$$\omega = \frac{U - I_{\varepsilon} R}{k \Phi}, \quad (2.40)$$

де $R = R_{\partial в} + R_{\partial}$ — сумарний опір якорного кола двигуна, який складається з внутрішнього опору двигуна $R_{\partial в}$ та зовнішнього додаткового опору R_{∂} . До $R_{\partial в}$ входять опори обмотки якоря $r_{0, \varepsilon}$, обмотки додаткових полюсів $r_{\partial, n}$, обмотки збудження $r_{\partial з}$ та щіткового контакту $r_{щ}$.

На прямій ділянці кривої намагнічування при ненасиченому магнітопроводі (рис. 2.8) магнітний потік залежить від струму прямо-лінійно:

$$\Phi = \alpha \cdot I, \quad (2.41)$$

де $\alpha = \operatorname{tg} \varphi$ — коефіцієнт пропорційності.

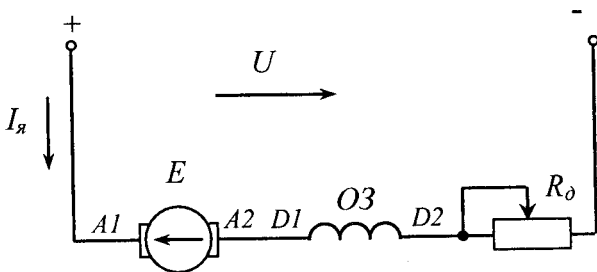


Рис. 2.7. Схема вмикання ДПС ПЗ

Враховуючи (2.41), електромагнітний момент двигуна визначається залежністю:

$$M = k\Phi I_a = k\alpha I_a^2, \quad (2.42)$$

звідки

$$I_a = \sqrt{\frac{M}{k\alpha}}. \quad (2.43)$$

Підставивши значення магнітного потоку (2.41) в (2.40), одержуємо рівняння ЕМХ ДПС ПЗ:

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha}. \quad (2.44)$$

Якщо в рівнянні (2.44) виразити струм через електромагнітний момент (2.42), то рівняння МХ ДПС ПЗ матиме вигляд:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha}, \text{ або } \omega = \frac{A}{\sqrt{M}} - B, \quad (2.45)$$

де $A = \frac{U}{\sqrt{k\alpha}}, B = \frac{R}{k\alpha}.$

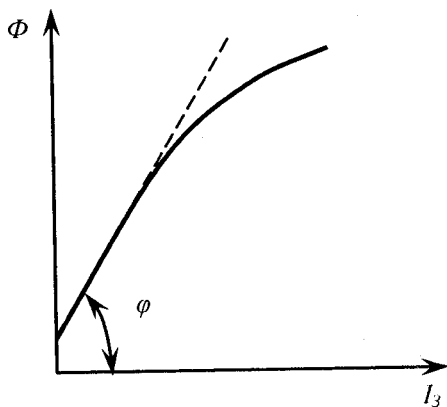


Рис. 2.8. Крива намагнічування ДПС ПЗ

З рівнянь (2.44) і (2.45) випливає, що:

1. При $I \rightarrow 0$; $M \rightarrow 0$; $\omega \rightarrow \infty$, тобто вісь кутової швидкості є вертикальною асимптотою для характеристик ДПС ПЗ (рис. 2.9). При навантаженні, наближеному до холостого ходу, швидкість обертання ЕД різко зростає і може досягти значення, недопустимого за умовами механічної міцності колектора і бандажів, обмотки якоря, тобто ЕД іде врознос. Тому в приводах з ДПС ПЗ забороняється застосовувати пасові механічні передавальні пристрої, а мінімальний момент на валу не повинен бути меншим 40 % номінального.

2. При $I \rightarrow \infty$; $M \rightarrow \infty$; $\omega \rightarrow -\frac{R}{k\alpha}$, тобто пряма з ординатою $\omega = -\frac{R}{k\alpha}$ є горизонтальною асимптотою характеристик ДПС ПЗ.

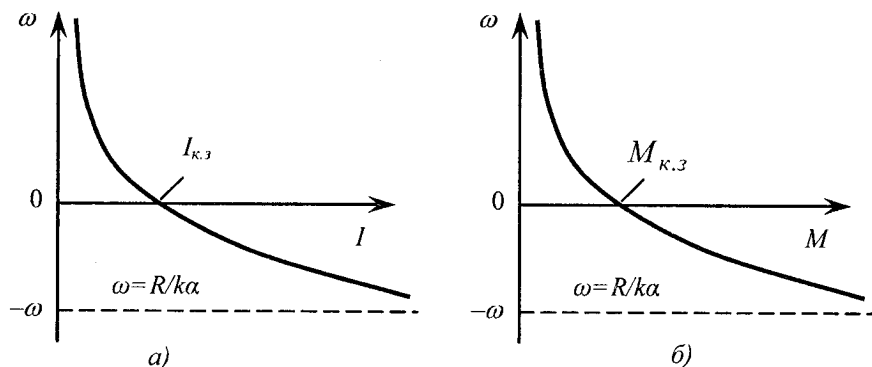


Рис. 2.9. Електромеханічна (а) та механічна (б) характеристики ДПС послідовного збудження

3. При ненасиченій магнітній системі ЕМХ і МХ гіперболічні і м'які (рис. 2. 9). При збільшенні навантаження на валу двигуна зростає струм збудження і спочатку майже пропорційно збільшується потік, що призводить до різкого зменшення швидкості. При значних струмах внаслідок насичення магнітного кола потік змінюється мало і відповідно менше змінюється кутова швидкість. Оскільки сучасні ДПС ПЗ мають насичену магнітну систему, то гіперболічний характер їх характеристик зберігається лише при малих значеннях моменту. При моментах, більших від номінального, магнітний потік практично не змінюється, тому ЕМХ і МХ мають лінійний характер (рис. 2.9).

ДПС ПЗ використовують для привода машин, які працюють зі значними перевантаженнями.

2.1.6. Гальмівні режими роботи ДПС ПЗ

ДПС ПЗ не може працювати в режимі рекуперативного гальмування. При звичайній схемі його вмикання неможливо однозначно визначити швидкість ідеального холостого ходу ω_0 , оскільки теоретично при $I \rightarrow 0$, $M \rightarrow 0$, $\Phi \rightarrow 0$, а $\omega_0 \rightarrow \infty$. Практично за рахунок залишкового магнітного потоку Φ_3 така швидкість ω_0 існує, але знаходиться значно вище за допустиму швидкість і має тільки теоретичний інтерес.

Інші режими роботи ДПС ПЗ аналогічні режимам роботи ДПС НЗ, тобто: **двигунний режим** має місце при $0 < \omega < \infty$, **режим короткого замикання**, коли $\omega = 0$, $E = 0$, $I = I_{к.з}$, $M = M_{к.з}$.

Гальмування противмиканням ДПС ПЗ може бути здійснено трьома шляхами.

1. Гальмування до зупинки: двигун вимикають з мережі, змінюють полярність напруги на обмотці якоря, вводять додатковий гальмівний опір $R_{z,n}$ і знову вмикають в мережу. Робоча точка (рис. 2.10) переходить з точки *a* МХ 1 на точку *b* МХ 3, з якої починається режим гальмування противмиканням до $\omega = 0$. Якщо при цьому двигун не вимкнути з мережі, то він почне обертати РМ у протилежному напрямку (МХ 3').

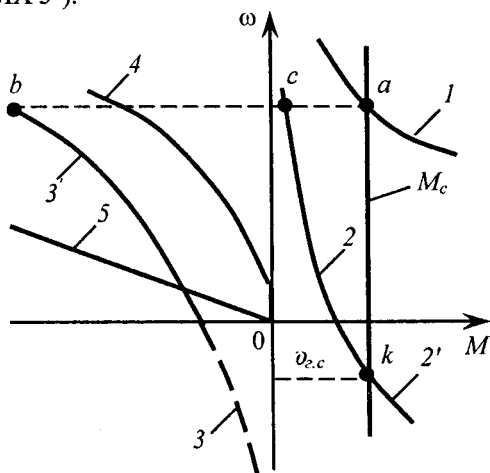


Рис. 2.10. Механічні характеристики ДПС ПЗ у двигунному і гальмівних режимах:

1 — природна; 2 — штучна у двигунному режимі; 3 — двигунний режим при зворотному напрямку обертання; 2', 3' — режим гальмування противмиканням; 4 — динамічне гальмування із самозбудженням; 5 — динамічне гальмування з незалежним збудженням

2. Гальмування противмиканням (гальмівний спуск з постійною швидкістю $\omega_{z.c}$) може бути здійснене також, коли двигун має активне навантаження M_c , яке перевищує момент короткого замикання (точка k на МХ 2').

Наприклад, двигун працює в усталеному режимі в точці a (рис. 2.10). При вмиканні в коло якоря додаткового опору $R_{z.n}$ двигун переходить з точки a в точку c штучної характеристики 2 і починається гальмування. Після зупинки він змінить напрям обертання і в точці k МХ 2' буде здійснюватися гальмування противмиканням (спуск вантажу з усталеною кутовою швидкістю $\omega_{z.c}$).

3. Якщо двигун працював на штучній МХ 2 в точці c і навантаження збільшилося до M_c (рис. 2.10), то процес гальмування буде таким же, як і в попередньому випадку.

Електродинамічне гальмування може здійснюватися із самозбудженням (рис. 2.11, а) або з незалежним збудженням (рис. 2.11, б).

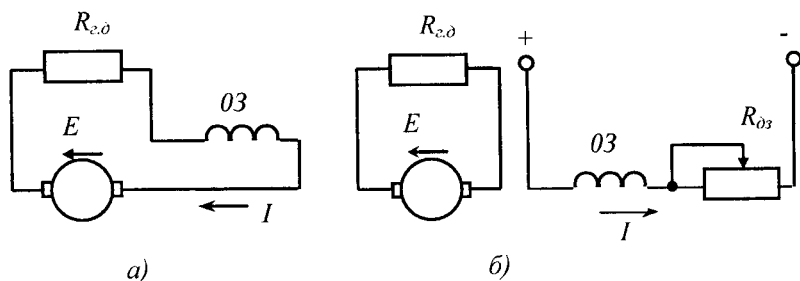


Рис. 2.11. Схема вмикання ДПС ПЗ при електродинамічному гальмуванні:
а) — з самозбудженням; б) — з незалежним збудженням

При гальмуванні із самозбудженням (МХ 4 на рис.2.10) двигун вимикають з електромережі, змінюють полярність вмикання обмотки збудження і замикають на гальмівний резистор $R_{z.d}$. При зменшенні кутової швидкості гальмівний момент знижується. Це зменшення відбувається швидше, ніж зменшення кутової швидкості. Пояснюється це тим, що момент двигуна створюється струмом якоря і потоком, а отже, вони зменшуються разом. Режим електродинамічного гальмування із самозбудженням можна використовувати для інтенсивного електричного гальмування в електроприводах транспортних машин.

Для динамічного гальмування з незалежним збудженням (МХ 5 на рис. 2.10) двигун вимикають з мережі, обмотку якоря замикають на гальмівний резистор $R_{г.д}$, а в обмотку збудження подають струм від мережі або іншого джерела (рис. 2.11, б).

Електродинамічне гальмування ДПС ПЗ при незалежному збудженні має ту перевагу, що дає можливість плавного гальмування. До недоліків слід віднести зникнення гальмівного моменту при зникненні напруги в мережі живлення і значні втрати енергії в резисторі $R_{г.д}$.

2.1.7. Розрахунок і побудова природних і штучних електромеханічних та механічних характеристик ДПС ПЗ. Розрахунок опорів пускових резисторів

Вирази (2.42) і (2.45) дають лише загальне уявлення про МХ і ЕМХ ДПС ПЗ, їх не можна використовувати для інженерних розрахунків. Прийняте в цих рівняннях допущення, що магнітна система двигуна ненасичена і магнітний потік пропорційний струму якоря, вносить до розрахунків значну похибку. Побудувати реальні природні характеристики в практичних розрахунках можна за допомогою наведених в каталогах універсальних характеристик $\omega^* = f(I^*)$ і $M^* = f(I^*)$, які у відносних одиницях (рис. 2.12) виражають залежність швидкості обертання і моменту на валу двигуна від струму якоря при номінальній напрузі і відсутності зовнішніх додаткових опорів у якорному колі.

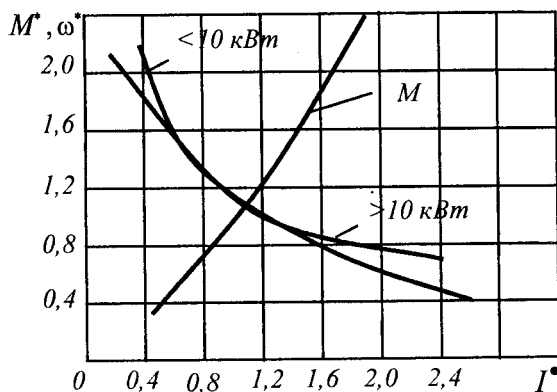


Рис. 2.12. Універсальні характеристики ДПС ПЗ

Універсальні характеристики визначають експериментально, тому вони враховують насичення магнітного кола і вплив реакції якоря двигуна. Спочатку з універсальних характеристик виписують три рядки даних для розрахунку координат природних ЕМХ і МХ.

У перший рядок записують ряд довільних значень струмів і за характеристиками $M^* = f(I^*)$ і $\omega^* = f(I^*)$ знаходять відповідні значення M_1^* , M_2^* , .., M_i^* , та швидкості ω_1^* , ω_2^* , .., ω_i^* і записують їх відповідно у другий і третій рядки табл. 2.2. Рядки 4 — 6 заповнюють даними в іменованих одиницях.

За даними таблиці будують природні ЕМХ та МХ (рис. 2.17).

Для побудови штучної ЕМХ при відомому R_∂ зручно користуватися аналітичним методом. Рівняння природної і штучної ЕМХ записують у такому вигляді:

$$\omega_{n,i} = \frac{U_{ном} - I_i R_{\partial\partial}}{k \cdot \Phi} = \frac{U_{ном}}{k\Phi} \left(1 - \frac{I_i R_{\partial\partial}}{U_{ном}}\right). \quad (2.46)$$

$$\omega_{ш} = \frac{U_n}{k\Phi} \left[1 - \frac{I_i (R_{\partial\partial} + R_\partial)}{U_n}\right]. \quad (2.47)$$

Розділивши (2.47) на (2.46), знайдемо швидкість $\omega_{ш,i}$ за виразом:

$$\omega_{ш,i} = \omega_{n,i} \frac{U_{ном} - I_i \cdot (R_{\partial\partial} + R_\partial)}{U_{ном} - I_i \cdot R_{\partial\partial}}, \quad (2.48)$$

або у відносних одиницях:

$$\omega_{ш,i}^* = \omega_{n,i}^* \frac{1 - I_i \cdot R^*}{1 - I_i \cdot R_{\partial\partial}^*}, \quad (2.49)$$

$$\text{де } R^* = \frac{R_{\partial\partial} + R_\partial}{R_n}; R_{\partial\partial}^* = \frac{R_{\partial\partial}}{R_n}; I_i^* = \frac{I_i}{I_n}; \omega_{ш,i}^* = \frac{\omega_{ш,i}}{\omega_n}; \omega_{n,i}^* = \omega_{n,i}^* = \frac{\omega_{n,i}}{\omega_n}. \quad (2.50)$$

Потрібні для розрахунку значення $R_{\partial\partial}$ знаходять у каталогах, експериментально або наближено за формулою:

$$R_{\partial\partial} \approx 0,75(1 - \eta_{ном}) \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = 0,75(1 - \eta_{ном}) R_{ном}. \quad (2.51)$$

Послідовність побудови штучних характеристик така:

За даними рядків 4 і 6 табл. 2.2 у першому квадранті будують природну ЕМХ (рис. 2.17) в іменованих одиницях або за даними рядків 1 і 3 — у відносних. Задають ряд значень струму $I_1, I_2, \dots, I_n$ або $I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*$ і знаходять на природній характеристиці точки, ординати яких відповідають $\omega_{n1}, \omega_{n2}, \dots, \omega_{nn}$ або $\omega_{n1}^*, \omega_{n2}^*, \dots, \omega_{nn}^*$.

За формулами (2.48) або (2.49) при заданому значенні R_∂ і R_γ визначають $\omega_{u1}, \omega_{u2}, \dots, \omega_{un}$ або $\omega_{u1}^*, \omega_{u2}^*, \dots, \omega_{un}^*$, що відповідають прийнятому ряду струмів і за визначеними даними будують штучну ЕМХ.

Для побудови штучної МХ використовують універсальні робочі характеристики двигуна (рис. 2.12), за допомогою яких для заданого ряду струмів $I_1, I_2, \dots, I_n$ або $I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*$ визначають відповідні значення моментів $M_1, M_2, \dots, M_n$ або $M_1^*, M_2^*, \dots, M_n^*$. У координатних осях (ω, M) або (ω^*, M^*) відкладають знайдені значення моменту і швидкості. Точки з'єднують плавною кривою, яка й буде штучною МХ.

Обернена задача. Коли відомі координати хоча б однієї точки заданої штучної ЕМХ (ω_{ui}, I_i) , то для визначення додаткового опору розв'язують рівняння (2.48) відносно R_∂ і для струму I_i на природній характеристиці знаходять відповідну швидкість ω_n :

$$R_\partial = \left(1 - \frac{\omega_{ui}}{\omega_{ni}}\right) \left(\frac{U}{I_i} - R_{\partial n}\right). \quad (2.52)$$

Якщо задана штучна МХ або одна її точка з координатами (ω_{ui}, M_i) , то спочатку за допомогою універсальних характеристик (рис. 2.12) за моментом M_i визначають струм, а потім використовують вищевикладений порядок розрахунку.

Розрахунок пускових опорів графічним методом. У першому квадранті будують природну ЕМХ (рис. 2.13). Задаються значеннями пускового струму I_1 та струму перемикавання I_2 і знаходять на природній характеристиці точки e і f , що відповідають цим струмам.

У другому квадранті будують залежності $\omega = f(R_1)$ і $\omega = f(R_2)$. Для цього у вибраному масштабі на осі абсцис відкладають опір якорного кола двигуна $R_{\text{дв}}$ і проводять вертикаль. З точок e і f проводять горизонтальні лінії до перетину з вертикаллю в точках E і F . Друга точка прямих $\omega = f(R_1)$ і $\omega = f(R_2)$ лежить на осі абсцис.

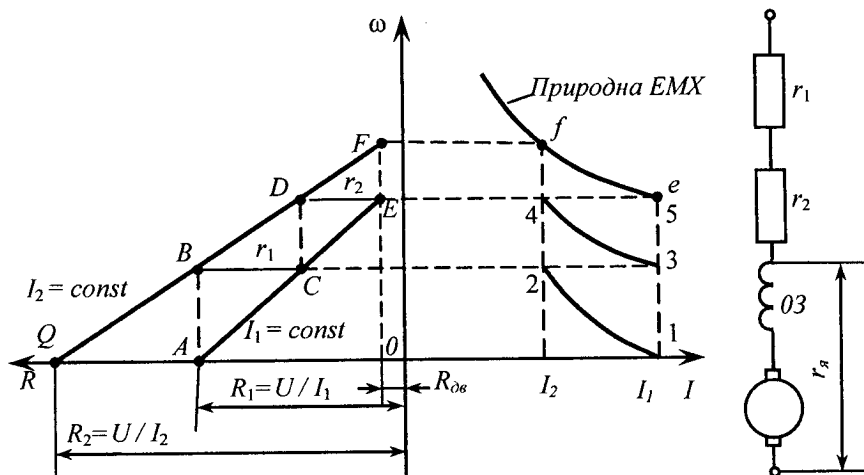


Рис. 2.13. Графічний метод визначення опорів пускових і гальмівних резисторів

При цьому $\omega = 0$, $R_1 = \frac{U}{I_1}$, $R_2 = \frac{U}{I_2}$. У масштабі на осі абсцис відкладають значення опорів R_1 і R_2 (відповідно точки A і Q). З'єднавши точки A і E та точки Q і F , одержують лінії $I_1 = \text{const}$ і $I_2 = \text{const}$.

Пуск двигуна починають при найбільшому опорі пускового резистора R_1 . Під дією пускового моменту двигун розганяється на штучній характеристиці $I-2$, його швидкість зростає (пряма AB), а струм спадає до значення I_2 . При цьому закорочується перша секція пускового резистора r_1 і струм зростає раптово до I_1 (пряма BC або $2-3$). Далі двигун буде розганятися відповідно до характерис-

тики 3—4. Його струм знову зменшується до I_2 (точка D), а після замикання другої секції пускового реостата r_2 зростає до I_1 (пряма DE або 4—5), після чого двигун переходить на природну ЕМХ і обертається з швидкістю, що відповідає його навантаженню. Якщо в результаті побудови горизонтальна лінія, проведена з точки D , не попаде в точку E або з точки 4 в точку 5, що лежить на природній характеристиці, то слід змінити I_2 або I_1 і повторити побудову. Після такої побудови величини опорів секцій пускового резистора знаходять безпосередньо з рисунка 2.13, тобто відрізок BC в масштабі дорівнює опору першої секції r_1 , а відрізок DE — опору другої секції r_2 .

2.1.8. Схема вмикання, рівняння електромеханічних та механічних характеристик, режими роботи двигуна постійного струму змішаного збудження

Двигун постійного струму змішаного збудження (ДПС 33) (рис. 2.14, *а*) має дві обмотки збудження, які вмикаються узгоджено. Послідовну обмотку збудження ($ОЗПс$) вмикають послідовно з обмоткою якоря, а паралельну $ОЗПн$ — на напругу мережі. Магнітні потоки цих обмоток додаються (рис. 2.14, *б*). При струмі якоря $I_a \rightarrow \rightarrow - I_a$, магнітний потік Φ наближається до нуля, тобто ДПС 33 розмагнічується.

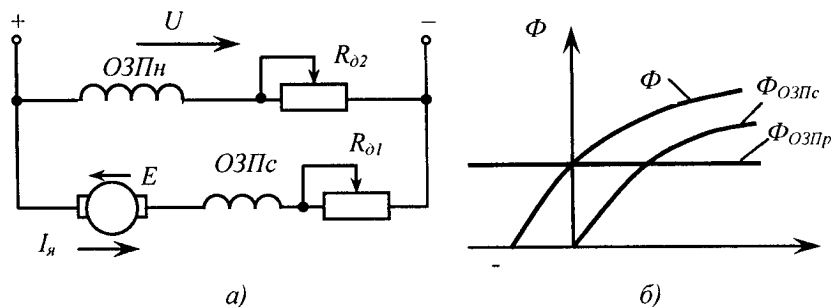


Рис. 2.14. Схема вмикання (*а*) і характеристики намагнічування (*б*) ДПС 33

Електромеханічна і механічна характеристики ДПС 33 (рис. 2.15) виражаються відповідно формулами (2.57) і (2.58), в яких магнітний потік Φ також є функцією струму.

Внутрішній опір ДПС 33 приблизно визначають за формулою:

$$R_{\text{об}} \approx 0,6(1 - \eta_{\text{ном}}) \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} = 0,6(1 - \eta_{\text{ном}}) R_{\text{ном}}. \quad (2.53)$$

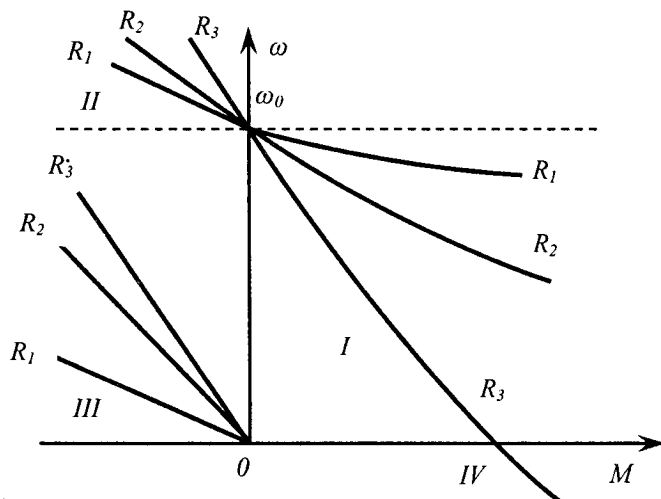


Рис. 2.15. Механічні характеристики ДПС змішаного збудження при різних опорах реостата $R_{\text{д1}}$ в режимах роботи:

I — двигунному; II — рекуперативного гальмування;
III — динамічного гальмування; IV — гальмування противмиканням

Якщо струм якоря дорівнює нулю, магнітний потік ДПС 33 створюється обмоткою незалежного збудження, внаслідок чого швидкість ідеального холостого ходу цього двигуна значно менша, ніж у відповідного двигуна послідовного збудження, і трохи більша порівняно із швидкістю ідеального холостого ходу ДПС НЗ. Значення швидкості ідеального холостого ходу можна обчислити за формулою:

$$\omega_o = \frac{U_{\text{ном}}}{k\Phi_{\text{пр}}}. \quad (2.54)$$

де $\Phi_{\text{пр}}$ — магнітний потік, створений паралельною обмоткою збудження.

Завдяки наявності обмотки послідовного збудження ДПС ЗЗ порівняно із ДПС НЗ мають більшу кратність пускового моменту при меншій кратності пускового струму і зменшену кутову швидкість обертання його при навантаженні.

Для ДПС ЗЗ, як і для ДПС ПЗ, точного аналітичного виразу МХ одержати не можна. Звичайно природні ЕМХ і МХ ДПСЗЗ наводяться в каталогах. Коли вони невідомі, їх можна розрахувати за формулами (2.7) і (2.8), користуючись універсальною кривою намагнічування.

Природну і штучні МХ ДПС ЗЗ можна побудувати аналогічно побудові відповідних характеристик ДПС ПЗ.

В електроприводах з ДПС ЗЗ використовують гальмування з рекуперацією енергії в мережу, електродинамічне та противмиканням. Здійснюють це так, як і в ДПС НЗ. Але коли ДПС ЗЗ переходить у режим рекуперативного або електродинамічного гальмування, струм в якорі і послідовній обмотці збудження змінює напрямок. Щоб запобігти розмагнічуючому впливу послідовної обмотки, її виключають або закорочують. Після цього МХ в режимах рекуперативного і електродинамічного гальмувань стають прямими лініями, подібними до відповідних характеристик ДПС НЗ.

2.1.9. Приклади

1. Для ДПС НЗ типу 2ПН132М з технічними характеристиками $P_{ном} = 2,5 \text{ кВт}$; $U_{ном} = 110 \text{ В}$; $n_{ном} = 1000 \text{ об/хв}$; $\eta_{ном} = 72 \%$ визначити величини, що характеризують його роботу у номінальному режимі та побудувати природну і штучні МХ при:

1) номінальних значеннях напруги і магнітного потоку і наявності в колі якоря додаткового опору $R_0 = 0,9 \text{ Ом}$;

2) номінальному значенні магнітного потоку і напрузі на якорі $U_1 = 0,5 U_{ном}$;

3) номінальному значенні напруги і магнітному потоці $\Phi_1 = 0,8 \Phi_{ном}$.

Розв'язок

$$1. \text{ Номінальний струм двигуна: } I_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{U_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{2,5 \cdot 10^3}{110 \cdot 0,72} = 31,6 \text{ А.}$$

$$2. \text{ Номінальний опір двигуна: } R_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = \frac{110}{31,6} = 3,5 \text{ Ом.}$$

3. Внутрішній опір якорного кола ЕД:

$$R_{\partial\partial} \approx 0,5(1 - \eta_{\text{ном}}) R_{\text{ном}} = 0,5 \cdot (1 - 0,72) \cdot 3,5 = 0,49 \text{ Ом.}$$

4. Спад напруги в якорному колі при номінальному струмі:

$$\Delta U_{\text{ном}} = I_{\text{ном}} R_{\partial\partial} = 31,6 \cdot 0,49 = 15,5 \text{ В.}$$

5. Номінальна ЕРС: $E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - \Delta U_{\text{ном}} = 110 - 15,5 = 94,5 \text{ В}$

6. Номінальна кутова швидкість якоря:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = 0,105 \cdot 1000 = 105 \text{ рад/с.}$$

7. Номінальний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{2,5 \cdot 10^3}{105} = 23,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

8. Потужність, споживана ЕД з мережі, при номінальному навантаженні:

$$P_1 = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 2,5 / 0,72 = 3,47 \text{ кВт.}$$

9. Номінальні втрати потужності у двигуні:

$$\Delta P_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})}{\eta_{\text{ном}}} = 2,5 \frac{1 - 0,72}{0,72} = 0,97 \text{ кВт.}$$

10. Номінальний коефіцієнт ЕРС :

$$c_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} \cdot R_{\partial\partial}}{\omega} = \frac{110 - 31,6 \cdot 0,49}{105} = 0,9 \text{ В}\cdot\text{с.}$$

11. Швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{c_{\text{ном}}} = \frac{110}{0,9} = 122 \frac{\text{рад}}{\text{с.}}$$

12. Номінальний електромагнітний момент:

$$M_{\text{е.ном}} = c_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = 0,9 \cdot 31,6 = 28,4 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

13. Номінальна кутова швидкість якоря у відносних одиницях:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_0} = \frac{105}{122} = 0,86 \text{ в.о.}$$

14. Жорсткість природної МХ:

$$\beta^* = \beta = \frac{M_0^* - M_{ном}^*}{\omega_0^* - \omega_{ном}^*} = \frac{0 - 1}{1 - 0,86} = -7,14 \text{ в.о.}$$

15. Момент холостого ходу (момент втрат):

$$M_{х.х} = M_{е.ном} - M_{ном} = 28,4 - 23,8 = 4,6 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

16. Швидкість холостого ходу:

$$\begin{aligned} \omega_{х.х} &= \omega_0 - \Delta\omega_{х.х} = \frac{U_{ном}}{c_{ном}} - M_{х.х} \cdot \frac{R_{\partial в}}{c_{ном}^2} = \\ &= 122 - 4,6 \cdot 0,49 / 0,81 = 119,2 \text{ рад/с.} \end{aligned}$$

17. Струм короткого замикання для природної ЕМХ:

$$I_{к.з} = \frac{U_{ном}}{R_{\partial в}} = 110 / 0,49 = 224,5 \text{ А.}$$

18. Момент короткого замикання для природної МХ :

$$M_{к.з} = M_{ном} I_{к.з} / I_{ном} = 23,8 \cdot 224,5 / 31,6 = 169 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

За координатами точок: 1) $\omega = \omega_0 = 122 \text{ рад/с}$, $M = 0$ і 2) $\omega_{ном} = 105 \text{ рад/с}$,

$M_{ном} = 23,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$, на рис. 2.16 побудована природна характеристика 1.

19. Розрахунок штучної механічної характеристики при $R_0 = 0,9 \text{ Ом}$.

19.1. Визначаємо кутову швидкість при номінальному моменті:

$$\begin{aligned} \omega_{ш.Р} &= \frac{U_{ном} - I_{я.ном} \cdot (R_{\partial в} + R_0)}{U_{ном} - I_{я.ном} \cdot R_{\partial в}} \cdot \omega_{ном} = \\ &= \frac{110 - 31,6 \cdot (0,49 + 0,9)}{110 - 31,6 \cdot 0,49} \cdot 105 = 73,4 \text{ рад/с.} \end{aligned}$$

19.2. Струм короткого замикання (пусковий струм):

$$I_{к.з} = \frac{U_n}{R_{\partial в} + R_0} = \frac{110}{0,49 + 0,9} = 79 \text{ А.}$$

19.3. Момент короткого замикання (пусковий момент):

$$M_{к.з} = M_{ном} \frac{I_{к}}{I_{ном}} = 23,8 \frac{79}{31,6} = 59,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За координатами точок: 1) $M = 0$, $\omega = \omega_0 = 122 \text{ рад/с}$; 2). $M_{ном} = 23,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\omega = \omega_{ш.Р} = 73,4 \text{ рад/с}$; 3) $M = M_{к.з} = 59,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\omega = 0$ на рис. 2.16 побудована характеристика 2.

20. Розрахунок штучної механічної характеристики при $U = 0,5U_{ном}$.

20.1. Швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_{о.ш.U} = \frac{0,5U_{ном}}{c_{ном}} = \frac{0,5 \cdot 110}{0,9} = 61 \text{ рад/с}.$$

20.2. Швидкість при номінальному моменті:

$$\omega_{ш.U} = \frac{0,5U_{ном}}{c_{ном}} - M_{ном} \frac{R_{\Delta\phi}}{c_{ном}^2} = \frac{0,5 \cdot 110}{0,9} - 23,8 \frac{0,49}{0,81} = 46,7 \text{ рад/с}.$$

За координати точок: 1) $M = 0$, $\omega = \omega_{о.ш1} = 61 \text{ рад/с}$, 2) $M = M_{ном} = 23,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$,

$\omega_{о.ш.U} = 46,7 \text{ рад/с}$ на рис. 2.16 побудована МХ 3.

21. Розрахунок штучної механічної характеристики при ослабленому магнітному потоці $\Phi = 0,8 \Phi_{ном}$.

21.1. Швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_{о.ф} = \frac{U_{ном}}{0,8c_{ном}} = \frac{110}{0,8 \cdot 0,9} = 153 \text{ рад/с}.$$

21.2. Момент короткого замикання:

$$M_{к.з.ф} = I_{к.з} 0,8 k\Phi_{ном} = 224,5 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 163 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За координати точок: 1) $M = 0$ і $\omega = \omega_{о.ф} = 153 \text{ рад/с}$, 2) $M = M_{к.з.ф} = 163 \text{ Н} \cdot \text{м}$. на рис. 2.16 побудована МХ 4.

Приклад 2. Побудувати ЕМХ і МХ для ДПС ПЗ типу МТ-4М, паспортні дані якого: $P_{ном} = 3,3 \text{ кВт}$; $U_{ном} = 40 \text{ В}$; $n_{ном} 1250 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$; $\eta_{ном} = 85\%$;

$$I_{ном} = 96 \text{ А}.$$

Універсальна характеристика наведена на рис. 2.12.

Розв'язок

1. Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi n_{ном}}{30} = \frac{3,13 \cdot 1250}{30} = 131 \text{ рад/с}.$$

2. Номінальний момент двигуна:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном} 10^3}{\omega_{ном}} = \frac{3300}{131} = 25,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Номінальний опір двигуна:

$$R_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = \frac{40}{96} = 0,42 \text{ Ом}.$$

4. Опір обмоток двигуна:

$$R_{\partial\partial} = 0,75(1 - \eta_{ном})R_{ном} = 0,75(1 - 0,85) \cdot 0,42 = 0,05 \text{ Ом}$$

5. З графіків рис. 2.12 записуємо в табл. 2.2 перші 3 рядки значення струмів I^* , моментів M^* та кутових швидкостей ω^* .

6. За формулами, наведеними в табл. 2.2, розраховуємо значення моментів, кутових швидкостей і струмів в іменованих одиницях на природних і штучних характеристиках.

Таблиця 2.2

РОЗРАХУНКОВІ ДАНІ ДЛЯ ПОБУДОВИ МХ І ЕМХ ДПС ПЗ

1	Універсальні характеристики	$I^*, \text{о.е.}$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
2		$M^*, \text{о.е.}$	0,3	0,8	1,25	1,7	2,38
3		$\omega^*, \text{о.е.}$	2,1	1,2	0,9	0,7	0,6
4	Природні характеристики	$I = I^* I_{ном}, \text{А}$	38,40	76,8	115	154	192
5		$\omega = \omega^* \omega_{ном}, \text{с}^{-1}$	275	175	118	91,6	78,5
6		$M = M^* M_{ном}, \text{Н} \cdot \text{м}$	7,56	20,17	31,51	42,86	60,0
7	Швидкість на штучних характеристиках при $R_{\partial} = 0,1 \text{ Ом}$	$\omega_{ш.і} = \omega_{н.і} \frac{U_{ном} - I_i \cdot (R_{\partial\partial} + R_{\partial})}{U_{ном} - I_i \cdot R_{\partial\partial}}$	247	138	78,4	48	29

7. На рис. 2.17 побудовані природні та штучні ЕМХ і МХ.

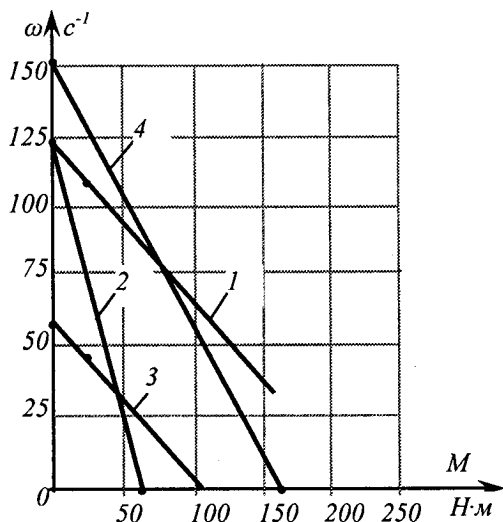


Рис. 2. 16. Механічні характеристики двигуна 2ПН132М:
 1 — природна; 2 — при $R_0 = 0,9 \Omega_m$; 3 — при $U = 0,5 U_{ном}$;
 4 — при $\Phi = 0,8 \Phi_{ном}$

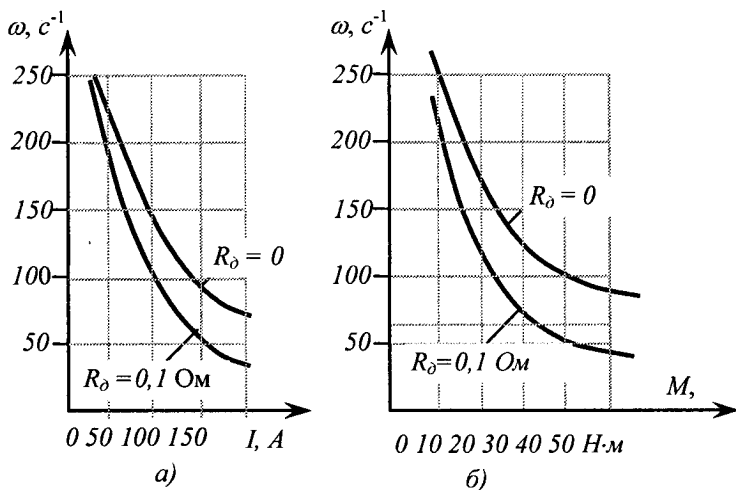


Рис. 2. 17. Механічні характеристики двигуна МТ-4М:
 а) — електромеханічні; б) — механічні

2.1.10. Питання для самоконтролю

1. Від чого залежить ЕРС і електромагнітний момент ДПС НЗ?
2. Виведіть і проаналізуйте рівняння механічної (електромеханічної) характеристики ДПС.
3. Як розрахувати і побудувати природні МХ і ЕМХ ДПС НЗ?
4. Як визначити номінальний момент електродвигуна?
5. Який вигляд мають штучні МХ і ЕМХ ДПС НЗ при різних значеннях опору якріного кола, напруги і магнітного потоку?
6. При яких умовах ДПС НЗ працює в режимі рекуперативного гальмування?
7. Як здійснити гальмівні режими ДПС НЗ?
8. Що таке статичний спад кутової швидкості ЕД?
9. Як розмірність коефіцієнта ЕРС?, коефіцієнта моменту?
10. Яку швидкість розвиває ДПС НЗ при номінальному моменті і введеному в коло якоря додатковому опорі?
11. Як визначити величину опору внутрішнього кола якоря ДПС НЗ за даними каталогу?
12. Як визначити струм якоря у гальмівних режимах ДПС НЗ?
13. Як визначити величини гальмівних опорів в колі якоря ДПС НЗ?
14. Як змінюється струм короткого замикання ДПС НЗ при зміні струму в обмотці збудження?
15. Напишіть рівняння електромеханічної і механічної характеристик ДПС ПЗ і проаналізуйте їх.
16. Як визначити величину опору внутрішнього кола якоря ДПС ПЗ за даними каталогу?
17. В яких гальмівних режимах може працювати ДПС ПЗ?
18. При яких обставинах ДПС ПЗ «іде врознос»?
19. Як розрахувати опори пускового реостата ДПС ПЗ графічним методом?
20. Як визначити величину опору внутрішнього кола якоря ДПС 3З за даними каталогу?
21. В яких гальмівних режимах може працювати ДПС 3З?
22. Чому дорівнює швидкість ідеального холостого ходу ДПС 3З?
23. Які позитивні якості мають ДПС 3З?

2.2. Електромеханічні та механічні характеристики двигунів змінного струму

2.2.1. Схеми вмикання та заміщення трифазного асинхронного двигуна

Серед двигунів змінного струму найбільш поширені в сільському господарстві прості і надійні в експлуатації трифазні асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором (КЗР). В окремих

випадках використовують трифазні асинхронні електродвигуни з фазним ротором (АД ФР), синхронні (СД), однофазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, універсальні колекторні двигуни та інші.

Основна схема вмикання трифазного АД і спрощена Г- подібна схема заміщення його фази зображені на рис. 2.18.

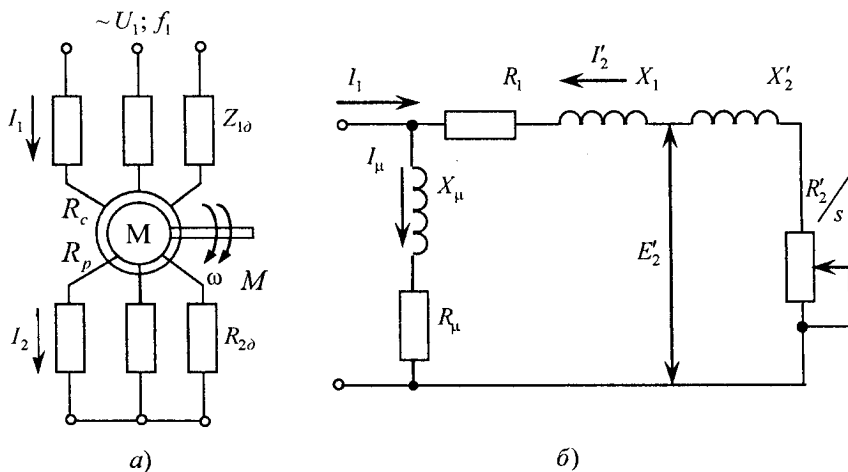


Рис. 2.18. Схеми вмикання (а) і заміщення (б) трифазного асинхронного двигуна

На схемах прийняті такі позначення: U_l , U_ϕ , — відповідно діючі значення лінійної та фазної напруги статора, В; I_l , I_μ , I'_2 — відповідно фазні струми обмотки статора, контура намагнічування та ротора, зведені до обмотки статора, А; $R_1 = R_c + R_{1d}$ і X_1 — сумарний активний та індуктивний опори фази обмотки статора, Ом; R_c , R_{1d} — активні опори обмотки статора і додаткового резистора, Ом; $R'_2 = R_p + R_{2d}$ і X'_2 — сумарний активний та індуктивний опори фази обмотки ротора, зведені до обмотки статора, Ом; R_μ і X_μ — активний та індуктивний опори контура намагнічування, Ом; s — ковзання асинхронного двигуна у відносних одиницях, яке визначається:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - \frac{\omega p}{2\pi f_1}, \quad (2.55)$$

де $\omega_o = \frac{2\pi f_1}{p}$ — кутова швидкість магнітного поля статора, рад/с;

ω — кутова швидкість ротора, рад/с; n_0 — частота обертання магнітного поля статора, об/хв; n — частота обертання ротора, об/хв.; f_1 — частота струму мережі, Гц; p — число пар полюсів двигуна.

2.2.2. Рівняння статичних електромеханічної та механічної характеристик трифазного асинхронного двигуна у параметричній формі та його аналіз

При виведенні рівняння МХ прийняті такі припущення: активний опір обмотки ротора не залежить від частоти струму в ньому; насичення магнітної системи двигуна не впливає на величину індуктивних опорів обмоток статора і ротора; провідність контура намагнічування не залежить від навантаження (залежить лише від напруги); додаткові втрати енергії у двигуні не враховуються; моменти, що створюються магніторушійними силами вищих гармонічних складових, не враховуються.

Згідно із схемою заміщення (рис. 2.18) фазний струм обмотки ротора, зведений до обмотки статора, визначається залежністю:

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + X_k^2}} = \frac{U_\phi s}{\sqrt{(R_1 s + R'_2)^2 + X_k^2 s^2}} \quad (2.56)$$

де $X_k = X_1 + X'_2$ — індуктивний опір двигуна при короткому замиканні.

Якщо в рівняння (2.56) підставити $s = I$, то одержимо рівняння пускового струму в роторі:

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{U_\phi}{Z_k}, \quad (2.57)$$

де $Z_k = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + X_k^2}$ — повний опір короткого замикання АД.

Струм статора через провідності схеми заміщення (рис. 2.18, б) визначиться за виразом:

$$I_1 = U_1 \left[\frac{1}{R_\mu + jX_\mu} + \frac{1}{R_1 + R'_2/s + jX_k} \right]. \quad (2.58)$$

З рівняння (2.58) можна зробити наступні висновки:

1) при синхронній швидкості ($s = 0$) двигун споживає струм на магнічування ($I_1 = I_\mu$);

2) при нерухомому роторі ($s = 1$) двигун споживає пусковий струм I_n ;

3) при швидкості, більшій за синхронну ($s < 0$) активна складова струму статора змінює свій знак (двигун працює в генераторному режимі).

Як видно із рівняння (2.58), пусковий струм двигуна не залежить від навантаження, а залежить від параметрів двигуна (R_1, R'_2, X_1, X'_2) і величини напруги (U_ϕ) на обмотці статора. Пусковий струм асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в 3,5...7,5 разів більший за номінальний. Кратність пускового струму $K_I = \frac{I_n}{I_{ном}}$ —

важлива каталожна величина.

Вираз (2.56) є функція $I'_2 = f(s)$, яка має екстремум, для визначення якого аналізують знаменник (позначимо його «У»):

$$Y = (R_1 + R'_2/s)^2 = R_1^2 + 2R_1 R'_2/s + R'^2_2/s^2,$$

після розв'язку якого одержимо: $s = -R'_2/R_1$. Отже максимальне значення струму I'_2 має місце в генераторному режимі при від'ємному ковзанні.

Часто ЕМХ і МХ АД показують у вигляді залежності струму і моменту від ковзання s . В цьому випадку одержані аналітичні вирази мають компактну форму запису і більш зручні для аналізу і розрахунків.

На рис. 2.19 наведені ЕМХ $\omega = f(I'_2)$ і $\omega = f(I_1)$. На осі ординат відкладені кутова швидкість і ковзання, які однозначно пов'язані між собою співвідношенням:

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (2.59)$$

Електромеханічна характеристика має такі характерні точки:

- 1) $s = 0$, $\omega = \omega_0$, $I'_2 = 0$, $I_1 = I_\mu$ — ідеального холостого ходу (синхронної кутової швидкості магнітного поля статора);
- 2) $s = 1$, $\omega = 0$, $I_1 = I_{к.з} = I_n$ — короткого замикання (пуску);

- 3) $s_1 = -R'_2 / R_1$, $\omega_1 = \omega_0 = (1 - s_1)$, $I'_2 = I_{\max} = \frac{U_\phi}{X_K}$ — максимального значення струму в області від'ємних ковзань;
- 4) $s \rightarrow \pm\infty$, $\omega \rightarrow \infty$, $I'_2 \rightarrow I_\infty = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}$ — асимптотичне значення струму ротора при безмежному збільшенні ковзання і швидкості.

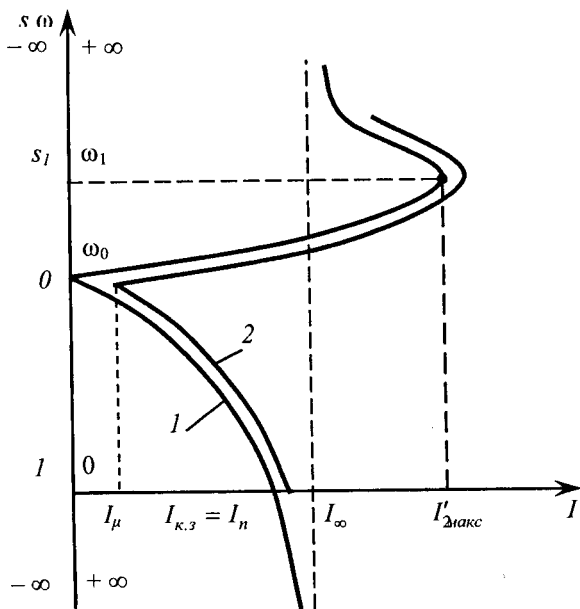


Рис. 2.19. Електромеханічні характеристики АД:
1 - $I'_2 = f(s)$; 2 — $I_1 = f(s)$

Рівняння механічної характеристики АД можна одержати із рівняння балансу потужності в колі ротора. Згідно з законом Джоуля—Ленца визначимо втрати потужності в колі ротора, виражені через електричні величини:

$$\Delta P_2 = m_1 I_2'^2 R_2', \quad (2.60)$$

де m_1 — число фаз двигуна.

Втрати потужності в колі ротора ΔP_2 , виражені через механічні величини АД, — це різниця між електромагнітною потужністю $P_1 = M\omega_0$ і корисною механічною потужністю $P_2 = M\omega$, тобто:

$$\Delta P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s. \quad (2.61)$$

Прирівнявши втрати потужності (2.60) і (2.61), одержимо вираз електромагнітного моменту двигуна:

$$M = \frac{m_1 I_2' R_2'}{\omega_0 s} = \frac{3U_\phi^2 R_2' s}{\omega_0 [(R_1 s + R_2')^2 + X_k^2 s^2]}. \quad (2.62)$$

Одержане рівняння (2.62), виражене через параметри схеми заміщення, є рівнянням МХ АД в параметричній формі. Залежність $s = f(M)$, побудована за рівнянням (2.62), має вигляд, показаний на рис. 2.20, а). Графік залежності має два екстремуми: критичні (максимальні) моменти в двигунному і генераторному режимах.

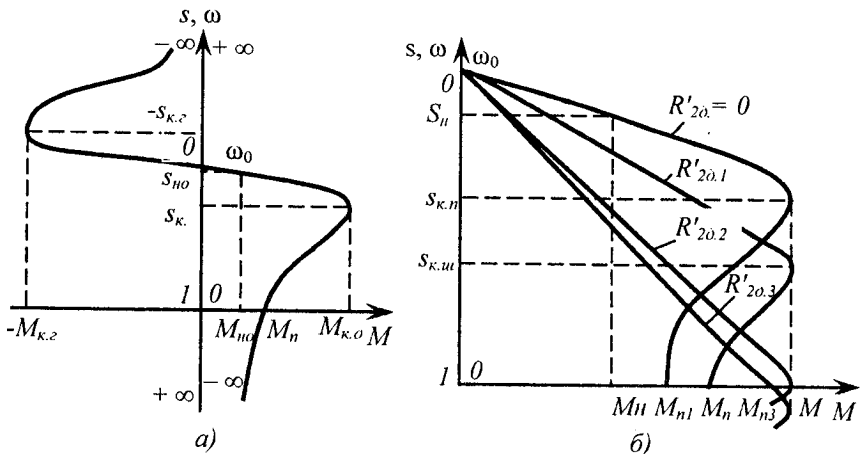


Рис. 2.20. Механічні характеристики АД:

а) в двигунному і генераторному режимах; б) при різних опорах $R'_{2\sigma}$ додаткового резистора в колі ротора: $R'_{2\sigma 1} < R'_{2\sigma 2} < R'_{2\sigma 3} < R'_{2\sigma 4}$

Механічні характеристики АД: а) в двигунному і генераторному режимах; б) при різних опорах $R'_{2\sigma}$ додаткового резистора в колі ротора

Для визначення координат точок максимумів моменту M_k беруть першу похідну з виразу (2.62) по s і прирівнюють її до нуля:

$$\frac{dM}{ds} = \frac{m_1 U_\phi^2 R_2'}{\omega_0} \times \frac{\left[(R_1 s + R_2')^2 + X_k^2 s^2 \right] - s (2R_1^2 s + 2R_1 R_2' + 2X_k^2 s)}{\left[(R_1 s + R_2')^2 + X_k^2 s^2 \right]^2} = 0,$$

Після перетворення чисельника одержимо:

$$\frac{dM}{ds} = \frac{m_1 U_\phi^2 R_2'}{\omega_0} \cdot \frac{R_2'^2 - R_1^2 s^2 - X_k^2 s^2}{[(R_1 s + R_2')^2 + X_k^2 s^2]^2} = 0.$$

Похідна дорівнює нулю при умові:

$$R_2'^2 - R_1^2 s^2 - X_k^2 s^2 = 0.$$

Розв'язавши це рівняння відносно s , матимемо:

$$s = \pm \sqrt{\frac{R_2'^2}{R_1^2 + X_k^2}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = s_k. \quad (2.63)$$

Ковзання, при якому двигун розвиває максимальний момент, називають критичним ковзанням і позначають s_k .

Підставивши у формулу (2.62) замість s значення s_k з (2.63), одержують вираз для максимального (критичного) моменту:

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}. \quad (2.64)$$

Критичний момент АД є найбільшим значенням електромагнітного моменту, який може розвивати двигун, що працює при заданих значеннях напруги і опорах R_1 і X_k . У формулі (2.64) знак «+» ставлять при розрахунку характеристики в двигунному режимі роботи, знак «-» — у генераторному.

Аналізуючи рівняння (2.56, 2.58, 2.62, 2.63 і 2.64), можна зробити наступні висновки:

- 1) при ковзанні $s = 0$ струм ротора дорівнює нулю;
- 2) при ковзанні $s = 1$ в роторі протікає пусковий струм, незалежний від навантаження (рівняння 2.58);

- 3) крутний момент АД пропорційний квадрату напруги;
- 4) критичне ковзання за абсолютною величиною однакове для двигунного і генераторного режимів;
- 5) критичне ковзання не залежить від напруги, а тільки від параметрів двигуна;
- 6) критичне ковзання пропорційне активному опору кола ротора;
- 7) критичний момент не залежить від активного опору кола ротора (рис. 2.20);
- 8) критичний момент за абсолютною величиною в режимі генератора більший, ніж у двигунному режимі. Це обумовлено впливом падіння напруги на активному опорі статора.

На (рис. 2.20, а) наведена механічна характеристика АД і її характерні точки, визначивши координати яких, можна побудувати природну МХ:

1) $s = 0$; $\omega = \omega_0$; $M = 0$ — точка ідеального холостого ходу (синхронної кутової швидкості);

2) $s = 1, 0$; $\omega = 0$; $M = M_{к.з} = M_n = M_{ном} \cdot M_n^*$ — точка короткого замикання (початковий пусковий момент);

3) $s = s_{к.д}$; $\omega = \omega_{к.д}$; $M = M_{к.д}$; $s = -s_{к.з}$; $\omega = \omega_{к.з}$; $M = -M_{к.з}$ — точки максимальних моментів в режимах двигуна і генератора.

4) $s = s_{ном}$; $\omega = \omega_{ном}$; $M = M_{ном}$ — точка номінального режиму;

5) $s \rightarrow \pm\infty$; $\omega \rightarrow \infty$; $M \rightarrow 0$ — асимптота МХ, якою є вісь швидкості.

Якщо у формулу (2.62) замість s підставити значення ковзання при пуску двигуна $s = 1$, то дістанемо вираз для пускового моменту:

$$M_n = \frac{m_1 U_\phi^2 R_2'}{\omega_0 [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (2.65)$$

Пусковий момент асинхронного двигуна з фазним ротором (рис. 2.20, б) при збільшенні активного опору кола ротора спочатку зростає і при певному опорі досягає значення критичного моменту, а потім спадає і при безмежно великому опорі наближається до нуля.

У короткозамкнених двигунів величина початкового пускового моменту практично не завжди є найменшим значенням моменту в двигунному режимі. При малих кутових швидкостях ($s_{\min} = 0,8 \dots 0,85$) МХ АД має провал внаслідок впливу асинхронних моментів від вищих непарних гармонік в магнітному полі обмоток. Це необхідно враховувати при пуску двигуна під навантаженням.

За величиною максимального моменту визначають перевантажувальну здатність двигуна, тобто його властивість короткочасно в динамічних режимах розвивати момент, який перевищує номінальне значення.

В рівняннях (2.63) і (2.64) знак «+» відповідає роботі в двигунному режимі ($1 \geq s \geq 0$), а знак «-» в генераторному режимі паралельно з мережею ($s < 0$).

Енергетичний режим роботи АД визначається величиною і знаком ковзання, а саме (рис. 2.20, а):

- 1) $s = 0$; $\omega = \omega_0$ — режим ідеального холостого ходу;
- 2) $s = s_{ном}$; $\omega = \omega_{ном}$; $I = I_{ном}$; $M = M_{ном}$ — номінальний режим;
- 3) $s = 1$; $\omega = 0$; $M = M_{к.з} = M_{пуск}$ — режим короткого замикання;
- 4) $0 < s < 1, 0$; $\omega_0 > \omega > 0$ — двигунний режим;
- 5) $s < 0$; $\omega > \omega_0$ — генераторний режим паралельно з мережею живлення (рекуперативне гальмування);
- 6) $s > 1, 0$; $\omega < 0$ — генераторний режим послідовно з мережею живлення (протivismання).

Крім того АД може працювати в генераторному режимі незалежно від мережі змінного струму, який називається режимом динамічного гальмування.

Розглянуті вище рівняння дають значення електромагнітних моментів. Момент на валу двигуна менший від електромагнітного на величину моменту втрат на обертання.

2.2.3. Природні та штучні характеристики трифазного асинхронного двигуна, їх розрахунок і побудова

Оскільки опори кіл статора і ротора здебільшого невідомі, тому доцільно мати рівняння МХ АД, виражене через каталожні дані двигуна. Для цього потрібно поділити вираз (2.62) на вираз (2.64) і після нескладних перетворень одержати уточнену формулу Клосса:

$$M = \frac{M_k(2+q)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + q} \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} \text{де } q &= \pm \frac{2R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \text{ Виразимо його через } s_k: q = \frac{2R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \cdot \frac{R_2'}{R_2} = \\ &= 2s_k \frac{R_1}{R_2} = 2a s, \end{aligned}$$

$$\text{де } a = \frac{R_1}{R_2}.$$

Враховуючи, що $R_1 \approx R_2$, то $q = 2s_k$, тоді:

$$M = \frac{2M_k(1+s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2s_k}. \quad (2.67)$$

Для визначення параметра s_k в (2.67) замість поточних значень моменту і ковзання підставимо їх номінальні значення M_n і s_n .

$$\text{Одержимо вираз: } M_k^* = \frac{M_k}{M_n} = \frac{\frac{s_n}{s_k} + \frac{s_k}{s_n} + 2s_k}{2(1+s_k)}. \quad (2.67, a)$$

Після алгебраїчних перетворень запишемо його у вигляді квадратного рівняння $s_k^2[1 - 2s_n(M_k^* - 1)] - 2M_k^*s_k s_n + s_n^2 = 0$ і, розв'язуючи відносно s_k , одержимо:

$$s_k = \frac{s_{ном} [M_k^* \pm \sqrt{M_k^{*2} + 2s_{ном}(M_k^* - 1) - 1}]}{1 - 2s_{ном}(M_k^* - 1)}, \quad (2.68)$$

$$\text{або спрощену формулу } s_k = s_{ном} (M_k^* \pm \sqrt{M_k^{*2} - 1}). \quad (2.68, a)$$

У виразах (2.68) і (2.68, а) перед квадратним коренем ставлять знак «+». Від'ємний знак відповідає випадку, коли номінальний момент настає при $s > s_k$, що нереально. Практично двигун має критичне ковзання $s_k \approx (4 \dots 6)s_{ном}$.

В деяких випадках при побудові МХ використовують наближені формули.

В потужних АД (починаючи з 20 — 25 кВт) активний опір R_l значно менший X_k ($R_l \approx 0,01X_k$). Якщо ним знехтувати ($R_l = 0$), то МХ матимуть однакові значення критичних моментів у двигунному і генераторному режимах. Для цих двигунів рівняння МХ (2.66) матиме вигляд:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (2.69)$$

Вираз (2.69) називають спрощеною формулою Клосса, яка дає достатню точність розрахунків МХ двигунів середньої та великої потужності. Для АД з $P_{ном} < 5$ кВт користуватися формулою (2.69) недоцільно.

Механічні характеристики АД, побудовані за формулами (2.66) і (2.69), можуть відрізнятися від дійсних. Особливо ця різниця збільшується при ковзанні більшому за критичне, тобто при малих кутових швидкостях. Якщо потрібна більша точність, то необхідно будувати МХ за експериментальними даними.

Із аналізу рівнянь статичних МХ (2.66) і (2.69) видно, що при ковзанні в межах від $s = 0$ до $s = (1,2 \dots 1,5) s_{ном}$ (робоча частина МХ) можна знехтувати величиною s/s_k , оскільки вона значно менша величини s_k/s . Тоді МХ буде виражена рівнянням прямої $M \approx 2M_k \cdot s/s_k$. На цій ділянці спад напруги в статорному колі малий і магнітний потік близький до сталого. На ділянці великих ковзань $s \gg s_k$ (пускова частина МХ) можна знехтувати величиною s_k/s як малою порівняно з величиною s/s_k і рівняння МХ матиме такий вигляд:

$$M \approx 2M_k \frac{s_k}{s}.$$

Таким чином, робоча частина МХ у вказаних межах ковзань орієнтовно може бути прийнята лінійною. Пускова частина МХ — нелінійна залежність.

Із рівнянь (2.57), (2.58), (2.63) та рис. 2.20 видно, що збільшення активного опору R_2' кола ротора приводить до зменшення пускового струму, підвищення пускового моменту і збільшення критичного і номінального значень ковзання. При збільшенні опору ротора МХ в робочій її частині стає більш м'якою.

Необхідно мати на увазі, що збільшення опору кола ротора приводить до небажаних явищ, головне з яких — збільшення втрат енергії (2.60), а отже, і зниження ККД двигуна.

Розрахунок механічної характеристики $\omega(M)$ АД з відомим числом пар полюсів за каталожними даними проводять за формулою (2.67) в такий послідовності:

1. З каталога виписують такі параметри: $P_{ном}$, кВт; $n_{ном}$, об/хв, або $s_{ном}$, в.о.; кратності моментів: пускового $M_n^* = \frac{M_n}{M_{ном}}$, мінімально-

го $M_{\min}^* = \frac{M_{\min}}{M_{ном}}$ і максимального $M_k^* = \frac{M_k}{M_{ном}}$.

2. Визначають синхронну кутову швидкість двигуна: $\omega_c = \omega_o = \frac{2\pi f_{ном}}{p}$, або синхронну частоту обертання магнітного поля статора: $n_o = \frac{60 f_{ном}}{p}$.

3. Визначають номінальний момент $M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = \frac{P_{ном} 10^3}{\omega_{ном}}$.

4. Визначають номінальне ковзання $s_{ном} = \frac{n_o - n_{ном}}{n_o}$.

5. Визначають критичний M_k , мінімальний $M_{мін}$ і пусковий M_n моменти.

6. За формулою (2.68) визначають критичне ковзання.

7. За формулою (2.67) для ряду заданих ковзань визначають значення обертових моментів, а за формулою (2.59) — відповідні кутові швидкості. При визначенні кутової швидкості, що відповідає мінімальному моменту, ковзання необхідно брати в межах (0,8...0,85). За визначеними даними будують МХ.

Розрахунок МХ за формулами (2.66), (2.67) дає добрі результати для двигунів з фазним ротором. Для двигунів з короткозамкненим ротором розрахункові значення моментів на пусковій частині характеристики (при ковзаннях від 1 до s_k) багато відрізняються від реальних.

Якщо не вимагається висока точність, то МХ АД з КЗР у двигунному режимі можна побудувати за координатами п'яти характерних точок:

- 1) синхронної швидкості: $\omega = \omega_o$, ($s = 0$), $M = 0$;
- 2) номінальної швидкості: $\omega = \omega_{ном}$, ($s = s_{ном}$), $M = M_{ном}$;
- 3) критичного моменту: $\omega = \omega_{к.д.}$, ($s = s_{к.д.}$), $M = M_{к.д.}$;
- 4) мінімального моменту: $\omega = \omega_{мін}$, ($s = 0,8 \text{ — } 0,85$), $M = M_{мін}$;
- 5) пускового моменту: $\omega = 0$, ($s = 1$), $M = M_{пвск.}$.

Побудувати природну МХ АД можна за допомогою типових характеристик $M / M_{ном} = f(\omega / \omega_o)$ у відносних одиницях, що наводять у заводських каталогах, наприклад, Володимирського електромоторного заводу (рис. 2.21). За типовими характеристиками та номінальними даними двигунів — синхронною швидкістю ω_c , номінальним моментом $M_{ном}$, кратностями пускового $M_p / M_{ном}$ і максимального $M_k / M_{ном}$ моментів - складають табл. 2.3 для розрахунків і за її даними будують природну МХ.

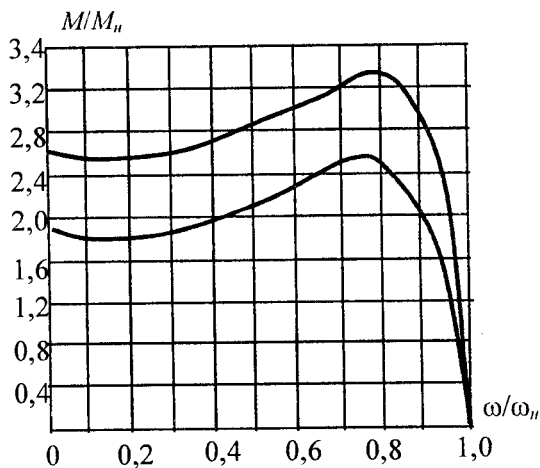


Рис. 2.21. Типова механічна характеристика індексу І асинхронного двигуна Володимирського електромоторного заводу

Таблиця 2.3

ДАНІ ДЛЯ ПОБУДОВИ МХ АД ІНДЕКСУ І

ω/ω_c , в. о.	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,76	0,8	0,9	1,0
$M/M_{\text{ном}}$, в. о.	2,0	1,9	1,9	1,95	2,1	2,2	2,3	2,45	2,5	2,45	2,0	0
ω , рад/с	$\omega_i = (\omega/\omega_c) \cdot \omega_c$											
M , Нм	$M_i = (M/M_{\text{ном}}) \cdot M_{\text{ном}}$											

Штучні МХ АД можна одержати такими способами: зміною підведеної до двигуна напруги і частоти струму мережі, вмиканням зовнішнього активного або індуктивного опору в коло статора або ротора.

Вмикання додаткових резисторів $Z_{l\partial}$ в коло статора

Рівняння для розрахунку штучної МХ АД при увімкненому додатковому опорі в колі обмотки статора можна записати на основі

$$(2.66) \text{ у вигляді: } M_{(Rl\partial)} = \frac{M_{k(Rl\partial)}(2+q)}{\frac{s}{s_{k(Rl\partial)}} + \frac{s_{k(Rl\partial)}}{s} + q},$$

де $M_{(Rl\partial)}$ — максимальний момент асинхронного двигуна при увімкненому додатковому опорі в колі обмотки статора; $s_{k(Rl\partial)}$ — кри-

тичне ковзання двигуна при увімкненому додатковому опорі в колі обмотки статора.

Критичне ковзання асинхронного двигуна в залежності від того, який додатковий опір (активний чи індуктивний) увімкнений в коло обмотки статора, буде при активному додатковому опорі:

$$s_{k(R1\sigma)} = \frac{R'_2}{\sqrt{(R_1 + R_{1\sigma})^2 + X_k^2}}, \text{ при індуктивному додатковому опорі:}$$

$$s_{k(X1\sigma)} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_k + X_{1\sigma})^2}}.$$

Таким чином, введення в коло статора АД додаткового опору (рис. 18, а), приводить до зменшення критичного ковзання s_k (2.63) і критичного моменту M_k (2.64), а також до зменшення пускового моменту M_n (2.65) і струму (2.58).

Оскільки швидкість ідеального холостого ходу ω_0 не залежить від $Z_{1\sigma}$, то штучні МХ можна представити сімейством кривих при $Z_{1\sigma} = \text{var}$ у вигляді, наведеному на рис. 2.22. Всі штучні МХ розташовуються в 1-му квадранті ліворуч природної, побудованої при $Z_{1\sigma} = 0$, причому більшому значенню $Z_{1\sigma}$ відповідає більший нахил штучних МХ, які розташовані нижче природної.

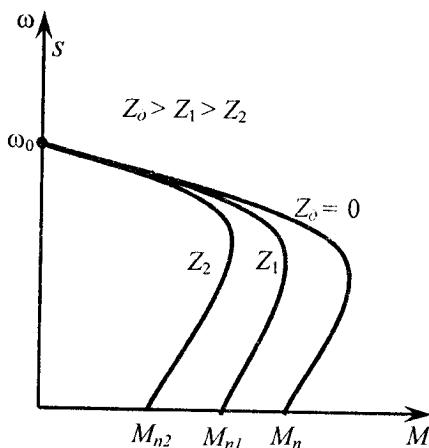


Рис. 2.22. Механічні характеристики АД при наявності в колі обмотки статора додаткових резисторів $Z_{1\sigma}$

Вмикання додаткових резисторів $R_{2\partial}$ в коло ротора

Штучну МХ, що відповідає заданому значенню додаткового опору $R_{2\partial}$, ввімкненого в коло фазного ротора, знаходять перерахуванням ковзань за формулою:

$$s_{ш} = s_n \frac{R'_2 + R_{2\partial}}{R'_2}, \quad (2.70)$$

де $s_{ш}$ і s_n — ковзання на штучній і природній МХ; R'_2 і R'_2 — зведені до обмотки статора активні опори фази ротора і додаткового реостата.

Опір фази ротора визначають:

$$R_2 = \frac{E_{2ном}}{I_{2н} \sqrt{3}} s_{ном} = R_{ном} s_{ном}, \quad (2.71)$$

де $R_{ном} = \frac{E_{2ном}}{\sqrt{3} I_{2ном}}$ — номінальний опір фази ротора, Ом; $E_{2ном}$ —

ЕРС ротора при $s = 1,0$; $I_{2ном}$ — номінальний струм ротора.

Двигуни з фазним ротором складніші за конструкцією, дорожчі і менш надійні в експлуатації, ніж короткозамкнені, але завдяки можливості змінювати в них опір кола ротора можна регулювати параметри їх механічних характеристик.

Відомі електричні модифікації асинхронних двигунів: з підвищеним пусковим моментом та підвищеним ковзанням, багатошвидкісні, з фазним ротором, однофазні.

Для підвищення початкового пускового моменту застосовують АД з короткозамкненим ротором спеціальних конструкцій. Ротор такого двигуна має дві клітки, розташовані концентрично, або глибокі пази з високими і вузькими стержнями. Пускова обмотка з більшим активним опором розташована безпосередньо біля циліндричної поверхні ротора, завдяки чому має низьку індуктивність. Робоча обмотка розміщена глибше та має малий активний опір і велику індуктивність. Оскільки під час пуску частота струму в роторі зменшується від частоти мережі до частоти при номінальній кутовій швидкості, то можна вважати, що пускова обмотка забезпечує пуск із значним опором ротора, а робоча діє в усталеному режимі на природній характеристиці з малим активним опором.

Таким чином, активний опір обмотки ротора у пусковий період значно більший, ніж при номінальній кутовій швидкості внаслідок

поверхневого ефекту, тому і втрати потужності зростають тільки при пуску. Пусковий момент і пусковий $\cos\phi$ у цих двигунів більший, ніж у двигунів загальнопромислового виконання.

Електродвигуни з підвищеним пусковим моментом використовують для привода машин та механізмів, які мають великі статичні та інерційні навантаження при пуску: компресори, конвеєри, поршневі насоси та ін.

Асинхронні двигуни з підвищеним ковзанням використовують для привода робочих механізмів (молоти, преси тощо), яким в режимі S3 потрібні короточасні значні крутні моменти. Обмотки їх роторів мають дещо вищий активний опір, ніж у двигунів загального використання. Номінальне ковзання таких двигунів у 2—3 рази вище ковзання машин загального використання і становить $s_{\text{ном}} = 0,4 \dots 0,12$. Внаслідок цього погіршуються енергетичні показники двигунів.

Характеристики багатошвидкісних і однофазних двигунів розглядаються у відповідних підрозділах підручника.

2.2.4. Гальмівні режими трифазних асинхронних двигунів

Для АД застосовують такі способи гальмування: рекуперативне, противмикання та електродинамічне гальмування із збудженням постійним або змінним струмом.

Гальмування з поверненням активної енергії в мережу (рекуперативне) виникає, коли кутова швидкість ротора перевищує синхронну ($\omega > \omega_0$). Це може статися при: частотному керуванні і зниженні частоти перетворювача; перемиканні багатошвидкісного двигуна з меншого числа пар полюсів на більше (з вищої швидкості на нижчу); спуску вантажу. В усіх цих випадках АД працює як асинхронний генератор паралельно з мережею живлення. При цьому активна потужність віддається в мережу і має напрямок, протилежний тому, що відповідає роботі в режимі двигуна. Реактивна потужність споживається з мережі як і в режимі двигуна.

При частотному керуванні під час рекуперативного гальмування керований перетворювач частоти повинен працювати в режимі інвертора, щоб прийняти енергію гальмування і передати її в мережу. Механічні характеристики режиму рекуперативного гальмування описуються рівняннями (2.66) і (2.67), в яких ковзання, критичне ковзання і максимальний момент мають від'ємні значення.

Механічні характеристики АД, що відповідають рекуперативним гальмівним режимам, наведено на рис.2. 23. МХ 1', 2' і 5' — при відсутності зовнішнього гальмівного резистора. МХ 3', 4' і 6' — при $R_{z.p} > 0$. Перемикання багатшвидкісного двигуна з вищої швидкості на нижчу показано на рис. 2.23. Припустимо, що АД працював

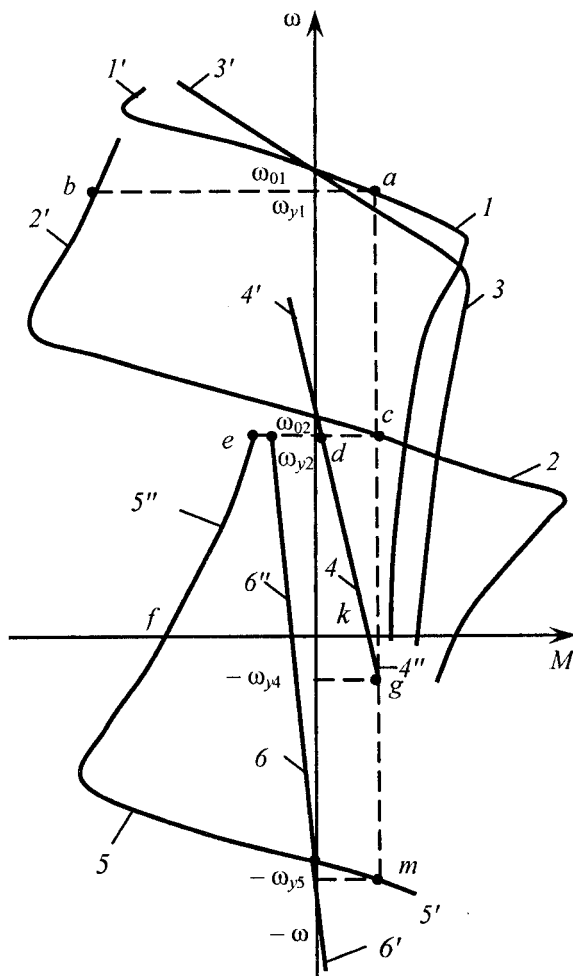


Рис. 2.23. Механічні характеристики АД: 1, 2, 5, ($R_\delta = 0$), 3, 4, 6, ($R_\delta > 0$), — двигунний режим; 1', 2', 3', 4', 5', 6' — рекуперативне гальмування; 4'', 5'', 6'' — гальмування противмиканням

на МХ 1 в точці «а» з кутовою швидкістю $\omega_{y,1}$. При перемиканні на нижчу швидкість робоча точка АД переходить в точку «в» на МХ 2', ділянка якої «b — ω_{02} » відповідає рекуперативному гальмуванню. В точці «с» МХ 2 АД працює з усталеною швидкістю $\omega_{y,2}$. Рекуперативне гальмування може бути реалізовано в ЕП вантажопідйомних механізмів при спуску вантажу. Для цього (після реверсування) АД вмикається в точці «f» в напрямку спуску вантажу МХ 5. Після розгону він працює в точці «т» (МХ 5') з усталеною кутовою швидкістю — $\omega_{y,5}$. При цьому здійснюється процес спуску вантажу з віддачею активної енергії в мережу.

Гальмування противмиканням може бути виконано двома шляхами.

Один з них виконується для приводів як з реактивними так і активними моментами опору зміною чергування двох фаз напруги живлення АД. Припустимо, що АД працює в точці «с» двигунного режиму на МХ 2 (рис. 2. 23). При зміні чергування двох фаз робоча точка переходить в точку «е» на МХ 5'', ділянка якої «ef» відповідає гальмуванню противмиканням. В момент зупинки в точці «f» двигун вимикають.

При гальмуванні противмиканням, як правило, необхідно обмежувати струм і момент АД, що досягається ввімкненням додаткових резисторів в коло статора або ротора (МХ 6'').

Другий шлях використовується тільки для АД з ФР у приводах з активним моментом опору (наприклад, у приводах вантажопідйомних механізмів). Для переходу з режиму двигуна (точка «с» МХ 2 рис. 2.23) в режим гальмування противмиканням досить увімкнути в коло фазного ротора достатню величину додаткового опору, не змінюючи схеми вмикання обмоток статора. Двигун переходить на МХ 4 в точку «d» і починається процес гальмування. Напрямок обертання ротора змінюється, коли момент статичних опорів РМ активний і більший від моменту, який може розвивати ЕД. Після точки «к» РМ обертає ротор ЕД проти напрямку обертання магнітного поля статора, який створює гальмівний момент (МХ 4''). При цьому здійснюється процес спуску вантажу з усталеною швидкістю — $\omega_{y,4}$ (точка «g»).

Недоліками гальмування противмиканням АД є великі втрати енергії і мала жорсткість МХ. Аналітично МХ АД у режимі гальмування противмиканням описуються тими ж рівняннями, що й МХ

двигунного режиму. При цьому слід відзначити, що режим противмикання має місце при ковзаннях, більших за одиницю.

Електродинамічне гальмування. Щоб створити режим електродинамічного гальмування АД із збудженням постійним струмом, треба вимкнути двигун з мережі змінного струму і ввімкнути його в мережу постійного струму за однією із схем, зображених на рис. 2.24, а), обмеживши постійний струм до значення $I_{пост} = (3 \dots 4) I_{х.х}$, де $I_{х.х}$ — струм холостого ходу двигуна. Постійний струм, що проходить в обмотці статора, створює нерухоме в просторі магнітне поле, в якому обертається ротор ЕД.

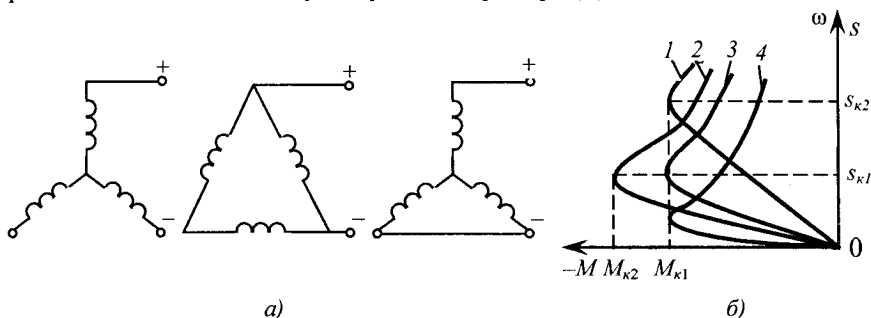


Рис. 2.24. Деякі схеми з'єднання обмоток статора (а) та механічні характеристики АД при динамічному гальмуванні (б)

В обмотці ротора наводиться ЕРС, під дією якої в замкненому колі цієї обмотки виникає змінний струм. Взаємодією струму ротора з нерухомим магнітним полем статора створюється гальмівний момент. При зниженні кутової швидкості ротора до нуля ЕРС, струм в обмотці ротора і гальмівний момент також зменшуються до нуля. Після зупинки ротора двигун вимикають.

Рівняння МХ АД в режимі електродинамічного гальмування при ненасиченій магнітній системі має вигляд:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{\omega}{\omega_k} + \frac{\omega_k}{\omega}}, \quad (2.72)$$

де ω_k — кутова швидкість, що відповідає критичному моменту M_k і ковзанню s_k в режимі динамічного гальмування. Координати точки екстремуму залежності $M(s)$ визначаються за формулами:

$$M_k = \frac{m_1 I_n^2 X_\mu^2}{2\omega_0 (X_\mu + X'_2)}, \quad (2.77)$$

$$s_k = \frac{R'_2}{X_\mu + X'_2}, \quad (2.78)$$

де X_μ — реактивний опір контуру намагнічування двигуна; I_n — постійний струм, що проходить по обмотці статора; X'_2 — реактивний опір ротора при частоті мережі.

Механічні характеристики АД (рис. 2.24, б), що працює в режимі електродинамічного гальмування одержують зміною опору додаткового резистора $R_{2\partial}$ в колі ротора і постійного струму I_n . Характеристика 3 відповідає певним значенням струму I_{n1} і опору резистора $R_{2\partial 1}$, максимальний момент на ній дорівнює M_{k1} , а ковзання, що йому відповідає — s_{k1} . Збільшення додаткового опору з $R_{2\partial 1}$ до $R_{2\partial 2}$ при $I_{n1} = \text{const}$ відповідно з (2.73) не приведе до зміни максимального моменту, в той час як ковзання s_{k2} відповідно до (2.74) зросте. Цьому режиму відповідає характеристика 1. Збільшення струму I_n до $I_{n2} > I_{n1}$ при $R_{2\partial 1} = \text{const}$ приведе відповідно з (2.73) до збільшення максимального моменту пропорційно квадрату сили струму (характеристика 2), а ковзання, що йому відповідає — s_{k1} . При відсутності додаткового опору в колі ротора жорсткість характеристики найбільша (крива 4).

Якщо одночасно варіювати значеннями величин I_n і $R_{2\partial}$, можна отримати бажаний вигляд МХ АД в режимі динамічного гальмування.

2.2.5. Способи пуску, обмеження пускових струмів і моментів трифазних асинхронних двигунів

Пуск асинхронних двигунів може бути прямим або непрямим.

Прямий пуск застосовують для АД з короткозамкненим ротором малої і середньої потужності, який здійснюють безпосереднім вмиканням його в електричну мережу. Основним недоліком прямого пуску є великі значення пускового струму і моменту. Великий пус-

ковий струм зменшує надійність роботи апаратури керування, захисту й автоматики тощо. Великий пусковий момент сприяє швидкому спрацюванню передавального механізму.

При пуску порівняно потужних двигунів ($P_n \geq 11 \text{ кВт}$) від сільськогосподарських мереж через великі пускові струми сильно знижується напруга як на їх затискачах, так і на інших двигунах, що живляться від цієї мережі. Пусковий момент двигуна при зниженій напрузі значно знижується, що може унеможливити пуск такого двигуна в даній точці мережі. Крім того, сильне зниження напруги на працюючих двигунах може призвести до їх зупинки під навантаженням.

Для усунення цих небажаних явищ при пуску потужних АД з короткозамкненим ротором застосовують різні способи обмеження пускових струмів: перемикання обмотки статора з «зірки» на «трикутник»; вмикання в коло статора активних або реактивних опорів; регулюванням напруги автотрансформатором або напівпровідниковим перетворювачем напруги. Двигуни з фазним ротором вмикають з введенням в коло ротора пусковим реостатом.

Пуск за допомогою активних опорів, ввімкнених у коло статора, застосовують для двигунів середньої потужності напругою до 1000 В, а пуск за допомогою реактивних опорів — здебільшого для потужних високовольтих двигунів. Завдяки опорам знижується напруга на затискачах двигуна, тому відповідно зменшуються пускові струм і момент.

За допомогою автотрансформаторів пускають потужні високовольтих двигуни. Зменшення пускового струму та пускового моменту двигуна при цьому досягається завдяки зниженню напруги, підведеної до його статора.

Пуск з перемиканням обмотки статора з «зірки» на «трикутник» застосовують для двигунів з короткозамкненим ротором, які в дану мережу вмикаються за схемою «трикутник». Наприклад, двигун напругою Δ/Y , 380/660 В при живленні з електромережі 380 В. У перший момент пуску обмотку статора з'єднують «зіркою». При цьому на кожну фазу обмотки буде подана напруга U в $\sqrt{3}$ раз менша від лінійної напруги U_1 електромережі, тобто $U_{\phi Y} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}$. Струм обмо-

ток зменшиться в $\sqrt{3}$ раз, тобто: $I_{\phi \lambda} = \frac{U_{\phi Y}}{Z_{\phi}} = \frac{U_1}{\sqrt{3}Z_{\phi}}$, а $I_{nY} = I_{\phi Y} =$

$= \frac{U_1}{\sqrt{3}Z_\phi}$. Коли обмотки двигуна з'єднані в «трикутник», то: $U_{\phi\Delta} = U_1$;

$$I_{\phi\Delta} = \frac{U_1}{Z_\phi}; I_{\lambda\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_1}{Z_\phi}.$$

Відношення пускових струмів і моментів в залежності від схеми:

$$\frac{I_{\lambda Y}}{I_{\lambda\Delta}} = \frac{U_1 Z_\phi}{\sqrt{3} Z_\phi U_1 \sqrt{3}} = \frac{1}{3}; \frac{M_Y}{M_\Delta} = \frac{U_{\phi Y}^2}{U_{\phi\Delta}^2} = \frac{U_1^2}{(\sqrt{3})^2 U_1^2} = \frac{1}{3},$$

тобто, пусковий лінійний струм і пусковий момент двигуна зменшуються втричі.

2.2.6. Розрахунок пускових резисторів, увімкнених в коло статора та ротора

Пуск із симетрично ввімкненими опорами (рис. 2.18, а) застосовують для зменшення пускових струмів і моментів. При несиметрично ввімкнених опорах у коло статора знижується пусковий момент.

Пусковий симетричний опір для обмеження пускових моменту і струму:

$$R_n = \sqrt{\frac{Z_k^2}{M_{n.u}^*} - X_k^2} - R_k, \quad (2.75)$$

де Z_k — повний опір короткого замикання двигуна; X_k і R_k — реактивна і активна складові опору Z_k ; $M_{n.u}^* = M_{n.u}/M_n$ — відносний пусковий момент на штучній характеристиці, тобто, відношення пускового моменту на штучній характеристиці до пускового моменту на природній характеристиці.

Пусковий струм на штучній характеристиці визначається за виразом:

$$I_{n.u} = I_{n,n} \sqrt{M_{n.u}^*}, \quad (2.76)$$

де $I_{n,n}$ — пусковий струм на природній характеристиці.

Значення опору пускового резистора в одній фазі статора для обмеження пускового моменту визначають за формулою:

$$R_{n.o} = \frac{2}{3} Z_k \left[\frac{1 - M_{n.u}^* \cos \varphi_k}{2 M_{n.u}^*} + \sqrt{\left(\frac{1 - 2 M_{n.u}^*}{2 M_{n.u}^*} \right)^2 \cos^2 \varphi_k + \frac{1 - M_{n.u}^*}{M_{n.u}^*}} \right]. \quad (2.77)$$

Якщо прийняти МХ АД з фазним ротором на робочій ділянці лінійною, то залежність між критичним ковзанням на природній $s_{к.п}$ і штучній $s_{к.ш}$ характеристиках та відповідними їм активними опорами кола ротора буде:

$$\frac{s_{к.п}}{s_{к.ш}} = \frac{R_2'}{R_2' + R_{20}}. \quad (2.78)$$

Звідки додатковий опір в колі ротора:

$$R_{20} = R_2 \left(\frac{s_{к.ш}}{s_{к.п}} - 1 \right), \quad (2.79)$$

де R_2 — опір фази ротора.

Щоб забезпечити пуск двигуна з фазним ротором при $M_n = M_k$, (характеристика $R'_{20.2}$ на рис. 2.20, б) необхідно в коло ротора увімкнути опір

$$R_{20} = R_2 \left(\frac{1}{s_{к.п}} - 1 \right). \quad (2.80)$$

2.3. Механічні характеристики однофазних та універсальних колекторних двигунів

Однофазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором випускаються невеликої потужності (до 1,5 кВт) і використовуються для привода малопотужних механізмів у сільському господарстві та побутових машин і електроінструментів. Однофазні АД порівняно з трифазними мають дещо гірші технічні характеристики. Їх потужність складає не більш 70% від потужності трифазного АД того ж габариту. Крім того, вони мають меншу перевантажувальну здатність.

В пази статора однофазного АД закладають основну (робочу) РО і спеціальну пускову ПО (рис. 2.25) обмотки. Робоча обмотка звичайно займає 2/3 пазів статора, а пускова — решту. На статорі обмотки закладені так, що їх вісі зміщені одна від другої на 90° .

При пропусканні струму тільки через робочу обмотку пусковий момент двигуна дорівнює нулю (характеристика А на рис. 2.25, а). Для створення обертового магнітного поля, а значить і пускового моменту достатньо, щоб струм пускової обмотки в часі був зсунутий відносно струму робочої обмотки. Для цього послідовно в коло пускової обмотки вмикають конденсатори.

Однофазні двигуни бувають з пусковим, робочим, пусковим та робочим конденсаторами.

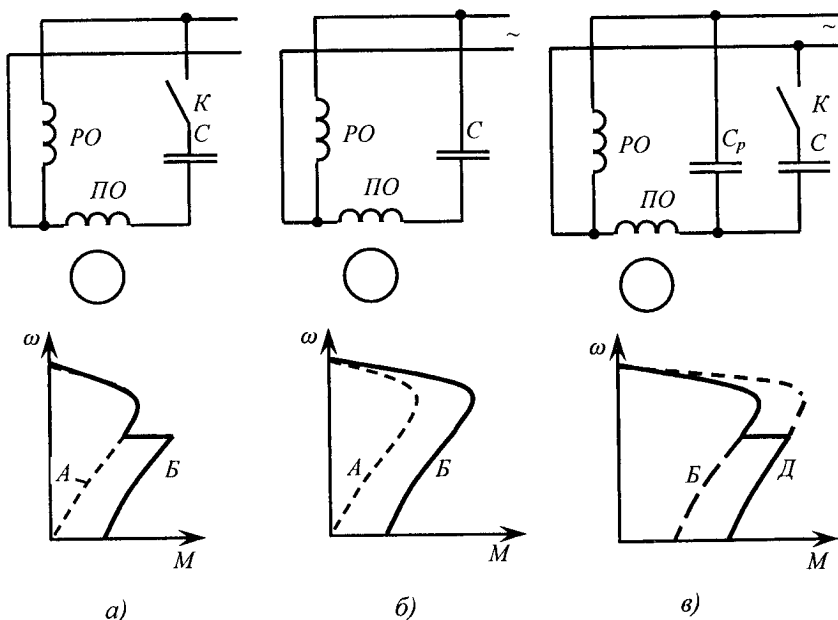


Рис. 2.25. Схеми вмикання і механічні характеристики однофазних двигунів:
 а) з пусковим конденсатором; б) з робочим конденсатором;
 в) з пусковим і робочим конденсатором

Пускова обмотка з пусковим конденсатором C_n вмикається тільки на час пуску. Пуск відбувається згідно з характеристикою Б (рис. 2.25, а). Після досягнення ротором двигуна швидкості, близької до 0,75 синхронної, її вимикають. Для автоматичного вимикання використовують відцентрові вимикачі та різного роду реле (струму, часу тощо).

Щоб збільшити потужність однофазного двигуна, його обмотки закладають в однакові кількості пазів з фазною зоною 90° . Пускову обмотку вмикають через робочу ємність C_p (рис. 2.25, б). Двигун працює на характеристиці Б.

Якщо для привода РМ потрібний двигун з більшою кратністю пускового моменту, застосовують двигун з пусковим і робочим конденсаторами (рис. 2.25, в), у якого робоча ємність C_p ввімкнена постійно, а пускова C_n — тільки на період пуску. Значення пускового і максимального моментів залежить від ємності конденсаторів. Двигун розганяється по характеристиці Д, а після вимикання пускового конденсатора переходить на характеристику Б.

Для зміни напрямку обертання конденсаторного двигуна міняють місцями кінці однієї з його обмоток — пускової або робочої.

В якості однофазного АД при необхідності можуть бути використані звичайні трифазні двигуни з короткозамкненим ротором. Існує ряд схем з'єднання обмоток трифазного двигуна при його вмиканні в однофазну мережу, але він в усіх випадках набуває властивостей однофазного АД.

Універсальний колекторний двигун (рис. 2.26) може працювати як на постійному, так і на змінному однофазному струмі. За конструктивним виконанням він подібний до малопотужних двигунів постійного струму послідовного збудження, але відрізняється від них будовою магнітопроводів ярма і полюсів та конструкцією обмоток збудження. В універсальному колекторному двигуні з метою зменшення втрат енергії на вихрові струми магнітопроводи якоря, ярма і полюсів набрані з листків електротехнічної сталі, а обмотки збудження мають відпайки.

Оскільки опір обмоток двигуна змінному струму більший, ніж постійному, то при однакових значеннях напруг джерел живлення швидкість обертання на змінному струмі буде меншою, ніж на постійному. Для забезпечення приблизно однакових швидкостей в мережу постійного струму двигун вмикають з повним числом витків обмоток збудження (затискачі $L+$ і $L-$), а в мережу змінного струму — із зменшеним числом витків (затискачі $L1$ і N). Швидкість обертання на змінному струмі збільшується за рахунок зменшення магнітного потоку. Колекторні двигуни, призначені для вмикання тільки в мережу змінного струму, мають два виводи.

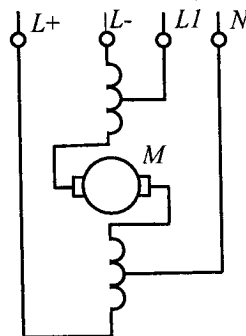


Рис. 2.26. Схема вмикання універсального колекторного двигуна

Електромеханічні та механічні характеристики універсальних колекторних двигунів подібні до відповідних характеристик двигунів постійного струму послідовного збудження (див. розділ 2.1).

Універсальні колекторні двигуни є основними двигунами привода ручних електричних машин. Завдяки високій швидкості обертання вони мають значно меншу масу і габарити, ніж асинхронні двигуни нормальної частоти з такою ж номінальною потужністю.

2.2.4. Механічна та кутова характеристики синхронного двигуна

Синхронні трифазні двигуни широко застосовують для привода механізмів, що не потребують регулювання кутової швидкості (насосів, компресорів, охолоджувальних машин та ін.). СД мають такі переваги порівняно з АД:

- 1) високий коефіцієнт потужності $\cos\varphi$, який дорівнює одиниці для малопотужних двигунів і може бути випереджаючим у потужних двигунів;
- 2) здатність роботи з випереджаючим $\cos\varphi$, коли він компенсує реактивну потужність, що споживається з мережі іншими АД;
- 3) високий ККД (96–98 %), що на (1...1,5) % перевищує ККД АД такого ж габариту і кутової швидкості;
- 4) можливість короткочасного збільшення перевантажувальної здатності завдяки підсиленню збудження двигуна. Перевантажувальна здатність СД звичайно дорівнює $M_{\max}/M_{\text{ном}} = 2...2,5$. Вона залежить від напруги мережі і струму збудження. Збільшуючи струм збудження понад номінальний, можна збільшити перевантажувальну здатність двигуна до $(3,5...4)M_{\text{ном}}$;
- 5) менша чутливість до відхилень напруги мережі від номінального значення. Обертовий момент ЕД залежить від величини магнітного потоку статора і магнітного потоку ротора. У зв'язку з тим, що магнітний потік ротора створюється постійним струмом збудника, зміна напруги в мережі впливає лише на величину магнітного потоку, створюваного обмоткою статора. Тому електромагнітний момент синхронного двигуна прямо пропорційний напрузі мережі;
- 6) більший максимальний момент ;
- 7) абсолютно жорстка механічна характеристика;
- 8) більша експлуатаційна надійність завдяки наявності більшого повітряного зазору між статором і ротором.

Статор СД аналогічний статору АД. Ротор виконаний з двома обмотками: обмоткою збудження постійного струму та короткозамкнутою пусковою обмоткою, яка забезпечує пускову МХ СД у вигляді однієї з кривих (рис. 2.27, а). Характеристика 1 забезпечує порівняно з характеристикою 2 більший підсинхронний (вхідний) момент $M_{a,1} > M_{a,2}$, тобто обертальний момент, який двигун розвиває при швидкості $0,95\omega_0$.

Підсинхронний момент буде тим більший, чим менший опір пускової обмотки двигуна, а пусковий момент — навпаки, тобто $M_{n1} < M_n$.

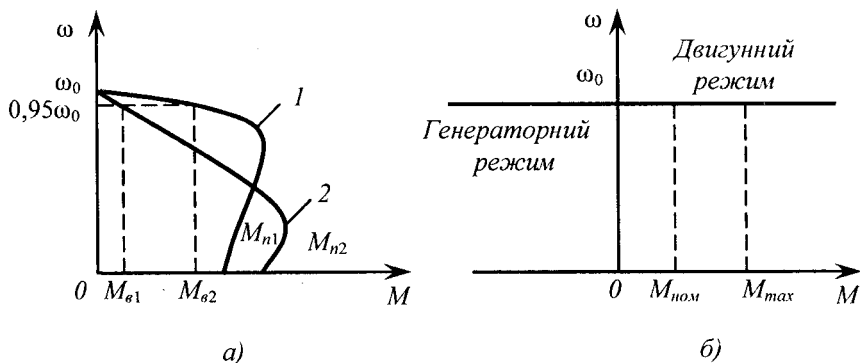


Рис. 2.27. Механічні характеристики СД: а) пускові; б) робоча

Вибір двигуна за видом проводиться залежно від МХ РМ. Двигун з малим пусковим і великим входним моментом використовують для привода механізмів з вентиляторною характеристикою. Для привода машин з великим пусковим моментом (компресори, прокатні стани та ін.) застосовують СД з великим пусковим і малим входними моментами.

Синхронний двигун запускають спочатку в асинхронному режимі прямим вмиканням у мережу. При цьому СД буде розганятися як АД завдяки наявності в ньому пускової короткозамкненої обмотки на роторі. Після розгону до підсинхронної швидкості в обмотку збудження двигуна подають струм від збудника і двигун втягується в синхронізм. В цьому випадку взаємодія магнітних полів статора і ротора створює сталий за напрямом момент. Механічна характеристика СД $\omega = f(M)$ (рис. 2.27, б) є горизонтальна лінія з ординатою ω_0 . Зростання навантаження вище максимального моменту $M_{\max}$ приводить до випадання ЕД з синхронізму.

Важливою для аналізу СД є кутова характеристика, яка відображає залежність моменту від внутрішнього кута θ , яким є кут між ЕРС статора E і фазною напругою мережі U , або між віссю обертового магнітного поля статора та віссю магнітного поля ротора.

Для визначення кутової характеристики скористаємося спрощеною векторною діаграмою СД (рис. 2.28, а), знехтувавши активним опором статора.

Електромагнітна потужність двигуна дорівнює потужності, яка споживається з мережі:

$$P_1 = M\omega_o = 3UI \cos \varphi, \quad (2.81)$$

де U — фазна напруга мережі; I — фазний струм статора; φ — кут зсуву між векторами напруги і струму.

Із векторної діаграми видно, що проєкції векторів напруги U і ЕРС E на вісь струму I однакові, тобто:

$$U \cos \varphi = E \cos(\varphi - \theta). \quad (2.82)$$

З допоміжного трикутника ABC і трикутника ABO визначають:

$$\cos(\varphi - \theta) = \frac{AB}{AC} = \frac{U \sin \theta}{I \cdot X_c}. \quad (2.83)$$

$$\text{Тоді } U \cos \varphi = EU \frac{\sin \theta}{I \cdot X_c}, \quad (2.84)$$

де X_c — реактивний опір статора.

Підставивши до виразу (2.82) замість $U \cos \varphi$ відповідно $UE \frac{\sin \theta}{I \cdot X_c}$ знаходимо:

$$P = 3IUE \frac{\sin \theta}{I \cdot X_c} = 3UE \frac{\sin \theta}{X_c}. \quad (2.85)$$

Оскільки $I_{k.з} = \frac{U}{X_c}$ — струм короткого замикання, то:

$$P = 3I_{k.з} E \cdot \sin \theta. \quad (2.86)$$

Електромагнітний момент двигуна:

$$M = \frac{3I_{k.з} E \cdot \sin \theta}{\omega_o}. \quad (2.87)$$

При $\Theta = 90^\circ$ електромагнітний момент має максимальне значення:

$$M_{\max} = \frac{3EI_{k.з}}{\omega_o}. \quad (2.88)$$

Тоді вираз кутової характеристики СД має такий вигляд (рис. 2.28, б):

$$M = M_{\max} \sin \theta. \quad (2.89)$$

СД може стійко працювати тільки при зміні кута Θ в межах від 0 до 90° .

Подальше зростання кута Θ призводить до випадання двигуна із синхронізму.

Синхронний двигун може працювати в усіх основних енергетичних режимах. Режим генератора послідовно з мережею (гальмуванням противмиканням) використовується рідко, тому що переведення в цей режим супроводжується значним кидком струму і потребує застосування складних схем керування. Частіше використовується режим динамічного гальмування, при якому статор вимикається із мережі і замикається на резистори. Обмотка збудження продовжує одержувати живлення від джерела постійного струму. Синхронний двигун може працювати в режимі рекуперативного гальмування. Якщо зовнішнє навантаження від'ємне, кут Θ змінює знак і СД починає віддавати активну енергію в мережу. Особливістю генераторного режиму СД є те, що в перезбудженому стані він може віддавати у мережу і реактивну енергію.

СД можуть працювати в режимі динамічного гальмування, при якому обмотки статора вимикають з мережі і замикають на резистори. Для підвищення ефективності електродинамічного гальмування СД його обмотку збудження доцільно живити від мережі змінного струму через випрямляч або від збудника, що приводиться в рух іншим двигуном. При живленні від власного збудника внаслідок зменшення напруги збудження одночасно із сповільненням СД струм збудження зменшується, що призведе до зменшення гальмівного моменту двигуна, а отже, до збільшення часу гальмування.

Недоліками СД є: значна вартість і відносно малий пусковий момент; складність схеми керування і потреба збудника або перетворювача змінного струму на постійний; неможливість регулювання кутової швидкості у випадку, коли двигун живиться від мережі незмінної частоти.

Оскільки СД запускають в асинхронному режимі, то при зниженні напруги, яку подають до двигуна для зменшення пускового струму СД, сила струму двигуна знижується пропорційно першому ступеню напруги, тоді як пусковий момент знижується пропорційно другому її ступеню.

Електропривод з СД до недавнього часу був нерегульованим, але з появою сучасних електронних ПЧ ситуація радикально змінилась, з'явилися малопотужні частотно регульовані ЕП на основі СД з постійними магнітами, ЕП з синхронними реактивними машинами.

Електронні комутатори, що виконують безконтактне перемикання обмотки машини, стали основним елементом так званих безконтактних двигунів постійного струму тощо.

Особливе місце в ряду нових ЕП, завдяки успіхам електронної техніки, займає дискретний електропривод, який перетворює електричний сигнал (код, цифру) в дозоване кутове або лінійне переміщення, а також силова версія цього привода — вентильно-індукторний електропривод, який з 90-х років ХХ сторіччя інтенсивно розвивається.

Принцип дії вентильно-індукторної машини (ВІМ) оснований на притяганні феромагнітного тіла до збудженого електромагніта — індуктора. Одержані попередні результати показали, що при керуванні за спеціальною схемою вентильно-індукторний електропривод перевищує за основними показниками традиційний частотно регульований асинхронний електропривод і займе достойне місце в ряду регульованих ЕП завдяки простоті, низькій вартості і високій надійності машини.

2.5. Приклади

Приклад 1. Розрахувати і побудувати природну та штучну при зниженій напрузі $U = 0,8U_{\text{ном}}$ механічні характеристики $\omega = f(M)$ двополюсного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу АИР90L2 за каталожними даними: $P_{\text{ном}} = 3,0$ кВт; $n_{\text{ном}} = 2850$ об/хв. Кратності моментів: $M_n^* = 2$; $M_{\text{мін}}^* = 1,6$; $M_k^* = 2,2$.

Параметри механічних характеристик розраховуємо при ковзаннях 0; $s_{\text{ном}}$; 0,1; s_k ; 0,4; 0,6; 0,85; 1,0.

Розв'язок

1. Синхронна швидкість двигуна:

$$\omega_o = \frac{2\pi f_{\text{ном}}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{1} = 314 \text{ рад/с.}$$

2. Номінальна кутова швидкість:

$$\omega = \omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 2850}{30} = 299 \text{ рад/с.}$$

3. Номінальне ковзання:

$$s_{\text{ном}} = \frac{\omega_o - \omega_{\text{ном}}}{\omega_o} = \frac{314 - 299}{314} = 0,048.$$

4. Критичне ковзання визначаємо за формулою (2.68):

$$s_k = \frac{0,048 \cdot [2,2 + \sqrt{2,2^2 + 2 \cdot 0,048(2,2 - 1)} - 1]}{1 - 2 \cdot 0,048(2,2 - 1)} = 0,23.$$

5. Кутова швидкість при критичному ковзанні:

$$\omega_k = \omega_o(1 - s_k) = 314(1 - 0,23) = 242 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

6. Кутова швидкість при мінімальному моменті:

$$\omega_{\min} = \omega_o(1 - s_{\min}) = 314(1 - 0,85) = 47 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

7. Номінальний момент:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} 10^3}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{3,0 \cdot 10^3}{299} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Максимальний момент:

$$M_k = M_k^* M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 10 = 22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9. Мінімальний момент:

$$M_{\min} = M_{\min}^* M_{\text{ном}} = 1,6 \cdot 10 = 16 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

10. Пусковий момент:

$$M_n = M_n^* M_{\text{ном}} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

11. Момент при ковзанні $s = 0,1$:

$$M_{0,1} = \frac{2M_k(1 + s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2s_k} = \frac{2 \cdot 22(1 + 0,23)}{\frac{0,1}{0,23} + \frac{0,23}{0,1} + 2 \cdot 0,23} = 17 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

12. Кутові швидкості і моменти при інших ковзаннях визначаємо аналогічно.

13. Значення моментів штучної характеристики визначаємо за виразом:

$$M_{\text{ш}} = M_{np}(U/U_{\text{ном}})^2 = M_n \cdot 0,8^2.$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 2.4

2.4. Дані для побудови природної і штучної МХ АД

1	s	0	0,048	0,1	0,23	0,4	0,6	0,85	1
2	ω , рад/с	314	299	283	242	188	126	47	0
3	$M_{np}, H \cdot m$	0	10	17	22	19,5	15,7	16	20
4	$M_{ш}, H \cdot m$	0	6,4	11	14	12,5	10	10	13

За даними розрахунків на рис. 2.28 побудовані природна і штучна механічні характеристики.

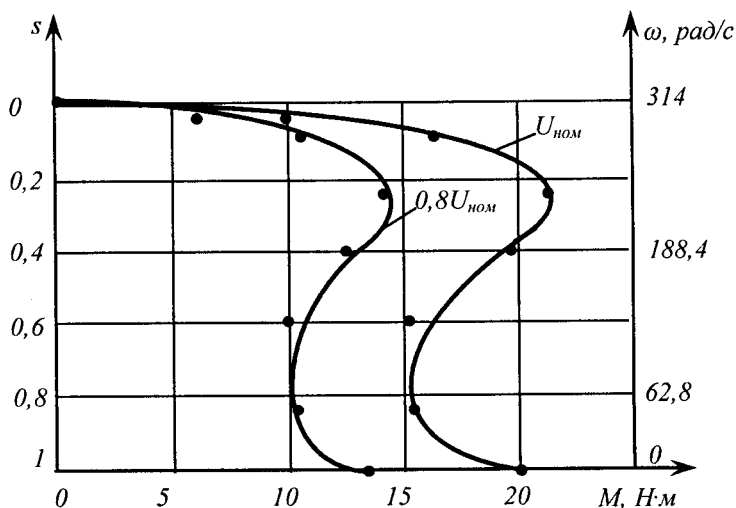


Рис. 2.28. Механічні характеристики двигуна АІР90L2

Приклад 2. Розрахувати дані для побудови механічної характеристики $\omega = f(M)$ асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу АІРМ132М2 з використанням типових механічних характеристик у відносних одиницях $\frac{M}{M_{ном}} = f\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)$ Технічні дані

двигуна: $P_{ном} = 11$ кВт; $n_{ном} = 2915$ об/хв.; $M_{ном} = 36$ Н·м; $M_{п.}^* = 2,5$; $M_{к.}^* = 3,3$; типова механічна характеристика індексу І (рис. 2.19).

Розв'язок. 1. Синхронна швидкість обертання:

$$\omega_c = 60f/p = 60 \cdot 50/1 = 314 \text{ рад/с.}$$

2. З каталогу Володимирського електромоторного заводу визначаємо координати механічної характеристики індексу I у відносних одиницях $M^* = f(\omega^*)$. Результати заносимо в табл. 2.2.

3. За формулами $M = M^* \cdot M_{ном}$ і $\omega = \omega^* \cdot \omega_c$ розраховуємо значення моментів і швидкості в іменованих одиницях. Результати заносимо в табл. 2.5.

2.5. Дані для побудови природної МХ АД АИРМ132М2

M_i^*	2,5	2,25	2,7	2,8	3,0	3,2	3,3	3,25	0
ω_i^*	0	0,1	0,4	0,5	0,6	0,7	0,78	0,8	1,0
$M = M^* \cdot M_{ном}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	90	81	97	101	108	115	119	117	0
$\omega = \omega^* \cdot \omega_c, \text{ рад/с}$	0	31	126	157	188	220	245	351	314

2.6. Питання для самоконтролю

1. При яких допущеннях виведено рівняння механічної характеристики АД?
2. На основі схеми заміщення фази АД виведіть рівняння його електромеханічної характеристики.
3. Як залежить момент АД від підведеної до нього напруги?
4. Що таке критичне ковзання АД і від чого воно залежить?
5. Які висновки можна зробити при аналізі рівняння МХ АД у параметричній формі?
6. Яким рівнянням описується залежність пускового моменту АД від ковзання?
7. За якими характерними точками можна побудувати природну механічну характеристику АД з короткозамкненим ротором?
8. Що таке типова МХ АД? Для чого її використовують?
9. Які є електричні модифікації АД?
10. Як змінюється пусковий момент АД з фазним ротором при збільшенні активного опору кола ротора?
11. Назвіть способи електричного гальмування АД.

12. Як здійснити гальмування противмиканням АД у приводах з активним і реактивним моментами статичних опорів?
13. Як збільшити гальмівний момент при динамічному гальмуванні АД?
14. Назвіть способи пуску асинхронних електродвигунів. Для яких АД застосовують пуск за допомогою автотрансформаторів?
15. Як змінюються пусковий струм і пусковий момент АД при пуску з перемиканням обмоток із «зірки» на «трикутник»?
16. За якою схемою вмикають АД в мережу для обмеження пускового струму і пускового моменту?
17. За якими схемами вмикають однофазні АД?
18. Який вигляд має механічна характеристика синхронного двигуна?
19. Що таке кутова характеристика СД?
120. Для привода яких робочих машин застосовують СД з малим вхідним моментом?; з великим вхідним моментом?
21. Які режими електричного гальмування застосовують у приводах з синхронними двигунами?



3. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

3.1. Загальні положення

Режими роботи електроприводів поділяються на усталені і неусталені.

Усталеним називається режим, при якому електропривод працює з постійними струмом, моментом, швидкістю обертання і температурою. Режими, при яких ці параметри змінюються, називаються неусталеними.

Неусталені режими умовно можна поділити на тривалі і короткочасні. Тривалі (безперервні) неусталені режими спостерігаються при роботі привода із змінним навантаженням, коли момент статичних опорів безперервно змінюється (дробарки, пилорами, преси, валки прокатних станів тощо), а також у регульованих приводах з безперервною зміною швидкості обертання відповідно до заданого закону. Короткочасні неусталені режими виникають при переході від одного усталеного стану до іншого, тому їх називають перехідними режимами або перехідними процесами. До них належать процеси розгону, гальмування, реверсування, зміни швидкості обертання при регулюванні або при зміні навантаження тощо.

Необхідність вивчення перехідних режимів обумовлена рядом суттєвих обставин. Як буде показано нижче, при виборі електродвигуна за потужністю користуються навантажувальними діаграмами, тобто залежностями статичної потужності або статичного моменту виробничого механізму від часу: $P_c = f(t)$ або $M_c = f(t)$. В більшості випадків статичне навантаження на валу двигуна змінюється. Але через наявність махових мас в системі електродвигун — робоча машина момент двигуна змінюється інакше, ніж момент статичного навантаження. Тому доводиться спочатку попередньо вибрати тип

і потужність двигуна, розраховувати перехідні процеси, будувати навантажувальну діаграму двигуна і лише тоді перевіряти правильність попереднього вибору.

У ряді випадків перехідні режими впливають на продуктивність робочих машин і якість перероблюваного або вироблюваного продукту (штампувальні верстати, дробарки зерна при ручному завантаженні, текстильні, папероробні машини тощо). Так, якщо у штампувального верстата напрямок руху пуансона змінюється шляхом реверсування електродвигуна, то для підвищення продуктивності верстата потрібно зменшувати час перехідних процесів пуску і гальмування. При великих коливаннях швидкості обертання роторів дробарок зерна від зміни навантаження також знижується продуктивність машин і погіршується якість подрібнення.

Прискорення, які виникають у виробничих механізмах і передачах при перехідних процесах, можуть перевищити допустимі значення і привести до поломки окремих ланок кінематичної схеми, псування продукту або порушення вимог техніки безпеки. Тому при проектуванні електроприводів потрібно узгоджувати фактичну тривалість перехідних процесів з допустимою.

Для електроприводів, які тривалий час працюють у перехідних режимах, суттєве значення може мати витрата електроенергії на прискорення або гальмування системи. Ця енергія не виконує корисної роботи, внаслідок чого знижується ККД електропривода.

Ці та інші фактори свідчать, що знання законів перехідних процесів дає можливість вибрати електропривод, який би максимально забезпечував вимоги технологічного процесу при найкращому використанні електродвигунів.

Характери і тривалості перехідних процесів залежать від особливостей робочої машини, типу приводного електродвигуна, механічної передачі, перетворювального і керуючого пристроїв.

Перехід будь-якої системи від одного рівноважного стану до іншого пов'язаний з інерційністю окремих ланок системи. В електроприводах діють три основних види інерції:

- електромагнітна інерція, обумовлена індуктивністю обмоток електродвигунів, трансформаторів, реакторів, апаратів керування;

- механічна інерція робочої машини, двигуна, передачі і апаратів керування;

- теплова інерція електродвигунів та деяких елементів апаратів керування.

У більшості випадків теплові процеси відбуваються набагато повільніше за механічні і електромагнітні, суттєвого впливу на стан електропривода не мають, тому у подальшому вивченні перехідних процесів зміна теплового стану не враховується.

Вплив електромагнітної інерції враховують при розрахунку швидкодіючих і точних електроприводів (регульованих, програмно-керованих, слідкуючих та ін.).

У багатьох же випадках, коли не потрібна висока точність розрахунків, обмежуються врахуванням лише механічної інерції. При цьому складається одне диференційне рівняння руху системи, а співвідношення між електричними величинами описуються алгебраїчними рівняннями.

3.2. Визначення часу пуску і гальмування системи електродвигун — робоча машина

При розрахунку електроприводів потрібно знати час пуску або гальмування системи електродвигун — робоча машина. Така необхідність виникає при розробці технологічних процесів, пов'язаних з частими пусками, гальмуваннями і реверсуванням електродвигунів; при перевірці двигунів на нагрівання під час перехідних режимів тощо.

Якщо прийняти зведений момент інерції системи J незмінним, то рівняння руху електропривода (1.26) можна записати так:

$$dt = J \frac{d\omega}{M_o - M_c}, \quad (3.1)$$

або

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_o - M_c}, \quad (3.2)$$

де t — час перехідного процесу при зміні швидкості електродвигуна від ω_1 до ω_2 .

Оскільки момент електродвигуна і момент статичних опорів системи є функціями швидкості, то

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_o(\omega) - M_c(\omega)}. \quad (3.3)$$

Аналітичне розв'язання рівняння (3.3) часто дуже складне, а іноді неможливе через складність рівнянь механічних характеристик

електродвигуна і робочої машини. В деяких випадках розв'язання можна спростити.

Розглянемо це на прикладі реостатного пуску електродвигуна постійного струму або асинхронного двигуна з фазним ротором, прийнявши залежність між їх моментом і швидкістю лінійною, а момент статичних опорів незмінним ($M_c = \text{const}$).

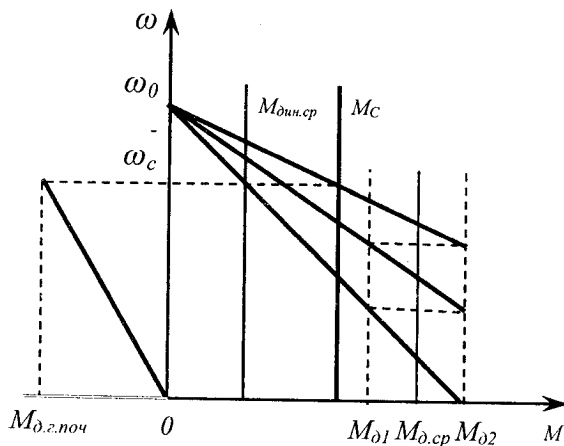


Рис. 3.1. Зміна моменту електродвигуна при реостатному пуску і $M_c = \text{const}$

При вірному розрахунку пускового реостата значення максимального моменту $M_{д1}$ і моменту перемикавання $M_{д2}$ на всіх ступенях однакові (рис. 3.1), тому з невеликою похибкою можна допустити, що момент двигуна в процесі пуску незмінний і дорівнює середньому значенню:

$$M_{д.ср.} = \frac{M_{д1} + M_{д2}}{2} \quad (3.4)$$

З урахуванням прийнятих припущень час пуску системи до усталеної швидкості ω_c буде:

$$t_n = J \int_0^{\omega_c} \frac{d\omega}{M_{д.ср} - M_c} = \frac{J\omega_c}{M_{д.ср} - M_c}. \quad (3.5)$$

Якщо електродвигун вимкнути з мережі, то при самогальмуванні під дією статичного моменту M_c система зупиниться від швидкості ω_c за час:

$$t_r = J \int_{\omega_c}^0 \frac{d\omega}{-M_c} = \frac{J\omega_c}{M_c}. \quad (3.6)$$

Відповідно при електричному гальмуванні (наприклад, при динамічному гальмуванні електродвигуна паралельного збудження) середній гальмівний момент двигуна становитиме:

$$M_{\text{д.ср.}} = \frac{M_{\text{д.поч.}}}{2}$$

і час гальмування визначиться з рівняння:

$$t_{\text{з.дин}} = J \int_{\omega_c}^0 \frac{d\omega}{-M_{\text{д.ср.}} - M_c} = \frac{2J\omega_c}{M_{\text{д.ср.}} + 2M_c}. \quad (3.7)$$

Розглянемо інший випадок, коли момент двигуна $M_{\text{д}}$ і момент статичних опорів M_c лінійно залежать від швидкості (рис. 3.2). При цьому залежність динамічного моменту $M_{\text{дин}} = f(\omega)$ також має лінійний характер:

$$M_{\text{дин}} = a - b\omega. \quad (3.8)$$

Тоді вираз (3.2) запишеться:

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{a - b\omega}. \quad (3.9)$$

Інтегруючи рівняння (3.9) в межах зміни швидкості від ω_1 до ω_2 , одержимо:

$$t = J \ln \frac{a - b\omega_1}{a - b\omega_2}. \quad (3.10)$$

Коефіцієнти a і b , що входять до рівняння (3.10), можна знайти, користуючись рис. 3.2. Пряма лінія, яка описує залежність динамічного моменту від швидкості, задана двома точками A і B з координатами $M_{\text{дин1}}$ і ω_1 та $M_{\text{дин2}}$ і ω_2 . З урахуванням цих координат рівняння прямої запишеться:

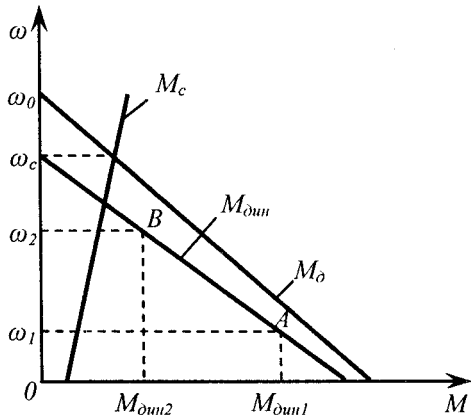


Рис. 3.2. Зміна динамічного моменту в системі, коли $M_{\text{д}}$ і M_c лінійно залежать від швидкості

$$\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{M_{\text{дин}} - M_{\text{дин1}}}{M_{\text{дин2}} - M_{\text{дин1}}}, \quad (3.11)$$

де ω і $M_{\text{дин}}$ — відповідно поточні значення швидкості і динамічного моменту на прямій.

Розв'язавши (3.11) відносно $M_{\text{дин}}$, одержимо:

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{дин1}} + \frac{M_{\text{дин1}} - M_{\text{дин2}}}{\omega_2 - \omega_1} \omega_1 - \frac{M_{\text{дин1}} - M_{\text{дин2}}}{\omega_2 - \omega_1} \omega. \quad (3.12)$$

З виразу (3.12) визначаються коефіцієнти a і b :

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{M_{\text{дин1}} \omega_2 - M_{\text{дин2}} \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \\ b &= \frac{M_{\text{дин1}} - M_{\text{дин2}}}{\omega_2 - \omega_1} \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Підставимо значення коефіцієнтів a і b у рівняння (3.10), остаточно матимемо:

$$t = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{\text{дин1}} - M_{\text{дин2}}} \ln \frac{M_{\text{дин1}}}{M_{\text{дин2}}}. \quad (3.14)$$

За рівнянням (3.14) можна знайти час розгону системи при переході від однієї швидкості до іншої, при зміні моменту навантаження або моменту двигуна, а також визначити час розгону і гальмування на кожному ступені реостата.

У тих випадках, коли аналітичний розв'язок занадто складний або неможливий через відсутність точного рівняння механічної характеристики (наприклад, у асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором) час пуску визначають графічним або графоаналітичними методами. Обидва методи ґрунтуються на рівнянні руху електропривода в кінцевих приростах:

$$M_o - M_c = J \frac{\Delta \omega}{\Delta t}, \quad (3.15)$$

припускаючи, що за деякий малий проміжок часу Δt динамічний момент $M_{\text{дин}} = M_o - M_c$ постійний і дорівнює середньому його значенню на цьому проміжку.

Тривалість пуску розраховують графічним методом у такій послідовності. У другому квадранті прямокутної системи координат

будують механічні характеристики електродвигуна $M_d = f(\omega)$ і виробничого механізму $M_c = f(\omega)$ (рис. 3.3). При цьому момент статичних опорів виробничого механізму повинен бути зведений до валу електродвигуна, а момент електродвигуна визначений з урахуванням допустимого зниження напруги і допустимих відхилень мінімального, максимального і пускового моментів. Графічно знаходять різницю $M_{дин} = M_d - M_c$ і будують графік динамічного моменту $M_d = f(\omega)$. Останній розділяють на окремі ділянки через малі проміжки швидкості $\Delta \omega$ і знаходять середнє значення $M_{дин.ср.}$ на кожній ділянці. Довжини проміжків $\Delta \omega$ можуть бути різними і вибирають такими, щоб забезпечити високу точність визначення $M_{дин.ср.}$. Середні значення динамічних моментів $M_{дин.ср.}$ на всіх ділянках відкладають вгору по осі ординат, одержуючи відрізки $OB_1, OB_2, \dots, OB_n$.

Ліворуч від початку координат відкладають відрізок OA , довжина якого пропорційна зведеному моменту інерції системи до вала електродвигуна J . Довжину відрізка OA (см) знаходять з виразу:

$$OA = \frac{J}{m_j} = \frac{J \cdot m_\omega}{m_m m_i}, \quad (3.16)$$

де m_ω — масштаб швидкості, $(с)^{-1}/см$; m_m — масштаб моменту, Н·м/см; m_i — масштаб часу, с/см; m_j — масштаб моменту інерції, $кг \cdot м^2/см$.

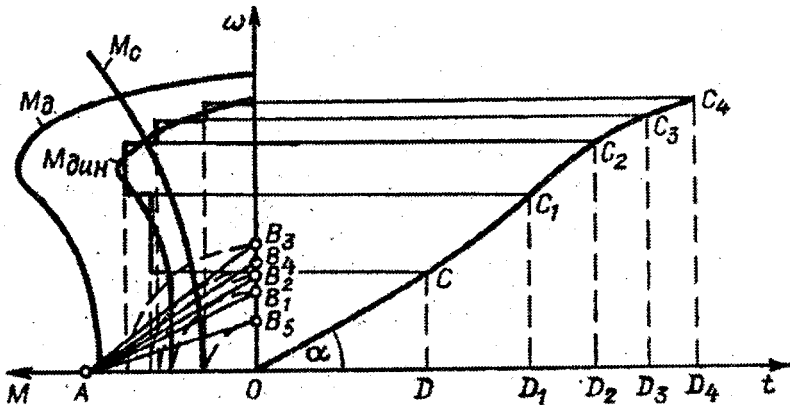


Рис. 3.3. Визначення тривалості пуску електропривода з асинхронним електродвигуном графічним методом

Масштаби швидкості і моменту визначають з графіка $M_{\text{дин}} = f(\omega)$, а масштабом часу задаються так, щоб майбутня крива $\omega = f(t)$ розмістилася у межах рисунка.

Позначені на осі ординат точки $B_1, B_2, \dots, B_n$ з'єднують прямими з точкою A . З початку координат проводять відрізок OC , паралельний прямій AB_1 , який характеризує залежність $\omega = f(t)$ на першій ділянці графіка $M_{\text{дин}} = f(\omega)$. Відрізок OD на осі абсцис відповідає часові пуску Δt_1 системи на першій ділянці. З рівняння (3.15)

$$\Delta \omega / \Delta t = M_{\text{дин}} / J.$$

Але $\Delta \omega / \Delta t = \tan \alpha = M_{\text{дин}} / J$, тому нахил кривої розгону $\omega = f(t)$ знаходять за відношенням $M_{\text{дин}} / J$.

Потім з точки C проводять відрізок CC_1 , паралельний AB_2 і так далі до закінчення побудови. Ламана крива $OCC_1C_2C_3C_4$ являє собою графік залежності $\omega = f(t)$, а відрізок OD_4 — тривалість пуску системи до усталеної швидкості.

При графоаналітичному методі розрахунку за методикою, описаною вище, будують графік динамічного моменту і поділяють його на ряд ділянок, на кожній з яких момент передбачається постійним і рівним середньому значенню (рис. 3.4).

З виразу (3.15) знаходять приріст часу на i -й ділянці графіка:

$$\Delta t_i = \frac{J \Delta \omega_i}{M_{\text{д}} - M_{\text{с}}} = \frac{J \Delta \omega_i}{M_{\text{дин.ср.і}}}. \quad (3.17)$$

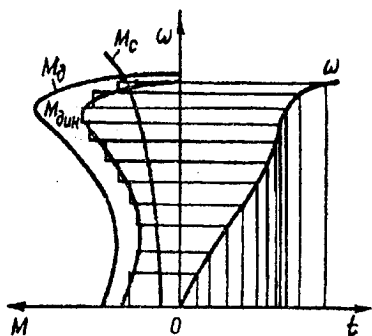


Рис. 3.4. Визначення тривалості пуску електропривода з асинхронним електродвигуном графоаналітичним методом

Знаючи тривалість розгону на кожній ділянці, повний час визначають сумою:

$$t_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (3.18)$$

Розрахунок зручно вести у табличній формі (табл. 3.1).

Графічним і графоаналітичним методом зручно користуватися також при визначенні часу пуску електродвигунів інших типів, а також часу гальмування системи, коли механічні характеристики електродвигуна і робочої машини мають складні аналітичні залежності.

Таблиця 3.1

**РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ ПУСКУ СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОДВИГУН — РОБОЧА МАШИНА ГРАФОАНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ**

№ ділянки	$\Delta \omega$, рад/с	$M_{\text{дин.сп}}$, Н·м	Δt , с	$t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$, с
1	$\Delta \omega_1$	$M_{\text{дин.сп.1}}$	Δt_1	Δt_1
2	$\Delta \omega_2$	$M_{\text{дин.сп.2}}$	Δt_2	$\Delta t_1 + \Delta t_2$
.				
.				
.				
n	$\Delta \omega_n$	$M_{\text{дин.сп.n}}$	Δt_n	$t_n = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n$

3.3. Механічні перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінних статичному моменті і моменті інерції

Як відомо, лінійну механічну характеристику мають електродвигуни постійного струму незалежного або паралельного збудження. З деякою похибкою лінійними можна вважати реостатні механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження, асинхронного двигуна з фазним ротором, а також асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при роботі в межах ковзання від 0 до s_k .

Розглянемо перехідні процеси при пуску електродвигуна постійного струму незалежного збудження з постійно ввімкненим резистором R_p у коло якоря. Пуск починається з моменту вмикання двигуна в мережу з незмінною напругою U . Процес відбувається при незмінному магнітному потоці $\Phi = \text{const}$. Електромагнітними перехідними процесами знехтуємо.

Вихідними є рівняння руху електропривода

$$M_o - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.19)$$

і рівняння електричної рівноваги електродвигуна

$$U = E + IR, \quad (3.20)$$

де $R = R_a + R_p$ — опір кола якоря електродвигуна.

Оскільки момент двигуна прямо пропорційний струмові, то:

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= cI \\ M_c &= cI_c \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

де c — коефіцієнт моменту, що чисельно дорівнює коефіцієнтові ЕРС; I_c — струм, споживаний електродвигуном в усталеному режимі роботи при $M_0 = M_c$.

Підставивши значення моментів з (3.21) в (3.19), одержимо:

$$cI - cI_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.22)$$

звідки

$$I = \frac{J}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + I_c. \quad (3.23)$$

Враховуючи вираз (3.23) і те, що $U = c\omega_0$, а $E = c\omega$, рівняння (3.20) запишемо:

$$c\omega_0 = c\omega + \frac{JR}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + I_c R. \quad (3.24)$$

Розділимо рівняння (3.24) на c і перегрупуємо члени:

$$\omega_0 - \frac{I_c R}{c} = \omega + \frac{JR}{c^2} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.25)$$

Відношення $I_c R/c$ є статичним падінням швидкості $\Delta\omega_c$ (рис. 3.5), викликане проходженням струму I_c .

Вираз

$$\frac{JR}{c^2} = T_m \quad (3.26)$$

має розмірність часу і називається електромеханічною сталою часу.

Якщо в формулі (3.26) замінити c^2 на добуток $U/\omega_0 \cdot M_{к.з}/I_{к.з}$, де $M_{к.з}$ і $I_{к.з}$ — відповідно момент і струм при загальмованому якорі, то після нескладних перетворень знайдемо:

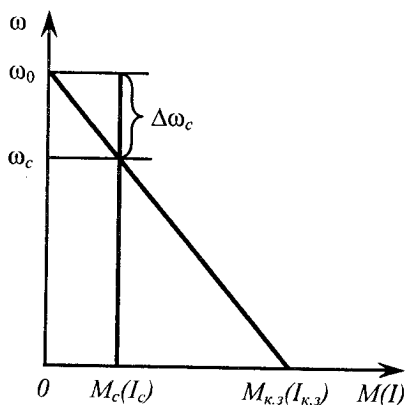


Рис. 3.5. Зміна моменту і струму електродвигуна постійного струму незалежного збудження при пуску з постійно ввімкненим резистором

$$T_m = \frac{J\omega_0}{M_{к.з}}, \quad (3.27)$$

або $T_m = \frac{J}{\beta_0}$, де β_0 — жорсткість механічної характеристики двигуна.

З (3.27) витікає, що електромеханічна стала часу — це час, за який система з моментом інерції J розганяється без навантаження з нерухомого стану до швидкості ідеального холостого ходу ω_0 при незмінному динамічному моменті, що дорівнює моментові короткого замикання $M_{к.з}$.

Оскільки T_m прямо пропорційна опорі кола якоря, то при збільшенні опору стала часу також зростає і навпаки. Слід зауважити, що електромеханічна стала часу не залежить від навантаження двигуна.

Таким чином, рівняння (3.25) можна записати:

$$\omega_0 - \Delta\omega_c = \omega + T_m \frac{d\omega}{dt},$$

або

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_m} = \frac{\omega_c}{T_m}, \quad (3.28)$$

де $\omega_c = \omega_0 - \Delta\omega_c$ — кутова швидкість двигуна в усталеному режимі при $M_0 = M_c$.

Розв'язання цього диференціального рівняння буде:

$$\omega = \omega_c + Ce^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (3.29)$$

де C — стала інтегрування, яку можна визначити з початкових умов при $t = 0$ і $\omega = \omega_{поч}$:

$$C = \omega_{поч} - \omega_c. \quad (3.30)$$

Підставивши рівняння (3.30) у (3.29), одержимо рівняння для кутової швидкості при перехідному процесі в загальному вигляді:

$$\omega = \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right) + \omega_{поч} e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.31)$$

Якщо перехідний процес двигуна починається з нерухомого стану, наприклад, при пуску, коли $\omega_{поч} = 0$, то:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right). \quad (3.32)$$

При пуску без навантаження усталена швидкість буде $\omega_c \approx \omega_0$, тоді:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right). \quad (3.33)$$

На рис. 3.6 зображені графіки $\omega = f(t)$ при пуску двигуна постійного струму незалежного збудження з навантаженням (крива 1) і без навантаження (крива 2).

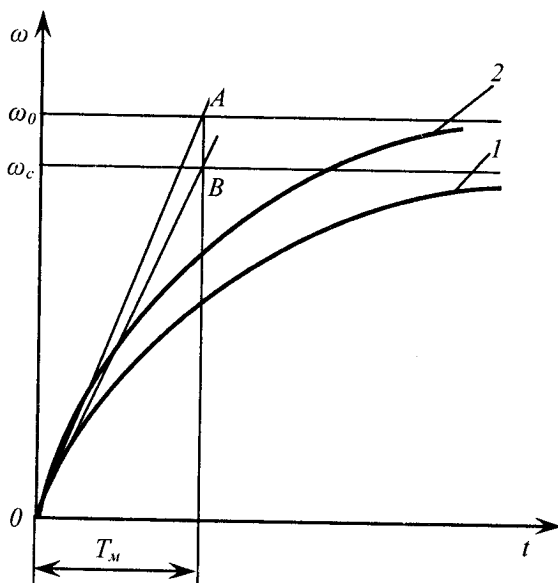


Рис. 3.6. Залежність швидкості обертання електродвигуна постійного струму незалежного збудження від часу при пуску в один ступінь:
1 — з навантаженням; 2 — без навантаження

Згідно з формулами (3.31), (3.32) і (3.33) теоретично процес пуску закінчується через нескінченний проміжок часу. При практичних розрахунках процес вважається усталеним через $t = (3 \dots 4) T_m$, бо за час $t = 3 T_m$ $\omega \approx 0,95 \omega_c$, а за $t = 4 T_m$ $\omega \approx 0,98 \omega_c$. З аналізу рівняння руху електропривода (3.19), при незмінній різниці $M_0 - M_c$ прискорення системи $\frac{d\omega}{dt} = \text{const}$, тобто графік $\omega = f(t)$ буде прямолінійним. Таким чином, якщо при пуску момент двигуна буде постійним і дорівнюватиме $M_{к.з.}$, то його швидкість зростатиме по прямій лінії

(пряма OA — при пуску без навантаження; пряма OB — при пуску з постійним навантаженням). Значить, якщо з початку координат провести дотичні OA і OB до кривих 1 і 2 до перетину з асимптотами, то відрізки $\omega_0 A$ і $\omega_c B$ у масштабі дадуть значення електромеханічної сталої часу T_m .

Для виявлення залежності струму в колі якоря від часу при перехідних процесах у рівнянні руху електропривода (3.19) замінимо момент двигуна і момент статичних опорів їх значеннями з (3.21):

$$cI - cI_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.34)$$

Продиференціювавши рівняння (3.29) за часом, знайдемо:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{C}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}}$$

і одержане значення прискорення підставимо в формулу (3.34):

$$I = -\frac{J}{c} \cdot \frac{C}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}} + I_c. \quad (3.35)$$

Значення сталої інтегрування C знайдемо з початкових умов, коли $t = 0$, а $I = I_{поч}$:

$$C = -\frac{cT_m}{J} (I_{поч} - I_c). \quad (3.36)$$

Підставимо значення C з виразу (3.36) у (3.35) і, зробивши перетворення, одержимо залежність струму в колі якоря від часу при перехідних процесах:

$$I = I_c (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) + I_{поч} e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.37)$$

Якщо двигун пускається з нерухомого стану, то початковий струм дорівнює пусковому або струмові короткого замикання $I_{к.з.}$ Тоді:

$$I = I_c (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) + I_{к.з.} e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.38)$$

При пуску двигуна без навантаження $I_c = 0$, і рівняння (3.38) має вигляд:

$$I = I_{к.з.} e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.39)$$

На рис. 3.7 побудовані графіки $I = f(t)$ за залежностями (3.38) і (3.39). Як витікає з попередніх міркувань, електромеханічну сталу часу T_m за відомими залежностями $I = f(t)$ можна знайти, провівши дотичні до кривих 1 і 2 в точці $I_{к.з.}$ до перетину з асимптотами кривих відповідно при $I = I_c$ і $I = 0$. Відрізки $I_c A$ або OB у масштабі дають величину електромеханічної сталої часу.

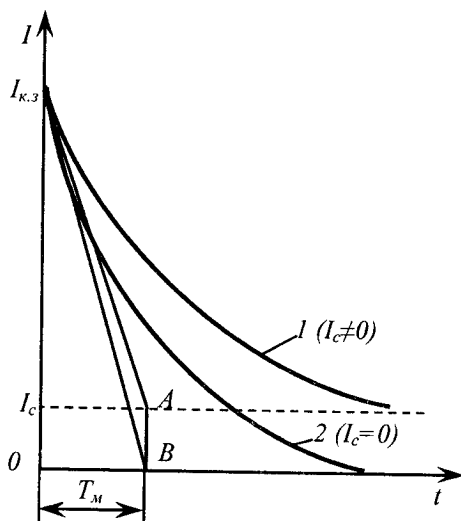


Рис. 3.7. Залежність струму електродвигуна постійного струму незалежного збудження від часу при пуску в один ступінь

Оскільки момент двигуна пропорційний струмові якоря ($M = cI$), то, помноживши рівняння (3.38) і (3.39) на c , знайдемо вирази для визначення залежності моменту двигуна від часу при перехідних режимах:

а) при пуску з навантаженням M_c :

$$M = M_c (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) + M_{к.з.} e^{-\frac{t}{T_m}}; \quad (3.40)$$

б) при пуску без навантаження:

$$M = M_{к.з.} e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.41)$$

Графічні залежності $M = f(t)$ будуть аналогічними залежностям $I = f(t)$ (рис. 3.7).

Формулами (3.31), (3.38) і (3.40) можна користуватися для аналізу перехідних процесів у електроприводі з електродвигуном незалежного збудження і $M_c = \text{const}$ при пуску і гальмуванні, при прийомі і скиданні навантаження.

3.4. Механічні перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінному моменті інерції і моменті статичних опорів, лінійно залежним від швидкості

Розглянемо перехідні процеси за тих самих умов, що і в розділі 3.3, тобто при незмінних напрузі живлення і магнітному потоці та індуктивності двигуна, що дорівнює нулю.

Вихідними є рівняння руху електропривода:

$$M_o - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.42)$$

та рівняння механічних характеристик електродвигуна $M_o = f(\omega)$ і робочого механізму $M_c = f(\omega)$.

Для зручності рівняння $M_o = f(\omega)$ виразимо через ω_0 і $M_{к.з.}$ (рис. 3.8), записавши його як рівняння прямої за відомими координатами двох точок:

$$\left. \begin{array}{l} \text{точка 1 : } \omega = \omega_0, M_o = 0; \\ \text{точка 2 : } \omega = 0, M_o = M_{к.з.} \end{array} \right\} \quad (3.43)$$

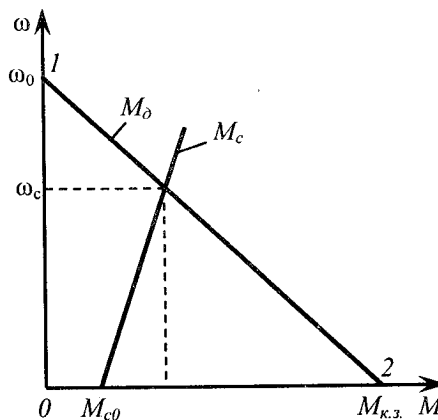


Рис. 3.8. Визначення координат точок механічної характеристики електродвигуна постійного струму незалежного збудження

Тоді рівняння механічної характеристики двигуна запишеться:

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 - 0} = \frac{M_\partial - 0}{0 - M_{\kappa.3}},$$

звідки:

$$M_\partial = M_{\kappa.3} - \frac{M_{\kappa.3}}{\omega_0} \omega. \quad (3.44)$$

Рівняння $M_c = f(\omega)$ при лінійній залежності між моментом і швидкістю має вигляд:

$$M_c = M_{c0} + k\omega. \quad (3.45)$$

Підставимо (3.44) і (3.45) в (3.42):

$$M_{\kappa.3} - \frac{M_{\kappa.3}}{\omega_0} \omega - M_{c0} - k\omega = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.46)$$

Згрупуємо члени рівняння (3.46) і розділимо його на коефіцієнт при ω :

$$\frac{J\omega_0}{M_{\kappa.3} + k\omega_0} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{(M_{\kappa.3} - M_{c0})\omega_0}{M_{\kappa.3} + k\omega_0}, \quad (3.47)$$

де $T' = \frac{J\omega_0}{M_{\kappa.3} + k\omega_0}$ — електромеханічна стала часу електропривода; (3.48)

$\omega_c = \frac{(M_{\kappa.3} - M_{c0})\omega_0}{M_{\kappa.3} + k\omega_0}$ — усталене значення швидкості при $M_\partial = M_c$. (3.49)

Тепер рівняння (3.47) набирає канонічного вигляду лінійного диференціального рівняння першого порядку:

$$T'_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c. \quad (3.50)$$

Розв'язанням рівняння (3.50) є:

$$\omega = \omega_c + Ce^{-\frac{t}{T'_m}}, \quad (3.51)$$

тобто, ми одержали вираз, аналогічний (3.29), кінцевим розв'язанням якого з урахуванням початкових умов є:

$$\omega = \omega_c (1 - e^{-\frac{t}{T'_m}}) + \omega_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T'_m}}. \quad (3.52)$$

Рівняння (3.31) і (3.52) відрізняються величиною електромеханічної сталої T_m і T'_m .

Розділимо праві частини рівнянь (3.48) і (3.49) на ω_0 , одержимо значення T'_m і ω_c , виражені через жорсткості характеристик електродвигуна $\left(\beta_\partial = \frac{M_{\kappa.2}}{\omega_0}\right)$ і робочої машини ($\beta_c = k$):

$$T'_m = \frac{J}{\beta_\partial + \beta_c}, \quad (3.53)$$

$$\omega_c = \frac{M_{\kappa.2} - M_{c0}}{\beta_\partial + \beta_c}. \quad (3.54)$$

При незалежному від швидкості статичному моменті ($M_c = \text{const}$) або при його відсутності ($M_c = 0$) жорсткість $\beta_c = 0$, тоді $T_m = T'_m$; $\omega_c = \frac{M_{\kappa.2} - M_c}{\beta_\partial}$ при $M_c = \text{const}$ і $\omega_c = \omega_0$ при $M_c = 0$. Це значить,

що рівняння (3.52) є більш універсальним, і його можна використовувати при розгляді перехідних процесів в електроприводах з моментом статичних опорів, лінійно залежним від швидкості, незмінним статичним моментом і при роботі двигуна без навантаження.

Вирази для струму і моменту будуть аналогічними (3.37) і (3.40):

$$I = I_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_m}}\right) + I_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T'_m}}; \quad (3.55)$$

$$M = M_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_m}}\right) + M_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T'_m}}. \quad (3.56)$$

де I_y і M_y — відповідно усталені значення струму і моменту електродвигуна при $M_\partial = M_c$.

У рівняння (3.55) і (3.56) індекси «у» при I і M введені з метою відрізнити усталені значення струму і моменту двигуна від поточних значень статичного моменту M_c , який залежить від швидкості обертання, і відповідного йому струму I_c .

Рівняння (3.52), (3.55) і (3.56) можна використовувати з прийнятими припущеннями при аналізі перехідних процесів пуску, гальмування, прийому і скидання навантаження в електроприводах з двигунами постійного струму паралельного збудження.

З деякою похибкою, викликаною криволінійністю механічних характеристик, цими рівняннями можна описувати і перехідні про-

цеси в електроприводах з двигунами послідовного збудження і асинхронними двигунами з фазним ротором на реостатних характеристиках, а також з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором при роботі в межах ковзання від 0 до s_k .

3.5. Перехідні процеси в електроприводах з трифазними асинхронними двигунами

Відсутність точного аналітичного рівняння пускової частини механічної характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (при зміні ковзання від 1 до s_k) унеможливорює одержання рівнянь швидкості і моменту при перехідних процесах. Тому в подальших виводах будемо вводити ряд обмежень і припущень.

3.5.1. Перехідні процеси на ділянках з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінних статичному моменті і моменті інерції

При перевірці попередньо вибраного двигуна на нагрівання під час роботи із змінним навантаженням за статичною навантажувальною діаграмою робочої машини розраховують навантажувальну діаграму двигуна (див. розділ 7). В цьому випадку двигун працює на робочій частині механічної характеристики, обмеженої ковзанням 0 і s_k .

Для спрощення виводу рівнянь перехідного процесу при зміні навантаження приймемо припущення:

1) механічна характеристика двигуна на ділянці $0 < s < s_k$ лінійна (рис. 3.9), тобто

$$\frac{M_\delta}{s} = \text{const}; \quad (3.57)$$

2) електромагнітні перехідні процеси не впливають на перебіг механічних.

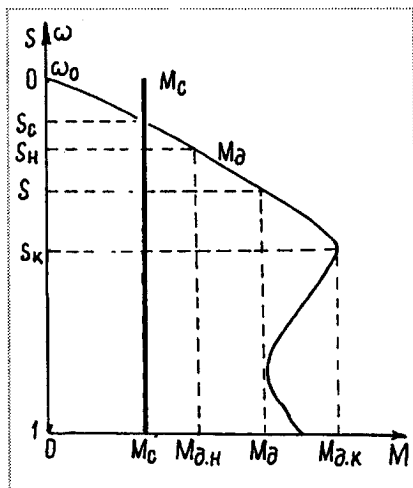


Рис. 3.9. Механічні характеристики асинхронного електродвигуна M_δ і робочої машини M_c

Вихідним є рівняння руху електропривода (3.19).

Для заміни кутової швидкості ковзанням продиференціюємо відоме рівняння

$$\omega = \omega_0(1 - s), \quad (3.58)$$

будемо мати:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (3.59)$$

Тоді рівняння (3.19) запишеться:

$$M_\partial - M_c = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (3.60)$$

Зважаючи на (3.57), можна записати:

$$\frac{M_\partial}{s} = \frac{M_{\partial, \text{ном}}}{s_{\text{ном}}}, \quad (3.61)$$

де M_∂ і $M_{\partial, \text{ном}}$ — відповідно поточне і номінальне значення моменту двигуна ;

s і $s_{\text{ном}}$ — відповідно поточне і номінальне значення ковзання.

Звідси

$$M_\partial = \frac{M_{\partial, \text{ном}}}{s_{\text{ном}}} \cdot s. \quad (3.62)$$

Аналогічно рівняння для статичного моменту M_c буде:

$$M_c = \frac{M_{\partial, \text{ном}}}{s_{\text{ном}}} \cdot s_c, \quad (3.63)$$

де s_c — ковзання двигуна при моменті $M_\partial = M_c$.

Підставимо (3.62) і (3.63) в (3.60):

$$\frac{M_{\partial, \text{ном}}}{s_{\text{ном}}} (s - s_c) = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}, \quad (3.64)$$

або:

$$\frac{M_{\partial, \text{ном}}}{s_{\text{ном}}} (s_c - s) = J\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (3.65)$$

Розв'яжемо (3.65) відносно ковзання:

$$s_c - s = \frac{J\omega_0 s_{\text{ном}}}{M_{\partial, \text{ном}}} \frac{ds}{dt}. \quad (3.66)$$

Вираз $\frac{J\omega_0 s_{ном}}{M_{о.ном}}$ має розмірність часу і називається електромеханічною сталою часу T_m . Тобто:

$$T_m = \frac{J\omega_0 s_{ном}}{M_{о.ном}}. \quad (3.67)$$

Але відомо, що $\frac{M_{о.ном}}{s_{ном}} = \beta_\delta$ є жорсткістю механічної характеристики електродвигуна. Тому (3.67) можна також записати:

$$T_m = \frac{J\omega_0}{\beta_\delta}. \quad (3.68)$$

Тоді

$$s - s_c = T_m \frac{ds}{dt}. \quad (3.69)$$

Представимо (3.69) у вигляді лінійного диференціального рівняння першого порядку:

$$T_m \frac{ds}{dt} + s = s_c, \quad (3.70)$$

розв'язком якого є:

$$s = s_c + C e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (3.71)$$

де C — стала часу інтегрування.

Величину C знайдемо з початкових умов, коли $t = 0$, а $s = s_{поч}$:

$$C = s_{поч} - s_c. \quad (3.72)$$

Підставивши рівняння (3.72) в (3.71), одержимо рівняння зміни ковзання в часі в перехідному процесі при $M_c = \text{const}$:

$$s = s_c (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) + s_{поч} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (3.73)$$

де s_c — ковзання двигуна при швидкості ω_c .

Замінивши значення s на ω за рівнянням (3.58), одержимо рівняння перехідного процесу швидкості:

$$\omega = \omega_c (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) + \omega_{поч} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (3.74)$$

аналогічне рівнянню (3.31).

Розв'яжемо рівняння (3.57), (3.62) і (3.63) відносно s :

$$s = M_{\partial} \frac{S_{ном}}{M_{\partial,ном}}; \quad s_c = M_c \frac{S_{ном}}{M_{\partial,ном}}; \quad s_{поч} = M_{\partial,поч} \frac{S_{ном}}{M_{\partial,ном}}. \quad (3.75)$$

Замінивши в (3.73) величини s , s_c і $s_{поч}$ їх значеннями з (3.75), одержимо рівняння перехідного процесу моменту двигуна при $M_c = \text{const}$:

$$M_{\partial} = M_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right) + M_{\partial,поч} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.76)$$

Графіки залежності ковзання, кутової швидкості і моменту двигуна від часу при зміні статичного навантаження від $M_{c,поч}$ до M_{c1} та від M_{c1} до M_{c2} показані на рис. 3.10 і 3.11.

Якщо розв'язати рівняння (3.73), (3.74) і (3.76) відносно часу, то одержимо вирази для визначення тривалості перехідного процесу при зміні ковзання, швидкості або моменту від початкового значення до кінцевого:

$$t = T_m \ln \frac{s_{поч} - s_c}{s_{кін} - s_c} = T_m \ln \frac{\omega_{поч} - \omega_c}{\omega_{кін} - \omega_c} = T_m \ln \frac{M_{поч} - M_c}{M_{кін} - M_c}, \quad (3.77)$$

де $s_{кін} \leq s_c$, $\omega_{кін} \leq \omega_c$, $M_{кін} \leq M_c$.

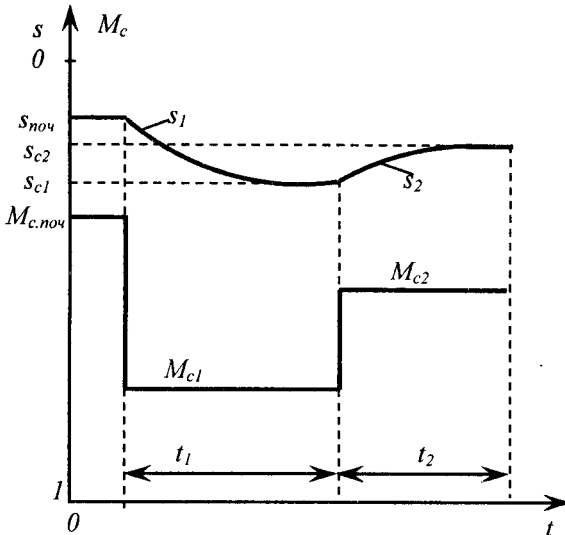


Рис. 3.10. Залежність ковзання асинхронного двигуна від часу при зміні статичного навантаження від $M_{c,поч}$ до M_{c1} та від M_{c1} до M_{c2}

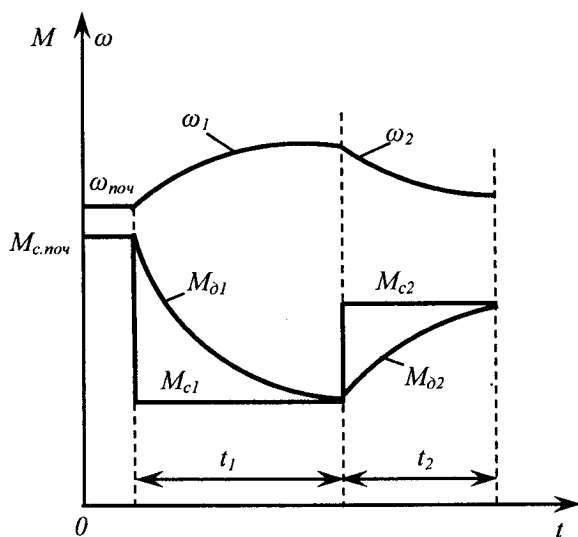


Рис. 3.11. Залежність кутової швидкості та моменту асинхронного двигуна від часу при зміні статичного навантаження від $M_{c,нач}$ до M_{c1} та від M_{c1} до M_{c2}

Таким чином, ковзання, кутова швидкість і момент асинхронного електродвигуна при перехідних процесах змінюються за однако- вим експоненціальним законом. Формулами (3.73), (3.74) і (3.76) можна користуватися як при зростанні, так і при скиданні наванта- ження. Час перехідного процесу прямо пропорційний величині еле- ктродинамічної сталої T_M .

3.5.2. Перехідні процеси на ділянках з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінному моменті інерції і моменті статичних опорів, лінійно залежним від швидкості

Аналіз перехідних процесів проведемо при таких же припущен- нях і в тих межах, що і в розділі 3.5.1.

Вихідними є рівняння руху електропривода (3.60), рівняння ме- ханічної характеристики двигуна на ділянці від $0 < s < s_k$ (3.62) та рівняння механічної характеристики робочої машини (рис. 3.12):

$$M_c = \beta_c \omega, \quad (3.78)$$

де β_c — жорсткість механічної характеристики робочої машини.

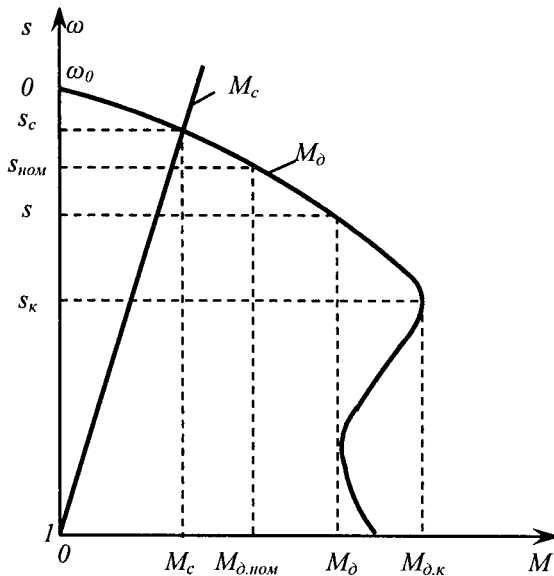


Рис. 3.12. Механічні характеристики асинхронного двигуна M_δ і робочої машини M_c

Замінімо в (3.78) кутову швидкість ковзанням:

$$M_c = \beta_c \omega_0 (1 - s) = \kappa_1 (1 - s), \quad (3.79)$$

де $\kappa_1 = \beta_c \omega_0$.

Як відомо, відношення $\frac{M_{\delta,н}}{s_n}$ є жорсткістю механічної характеристики електродвигуна β_δ .

Тоді рівняння (3.62) запишеться:

$$M_\delta = \beta_\delta s. \quad (3.80)$$

Підставимо (3.79) і (3.80) в рівняння руху (3.60):

$$\beta_\delta s - \kappa_1 (1 - s) = -J \omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (3.81)$$

Розв'язавши (3.81), одержимо лінійне диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{J \omega_0}{\beta_\delta + \kappa_1} \frac{ds}{dt} + s = \frac{\kappa_1}{\beta_\delta + \kappa_1}, \quad (3.82)$$

де вираз $\frac{J\omega_0}{\beta_o + \kappa_1} = T'_m$ — електромеханічна стала часу. (3.83)

Відношення $\frac{\kappa_1}{\beta_o + \kappa_1} = s_c$ — ковзання при рівності моментів $M_o = M_c$.

Справді, прирівнявши вирази (3.79) і (3.80), одержимо:

$$\kappa_1(1 - s_c) = -\beta_o s_c, \quad (3.84)$$

$$\text{звідки } s_c = \frac{\kappa_1}{\beta_o + \kappa_1}.$$

Таким чином, розв'язок рівняння (3.81) буде таким, як і (3.69):

$$T'_m \frac{ds}{dt} + s = s_c. \quad (3.85)$$

Значить, вираз перехідного процесу ковзання також буде аналогічним (3.73):

$$s = s_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_m}}\right) + s_{\text{поч}} \cdot e^{-\frac{t}{T'_m}}. \quad (3.86)$$

Рівняння (3.73) і (3.86) відрізняються величинами електромеханічної сталої T_m і T'_m .

Формула (3.83) є більш універсальною за (3.68). Адже при незмінному за час перехідного процесу моменті статичних опорів жорсткість механічної характеристики робочої машини дорівнює нулю, тобто $\kappa_1 = 0$, і рівняння (3.83) перетворюється в (3.68).

3.5.3. Аналітичне визначення часу перехідного процесу пуску і електричного гальмування

Певний теоретичний інтерес має аналіз перехідних процесів у електроприводах з трифазними асинхронними електродвигунами з урахуванням кривизни механічної характеристики, яка описується уточненим рівнянням (2.70) або спрощеним рівнянням (2.73). До них належать електродвигуни з фазним ротором та двигуни деяких серій з короткозамкненим ротором, на характеристиці яких немає провалу при мінімальному моменті.

Для спрощення розрахунків знехтуємо електромагнітними перехідними процесами, які протікають значно швидше за механічні.

Розглянемо перехідні процеси за умови, що $M_c = 0$. На практиці такі випадки зустрічаються, наприклад, при пуску на холостому ході потужних дробарок з великим зведенням до вала електродвигуна моментом інерції і відносно малим моментом статичних опорів. Скориставшись рівнянням механічної характеристики електродвигуна у спрощеному вигляді, запишемо рівняння руху електропривода:

$$\frac{2M_\kappa}{\frac{s}{s_\kappa} + \frac{s_\kappa}{s}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.87)$$

Замінивши $\frac{d\omega}{dt}$ виразом з (3.59), матимемо:

$$\frac{2M_\kappa}{\frac{s}{s_\kappa} + \frac{s_\kappa}{s}} = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (3.88)$$

Звідси:

$$dt = -\frac{J\omega_0}{2M_\kappa} \left(\frac{s}{s_\kappa} + \frac{s_\kappa}{s} \right) ds \quad (3.89)$$

або

$$dt = -\frac{T_M}{2} \left(\frac{s}{s_\kappa} + \frac{s_\kappa}{s} \right) ds. \quad (3.90)$$

де $T_M = \frac{J\omega_0}{M_\kappa}$ — електромеханічна стала часу.

У даному випадку електромеханічна стала часу — це час, за який система з моментом інерції J розганяється до швидкості ω_0 під дією моменту, що дорівнює максимальному моменту двигуна M_κ .

Проінтегрувавши вираз (3.90), можна знайти час перехідних процесів пуску привода при зміні ковзання від $s_{\text{поч}}$ до $s_{\text{кін}}$:

$$t_{\text{но}} = \frac{T_M}{2} \int_{s_{\text{кін}}}^{s_{\text{поч}}} \left(\frac{s}{s_\kappa} + \frac{s_\kappa}{s} \right) ds = \frac{T_M}{2} \left(\frac{s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2}{2s_\kappa} + s_\kappa \ln \frac{s_{\text{поч}}}{s_{\text{кін}}} \right). \quad (3.91)$$

Оскільки при пуску двигуна з нерухомого стану $s_{\text{поч}} = 1$, то

$$t_{no} = \frac{T_m}{2} \left(\frac{1 - s_{kin}^2}{2s_k} + s_k \ln \frac{1}{s_{kin}} \right). \quad (3.92)$$

При розгоні двигуна вхолосту $\omega_{kin} = \omega_0$, а $s_{kin} = 0$. Тоді, виходячи з виразу (3.92), тривалість пуску нескінченна. Але оскільки при швидкості $\omega = (0,95 \dots 0,98) \omega_0$ розгін вважається закінченим, то можна прийняти $\omega_{kin} = 0,05$, і тривалість пуску без навантаження визначиться:

$$t_{no} = \frac{T_m}{2} \left(\frac{1 - 0,05^2}{2s_k} + s_k \ln \frac{1}{0,05} \right). \quad (3.93)$$

Величиною $0,05^2$, як дуже малою у порівнянні з одиницею, у першому члені можна знехтувати, тоді:

$$t_{no} = \frac{T_m}{4s_k} + 1,5 T_m s_k. \quad (3.94)$$

Звідси витікає, що час пуску залежить від критичного ковзання двигуна, яке прямо пропорційне опоріві роторного кола.

Для визначення умови, при якій тривалість пуску мінімальна, необхідно з рівняння (3.94) взяти похідну від тривалості пуску по критичному ковзанню і привіняти її до нуля:

$$\frac{dt_{no}}{ds_k} = -\frac{T_m}{4s_k^2} + 1,5 T_m = 0, \quad (3.95)$$

звідси

$$s_{kmin} = \sqrt{\frac{1}{2 \ln \frac{1}{s_{kin}}}}. \quad (3.96)$$

де s_{kmin} — критичне ковзання, при якому тривалість пуску мінімальна.

Для випадку $s_{kin} = 0,05$ $s_{kmin} = 0,408$, а мінімальна тривалість пуску дорівнює $t_{no} = 1,22 T_m$. При більшому або меншому значенні s_k тривалість пуску більша.

Для спрощення аналізу перехідних процесів введено поняття ефективного моменту — такий постійний момент, при якому час пуску за всіх інших однакових умов однаковий з тривалістю пуску при фактичному змінному моменті. Як видно з рис. 3.13, площа під

кривою при $s_K = 0,408$ найбільша, значить, найбільший і ефективний момент, а час пуску найменший.

Користуючись поняттям ефективного моменту, час пуску електропривода без навантаження можна знайти за простою формулою, що витікає з виразу електромеханічної сталої часу:

$$t_{no} = \frac{J\omega_0}{M_{ef.n}}. \quad (3.97)$$

Залежність $M_{ef.n} = f(s_K)$ можна знайти, підставивши значення t_{no} з виразу (3.94) і замінивши $T_M = J\omega_0/M_K$:

$$M_{ef.n} = \frac{J\omega_0}{T_M \left(\frac{1}{4s_K} + 1,5s_K \right)} = \frac{M_K s_K}{0,25 + 1,5s_K^2}. \quad (3.98)$$

За виразом (3.98) побудована залежність $M_{ef.n} = f(s_K)$ (рис. 3.14), з якої видно, що ефективний момент при пуску асинхронного двигуна без навантаження має максимальне значення при $s_K = 0,407$ і дорівнює $0,81 M_K$.

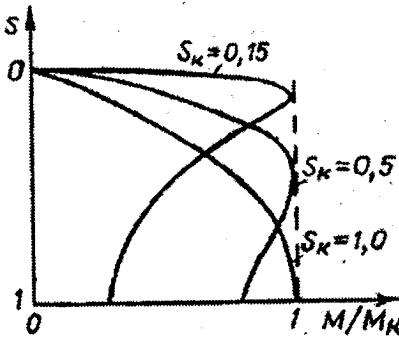


Рис 3.13. Механічна характеристика асинхронного електродвигуна при різних значеннях критичного ковзання

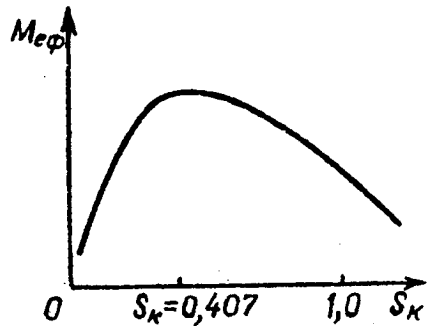


Рис 3.14. Залежність ефективного моменту асинхронного електродвигуна від критичного ковзання

Якщо пуск відбувається з незмінним моментом статичних опорів ($M_s = \text{const}$), то час пуску можна визначити:

$$t_n = \frac{J\omega_c}{M_{ef.n} - M_c}, \quad (3.99)$$

де ω_c — швидкість, до якої розганяється електродвигун при досягненні $M_0 = M_c$.

Гальмування противмиканням до зупинки ротора або для реверсування здійснюють перемиканням двох фаз статора двигуна. У двигунів з фазним ротором для обмеження гальмівних струмів в коло ротора вводять додаткові опори R_p . В такому випадку робоча точка переміщується стрибком з механічної характеристики у двигунному режимі (А) на одну з механічних характеристик противмикання (B_1, B_2, B_3) залежно від опору кола ротора (рис. 3.15).

Час гальмування без навантаження від $s_{поч} = 2$ до $s_{кін} = 1$ визначається за виразом (3.91):

$$T_{z.np.0} = \frac{T_m}{2} \left(\frac{4-1}{2s_k} + s_k \ln 2 \right) = T_m \left(\frac{0,75}{s_k} + 0,346s_k \right). \quad (3.100)$$

Взявши з (3.100) похідну по s_k і прирівнявши її до нуля, знайдемо мінімальний час гальмування противмиканням $t_{z0} = 1,02T_m$ при $s_k = 1,47$.

Якщо гальмування проходить з статичним моментом $M_c = \text{const}$, то час гальмування, визначений через ефективний момент, знайдеться з виразу:

$$t_{z.np} = \frac{J\omega_c}{M_{ef.np.} + M_c}, \quad (3.101)$$

де $M_{ef.np.}$ — ефективний момент двигуна при гальмуванні противмиканням.

Для динамічного гальмування найчастіше обмотку статора двигуна вимикають з мережі змінного струму і вмикають в коло постійного струму. У двигунів з фазним ротором необхідні гальмівні характеристики одержують шляхом регулювання сили гальмівного струму за допомогою реостата $R_{дг}$, або зміною напруги джерела живлення та зміною опору кола ротора. Для двигунів з короткозамкненим ротором можлива тільки зміна сили гальмівного струму.

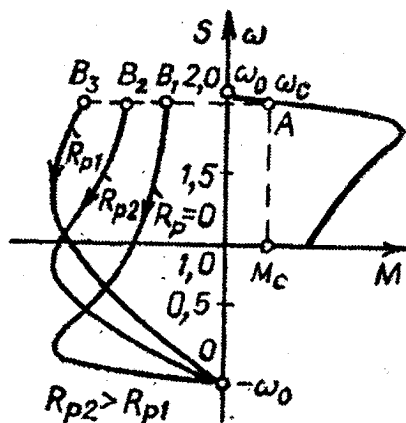


Рис. 3.15. Механічні характеристики асинхронного електродвигуна при реверсуванні з гальмуванням противмиканням

При динамічному гальмуванні робоча точка переміщується стрибком з механічної характеристики у двигунному режимі (A) на одну з гальмівних характеристик (B_1, B_2, B_3) залежно від опору кола ротора (рис. 3.16, a) або сили гальмівного струму (рис. 3.16, b).

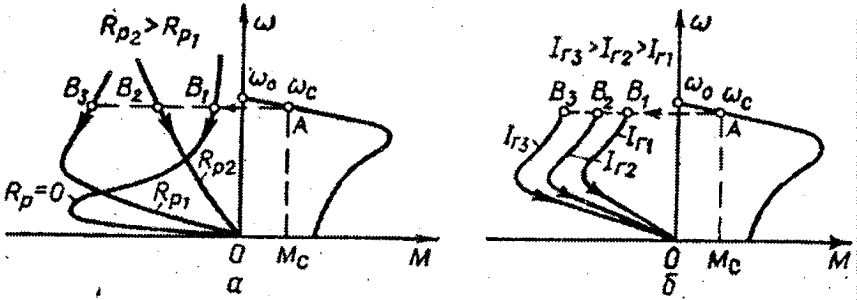


Рис. 3.16. Механічні характеристики асинхронного двигуна при перемиканні з двигунного режиму на динамічне гальмування: a — при зміні опору кола ротора; b — при зміні гальмівного струму

Оскільки при динамічному гальмуванні $s = \frac{\omega}{\omega_0}$, то ковзання двигуна при гальмуванні без навантаження змінюється від $s_{\text{поч}} = 1$ до $s_{\text{кін}} = 0$. Час гальмування можна визначити з рівняння (3.92).

Прийнявши $s_{\text{кін}} = 0,05$ і підставивши його у вираз (3.92), як і у випадку пуску одержимо:

$$t_{z.d.o} = \frac{T_m}{4s_{k.o}} + 1,5 T_m s_{k.o} = T_m \left(\frac{1}{4s_{k.o}} + 1,5 s_{k.o} \right), \quad (3.102)$$

де $s_{k.o}$ — критичне ковзання на гальмівній характеристиці;

$T_m = \frac{J\omega_0}{M_{k.o}}$ — електро механічна стала при динамічному гальмуванні.

Порівнявши (3.94) і (3.102), можна зробити висновок, що тривалості пуску і динамічного гальмування асинхронного електродвигуна без навантаження визначаються за аналогічними рівняннями. Неважко визначити, що й мінімальний час гальмування $t_{z.d.o} = 1,22 T_m$ спостерігається при критичному ковзанні $s_{k.d} = 0,408$, а ефективний момент знайдеться за виразом (3.98).

3.6. Динамічні механічні характеристики асинхронних електродвигунів

Досі перехідні процеси в асинхронних електроприводах нами розглядалися без урахування інерційності електромагнітного поля. Вважалося, що при вмиканні або вимиканні двигуна чи різкій зміні його навантаження електромагнітний момент змінюється також миттєво. В такому випадку кожному значенню швидкості обертання відповідає певне визначене значення струму і моменту. Розрахунок характеристик проводився за формулами, виведеними із схеми заміщення двигуна. Побудована за цією формулою механічна характеристика (1) називається статичною (рис. 3.17). Якщо за такою характеристикою розрахувати графіки зміни швидкості і моменту при пуску двигуна, то вони матимуть вигляд, зображений на рис. 3.18, а).

У реальних умовах електромагнітні перехідні процеси суттєво впливають на зміни струму і моменту асинхронного двигуна. На рис. 3.18, б зображені графіки зміни моменту і швидкості від часу при пуску двигуна, зняті експериментально. Якщо за такими графіками побудувати механічну характеристику двигуна, то вона матиме вигляд кривої 2 (рис. 3.17) і називається динамічною механічною характеристикою.

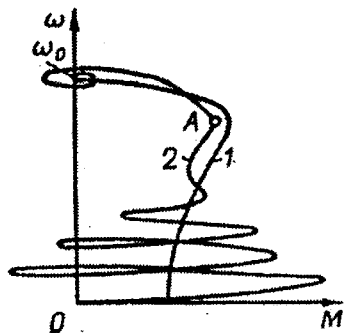


Рис. 3.17. Механічні характеристики асинхронного електродвигуна:
1 — статична; 2 — динамічна

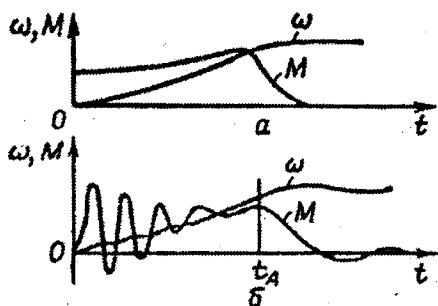


Рис. 3.18. Залежність моменту і кутової швидкості від часу при пуску асинхронного електродвигуна:
а) — статичні; б) — з урахуванням електромагнітних перехідних процесів

На відміну від статичної характеристики динамічна визначається не тільки параметрами обмоток статора і ротора, а й видом перехідного процесу (пуск, гальмування, зміна статичного моменту), а також параметрами механічної системи (статичний момент, момент інерції).

Тому для кожного двигуна при певному значенні напруги живлення може бути лише одна статична і безліч динамічних механічних характеристик.

Аперіодичні коливання моменту двигуна в процесі пуску (рис. 3.18, б) пояснюються тим, що в момент вмикання в обмотках виникають основні (вимушені) і вільні струми. Останні мають колильний характер. Поля, створені вільними струмами, посилюють або послаблюють основне поле, створене вимушеним струмом, внаслідок чого збільшується або зменшується перехідний електромагнітний момент. Максимальні значення перехідних моментів можуть перевищувати номінальні моменти у 3 — 5 разів при пуску і в 12 — 18 разів при реверсуванні. Наявність таких великих моментів може спричинити удари в кінематичних ланках електропривода, що слід враховувати при його проектуванні.

Аналіз динамічних характеристик показує, що коливання моменту в процесі пуску практично затухають при досягненні ротором швидкості, яка відповідає критичному ковзанню на статичній механічній характеристиці (рис. 3.18, б). При подальшому зменшенні ковзання струм в обмотках згідно з статичною електромеханічною характеристикою різко зменшується. Але внаслідок наявності індуктивності обмоток струми ротора не встигають зменшуватися відповідно до зміни швидкості. Тому при досягненні ротором синхронної швидкості струми ротора і викликаний ними електромагнітний момент можуть не дорівнювати нулю, внаслідок чого ротор розганяється до швидкості, більшої за синхронну. Потім струми ротора зменшуються, зменшується момент двигуна, що призводить до зниження швидкості обертання ротора. Тобто, виникає колильний процес зміни моменту і швидкості двигуна, що має затухаючий характер. Такі явища більш імовірні при пуску вхолосту двигуна з малим моментом інерції ротора і жорсткою механічною характеристикою на робочій ділянці. Очевидно, для електродвигунів з меншою жорсткістю робочої ділянки механічної характеристики та із значним моментом інерції вірогідність виникнення коливного перехідного процесу менша.

Зменшити негативний вплив перехідних пускових моментів на механічні ланки електропривода можна кількома методами.

1. Пуск привода без навантаження. При цьому зменшується амплітуда коливань моменту, а також кількість коливань, оскільки двигун розганяється до швидкості, що відповідає критичному ковзанню, швидше, ніж під навантаженням.

2. Зниження швидкості підйому напруги на статорі при живленні двигуна від регулятора напруги. Такого ж ефекту можна досягти і вмиканням послідовно з обмоткою статора додаткових опорів.

3. Пуск двигуна при плавному підвищенні частоти виключає його роботу на нелінійній частині механічної характеристики, внаслідок чого коливання моменту не виникають.

3.7. Перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою при $\omega_0 = f(t)$

В системах регульованого електропривода оптимальні перехідні процеси формуються шляхом плавної зміни підведеної до якоря двигуна постійного струму напруги. Такі перехідні процеси протікають при $\omega_0 = f(t)$.

Розглянемо лінійний закон зміни керуючого сигналу:

$$\omega_0(t) = \omega_{0\text{поч}} + \varepsilon t, \quad (3.103)$$

де $\omega_{0\text{поч}}$ — початкове значення швидкості ідеального холостого ходу; ε — прискорення.

Будемо вважати, що співвідношення електромеханічної та електромагнітної сталих часу $T_m / T_e > 2$. При цьому, як показує досвід, вплив електромагнітної інерції несуттєвий на протікання перехідного процесу завдяки плавності зміни керуючого сигналу.

Рівняння механічної характеристики ДПС НЗ записується у вигляді:

$$M_\delta = \beta_\delta (\omega_0 - \omega), \quad (3.104)$$

звідки з врахуванням (3.1):

$$\frac{dM_\delta}{dt} = \beta_\delta \varepsilon - \beta_\delta \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.105)$$

Тоді

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{\beta_\delta} \frac{dM_\delta}{dt} + \varepsilon. \quad (3.106)$$

Підставимо значення $\frac{d\omega}{dt}$ в рівняння руху електропривода:

$$M_{\partial} - M_c = J \frac{d\omega}{dt} = -\frac{J}{\beta_{\partial}} \frac{dM_{\partial}}{dt} + J\varepsilon = -T_M \frac{dM_{\partial}}{dt} + J\varepsilon, \quad (3.107)$$

або

$$T_M \frac{dM_{\partial}}{dt} + M_{\partial} = M_c + J\varepsilon. \quad (3.108)$$

При початкових умовах $M_{\partial} = M_{\text{поч}}$ дане диференціальне рівняння має розв'язок:

$$M_{\partial} = (M_c + J\varepsilon)(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + M_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (3.109)$$

Для кутової швидкості двигуна:

$$\beta_{\partial}(\omega_{0\text{поч}} + \varepsilon t - \omega) - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.110)$$

В усталеному режимі роботи

$$M_{\partial} = M_c = \beta_{\partial}(\omega_0 - \omega_c) = \beta_{\partial}\Delta\omega_c. \quad (3.111)$$

Тоді

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{0\text{поч}} + \varepsilon t - \Delta\omega_c. \quad (3.112)$$

Частинний розв'язок диференціального рівняння (3.112) з правою частиною, яка лінійно залежить від часу, знаходимо у вигляді:

$$\omega = a + bt, \quad (3.113)$$

де a і b — невизначені коефіцієнти.

Підставивши (3.113) в (3.112), отримаємо:

$$bT_M + a + bt = \omega_{0\text{поч}} + \varepsilon t - \Delta\omega_c, \quad (3.114)$$

звідки

$$a = \omega_{0\text{поч}} - \Delta\omega_c - \varepsilon T_M; \quad (3.115)$$

$$b = \varepsilon. \quad (3.116)$$

Загальний розв'язок рівняння (3.112) будемо знаходити у вигляді ($k = -\frac{1}{T_m}$):

$$\omega = \omega_{0\text{поч}} - \Delta\omega_c - \varepsilon T_m + \varepsilon t + A e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.117)$$

Коефіцієнт A визначаємо із початкових умов при $t = 0$, $\omega = \omega_{\text{поч}}$. В результаті отримаємо

$$A = \omega_{\text{поч}} - (\omega_{0\text{поч}} - \Delta\omega_c - \varepsilon T_m). \quad (3.118)$$

Закон зміни кутової швидкості запишеться у вигляді:

$$\omega = \varepsilon t + (\omega_{0\text{поч}} - \Delta\omega_c - \varepsilon T_m)(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) + \omega_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.119)$$

При пуску електропривода шляхом плавного збільшення напруги на обмотці якоря від нуля до усталеного значення істотний вплив на перехідний процес має характер моменту навантаження.

Якщо момент статичних опорів реактивний, то перехідний процес розпадається на дві ділянки, які відповідають нелінійності цього навантаження. На першій ділянці при $M_d < M_c$ кутова швидкість дорівнює нулю, а зміна $\omega_0(t) = \varepsilon t$ викликає лінійне зростання моменту короткого замикання двигуна:

$$M_d = \beta_d \omega_0 = \beta_d \varepsilon t. \quad (3.120)$$

Перший етап закінчується при $M_d = M_c$.

На другій ділянці, коли $M_d > M_c$ при $t_2 > t > t_1$, зручно прийняти новий відлік часу з t_1 . Позначимо $t' = t - t_1$. Рух електропривода визначається отриманими рівняннями (3.109), (3.119) при $M_{\text{поч}} = M_c$; $\omega_{\text{поч}} = 0$; $\omega_{0\text{поч}} = \Delta\omega_c$:

$$\begin{aligned} M_d &= M_c + J\varepsilon(1 - e^{-\frac{t'}{T_m}}), \\ \omega &= \varepsilon t - \varepsilon T_m(1 - e^{-\frac{t'}{T_m}}). \end{aligned} \quad (3.121)$$

Перехідний процес закінчується за час, який приблизно дорівнює $3T_m$.

Другий етап закінчується в момент часу t_2 , коли керуючий сигнал досягає заданого значення і його подальший ріст припиняється. Двигун при цьому виходить на природну механічну характеристику.

На третій ділянці має місце перехідний процес на природній механічній характеристиці. Введемо новий відлік часу з t_2 , позначивши його $t'' = t - t_2$. На третій ділянці перехідний процес описується диференціальними рівняннями:

$$T_m \frac{dM_o}{dt} + M_o = M_c, \quad (3.122)$$

$$T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c. \quad (3.123)$$

При початкових умовах $M_{поч} = M_c + J\varepsilon$, $\omega = \omega_{поч}$ дані рівняння мають розв'язок:

$$M_o = M_c (1 - e^{-\frac{t''}{T_m}}) + M_{поч} e^{-\frac{t''}{T_m}}, \quad (3.124)$$

$$\omega = \omega_c (1 - e^{-\frac{t''}{T_m}}) + \omega_{поч} e^{-\frac{t''}{T_m}}. \quad (3.125)$$

Залежності швидкості і моменту двигуна від часу при лінійному законі зміни керуючого сигналу показані на рис. 3.19, а динамічні механічні характеристики при пуску двигуна — на рис. 3.20. Як впливає із наведених залежностей, на більшій частині перехідного процесу динамічний момент і прискорення двигуна є не залежать від навантаження і визначаються прискоренням зміни напруги на виході перетворювача.

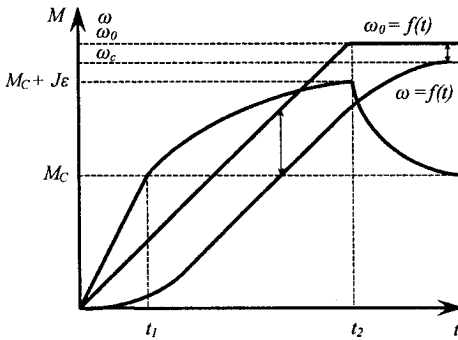


Рис. 3.19. Зміна швидкості і моменту двигуна у часі при його пуску в системі ТП-Д

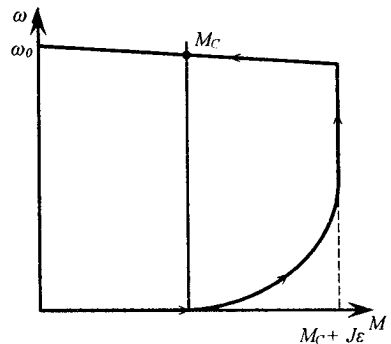


Рис. 3.20. Механічні характеристики при пуску двигуна

Залежності M і ω , отримані при пуску двигуна, зберігають свою силу для гальмування і реверсу при лінійному законі зміни керуючого сигналу.

3.8. Приклад

Розрахувати і побудувати криву перехідного процесу швидкості при пуску на штучній характеристиці ДПС НЗ 2ПН100УХЛ4 привода робочої машини з механічною характеристикою, лінійно залежною від швидкості. Параметри МХ РМ: $M_{c0} = 2 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_{c.\text{ном}} = 6 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\omega_{\text{ном}} = 330 \text{ рад/с}$. Технічні дані двигуна: $P_{\text{ном}} = 2,2 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$; $n_{\text{ном}} = 3150 \text{ об/хв}$; $\eta_{\text{ном}} = 81\%$; $R_{\text{дв}} = 1 \text{ Ом}$. Опір пускового резистора $R_p = 4 \text{ Ом}$. Зведений до вала двигуна момент інерції системи $J_{\text{зв}} = 0,065 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Розв'язок. 1. Номінальний струм двигуна:

$$I_{\text{ном}} = 1000 P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} = 1000 \cdot 2,2 / 220 \cdot 0,81 = 12,3 \text{ А}.$$

2. Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{\text{ном}} = \pi n_{\text{ном}} / 30 = 3,14 \cdot 3150 / 30 = 330 \text{ рад/с}.$$

3. Коефіцієнт пропорційності:

$$c = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} \cdot R_{\text{дв}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{220 - 12,3 \cdot 1}{330} = 0,63 \text{ В}\cdot\text{с} / \text{рад} (\text{Н}\cdot\text{м} / \text{А}).$$

4. Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 9550 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9550 \cdot 2,2 / 3150 = 6,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

5. Швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0 = U_{\text{ном}} / c = 220 / 0,63 = 349 \text{ рад/с}.$$

6. Момент короткого замикання на штучній характеристиці:

$$M_{\text{к.з}} = I_{\text{к.з}} \cdot c = U_{\text{ном}} \cdot c / (R_{\text{дв}} + R_p) = 220 \cdot 0,63 / (1 + 4) = 27,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

7. Коефіцієнт пропорційності МХ робочої машини:

$$k = (M_{c.\text{ном}} - M_{c.0}) / \omega_{\text{ном}} = (6 - 2) / 330 = 0,012 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с} / \text{рад}.$$

8. Усталена швидкість двигуна після розгону:

$$\begin{aligned} \omega_c &= (M_{\text{к.з}} - M_{c.0}) \omega_0 / (M_{\text{к.з}} + k \omega_0) = \\ &= (27,7 - 2) \cdot 350 / (27,7 + 0,012 \cdot 350) = 283 \text{ рад/с}. \end{aligned}$$

9. Електромеханічна стала часу:

$$T'_m = J \omega_0 / (M_{к.з} + \kappa \omega_0) = 0,0565 \cdot 349 / (27,7 + 0,012 \cdot 350) = 0,62 \text{ с.}$$

10. Рівняння перехідного процесу швидкості:

$$\omega = \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_m}} \right) = 283 \left(1 - e^{-\frac{t}{0,62}} \right).$$

11. Задаючи значення часу t від 0 до 5 с, за формулою перехідного процесу розраховуємо значення кутової швидкості ω (табл. 3.2) і будуємо графік (рис. 3.21).

Таблиця 3.2

$t, \text{с}$	$\omega, \text{рад/с}$
0	0,0
0,5	156,3
1	226,3
1,5	257,6
2	271,6
2,5	277,9
3	280,7
3,5	282,0
4	282,5
4,5	282,8
5	282,9

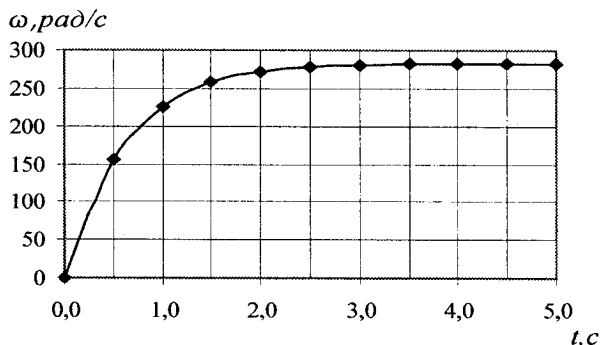


Рис. 3.21. Крива перехідного процесу швидкості при пуску двигуна 2ПН100УХЛ4

3.9. Питання для самоконтролю

1. Які процеси в електромеханічній системі відносять до перехідних?
2. Які види інерції діють в системах електропривод-робоча машина?
3. Які фактори впливають на тривалість перехідних процесів?
4. За яким рівнянням визначають час пуску або гальмування системи електродвигун-робоча машина?
5. Чому доводиться визначати час пуску або гальмування системи електродвигун-робоча машина графоаналітичним методом?
6. Які вихідні дані для визначення часу пуску або гальмування системи електродвигун-робоча машина графоаналітичним методом? яка методика визначення?

7. Якими вихідними рівняннями користуються при аналізі механічних перехідних процесів?
8. Якими рівняннями описуються перехідні процеси швидкості, струму, моменту в електроприводах з лінійною механічною характеристикою двигуна при $M_c = \text{const}$ і $J = \text{const}$? Які графіки цих залежностей?
9. Якими рівняннями описуються перехідні процеси швидкості, струму, моменту в електроприводах з лінійними механічними характеристиками двигуна та робочої машини і $J = \text{const}$? Які графіки цих залежностей?
10. Що таке електромеханічна стала часу? Від чого залежить її величина?
11. Як змінюються швидкість і момент двигуна при лінійному законі зміни керуючого сигналу?



4. РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В РОЗІМКНЕНИХ СИСТЕМАХ

4.1. Загальні поняття про регулювання координат електропривода

Координатами електропривода називають параметри, які регулюють за наперед визначеним законом або стабілізують на певному рівні. До них відносять кутову швидкість, струм, потужність, момент, кутове та лінійне прискорення, положення та ін. Регулювання координат електропривода потрібно здійснювати при керуванні як в усталеному, так і неусталеному режимах роботи виконавчих органів робочих машин.

В електроприводах сільськогосподарських машин найчастіше регулюють кутову швидкість. Прикладами таких машин є вентилятори, насоси дозатори, льонопереробні машини, металообробні верстати, випробувальні стенди тощо.

Регулювання швидкості — це вимушена зміна швидкості за допомогою певного пристрою відповідно до вимог технологічного процесу незалежно від величини статичного моменту на валу двигуна. Нове значення швидкості в розімкнених системах не залишається сталим, якщо статичний момент на валу двигуна змінюється.

Регулювати швидкість робочого органу можна зміною параметрів передавального пристрою, передаточного числа варіатора чи пасової передачі, зміною збудження електромагнітної муфти ковзання або зміною частоти обертання приводного електродвигуна. В сучасних регульованих електроприводах, як правило, регулювання здійснюється за рахунок зміни швидкості двигуна.

Швидкість обертання електродвигунів регулюють двома способами — параметричним і в замкнених системах. При параметрич-

ному регулюванні в розімкнених системах швидкість змінюють шляхом зміни параметрів електричного кола двигуна (опору, ємності, індуктивності) або напруги. Якість такого регулювання, як правило, невисоке.

З метою одержання процесу регулювання з високими якісними показниками застосовують замкнені системи електроприводів із зворотними зв'язками.

4.2. Основні показники регулювання кутової швидкості електроприводів

Регульований електропривод оцінюють за такими показниками:

1. Діапазон регулювання. Це основний показник регульованого електропривода і характеризується відношенням можливої максимальної швидкості обертання при даному способі регулювання до мінімальної, тобто $D = \omega_{\text{макс}} / \omega_{\text{мін}}$. Значення $\omega_{\text{макс}}$ формується схемою керування. В каталожних даних на двигун наводиться номінальне і максимальне значення частоти обертання (двигуни серій 2П, 4П). Фактичне значення максимальної швидкості не повинне перевищувати каталожне, щоб забезпечити механічну міцність і комутаційну здатність двигуна. Співвідношення каталожних значень максимальної швидкості і номінальної для різних потужностей і номінальних напруг неоднакове. Так, для двигуна серії 2П номінальною напругою 110 В і номінальною потужністю 0,5 кВт $\omega_{\text{ном}} = 104,7$ рад/с, а $\omega_{\text{макс}} = 418,8$ рад/с. Для двигуна цієї ж потужності і номінальною напругою 220 В $\omega_{\text{ном}} = 104,7$ рад/с, а $\omega_{\text{макс}} = 209,4$ рад/с. Ці співвідношення можуть бути для деяких двигунів 1,27 і, отже, не характеризуються сталою величиною для серії двигунів.

Мінімальна швидкість обертання в регульованому приводі визначається технологічним процесом і обмежується точністю підтримання швидкості при коливаннях статичного моменту на валу двигуна. При зниженні жорсткості механічної характеристики знижуватиметься і точність підтримання швидкості.

Якщо не задається діапазон коливання статичного моменту, а звідси і швидкості, то приймають його коливання на валу двигуна від 0 до $(1,5 - 2)M_{\text{с,розр}}$ ($M_{\text{с,розр}}$ — розрахунковий статичний момент на валу двигуна). Якщо знизити при потребі параметр $\omega_{\text{мін}}$, то при зазначених вище коливаннях статичного моменту двигун зупиниться.

З рис. 4.1 випливає, що жорсткі характеристики ($U < U_n$, $\omega_{\min}$) при заданому коливанні статичного моменту дають можливість збільшити діапазон регулювання, а м'які ($R_p > 0$, $\omega_{\min}$) — зменшують.

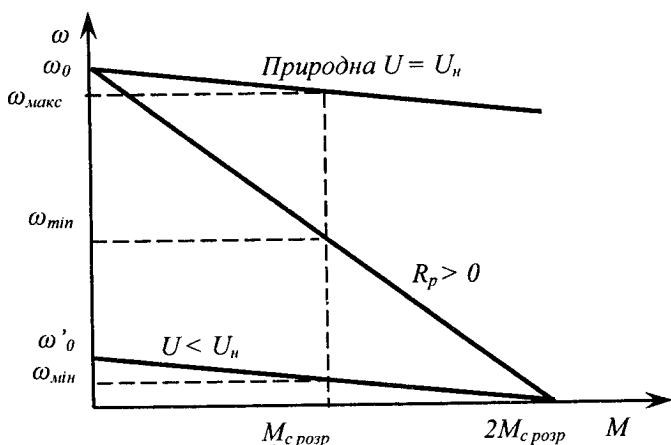


Рис. 4.1. Визначення діапазону регулювання ДПС НЗ при різних значеннях модуля жорсткості механічних характеристик

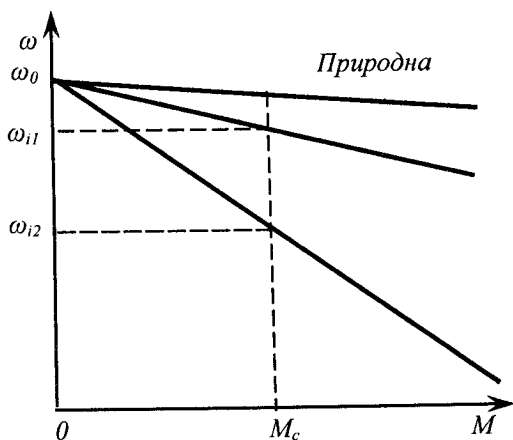


Рис. 4.2. Зміна коефіцієнта плавності регулювання швидкості ДПС НЗ при механічних характеристиках різної жорсткості

2. Плавність регулювання. Характеризує скачок швидкості при переході від даної швидкості до найближчої другої. Коефіцієнт плавності $\Pi = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}}$, де ω_i , ω_{i-1} — значення кутової швидкості на сусідніх регульовальних характеристиках ($\omega_i > \omega_{i-1}$). Висока плавність має місце, якщо $\Pi \rightarrow 1$.

При регулюванні швидкості привода за допомогою зміни опорів в якірному колі двигуна плавність зростає (Π зменшується) при збільшенні числа ступенів регулюючого реостата (рис. 4.2). При цьому збільшується число контакторів, що шунтують пускові ступені і, як наслідок, зростають вартісні показники привода. Вимоги до плавності регулюючого привода визначаються технологічним процесом. При живленні якірною кола двигуна по схемі генератор — двигун забезпечується досить висока плавність ($\Pi \rightarrow 1$).

3. Стабільність роботи. Технологічний процес відбувається, як правило, з певними коливаннями статичного моменту. Як наслідок має місце коливання швидкості робочих органів машини, яке обмежується технологіями. При незмінному коливанні статичного моменту $\pm M_c$ коливання частоти обертання приводного двигуна і робочих органів машини залежить від жорсткості механічної характеристики двигуна (рис. 4.3). При зниженні жорсткості коливання швидкості $\pm \Delta\omega$ можуть приймати недопустимі значення, що призводить до зниження діапазону регулювання.

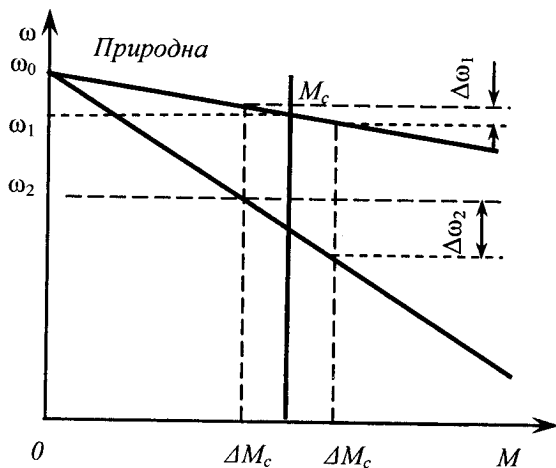


Рис. 4.3. Вплив жорсткості механічної характеристики ДПС НЗ на коливання швидкості обертання

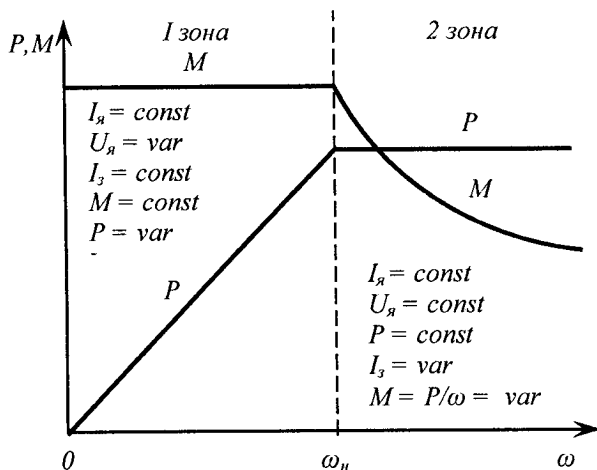


Рис. 4.4. Характеристика двозонного регулювання швидкості ДПС НЗ

4. Допустиме навантаження двигуна. В процесі регулювання швидкості допустимим навантаженням вважається таке, при якому в тривалому режимі струм в якорному колі і колі збудження не перевищує номінального значення. При цьому температура двигуна також буде в межах допустимої межі.

Навантаження двигуна при зміні його швидкості залежить від виду механічної характеристики робочої машини, що приводиться в рух. Якщо не враховувати статичний момент зрушення робочої машини, то споживана потужність робочих машин буде визначатись:

$$P_c = M_{c.n} \omega \quad (x=0); \quad P_c = M_{c.n} \cdot \omega^2 / \omega_n \quad (x=1);$$

$$P_c = M_{c.n} \cdot \omega^3 / \omega_n^2 \quad (x=2); \quad P_c = M_{c.n} \cdot \omega_n \quad (x=-1).$$

Якщо привод машини здійснюється двигуном постійного струму незалежного збудження, то регулювання швидкості відбувається шляхом впливу на якорне коло або на коло збудження, тобто є дві зони регулювання. Умовно вважаємо першою зону, коли змінюються параметри якорного кола, а другою — параметри кола збудження. Щоб двигун мав допустимий температурний режим, струм якорного кола не повинен перевищувати номінальний. Якщо за цієї умови змінювати напругу на якорі від нуля до номінальної, то потужність

буде також змінюватись за лінійним законом. При сталому струмові збудження (I_3) момент двигуна при зміні швидкості залишиться незмінним, оскільки струм якоря не змінюється (рис. 4.4). В першій зоні регулювання швидкості привод постійного струму незалежного збудження може забезпечити раціональний режим роботи машини, в рівнянні механічної характеристики якої показник степеня $x = 0$. Перша зона характеризується регулюванням вниз від номінальної швидкості. При цьому у двигунів з самовентильацією погіршується тепловіддача і може статися їх перегрівання. Ось чому в приводах з великим діапазоном регулювання швидкості необхідно використовувати двигуни з незалежною вентиляцією, наприклад, 2ПФ, 4ПФ.

При незмінних струмі і напрузі якоря регулювання швидкості можна здійснювати за рахунок зміни струму збудження (I_3). В зоні 2 потужність залишається сталою, а момент змінюватиметься за гіперболічним законом. Робота привода в другій зоні забезпечує раціональний режим робочих машин, в рівнянні механічних характеристик яких показник степеня $x = -1$, а регулювання здійснюється вгору від номінальної швидкості обертання двигуна.

Для машин, що характеризуються показником степеня у рівнянні механічної характеристики $x = 1$ і $x = 2$ в розімкнених системах регульованих приводів постійного струму незалежного збудження неможливо забезпечити раціональний режим роботи ні в першій, ні в другій зонах. Допустиме навантаження на двигун повинно прийматись при можливому максимальному значенні швидкості обертання. При нижчих швидкостях обертання двигун буде не завантажений.

5. Напрямок регулювання. В регульованих приводах за базисну величину приймають номінальну швидкість обертання двигуна. Регулювання швидкості обертання може здійснюватись вниз і вгору відносно до номінальної. Напрямок регулювання враховують при виборі способу регулювання.

6. Економічність. Регульований електропривод повинен забезпечити високу продуктивність машини, агрегату при високій якості кінцевого продукту. На стадії проектування електропривода, крім технологічних вимог, враховують його надійність та вартісні показники при проектуванні та експлуатації. Як правило, приймається той варіант регульованого електропривода, який забезпечує вимоги технологічного процесу, має невисокі вартісні показники і мінімальне питоме споживання електроенергії.

4.3. Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму

Можливі способи регулювання швидкості обертання ДПС витікають з рівняння механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{M(R_{\text{дв}} + R_p)}{K^2\Phi^2}, \quad (4.1)$$

де U — напруга джерела живлення кола якоря; M — електромагнітний момент; $R_{\text{дв}}$ — внутрішній опір двигуна; R_p — опір реостата в колі якоря; Φ — магнітний потік; K — конструктивний коефіцієнт ДПС.

Таким чином, регулювати швидкість ДПС можна зміною напруги на якорі, опору реостата та магнітного потоку.

4.3.1. Регулювання кутової швидкості ДПС НЗ зміною напруги на якорі

Двигуни постійного струму серії 2П виготовляються з незалежним збудженням, а серії 4П — з незалежним і паралельним. Для регулювання швидкості приводів зміною напруги на якорі використовують двигуни незалежного збудження.

Двигуни серії 4П допускають регулювання швидкості від номінальної до максимальної, зазначеної в каталожних даних, при номінальній напрузі на обмотці збудження зміною напруги на якорі тривалістю не більше 5 хв при номінальному струмі якоря і тривало — зі струмом якоря $0,8 I_n$. При цьому для двигунів з номінальною напругою якірного кола 110, 220 і 440 В допустиме підвищення напруги на якорі дорівнює відповідно 220, 330 і 460 В.

З метою регулювання швидкості ДПС НЗ зміною напруги на якорі використовують перетворювачі, що мають на виході регульовану постійну напругу. В сучасних приводах найчастіше використовують статичні перетворювачі трифазної напруги в регульовану постійну, побудовані на силових тиристорах або транзисторах. Рідше застосовують машинні перетворювачі з використанням генератора постійного струму. Ці системи скорочено називають КВ — Д або Г — Д (керований вентиль — двигун, генератор — двигун).

Система керований вентиль — двигун. Електрорушійна сила (ЕРС) на виході керованого статичного перетворювача напруги

ривчастих струмів. При цьому струм якоря певні проміжки часу дорівнює нулю. В цій зоні аналітичний опис процесу занадто складний.

З еквівалентної схеми живлення якоря двигуна постійного струму від статичного перетворювача напруги (рис. 4.6), що працює в режимі неперервних струмів, виходячи з другого закону Кірхгофа, одержимо:

$$E_d - \Delta U_g - E = (R_{e.n} + R_p + R_{\gamma})I, \quad (4.4)$$

де ΔU_g — втрати напруги на тиристорі в період пропускання струму; $R_{e.n}$ — еквівалентний опір перетворювача напруги; R_p — опір реактора (може бути відсутній); R_{γ} — опір якоря двигуна.

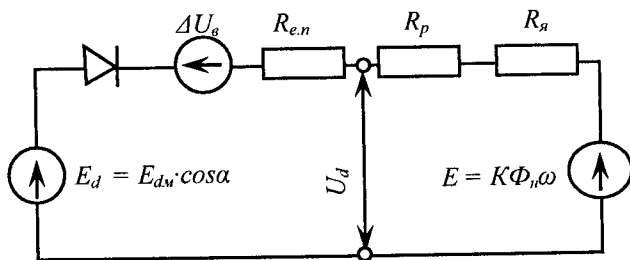


Рис. 4.6. Еквівалентна схема живлення двигуна постійного струму від статичного перетворювача

Замінивши в формулі (4.4) електрорушійну силу E через параметри $K\Phi_n \omega$, а E_d виразом (4.1) і розв'язавши відносно ω , одержимо рівняння електромеханічної характеристики двигуна, що живиться від статичного перетворювача напруги, для неперервного режиму:

$$\omega = \frac{E_{dM} \cos \alpha - \Delta U_B - R_{\Sigma} I}{K\Phi_{ном}}, \quad (4.5)$$

де $R_{\Sigma} = R_{e.n} + R_p + R_{\gamma}$.

Механічну характеристику одержимо із формули (4.5) після зміни $I = M / K\Phi_{ном}$:

$$\omega = \frac{E_{dM} \cos \alpha - \Delta U_B}{K\Phi_{ном}} - \frac{R_{\Sigma}}{(K\Phi_{ном})^2} M, \quad (4.6)$$

Рівняння (4.5) і (4.6) є лінійними з ординатою

$$\omega_0 = \frac{E_{dm} \cos \alpha - \Delta U_{\text{в}}}{K\Phi_{\text{ном}}} \quad (4.7)$$

Рівняння (4.5) та (4.6) в режимі неперервного струму зображують прямими паралельними лініями (рис. 4.5, лінії 1). Згідно з виразом (4.3) точки граничного режиму на рис. 4.5 розміщуються на пунктирній лінії 2, що являє собою дугу еліпса.

У режимі переривчастих струмів жорсткість електромеханічних і механічних характеристик знижується. Пояснюється це тим, що ЕРС самоіндукції при малих струмах в колі якоря мала і недостатня для підтримання струму в якірному колі. В результаті цього випрямлена напруга перетворювача зростає. Отже, в зоні переривчастих струмів залежності (4.5), (4.6) є нелінійними (рис. 4.5, лінії 3).

Для приводів середньої і великої потужності зона переривчастих струмів незначна і нею можна знехтувати при розімкнутій схемі регулювання швидкості. В замкнутих системах регулювання з зворотними зв'язками по струму робота привода в зоні переривчастих струмів не забезпечує заданих параметрів, оскільки зворотні зв'язки при цьому практично не діють.

При керуванні двигуном постійного струму (рис. 4.7) за рахунок задаючого сигналу U_z можна з високою плавністю одержати будь-яке значення частоти обертання від номінальної до мінімальної, яка обмежується жорсткістю характеристик і коливаннями статичного моменту.

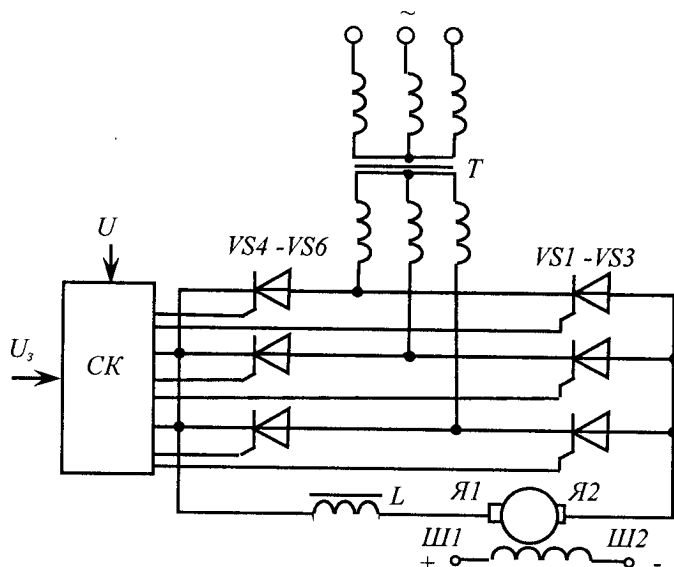
Модуль жорсткості механічної характеристики M можна визначити із залежності $M = K\Phi_{\text{ном}} I$, якщо замість I підставити його значення із формули (4.4):

$$M = \frac{K\Phi_{\text{ном}} (E_d - \Delta U_{\text{в}})}{R_{\text{екв}}} - \frac{(K\Phi_{\text{ном}})^2 \omega}{R_{\text{екв}}}, \quad (4.8)$$

$$\frac{dM}{d\omega} = - \frac{(K\Phi_{\text{ном}})^2}{R_{\text{екв}}}. \quad (4.9)$$

До еквівалентного опору $R_{\text{екв}}$ входять опір якоря двигуна, опір реактора і еквівалентний опір статичного перетворювача напруги. Як видно із рівняння (4.8) модуль жорсткості механічних характеристик двигуна при живленні від ТПН однаковий при різних значеннях кута α і він менший за модуль жорсткості природної характери-

стики двигуна, що живиться від мережі постійного струму великої потужності.



4.7. Схема керування ДПС НЗ при живленні якоря від ТРН

У режимі неперервних струмів двигун постійного струму незалежного збудження, що живиться від статичного перетворювача напруги (рис. 4.5) може працювати в режимі двигуна (зона, обмежена осями координат і електромеханічною характеристикою при $\alpha = 0$), режимі динамічного гальмування (характеристика при $\alpha = \pi/2$), гальмування противмиканням (зона, обмежена початком координат, віссю абсцис і характеристикою при $\alpha = \pi/2$), рекуперативне гальмування (зона, обмежена початком координат, характеристикою $\alpha = \pi/2$ і лінією граничного інвертування 6). При цьому максимальна частота обертання двигуна при інвертуванні визначається за формулою:

$$\omega_{i, \max} = \frac{-E_{d\max} \cos \delta - \Delta U_{\sigma} - \left(\frac{mX_m}{2\pi} - R_m - R_p - R_{\pi} \right) \cdot I}{K\Phi_{\text{ном}}}, \quad (4.10)$$

де δ — кут відновлення закритого стану тиристора ($\delta \approx 3^\circ$); X_m — індуктивний опір фази трансформатора, викликаний полем розсіювання; R_m — активний опір фази трансформатора.

Гальмівні режими двигуна постійного струму незалежного збудження, якірне коло якого живиться від тиристорного перетворювача напруги, можуть мати місце лише при активному статичному моменті.

Для реверсування двигуна використовують реверсивні ТПН, які складаються з двох нереверсивних перетворювачів. Варіанти реверсивних перетворювачів відрізняються, як правило, способом керування комплектами тиристорних перетворювачів для керування двигуном. Існують схеми, в яких обидва комплекти, що входять до складу реверсивного перетворювача напруги, одержують одночасно сигнали на відкриття тиристорів $VS1 - VS6$ і $VS7 - VS12$ (рис. 4.8). Якщо привод працює в режимі двигуна, то комплект вентилів $1B$ працює в режимі випрямлення, а комплект $2B$ в режимі інвертування. При цьому ЕРС інвертора повинна бути більшою за ЕРС випрямляча.

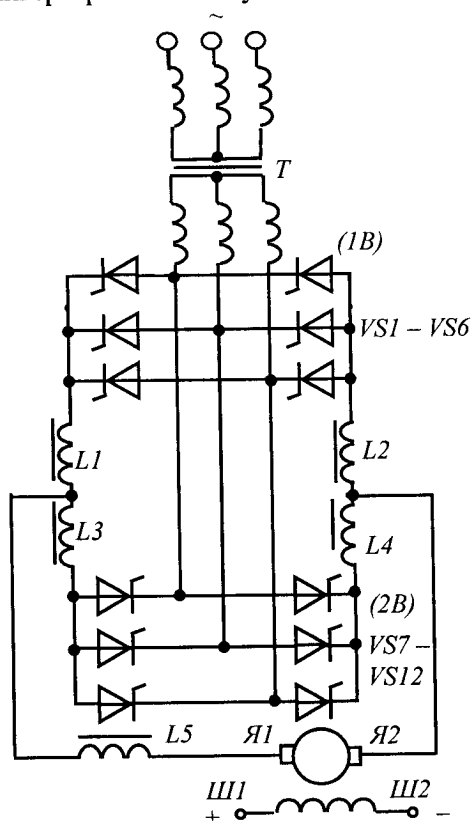


Рис. 4.8. Схема реверсивного електропривода з ТПН

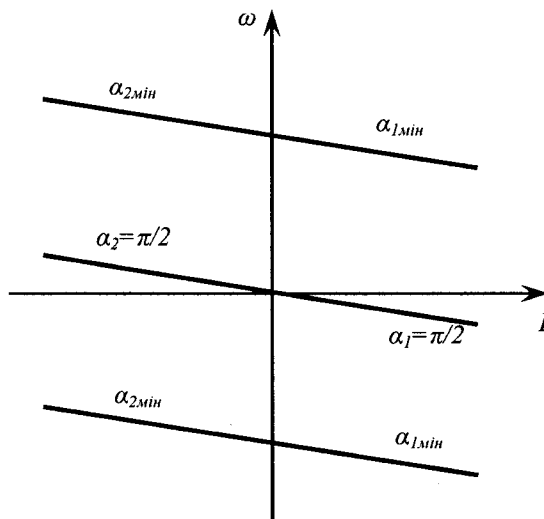


Рис. 4.9. Електромеханічні характеристики привода з ТПН при спільному керуванні комплектами тиристорів і лінійному узгодженні

Це виключить проходження струму від $1B$ через $2B$ в електричну мережу. В схемі (рис. 4.8) з метою обмеження вирівнювальних струмів між перетворювачами напруги $1B$ і $2B$ вмикають реактори $L1 — L4$.

Схема реверсивного керування з реакторами має дещо нижчий коефіцієнт корисної дії привода за рахунок втрат електроенергії в реакторах. Крім того, для схеми з реакторами $L1 — L4$ потрібно додатково витратити електротехнічну сталь і мідь.

При спільному керуванні комплектами перетворювачів, що входять до складу реверсивного перетворювача, і лінійному узгодженні кутів керування обома комплектами тиристорів електромеханічні (механічні) характеристики є лінійними залежностями (рис. 4.9). При цьому режим переривчастих струмів практично зникає за рахунок дії реакторів при струмі в якорному колі, що дорівнює нулю. В разі роздільного керування комплектами перетворювачів, що входять до складу реверсивного, один із них одержує сигнали керування, а другий — ні. Тоді вирівнювальний струм між комплектами $B1$ і $B2$ відсутній, оскільки один із них «закритий» і тому реактори $L1 — L4$ (рис. 4.8) не використовуються. При відсутності реакторів з'явля-

ється переривчастий режим і тому електромеханічні характеристики в зоні малих струмів нелінійні (рис. 4.10). Схема реверсивного електропривода з роздільним керуванням не використовується при роботі з частотою обертання, що дорівнює частоті ідеального холостого ходу або дуже малих струмах в якірному колі. Останнє пояснюється тим, що при малих струмах двигун працює в режимі переривчастого режиму. Незалежно від системи керування реверсивним ТПН вони мають однакову еквівалентну схему (рис. 4.11). Позначення на рис. 4.11 такі самі, як на рис. 4.6.

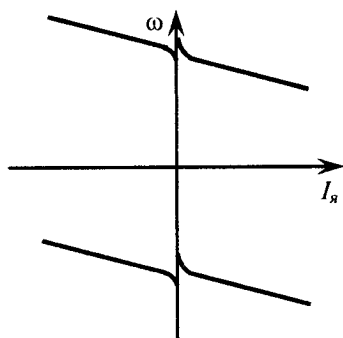


Рис. 4.10. Електромеханічні характеристики реверсивного електропривода з ТПН при роздільному керуванні комплектами і лінійному узгодженні

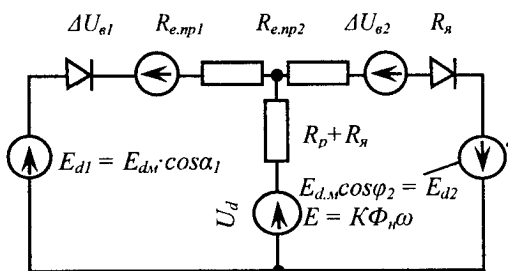


Рис. 4.11. Еквівалентна схема реверсивного електропривода з ТПН

Схеми реверсивного керування електродвигуном вибирають залежно від вимог технологічного процесу.

Тиристорний перетворювач напруги дає можливість регулювати швидкість обертання ДПС НЗ з коефіцієнтом плавності близьким до одиниці (це досить високий коефіцієнт). При цьому діапазон регулювання невеликий (8–10), що пояснюється збільшенням опору якірного кола ($R_{e.n} + R_p + R_{я}$) згідно з формулою (4.4) і як наслідок зменшенням модуля жорсткості. Тиристорний привод має досить високий ККД (0,85–0,9).

До недоліків слід віднести: пульсуючий характер напруги і струму в якірному колі, що призводить до появи переривчастого режиму роботи двигуна, що погіршує роботу привода в замкнутій

системі із зворотними зв'язками по струму. Пульсуючий характер напруги і струму в якірному колі двигуна зумовлює використання реактора в якірному колі. При збільшенні діапазону регулювання тиристорного електропривода знижується коефіцієнт корисної дії η і коефіцієнт потужності χ установки (рис. 4.12). Тиристорні приводи спотворюють форму напруги і струму джерела живлення. ТПН мають невисоку перевантажувальну здатність по струму і напрузі, що в окремих випадках обмежує їх використання.

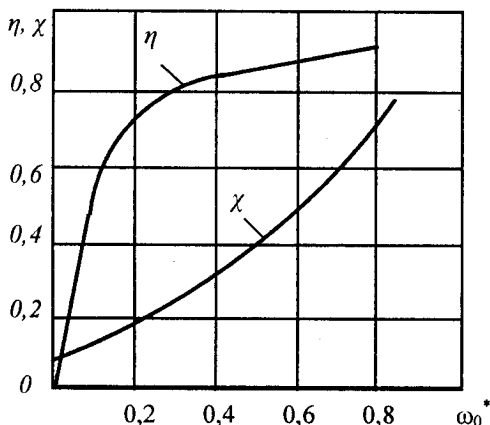


Рис. 4.12. Залежність ККД η і коефіцієнта потужності χ від швидкості обертання у відносних одиницях

Незважаючи на недоліки привода з ТПН, на сьогодні він найбільше задовольняє вимоги технологічного процесу в промисловості і окремих установок у сільському господарстві.

Регулювання напруги на якорі ДПС НЗ за допомогою тиристорного перетворювача напруги при номінальному струмі збудження забезпечує роботу привода в першій зоні регулювання, тобто при незмінному статичному моменті.

Система генератор-двигун. Напругу на якорі двигуна можна регулювати за допомогою електромашинного генератора, який забезпечує зміну ЕРС на затискачах двигуна в значних межах за допомогою системи генератор — двигун (рис. 4.13).

Для регулювання швидкості обертання двигуна в системі Г–Д необхідно мати мережу змінної і постійної напруги. Електрорушійна сила генератора регулюється потенціометром R_{32} від нуля (не врахо-

вуючи залишковий магнітний потік) до номінального значення. Електромеханічна і механічна характеристики двигуна при живленні його за схемою Г-Д описуються рівняннями:

$$\omega = \frac{E_z}{K\Phi_{ном}} - \frac{I(R_{я.д} + R_{я.г})}{K\Phi_{ном}}; \quad (4.11)$$

$$\omega = \frac{E_z}{K\Phi_{ном}} - \frac{M(R_{я.д} + R_{я.г})}{K\Phi_{ном}}; \quad (4.12)$$

де $R_{я.д}$, $R_{я.г}$ — відповідно опір якорного кола двигуна і генератора.

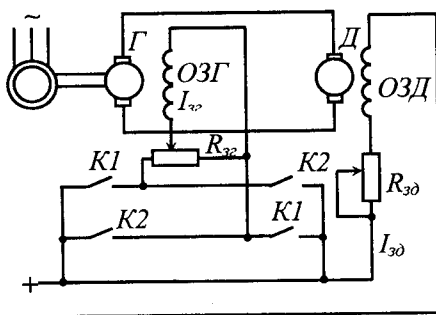


Рис. 4.13. Система Г-Д

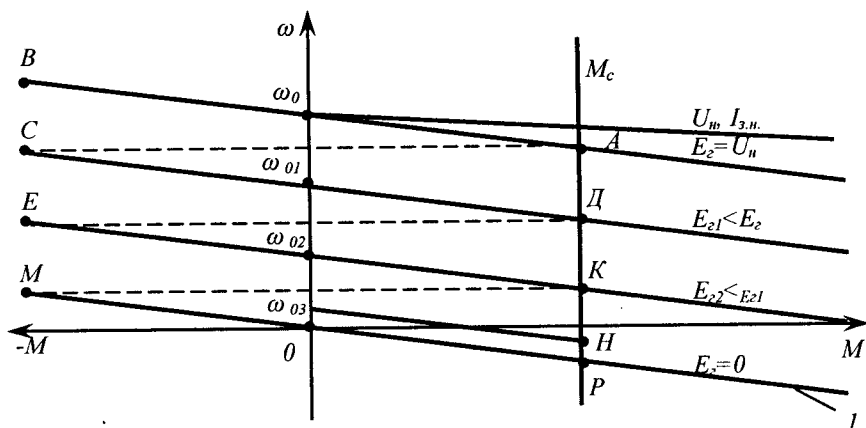


Рис. 4.14. Механічні характеристики ДПС НЗ у системі Г-Д

Як видно з рівнянь (4.11), (4.12), зміна ЕРС генератора E_e дає можливість одержати сімейство електромеханічних і механічних характеристик, які мають менший модуль жорсткості, ніж природна характеристика (рис. 4.14). Система Г — Д дає можливість реверсувати двигун зміною напрямку струму в обмотці збудження генератора $O3Г$ за рахунок контакторів $K1, K2$ (рис. 4.13), забезпечує роботу двигуна $Д$ в гальмівних режимах: рекуперативне, противмикання, динамічне.

Рекуперативне гальмування має місце за умови $\omega > \omega_{0i}$. У даному випадку ω_{0i} — швидкість ідеального холостого ходу при будь-якому значенні ЕРС генератора $Г$. В цей режим двигун може перейти при дії активного статичного моменту на вал двигуна з боку робочої машини (наприклад, сила тяжіння). Якщо система працювала в точці A (рис. 4.14) і почав діяти активний момент, то двигун розвантажується до точки ω_{0i} , а потім переходить в рекуперативний режим. В точці B моменти урівноважуються. Рекуперативне гальмування матиме місце і в тому разі, коли при роботі двигуна з реактивним статичним моментом в точці A швидко змінити ЕРС генератора з E_e до E_{e1} ($E_e > E_{e1}$). В силу інерційності механічної частини привода швидкість двигуна миттєво не зможе прийняти нове значення. З точки A система перейде в точку C , пройде рекуперативне гальмування до точки ω_{0i} і в точці D настане усталений режим. Отже, рекуперативне гальмування для одного напрямку обертання має місце в зоні, обмеженої віссю ординат і лінією I (рис. 4.14).

Динамічне гальмування в системі Г — Д здійснюється при $E_e = 0$, $I_{3,д} = I_{3,д.н.}$. Переведення системи в режим динамічного гальмування при реактивному статичному моменті можна здійснювати з точки K . Вимикаючи напругу обмотки збудження генератора, одержимо $E_e = 0$. Струм якоря і момент приймають від'ємне значення і система переходить з механічної характеристики двигуна (точка K) на характеристику динамічного гальмування (точка M) і потім в початок координат. Якщо переводити двигун в режим динамічного гальмування з точки A або D (рис. 4.14), то за рахунок порівняно великого значення ЕРС двигуна в якірному колі протікатиме великий струм і система захисту вимкне його. Якщо статичний момент на валу двигуна активний, то при нульовій швидкості система під дією активного моменту змінить напрямок обертання і в точці P матиме місце усталений режим (гальмівний спуск).

Гальмування противмиканням відбувається, якщо ЕРС генератора і двигуна збігаються за напрямком. У зв'язку з тим, що система Г — Д не передбачає вмикання додаткових резисторів в коло якоря

для обмеження струму гальмування противмиканням здійснюють при невеликих частотах обертання двигуна. Якщо знизити ЕРС генератора до величини, що відповідає швидкості ідеального холостого ходу ω_{0z} , то при активному статичному моменті система змінить напрям обертання і в точці H матиме місце усталений режим. Отже, зона гальмування противмиканням в системі $\Gamma - Д$ незначна і обмежена початком координат, додатною віссю моментів і лінією 1.

Механічні (електромеханічні) характеристики двигуна в системі $\Gamma - Д$ при всіх режимах роботи (двигунний і гальмівний) паралельні між собою, тому що опір якорного кола незмінний. Якщо двигун і генератор приблизно однакової потужності, то має місце співвідношення $R_{я,г} \approx R_{я,д}$. При цьому модуль жорсткості характеристик приблизно в два рази менший, ніж у двигуна, що працює від мережі. Зниження модуля жорсткості знижує діапазон регулювання швидкості в системі $\Gamma - Д$.

У приводах без підвищених вимог до стабільності роботи на мінімальній швидкості допускається зупинка двигуна при подвійному номінальному моменті (рис. 4.15). Рівняння механічної характеристики двигуна для точки $2M_n$ на підставі (4.12) має вигляд:

$$0 = \frac{E_{г\text{ мін}}}{K\Phi_{\text{ном}}} - \frac{2M(R_{я,д} + R_{я,г})}{(K\Phi_{\text{ном}})^2}, \quad (4.13)$$

або

$$\omega_{0z-д\text{ мін}} = 2M_{\text{ном}} \frac{(R_{я,д} + R_{я,г})}{(K\Phi_{\text{ном}})^2}. \quad (4.14)$$

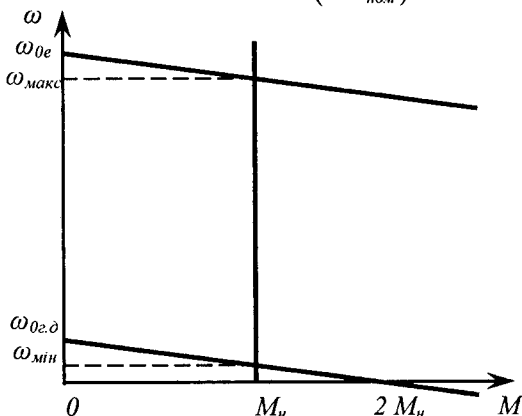


Рис. 4.15. До визначення граничного діапазону регулювання в системі $\Gamma - Д$

При номінальному моменті швидкість буде у два рази менша, ніж у виразі (4.14), що впливає з трикутника $0, \omega_{oe-\delta \min}, 2M$ (рис. 4.15):

$$\omega_{\min} = \frac{(R_{я.д} + R_{я.г})}{(K\Phi_{ном})^2} M_{ном}. \quad (4.15)$$

Максимальне значення швидкості обертання двигун матиме за умови $E_2 = U_{ном}$, ($M = M_{ном}$):

$$\omega_{\max} = \omega_{oe} - \frac{(R_{я.д} + R_{я.г})}{(K\Phi_{ном})^2} M_{ном}. \quad (4.16)$$

Розділивши (4.16) на (4.15) одержимо граничний максимальний діапазон регулювання:

$$D_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{\omega_{oe} (K\Phi_{ном})^2}{(R_{я.д} + R_{я.г}) M_{ном}} - 1. \quad (4.17)$$

Якщо вважати, що двигун і генератор мають майже однаковий опір якірного кола, то у відносних одиницях максимальний діапазон регулювання дорівнюватиме:

$$D_{\max} = \frac{1}{2R_{я}} - 1. \quad (4.18)$$

Так, двигун серії 2П потужністю 5,3 кВт має опір якірного кола у відносних одиницях 0,06. При цьому максимальний діапазон дорівнює 7.

Діапазон може бути значно більший у замкнених системах регулювання.

Система Г — Д, як уже відзначалося, дає можливість плавно регулювати швидкість в порівняно невеликому діапазоні (5...8), забезпечувати роботу двигуна в усіх квадрантах прямокутної системи координат, схема керування системою досить проста. При незмінному значенні ЕРС генератора ($E_2 = E_{2н}$) за рахунок зменшення струму збудження двигуна $I_{2д}$ можна забезпечити регулювання швидкості від номінальної, тобто система забезпечує двозонне регулювання.

Поряд із позитивним система Г — Д має недоліки. Це насамперед збільшення кількості електричних машин до трьох. При цьому установлена потужність системи становить дещо більше трикратної потужності двигуна. Система має низький ККД, особливо на понижений швидкості обертання (рис. 4.16).

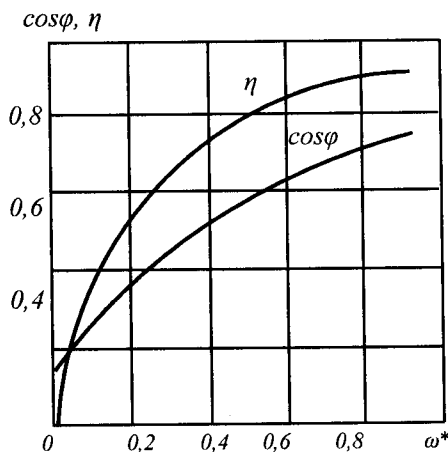
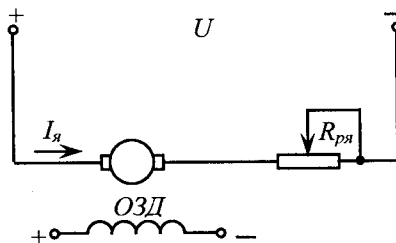


Рис. 4.16. Залежність $\cos \varphi$ і η системи $\Gamma — Д$ від швидкості при $M_c = M_{ном}$

4.3.2. Реостатне регулювання кутової швидкості ДПС НЗ

Регулювання кутової швидкості ДПС НЗ зміною величини резистора $R_{ря}$ в якорному колі (рис. 4.17). На відміну від пускових і гальмівних резисторів, які вибираються по струму для короткочасного режиму, резистори для регулювання швидкості обертання можуть працювати в тривалому режимі. Отже, при їх виборі залежно від струму враховують фактичний режим роботи. Опір регулювального резистора може змінюватись плавно або ступінчасто і як наслідок швидкість регулюється плавно або дискретно.



4.17. Схема вмикання ДПС НЗ при реостатному регулюванні швидкості обертання

Із формули (2.8) випливає, що зміна опору якірного кола не впливає на швидкість ідеального холостого ходу, а природна і штучні характеристики виходять з однієї точки (рис. 4.18). Регулювання швидкості здійснюється вниз від номінальної.

При незмінному струмі обмотки збудження двигун допускає навантаження, що дорівнює номінальному струму якоря (при постійній тепловіддачі двигуна). Отже, реостатне регулювання швидкості відноситься до першої зони. Слід відзначити, що при зниженні струму (моменту) двигуна регулювання становиться малоефективним.

Реостатне регулювання швидкості дає можливість створювати режим роботи двигуна в будь-якому з чотирьох квадрантів. Крім того, зона гальмування противмиканням і динамічного гальмування порівняно із системами КВ — Д, Г — Д значно більша (рис. 4.19). При активному моменті згадані гальмівні режими формуються в четвертому квадранті, а при реактивному — в другому. Зони гальмування обмежуються осями координат згаданих квадрантів і максимально допустимим моментом.

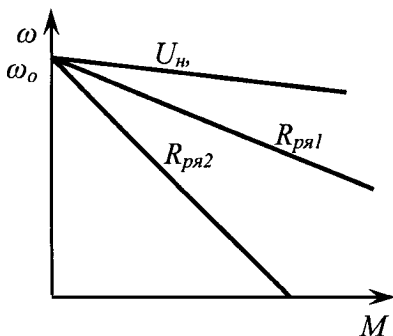


Рис. 4.18. Механічні характеристики ДПС НЗ при реостатному способі регулювання швидкості

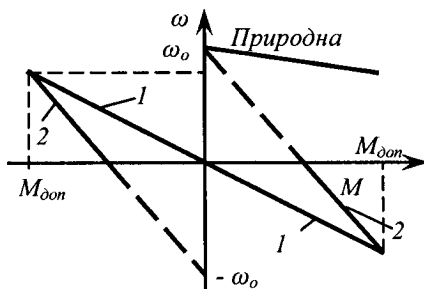


Рис. 4.19. Механічні характеристики ДПС НЗ у гальмівних режимах: 1,2 — відповідно динамічне гальмування та гальмування проти вмиканням з активним статичним моментом

Модуль жорсткості механічних характеристик неоднаковий і знижується при збільшенні опору в колі якоря. Невелика жорсткість штучних реостатних механічних характеристик обмежує діапазон регулювання. Діапазон регулювання визначається максимальною і мінімальною швидкостями обертання при номінальному моменті. Максимальна швидкість має місце на природній механічній характеристиці:

$$\omega_{\max} = \omega_0 - \frac{R_{\text{я.}}}{(K\Phi_{\text{ном}})^2} M_{\text{ном}} = \omega_0 - \frac{M_{\text{ном}}}{|\beta_{\text{пр}}|}, \quad (4.19)$$

де $\beta_{\text{пр}}$ — модуль жорсткості природної механічної характеристики.
Залежність (4.19) у відносних одиницях має вигляд:

$$\omega_{\star \max} = 1 - \frac{1}{|\beta_{\star \text{пр}}|} = \frac{|\beta_{\star \text{пр}}| - 1}{|\beta_{\star \text{пр}}|}. \quad (4.20)$$

Мінімальна швидкість визначається залежністю:

$$\omega_{\min} = \omega_0 - \frac{(R_{\text{я.}} + R_{\text{р.я.}})}{(K\Phi_{\text{ном}})^2} M_{\text{ном}} = \omega_0 - \frac{M_{\text{ном}}}{|\beta_{\min}|}, \quad (4.21)$$

Вираз (4.21) у відносних одиницях:

$$\omega_{\star \min} = 1 - \frac{1}{|\beta_{\star \min}|} = \frac{|\beta_{\star \min}| - 1}{|\beta_{\star \min}|}. \quad (4.22)$$

Розділивши (4.20) на (4.22), одержимо залежність діапазону регулювання від модуля жорсткості механічних характеристик:

$$D = \frac{(|\beta_{\star \text{пр}}| - 1)|\beta_{\star \min}|}{|\beta_{\star \text{пр}}|(|\beta_{\star \min}| - 1)}. \quad (4.23)$$

Із формули (4.23) випливає, що зменшення модуля жорсткості механічної характеристики з мінімальною швидкістю обертання при номінальному моменті збільшує діапазон регулювання.

Діапазон регулювання можна визначити, якщо модуль мінімальної жорсткості замінити допустимим відхиленням статистичного моменту. При $M_{\text{к.з}} = M_{\text{ном}} + \Delta M_{\text{с.доп}}$, модуль жорсткості визначається співвідношенням: $M_{\text{к.з}}/\omega_0$ або $(M_{\text{ном}} + \Delta M_{\text{с.доп}})/\omega_0$. Мінімальна швидкість визначається за виразом:

$$\omega_{\min} = \omega_0 - \frac{M_{\text{ном}}}{|\beta_{\min}|} = \omega_0 - \frac{\omega_0 M_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}} + \Delta M_{\text{с.доп}}}. \quad (4.24)$$

У відносних одиницях:

$$\omega_{*min} = 1 - \frac{1}{1 + \Delta M_{c.дон*}}. \quad (4.25)$$

Згідно із (2.19) рівняння природної механічної характеристики у відносних одиницях при номінальному моменті описується залежністю:

$$\omega_{*max} = 1 - R_{я*}, \quad (4.26)$$

де $R_{я*}$ — опір якоря у відносних одиницях.

Розділивши (4.26) на (4.25), одержимо:

$$D = \frac{(1 - R_{я*})(1 + \Delta M_{c.дон*})}{\Delta M_{c.дон*}}. \quad (4.27)$$

Якщо прийняти $\Delta M_{c.дон*} = 1$ і знехтувати величиною $R_{я*}$, яка дорівнює 0,05...0,1, то при реостатному регулюванні діапазон становить 2. При обґрунтованому зниженні відхилення статичного моменту від номінального до 0,5 діапазон регулювання не перевищує 3. Малий діапазон регулювання частоти обертання ДПС НЗ за допомогою резистора в якорному колі є одним із недоліків цієї системи.

Реостатне регулювання швидкості ДПС НЗ характеризується низьким ККД. Повна потужність, яку споживає двигун з електричної мережі при $M_c = const$, визначається залежністю:

$$P_1 = UI_{я} = \dot{\omega}_0 M.$$

Механічна потужність дорівнює:

$$P_M = \omega M.$$

Коефіцієнт корисної дії визначається відношенням:

$$\eta = \frac{P_M}{P_1} = \frac{\omega M}{\dot{\omega}_0 M} = \omega_*. \quad (4.28)$$

У зв'язку із значними втратами енергії при реостатному регулюванні швидкості ДПС НЗ його використовують в короткочасних режимах та в установках з малими діапазонами регулювання. Позитивним цієї системи регулювання є простота і незначні фінансові витрати на обладнання.

Регулювання швидкості ДПС НЗ шунтуванням якоря. З метою підвищення модуля жорсткості штучних механічних характеристик при реостатному регулюванні швидкості обертання ДПС НЗ вмикають резистори паралельно і послідовно якорю (рис. 4.20). Як видно з рис. 4.20 якір двигуна одержує живлення від резистора $R_{ш}$, який разом з резистором R_n утворюють потенціометр. Отже, розглядуваний спосіб регулювання швидкості обертання двигуна об'єднує два способи: зміну напруги на якорі та реостатний. Згідно з першим і другим законами Кірхгофа та рис. 4.20 одержуємо такі залежності:

$$U = E + I_a R_a + I_n R_n; \quad (4.29)$$

$$U = I_{ш} R_{ш} + I_n R_n; \quad (4.30)$$

$$I_n = I_a + I_{ш}. \quad (4.31)$$

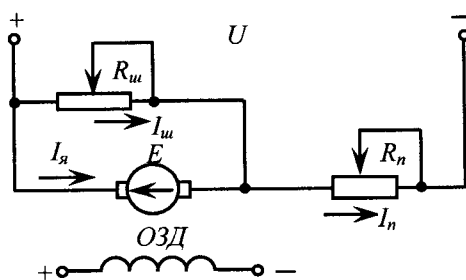


Рис. 4.20. Схема з шунтуванням якоря ДПС НЗ

Визначивши $I_{ш}$ з формули (4.30) і підставивши його в рівняння (4.31), одержимо:

$$I_n = I_a + \frac{U - I_n R_n}{R_{ш}}.$$

Розв'язавши відносно I_n , маємо:

$$I_n = \frac{U + I_a R_{ш}}{R_{ш} + R_n}. \quad (4.32)$$

Підставивши струм I_n з формули (4.32) в (4.29) і розв'язавши відносно ЕРС, одержимо:

$$E = U \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n} - I_a \left(R_a + R_n \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n} \right). \quad (4.33)$$

Відношення опорів $\frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n}$ позначимо коефіцієнтом a .

Електромеханічна і механічна характеристики з (4.33) мають вигляд:

$$\omega = a\omega_0 - \frac{I_{я}(R_{я} + aR_n)}{K\Phi_{ном}}; \quad (4.34)$$

$$\omega = a\omega_0 - \frac{M(R_{я} + aR_n)}{(K\Phi_{ном})^2}. \quad (4.35)$$

Рівняння (4.34), (4.35) є прямолінійні залежності. Модуль жорсткості штучних механічних характеристик більший, ніж при реостатному регулюванні швидкості без шунтування якоря. Швидкість ідеального холостого ходу змінюється при зміні опорів $R_{ш}$ або R_n . При цьому змінюється також і модуль жорсткості механічних характеристик. Оскільки характеристики непаралельні, то вони перетинаються у відповідній точці. Для знаходження координати точки перетину характеристик для випадку, коли $R_n = const$, а $R_{ш} = var$, рівняння двох механічних характеристик, що мають точку перетину при $M = M_l$ згідно з рівнянням (4.35) записують так:

$$a_1\omega_0 - \frac{R_{я} + a_1R_n}{(K\Phi_{ном})^2}M_l = a_2\omega_0 - \frac{R_{я} + a_2R_n}{(K\Phi_{ном})^2}M_l; \quad (4.36)$$

$$\omega_0(a_1 - a_2) = \frac{M_l}{(K\Phi_{ном})^2}(R_{я} + a_1R_n - R_{я} - a_2R_n);$$

$$a_1 = \frac{R_{ш1}}{R_n + R_{ш}}; \quad a_2 = \frac{R_{ш2}}{R_n + R_{ш}}.$$

Розв'язавши відносно M_l , одержимо:

$$M_l = \frac{UK\Phi_{ном}}{R_n}.$$

Підставивши значення M_l в (4.35) і розв'язавши відносно ω , одержимо:

$$\omega_1 = -\omega_0 \frac{R_{я}}{R_n}.$$

Отже, точка перетину механічних характеристик при $R_n = \text{const}$, $R_{ш} = \text{var}$ знаходиться в четвертому квадранті (рис. 4.21). Модуль жорсткості характеристик збільшується при зменшенні опору резистора $R_{ш}$ і при нульовому значенні $R_{ш}$ має модуль жорсткості такий, як і природної характеристики (режим динамічного гальмування з опором лише якоря).

Схема регулювання частоти обертання ДПС НЗ дає можливість одержувати різні діапазони за умови $R_{ш} = \text{const}$, $R_n = \text{var}$. При цьому жорсткість характеристик неоднакова.

Для знаходження координат точки перетину характеристик використовуємо співвідношення (4.36):

$$a_1 \omega_0 - \frac{R_{я} + a_1 R_{n1}}{(K\Phi_n)^2} M_2 = a_2 \omega_0 - \frac{R_{я} + a_2 R_{n2}}{(K\Phi_n)^2} M_2. \quad (4.37)$$

Розв'язавши рівняння (4.37) відносно M , одержимо $M_2 = -UK\Phi_n/R_{ш}$. Підставивши значення M_2 в формулу (4.35), одержимо координату ω_2 :

$$\omega_2 = \omega_0 \left(1 + \frac{R_{я}}{R_{ш}} \right).$$

При збільшенні опору резистора R_n зменшується модуль жорсткості механічних характеристик (рис. 4.22).

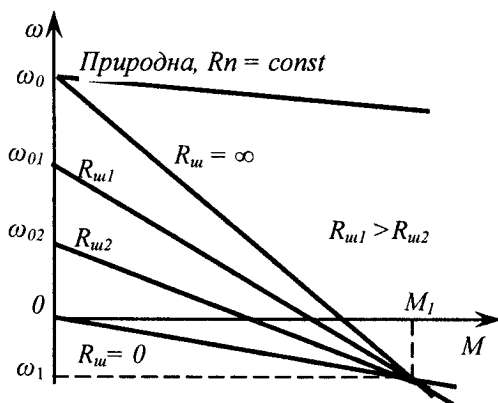


Рис. 4.21. Механічні характеристики ДПС НЗ при шунтуванні якоря для випадку $R_n = \text{const}$; $R_{ш} = \text{var}$

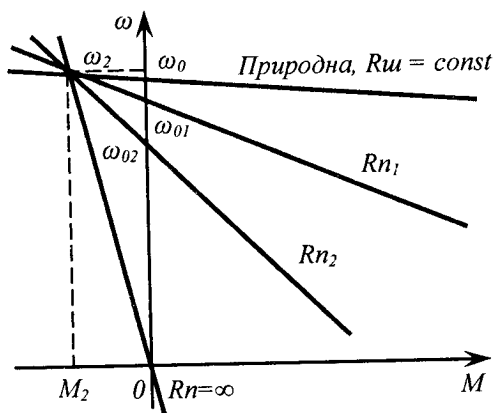


Рис. 4.22. Механічні характеристики ДПС НЗ при шунтуванні якоря для випадку $R_{\text{ш}} = \text{const}; R_n = \text{var}$

Спосіб регулювання швидкості ДПС НЗ шунтуванням якоря за допомогою двох резисторів дає можливість одержати діапазон регулювання до 5, плавність регулювання значно більша, ніж при реостатному регулюванні без шунтування якоря. Регулювання здійснюється при постійному струмі збудження, тобто в першому квадранті ($M_c = \text{const}$).

Недоліком цього способу регулювання є значні втрати електроенергії в резисторах $R_{\text{ш}}$ і R_n , тому регулювання швидкості шунтуванням якоря використовують у приводах з двигунами невеликої потужності. Крім того, двигун на зниженій частоті обертання повинен працювати короткочасно.

4.3.3. Регулювання кутової швидкості ДПС НЗ зміною магнітного потоку

Двигуни постійного струму серії 2П і 4П допускають регулювання кутової швидкості зниженням струму збудження (магнітного потоку). Згадані серії мають незалежне збудження (4П — незалежне і паралельне), що дозволяє регулювати швидкість вгору від номінального значення. Отже, це двигуни двозонного регулювання швидкості обертання. Основною ознакою цих двигунів є каталожне значення максимальної швидкості. Якщо двигуни призначені для регу-

лювання швидкості лише вниз від номінального значення (однозонне регулювання), то в каталожних даних наведені лише номінальні частоти обертання (двигуни серії П).

Відношення максимальної частоти обертання до номінальної різне для кожного типу двигуна і номінальної напруги. Так, для двигунів типорозміру 4ПФ112 з номінальними потужностями 4; 3,15 і 2 кВт і напругою 220 В номінальна частота обертання відповідно становить 900; 750 і 450 об/хв, а максимальна для всіх трьох двигунів — 5000 об/хв. Отже, не існує єдиного значення кратності підвищення частоти обертання відносно номінальної. При збільшенні номінальної частоти обертання двигуна, як правило, згадана кратність зменшується. Наприклад, для двигуна типорозміру 4ПБ100S2 номінальною потужністю 1,5 кВт і номінальною частотою обертання 3000 об/хв максимальна частота обертання становить 4000 об/хв.

Регулювання швидкості ДПС НЗ зменшенням магнітного потоку характеризується порівняно невеликою потужністю в колі регулювання (обмотці збудження).

Для двигунів серії 4П номінальний струм обмотки збудження становить 7 — 10 % номінального струму двигуна. В розімкнених системах з двигунами невеликої потужності струм обмотки збудження можна регулювати повзунковим реостатом (рис. 4.23), що дає можливість забезпечити високу плавність регулювання.

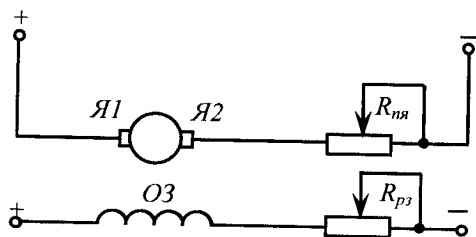


Рис. 4.23. Схема вмикання ДПС НЗ при регулюванні швидкості обертання зміною магнітного потоку

У приводах середньої і великої потужності для живлення обмотки збудження використовують статичні перетворювачі трифазної змінної напруги в регульовану постійну напругу. При цьому перетворювач може мати окремо регульовану постійну напругу для якорного кола і окремо для кола збудження (двобічний регулятор) (рис. 4.24).

При номінальному навантаженні двигуна його магнітна система практично насичена. Тому залежність $\Phi = f(I_3)$ є нелінійна (рис. 4.25), що унеможливило аналітичне розв'язання залежностей $\omega = f(I_3)$, $\omega = f(M)$. Допустимим навантаженням на двигун при зміні магнітного потоку слід вважати номінальний струм. Виходячи з цього, можна записати:

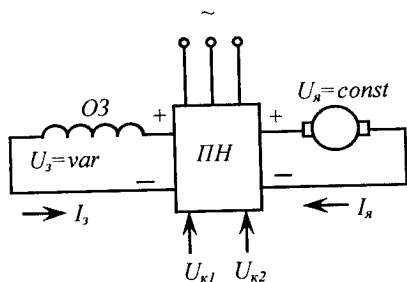


Рис. 4.24. Схема вмикання ДПС НЗ при регулюванні швидкості обертання зміною струму збудження I_3 : $U_{к1}$, $U_{к2}$ — відповідно задаючі сигнали керування напругою збудження (U_3) і якоря ($U_я$)

$$M_{дон} = K\Phi I_{яном}.$$

Регулювання швидкості обертання ДПС НЗ зміною магнітного потоку здійснюється за умови: $U_я = U_{ном}$, $I_я = I_{ном}$, отже $P = P_{ном}$. Допустимий момент за заданих умов має таку залежність: $M_{дон} = P_{ном}/\omega$ (рис. 4.26).

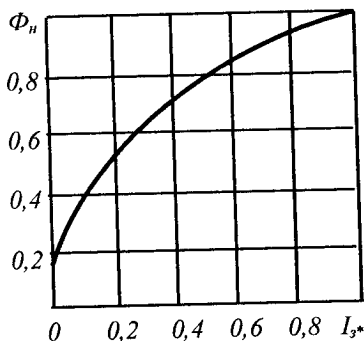


Рис. 4.25. Крива намагнічування двигуна постійного струму

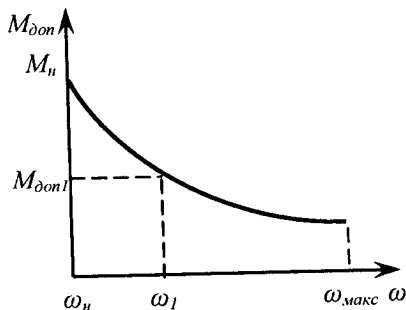
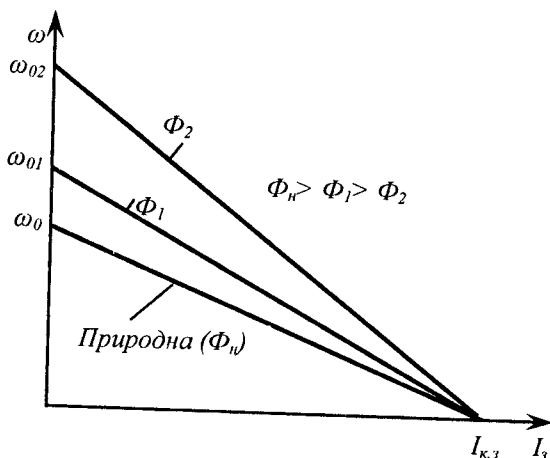


Рис. 4.26. Залежність допустимого моменту двигуна від швидкості обертання при зміні магнітного потоку

З аналізу електромеханічних і механічних характеристик (2.7, 2.8) видно, що швидкість ідеального холостого ходу із зменшенням збу-

дження двигуна збільшується. Оскільки струм двигуна при нерухомому якорі не залежить від величини магнітного потоку, то природна і штучні характеристики при цьому перетинаються в точці з координатами: $\omega = 0$, $I_a = I_{к.з}$ (рис. 4.27).



4.27. Електромеханічні характеристики ДПС НЗ при регулюванні швидкості обертання зміною магнітного потоку

Механічні характеристики при ослабленні магнітного потоку не мають спільної точки на осі моментів, оскільки кожному значенню магнітного потоку відповідає певне значення моменту короткого замикання (початкового пускового моменту) (рис. 4.28).

Штучні механічні характеристики мають менший модуль жорсткості, ніж природна характеристика і, як наслідок, погіршується стабільність регулювання швидкості обертання.

Діапазон регулювання двигунів серії 4П різних типорозмірів становить 3–8, а серії 2П — 2–4. Максимальна швидкість обертання обмежується механічною міцністю ротора та погіршенням комутації на колекторі. Мінімальна швидкість при зміні магнітного потоку має місце при номінальному струмі збудження.

Регулювання швидкості обертання зменшенням магнітного потоку найкраще використовувати в приводах робочих машин, статичний момент яких зворотно пропорційний швидкості обертання. Якщо ж $M_c = const$, то при певному значенні магнітного потоку, меншому за номінальний, частота обертання знижується (рис. 4.29), або двигун може взагалі зупинитись. Якщо двигун працював на

природній характеристиці (точка A на рис. 4.29), то зниження магнітного потоку до значення Φ_1 призведе до деякого підвищення швидкості (точка B). При подальшому зниженні магнітного потоку до Φ_2 швидкість знижується (точка C).

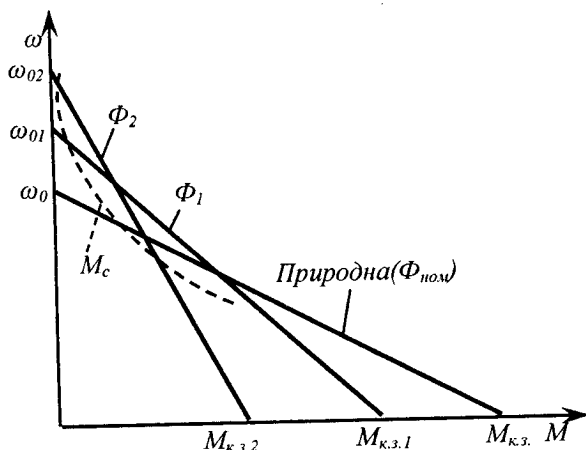


Рис. 4.28. Механічні характеристики ДПС НЗ при регулюванні швидкості обертання зміною магнітного потоку (M_c — гіперболічна залежність)

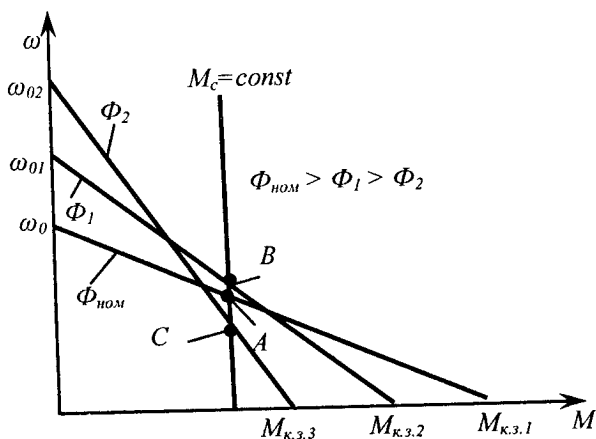


Рис. 4.29. Механічні характеристики ДПС НЗ при регулюванні швидкості обертання зміною магнітного потоку ($M_c = \text{const}$)

Економічні показники регульованого електропривода ослабленням магнітного поля порівняно високі. В якірному колі додаткові втрати електроенергії відсутні. Втрати в регулюючому резисторі в обмотці збудження незначні. Цей спосіб регулювання швидкості обертання широко використовується в електроприводах машин, які при різних швидкостях обертання споживають незмінну потужність. Може використовуватись комбіновано з іншими способами регулювання швидкості (наприклад, зміною напруги на якорі).

Існує ряд серій ДПС, що мають збудження від постійних магнітів. Для них регулювання швидкості обертання можливе лише в першій зоні.

4.3.4. Імпульсний спосіб регулювання кутової швидкості ДПС НЗ

Імпульсний спосіб регулювання швидкості ДПС НЗ полягає в тому, що резистор в якірному колі чи колі збудження шунтується за допомогою ключа, в результаті чого напруга на обмотках періодично змінюється. Якщо для шунтування резистора в колі якоря або в колі збудження використовується тиристорний ключ (рис. 4.30), то таку схему можна застосовувати в розімкненій і замкненій системах регулювання швидкості.

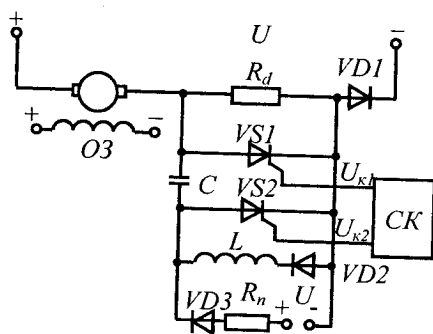


Рис. 4.30. Схема імпульсного реостатного регулювання швидкості обертання ДПС НЗ

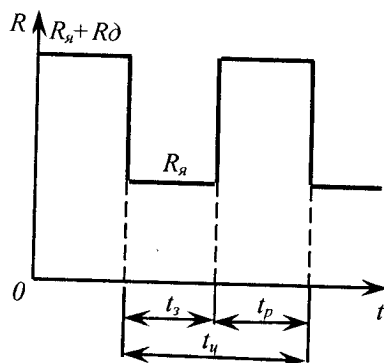


Рис. 4.31. Діаграма зміни опору в колі якоря при імпульсному регулюванні

Тиристорний ключ працює так. Коло якоря вмикають до джерела з напругою U_{α} та до малопотужного джерела з напругою U

(рис. 4.30). Двигун запускається на штучній характеристиці з введеним резистором R_{δ} . Від джерела напругою U заряджається конденсатор C по колу: $R_n - VD3 - C - R_{\delta}$. При подачі сигналу $U_{\kappa 1}$ від системи керування $СК$ на тиристор $VS1$ останній відкривається і шунтує резистор R_{δ} . Після подачі сигналу $U_{\kappa 2}$ відкривається тиристор $VS2$, що створює коло для розряду конденсатора C через резистор R_{δ} . Зворотний потенціал на резисторі R_{δ} надійно закриває тиристор $VS1$. В коло якоря вмикається резистор R_{δ} (штучна механічна характеристика). Через $VS2$ до конденсатора C прикладена напруга, що дорівнює спаду напруги на R_{δ} . При наступному відкриванні тиристора $VS1$ шунтується резистор R_{δ} і створює коло для перезарядження конденсатора: $C - VS1 - VD2 - L$. Нижня обкладинка конденсатора має знак плюс. Ключ займає вихідне положення. Система працює в квазіусталеному режимі. При цьому в колі якоря з досить великою частотою 800–1020 Гц вмикається і вимикається резистор R_{δ} . Отже, в колі діє осереднене значення додаткового опору. Режим комутації характеризується шпаруватістю імпульсів (рис. 4.31), яка визначається залежністю:

$$\varepsilon = \frac{t_3}{t_3 + t_p},$$

де t_3 — тривалість замкненого стану ключа; t_p — тривалість перебування ключа в розімкненому стані. При цьому еквівалентний додатковий опір

$$R_{\delta, \varepsilon} = R_{\delta} (1 - \varepsilon).$$

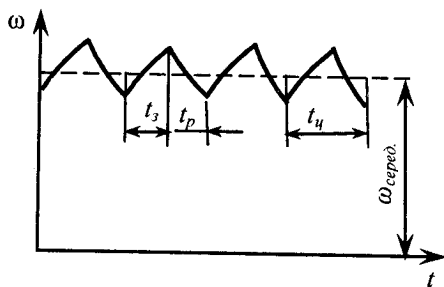
Рівняння електромеханічної і механічної характеристик з урахуванням параметру $R_{\delta, \varepsilon}$ матимуть вид:

$$\omega = \frac{U - I_{\kappa} [R_{\kappa} + R_{\delta} (1 - \varepsilon)]}{K\Phi_{ном}}, \quad (4.38)$$

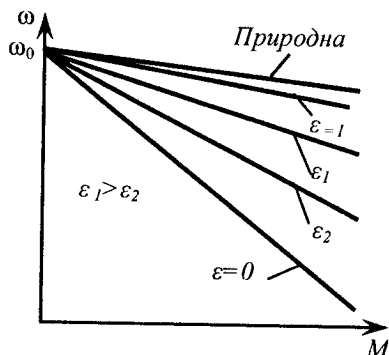
$$\omega = \frac{U}{K\Phi_{ном}} - \frac{M [R_{\kappa} + R_{\delta} (1 - \varepsilon)]}{(K\Phi_{ном})^2}. \quad (4.39)$$

У залежностях (4.38), (4.39) швидкість обертання характеризується середнім значенням (рис. 4.32). Період комутації $t_u = t_3 + t_p$ при широтно-імпульсному керуванні тиристорним ключем залишається незмінним.

Як видно з рівнянь (4.38), (4.39) електромеханічна і механічна характеристики — лінійні залежності (рис. 4.33). Механічна характеристика при $\varepsilon = 1$ має дещо нижчий модуль жорсткості, ніж природна характеристика. Пояснюється це впливом опору тиристора VSI в напрямі провідності.



4.32. Діаграма зміни швидкості при імпульсному керуванні резистором у колі якоря



4.33. Механічні характеристики ДПС НЗ при імпульсному регулюванні опору в колі якоря

Економічні показники регульованого привода з імпульсним введенням резистора в якірне коло нижчі, ніж при реостатному регулюванні (ступінчасте введення резистора), що пояснюється появою змінної складової в струмі якоря, яка створює додаткові втрати енергії.

Імпульсне регулювання швидкості ДПС НЗ можна також здійснювати зміною опору в колі обмотки збудження. При цьому використовують транзисторні ключі, розраховані на значно меншу потужність ніж тиристорні. Шунтування опору в колі обмотки збудження забезпечує регулювання швидкості обертання двигуна вище номінальної, тобто в другій зоні.

Система з імпульсним регулюванням опорів в якірному колі і колі збудження може працювати в замкненій системі. При цьому значно підвищується модуль жорсткості механічних характеристик, розширюється діапазон регулювання.

При живленні ДПС НЗ від мережі постійного струму можна регулювати швидкість імпульсною напругою на якорі. При цьому використовується тиристорний ключ, який за допомогою задаючого сигналу U_z і системи керування СК формує імпульси напруги на

якорі потрібної шпаруватості (рис. 4.34). Середнє значення напруги на якорі визначається залежністю $U_{я,с} = U_{\varepsilon}$.

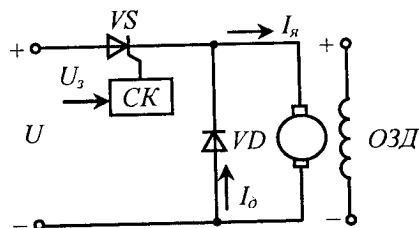


Рис. 4.34. Схема вмикання ДПС НЗ при імпульсному регулюванні напруги на якорі

Параметр ε змінюють від нуля до одиниці, напруга на якорі двигуна при цьому змінюється від нуля до напруги мережі U . Отже, система імпульсного регулювання напруги на якорі дає можливість одержати сімейство електромеханічних і механічних штучних характеристик, паралельних природній характеристиці з досить високим модулем жорсткості (опір тиристорного ключа не враховується).

Діаграма зміни напруги на якорі двигуна і струмів якоря, споживаного з мережі, і в шунтуючому діоді наведена на рис. 4.35. Для квазіусталеного режиму можна записати: $\varepsilon U = K\Phi_{ном} \omega_{сер} + I_{сер} R_{я}$. Розв'язавши відносно ω , одержимо рівняння електромеханічної характеристики:

$$\omega = \frac{\varepsilon U - I_{сер} R_{я}}{K\Phi_{ном}}. \quad (4.40)$$

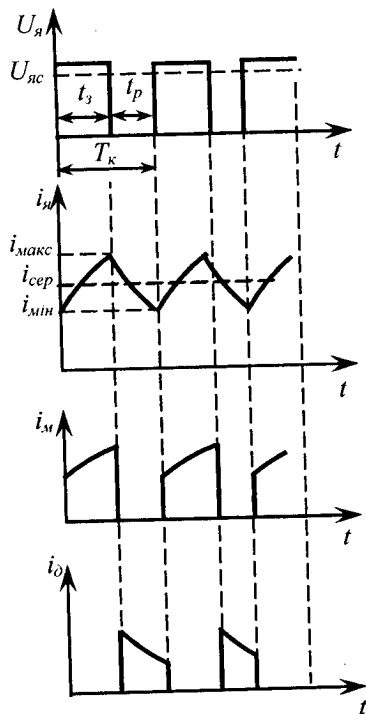


Рис. 4.35. Діаграма зміни напруги і струму при імпульсному регулюванні напруги: $i_{я}$ — струм якоря; $i_{м}$ — струм мережі; $i_{о}$ — струм самоіндукції через діод

Механічну характеристику одержимо з формули (4.40) замінивши струм згідно з рівнянням (2.3):

$$\omega = \frac{\varepsilon U}{K\Phi_{ном}} - \frac{MR_{я}}{(K\Phi_{ном})^2}. \quad (4.41)$$

Залежності (4.40), (4.41) дійсні, коли в якірному колі протікає неперервний струм. При зменшенні часу в замкненому стані ключа, малих навантаженнях та індуктивності якірного кола в ньому протікає переривчастий струм (рис. 4.36). При цьому мають місце проміжки часу, коли струм дорівнює нулю. В зоні переривчастого струму модуль жорсткості сильно знижується, робота привода нестійка (рис. 4.37). Ця зона описується залежністю $\omega_{зр} = f(I_{зр})$. Приблизні значення координати $\omega_{зр}$ і $I_{зр}$ визначаються залежностями:

$$\omega_{зр} \approx \omega_0 \varepsilon \left(1 - \frac{1 - \varepsilon}{2T_{я}f_k} \right); \quad (4.42)$$

$$I_{зр} \approx I_{к.з} \frac{\varepsilon(1 - \varepsilon)}{2T_{я}f_k}, \quad (4.43)$$

де $T_{я}$ — постійна часу якірного кола ($L_{я}/R_{я}$); f_k — частота комутації кола якоря тиристорним ключем (800 – 1200 1/с). У зоні переривчастого струму незалежно від значення ε всі характеристики мають однакову швидкість ідеального холостого ходу $\omega_0 = U/K\Phi_{н.}$. Зменшити параметр $I_{зр}$ можна за рахунок збільшення постійної часу $T_{я}$ та частоти комутації f_k . Постійну часу збільшують вмиканням в коло якоря дроселя, але це погіршує динамічні характеристики системи, яка стає більш інерційною. Збільшення частоти комутації обмежується для тиристорів часом поновлення їх управляючих властивостей.

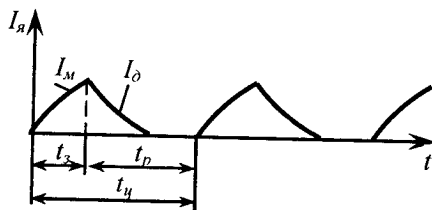


Рис. 4.36. Діаграма зміни струму в якорі ДПС НЗ у переривчастій зоні

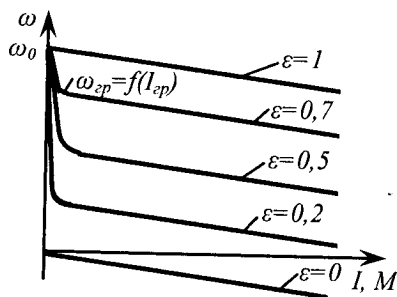


Рис. 4.37. Електромеханічні (механічні) характеристики ДПС НЗ при імпульсному регулюванні

Імпульсний спосіб регулювання швидкості ДПС НЗ за розглянутою схемою (див. рис. 4.34) дає можливість при наявності мережі постійного струму (чи акумуляторів) забезпечити роботу системи в режимі двигуна. При $\varepsilon = 0$ і активному статичному моменті має місце динамічне гальмування. Існують інші схеми імпульсних регуляторів напруги, які дозволяють переводити двигун в режим рекуперації, здійснювати реверс. Імпульсне регулювання швидкості за допомогою транзисторного або тиристорного ключа здійснюється за порівняно простою схемою.

Щодо енергетичної оцінки імпульсного регулювання напруги на якорі двигуна, то ця система створює змінну складову в пульсуючому струмі якоря і, як наслідок, підвищені втрати енергії.

4.3.5. Регулювання кутової швидкості ДПС ПЗ

Двигуни послідовного збудження широко застосовують в приладах механізмів, де необхідно регулювати швидкість обертання: підйомно-транспортні машини і електромобілі (серії ЗДТ, 4ДТ); двигуни для мотор-колес автосамоскидів з дизель-електричним приводом, для самохідних кранів, електропоїздів, для міського транспорту (серія ДК); тягові двигуни для електровозів (серія ТЛ), тягові двигуни тепловозів (серія ЕД) та ін.

Аналітичні залежності $\omega = f(I_a)$, $\omega = f(M)$ для ДПС ПЗ такі ж, як і для ДПС НЗ. Різниця полягає лише в тому, що у двигунах послідовного збудження магнітний потік нестала величина і залежить від струму якоря. Швидкість обертання ДПС ПЗ можна регулювати резисторами в якорному колі, зміною напруги на якорі та зміною струму збудження.

При введенні додаткового резистора в якорне коло одержимо сімейство штучних механічних характеристик (рис. 4.38). Діапа-

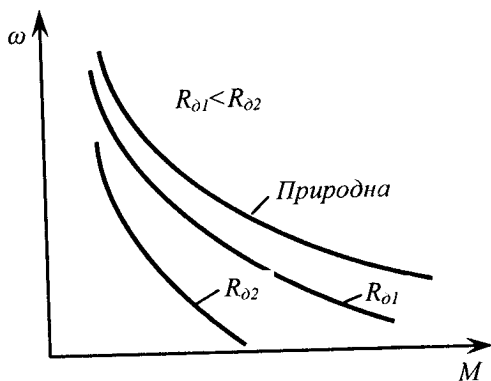


Рис. 4.38. Механічні характеристики ДПС ПЗ при регулюванні швидкості обертання резисторами в колі якоря

зон реостатного регулювання швидкості становить 2 — 2,5. Модуль жорсткості характеристик при регулюванні знижується. Як правило, опір регульованих реостатів змінюють ступінчасто, тому плавність регулювання невисока. Напрямок регулювання — тільки вниз від номінальної швидкості. Регулювання здійснюється при $M_c = \text{const}$, якщо двигун має незалежну вентиляцію. Для двигунів з самовентиляцією при зниженій швидкості необхідно відповідно до рекомендацій заводу-виготівника знизити навантаження з метою запобігання їх перегріванню. Цей спосіб регулювання має невисокі економічні показники через значні втрати енергії в регульованих резисторах. Може використовуватися при короточасній роботі на зниженій швидкості двигуна. Тягові двигуни в ряді випадків мають реостатне регулювання швидкості, оскільки воно надзвичайно просте.

Швидкість ДПС ПЗ можна регулювати (2.8) зміною напруги на якірному колі за допомогою перетворювача змінної трифазної напруги в регульовану постійну (рис. 4.39, а). Штучні механічні характеристики при цьому мають модуль жорсткості такий, як і природна характеристика (рис. 4.39, б). Тиристорний чи транзисторний перетворювач напруги ТПН, крім регулювання напруги на якорі, дає можливість здійснювати безреостатний пуск двигунів будь-якої потужності.

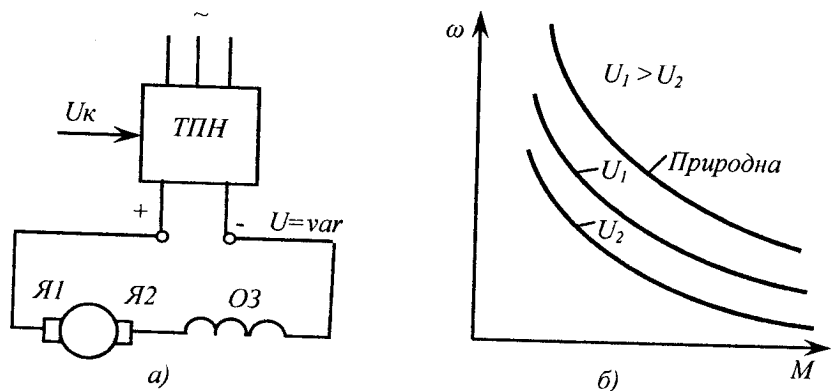


Рис. 4.39. Схема вмикання (а) та механічні характеристики (б) ДПС ПЗ при живленні від джерела регульованої напруги

Напругу на якірному колі ДПС ПЗ можна регулювати ступінчасто, з'єднуючи два двигуни послідовно (рис. 4.40, а), знизивши частоту обертання двигунів при номінальному навантаженні в два рази.

З'єднані паралельно двигуни (рис. 4.40, б) одержать номінальну напругу і перейдуть в номінальний режим роботи по напрузі. Такий спосіб регулювання можна використовувати в багатодвигунному приводі, де двигуни мають однакові параметри (електротранспорт). При цьому практично відсутні втрати енергії на регулювання.

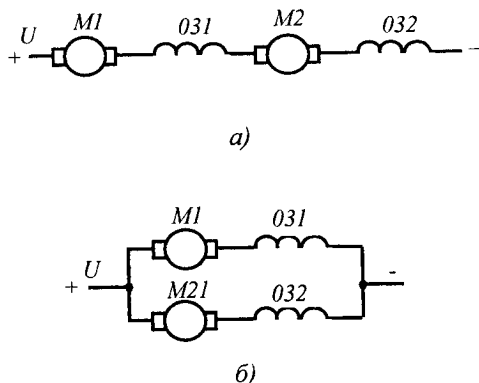


Рис. 4.40. Схеми вмикання двох однакових ДПС ПЗ при регулюванні кутової швидкості в багатодвигунному приводі

Електродвигуни послідовного збудження, що використовуються в підйомно-транспортних установках, допускають регулювання швидкості вгору від номінальної шляхом зменшення магнітного потоку двигуна в середньому в 1,5 — 2 рази. Змінюють магнітний потік шунтуванням обмотки збудження регульованим резистором $R_{ш\,оз}$ (рис. 4.41).

Модуль жорсткості характеристик при послабленні магнітного потоку зменшується (рис. 4.41, б). Регулювання швидкості послабленням магнітного потоку здійснюється в другій зоні, тобто при постійній потужності. Втрати енергії на регулювання невеликі, тому що опір шунтуючого резистора $R_{ш\,оз}$ порівняно малий.

Двигуни постійного струму послідовного збудження дають можливість регулювати швидкість обертання шунтуванням якоря з послідовним резистором в якірному колі (рис. 4.42, а). У наведеній схемі при струмі якоря $I_a = 0$ в обмотці збудження ОЗ протікає струм $I_{ш}$. Отже, двигун має швидкість ідеального холостого ходу, рекуперативне гальмування.

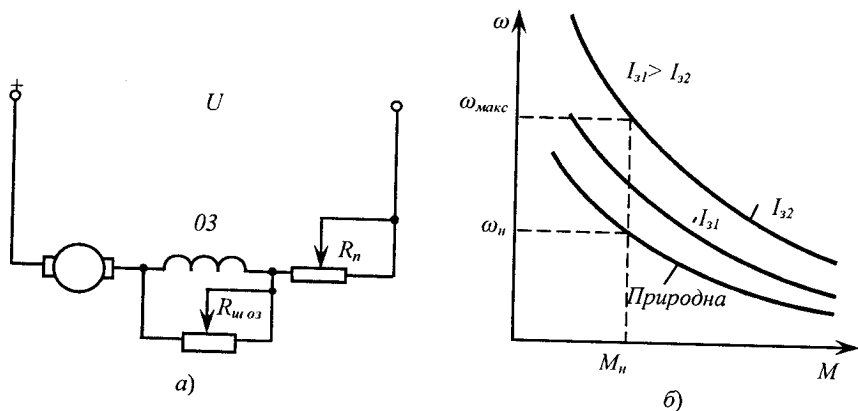


Рис. 4.41. Схема вмикання (а) і механічні характеристики (б) ДПС ПЗ при регулюванні швидкості обертання ослабленням магнітного потоку

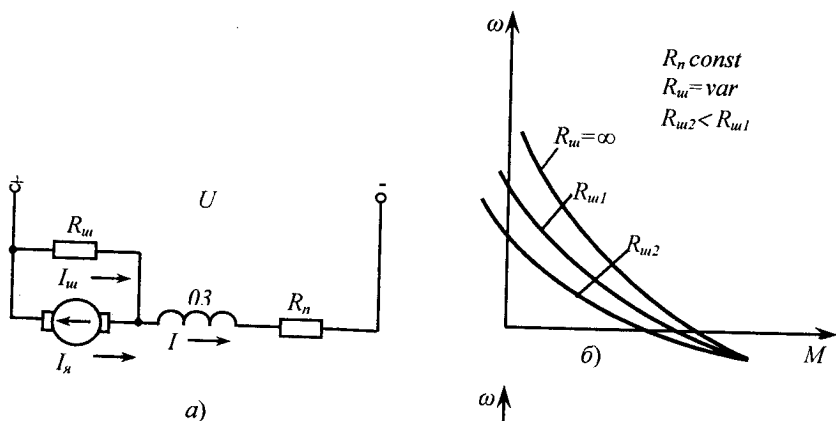
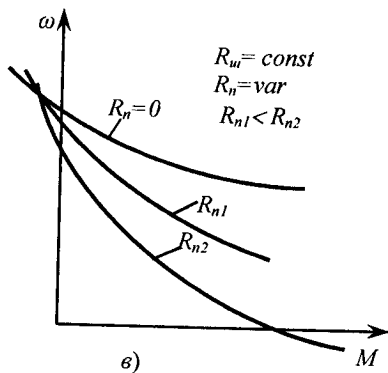


Рис. 4.42. Схема вмикання (а) і механічні характеристики (б) ДПС ПЗ при регулюванні швидкості обертання ослабленням магнітного потоку



Регулювання можна проводити при незмінному опорі резистора R_n і зміні опору шунтуючого резистора (рис. 4.42, б) та при постійному опорі шунтуючого резистора $R_{ш}$ і змінному R_n (рис. 4.42, в).

Рівняння електромеханічної і механічної характеристик можна одержати аналогічно залежностям (4.34), (4.35).

4.3.6. Контрольні питання

1. Назвіть і охарактеризуйте показники регулювання електропривода?
2. Якими способами можна регулювати швидкість ДПСНЗ?
3. В якій зоні відбувається регулювання швидкості ДПС змінною опору кола якоря? напруги на якорі?, магнітного потоку?
4. Накресліть механічні характеристики ДПСНЗ при регулюванні змінною опору кола якоря, напруги, магнітного потоку.
5. Назвіть джерела електричної енергії, від яких одержують живлення ДПСНЗ при регулюванні змінною напруги.
6. Які переваги і недоліки мають статичні перетворювачі напруги порівняно із системою Г-Д?
7. Чим відрізняються механічні характеристики ДПСНЗ при живленні двигуна за системою КВ-Д від характеристик при живленні за системою Г-Д?
8. Охарактеризуйте показники реостатного регулювання ДПСНЗ.
9. Як здійснюється регулювання швидкості ДПСНЗ шунтуванням якоря і який вигляд мають механічні характеристики двигуна?
10. В якому діапазоні можливе регулювання швидкості ДПСНЗ змінною магнітного потоку?
11. Як здійснюється імпульсний спосіб регулювання швидкості ДПСНЗ?
12. Якими способами можна регулювати швидкість обертання ДПСНЗ?
13. Переваги і недоліки реостатного регулювання швидкості ДПСНЗ у порівнянні з регулюванням змінною напруги?
14. Як здійснюється регулювання швидкості ДПСНЗ шунтуванням обмотки збудження?

4.4. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів

4.4.1. Загальні відомості

Для забезпечення деяких технологічних вимог сільськогосподарського виробництва необхідний регульований електропривод. Привод постійного струму характеризується досить високими пока-

зниками перевантажувальної здатності, діапазону і плавності регулювання. Проте економічні й експлуатаційні показники привода постійного струму нижчі ніж асинхронного.

Двигуни постійного струму мають більшу масу порівняно із асинхронними двигунами, меншу потужність при таких же габаритах, значно більший момент інерції ротора. Так, в одному і тому ж габариті 100L двигун постійного струму 4П100L порівняно із асинхронним двигуном АИР100L при частоті обертання 3000 об/хв має потужність лише 54,5 %, а масу 115 %. При експлуатації двигуни постійного струму потребують більш кваліфікованого обслуговування. В зв'язку із наведеними перевагами двигуни змінного струму використовують, по можливості, в першу чергу. Параметри, які впливають на частоту обертання асинхронного двигуна, визначають із залежності:

$$\omega = \omega_0(1 - s) = \frac{2\pi f}{p}(1 - s). \quad (4.44)$$

Як відомо, момент двигуна $M = 3I_2'^2 \cdot R_2' / \omega_0 s = 3\alpha I_2' \Phi \cos \psi_2$. Розв'язавши відносно ковзання і замінивши Φ через KU_ϕ , одержимо:

$$s = \frac{I_2' \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}}{\omega_0 \alpha K U_\phi}. \quad (4.45)$$

З урахуванням рівняння (4.45) частоту обертання асинхронного двигуна можна визначити за формулою:

$$\omega = \frac{2\pi f}{p} \left(1 - \frac{I_2' \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}}{\omega_0 \alpha K U_\phi} \right). \quad (4.46)$$

Отже, швидкість обертання асинхронного двигуна (4.46) можна регулювати зміною таких параметрів: частоти струму, числа пар полюсів, опору роторного кола та напруги на статорі.

4.4.2. Частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів

В частотно регульованих електроприводах можна використовувати двигуни загального призначення. При цьому дещо знижуються їх техніко-економічні показники.

Частотно-регульовані асинхронні двигуни, як правило, працюють з регуляторами напруги або магнітного потоку, що дозволяє забезпечити сталу роботу електропривода. Отже, ці двигуни можуть мати дещо знижену перевантажувальну здатність.

При пуску двигуна в частотно регульованому приводі в деяких випадках є можливість здійснювати пуск з початковим ковзанням вище критичного, що не вимагає при проектуванні частотно-регульованих двигунів дотримуватись заданих значень пускового і мінімального моментів, пускового струму. В зв'язку з цим ротор може мати обмотку з меншим активним опором і, як наслідок, з більшим коефіцієнтом корисної дії. Тому частотно-регульовані двигуни проектують без урахування пускових характеристик, які забезпечуються системою керування.

До двигунів загального призначення ставляться підвищені вимоги щодо вибору номінального ковзання при паралельній їх роботі. У зв'язку з тим, що частотно-регульовані двигуни одержують живлення кожен від індивідуального перетворювача частоти, навантаження між паралельно працюючими двигунами узгоджується системою керування. Тому певних вимог до розрахункового ковзання двигунів не існує.

Оскільки частотно регульовані двигуни можуть працювати при знижених швидкостях обертання, вони мають незалежну систему вентиляції.

Для сільськогосподарських машин і агрегатів розроблені частотно-регульовані двигуни з межами регулювання частоти 5 - 60 Гц, а напруги 30 - 380 В.

Енергетичні показники двигунів, що працюють від перетворювачів частоти, нижчі ніж двигунів, що працюють від мережі. Коефіцієнти корисної дії знижуються в середньому на 2–3 %, а $\cos \varphi$ — на 5 %. Корисна потужність асинхронного двигуна знижується на 10 — 25 %, а максимальний момент — на 8 — 15 %. Обертання двигуна в зоні переривчастих струмів стає дискретним, що знижує діапазон регулювання.

У серії АІ передбачено два виконання частотно регульованих двигунів:

1 — для роботи в діапазоні регулювання частоти обертання 1:3,75 і 2 — в діапазоні 1:22,5, призначені для тривалого режиму роботи, номінальна частота струму — 60 Гц. Двигуни виконання 1 працюють в обмеженому діапазоні регулювання частоти обертання і

тому їх виготовлення максимально уніфіковане з двигунами загального використання. Вони мають самовентиляцію. Двигуни виконання 2, як правило, мають незалежну вентиляцію.

Як видно з виразу (4.46) зміна частоти струму живлення дає можливість змінювати швидкість обертання двигуна в зоні малих ковзань, а значить і малих втратах енергії в роторному колі. Отже, частотне регулювання швидкості асинхронних двигунів характеризується досить високим коефіцієнтом корисної дії. Система частотного регулювання забезпечує високу плавність в досить широкому діапазоні, а штучні механічні характеристики мають високий модуль жорсткості.

При регулюванні частоти струму на затискачах двигуна змінюються його параметри. Так, при зниженні частоти і незмінній напрузі збільшується струм намагнічування і, як наслідок, зростає магнітний потік. Збільшення частоти струму призводить до зменшення струму і магнітного потоку двигуна. При незмінному статичному моменті на валу двигуна зростає струм ротора і його температурний режим виходить за межі допустимого. Регулювання частоти струму вимагає одночасного регулювання напруги.

Частотно регульовані приводи дають можливість регулювати швидкість обертання вверх від номінального значення і вниз. Верхня межа регулювання швидкості обмежується механічною міцністю ротора. Збільшення швидкості обертання відносно номінальної не повинно бути більше ніж у два рази. Мінімальна швидкість обертання обмежується нестабільною роботою перетворювача при низьких частотах.

При регулюванні частоти струму в приводах з різними механічними характеристиками робочої машини напругу на виході перетворювача частоти змінюють виходячи з умови збереження переважувальної здатності двигуна:

$$\lambda = M_k / M_c = \text{const.} \quad (4.47)$$

Як відомо, максимальний момент двигуна становить:

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}. \quad (4.48)$$

Механічна характеристика робочої машини визначається за (1.36).

При визначенні закону, за яким необхідно змінювати напругу при зміні частоти струму, вираз (4.47) записують, зробивши припущення, що $R_1 = 0$:

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 X_k}. \quad (4.49)$$

Параметри ω_0 , X_k залежать від частоти струму. Отже, критичний момент виражається залежністю

$$M_k = \frac{AU_\phi^2}{f^2}, \quad (4.50)$$

де A — коефіцієнт, що включає параметри, незалежні від частоти струму.

Перевантажувальна здатність двигуна при різних частотах струму згідно з формулою (4.47) має вигляд:

$$\frac{U_{\phi, \text{ном}}^2}{f_n^2 M_{c, \text{ном}}} = \frac{U_\phi^2}{f^2 M_c} = \lambda. \quad (4.51)$$

Вираз (4.51) у відносних одиницях має вигляд:

$$U_* = f_* \sqrt{M_{c*}}, \quad (4.52)$$

де U_* , f_* , M_{c*} — відповідно напруга, частота струму і статичний момент, відносні одиниці.

Статичний момент робочої машини у відносних одиницях, якщо зробити припущення, що $M_o = 0$, записується:

$$M_{c*} = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^x = \left(\frac{f}{f_{\text{ном}}} \right)^x = f_*^x. \quad (4.53)$$

З урахуванням (4.53) вираз (4.52) матиме вигляд:

$$U_* = f_* \sqrt{f_*^x}, \quad (4.54)$$

де x — показник степеня в механічній характеристиці робочої машини.

Рівнянням (6.11) і описується закон, за яким необхідно змінювати напругу при зміні частоти струму.

Так, для робочої машини, що має показник степеня $x = 0$, закон зміни напруги характеризується виразом:

$$U_* = f_* \quad (4.55)$$

При $x = -1$ залежність напруги від частоти струму на затискачах двигуна описуються залежністю:

$$U_* = \sqrt{f_*} \quad (4.56)$$

При вентиляторному навантаженні ($x = 2$):

$$U_* = f_*^2 \quad (4.57)$$

Механічні характеристики двигуна при частотному регулюванні швидкості обертання робочих машин з різними механічними характеристиками наведені на рис. 4.43 (при $R_l = 0$).

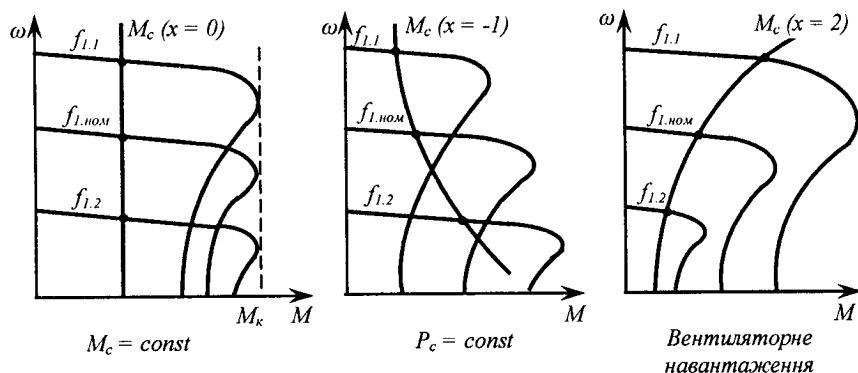


Рис. 4.43. Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості

Припущення $R_l = 0$ не вносить помітних похибок в основний закон зміни напруги живлення частотно регульованих приводів (4.54), (4.55), (4.56), (4.57) для двигунів великої потужності або при роботі двигунів з незначним зниженням частоти струму. Двигуни великої потужності мають індуктивний опір X_k на порядок більший ніж активний опір R_k . При цьому спад напруги на активному опорі статора незначний і двигун має достатню перевантажувальну здатність. Для двигунів малої і середньої потужності при номінальній частоті на статорній обмотці активний і індуктивний опори приблизно одного

порядку. При зниженні частоти струму індуктивний опір пропорційно знижуватимуться, а активний залишиться незмінним. Отже, спад напруги на активному опорі статора R_1 буде збільшуватись і, як наслідок, перевантажувальна здатність двигуна знизиться. При цьому виникає необхідність коригувати основний закон зміни напруги на статорі двигуна. Аналізуючи Т-подібну схему заміщення двигуна (рис. 4.44), одержимо приведенний струм ротора:

$$I'_2 = \frac{U_1 X_\mu}{\sqrt{\left(R_1 \frac{R'_2}{s} - X_1 X'_2 - X_\mu X_K\right)^2 + \left[R_1(X'_2 + X_\mu) + \frac{R'_2}{s}(X_1 + X_\mu)\right]^2}}, \quad (4.58)$$

де $X_1 = X_{1ном} f_{1*}$; $X_2 = X_{2ном} f_{1*}$;
 $X_\mu = X_{\mu ном} f_{1*}$; $X_K = X_{K ном} f_{1*}$;
 $X_{1ном}$, $X_{2ном}$, $X_{\mu ном}$, $X_{K ном}$ —

відповідно індуктивні опори статора, приведенний ротора, контура намагнічування і короткого замикання при номінальній частоті струму. Підставивши (4.58) у вираз електромагнітного моменту $M = 3I_2'^2 R'_2 / \omega_0 s$, одержимо:

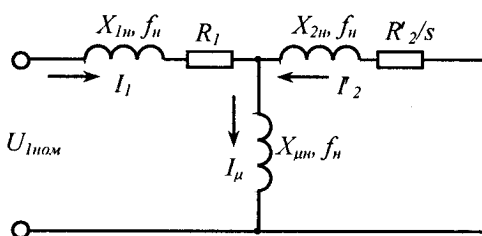


Рис. 4.44. Схема заміщення асинхронного двигуна при зміні частоти струму на статорі

$$M = \frac{3U_1^2 R'_2}{\omega_0 s \left[X_k^2 + (R_1 + R'_2/s)^2 + \left(\frac{R_1 R'_2}{s X_\mu} \right)^2 \right]}. \quad (4.59)$$

У формулі (4.59) величини X_1 / X_μ і X_2 / X_μ не враховані, оскільки їх значення дуже малі. Так, для асинхронного двигуна номінальною потужністю 4 кВт і синхронною частотою обертання 1500 об/хв $X_1 / X_\mu = 0,03$ і $X_2 / X_\mu = 0,05$.

Взявши похідну від (4.59) по ковзанню, одержимо критичне ковзання:

$$s'_k = R'_2 \sqrt{\frac{1 + (R_1 / X_\mu)^2}{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (4.60)$$

Замінивши ковзання у виразі (4.59) виразом (4.60), одержимо вираз максимального моменту двигуна при частотному регулюванні:

$$M'_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{(R_1^2 + X_k^2) + (1 + R_1^2 / X_\mu^2)} \right]}. \quad (4.61)$$

Замінивши у виразах (4.60), (4.61) індуктивні опори $X_k = X_{\kappa \text{ ном}} f_*$, $X_\mu = X_{\mu \text{ ном}} f_*$, швидкість обертання $\omega_0 = \omega_{0 \text{ ном}} f_*$, і позначивши відношення $R_1 / X_{\kappa \text{ ном}} = \rho_{1\kappa}$, а $R_1 / X_{\mu \text{ ном}} = \rho_{1\mu}$, одержимо:

$$s'_\kappa = \pm \frac{R'_2}{f_{1*} X_{\kappa \text{ ном}}} \sqrt{\frac{f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2}{f_{1*}^2 + \rho_{1\kappa}^2}}; \quad (4.62)$$

$$M'_\kappa = \frac{3U_1^2}{2\omega_{0 \text{ ном}} X_{\kappa \text{ ном}} [f_{1*} \rho_{1\kappa} \pm \sqrt{(f_{1*}^2 + \rho_{1\kappa}^2)(f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)}]}. \quad (4.63)$$

Використовуючи вирази (4.47), (4.63), одержимо скоригований закон зміни напруги (рис. 4.45) при частотному регулюванні при $R_1 \neq 0$:

$$U_{1*} = \sqrt{\frac{f_{1*} \rho_{1\kappa} + \sqrt{(f_{1*}^2 + \rho_{1\kappa}^2)(f_{1*}^2 + \rho_{1\mu}^2)} \cdot f_{1*}^x}{\rho_{1\kappa} + \sqrt{(1 + \rho_{1\kappa}^2)(1 + \rho_{1\mu}^2)}}}, \quad (4.64)$$

де f_{1*}^x — статичний момент механічної характеристики робочої машини з показником степеня x у відносних одиницях. При цьому початковим моментом робочої машини знехтувано.

Із аналізу рівняння (4.63) видно, що при частоті менше номінального значення напруга на виході частотного перетворювача зменшується менше, ніж частота і цим самим компенсується втрата напруги на активному опорі. Якщо частота струму вища номінального значення, то напруга при цьому зростає повільніше, ніж частота. При коригуванні напруги двигун має незмінну перевантажувальну здатність (рис. 4.46) як при $M_c = \text{const}$ так і при інших механічних характеристиках робочих машин.

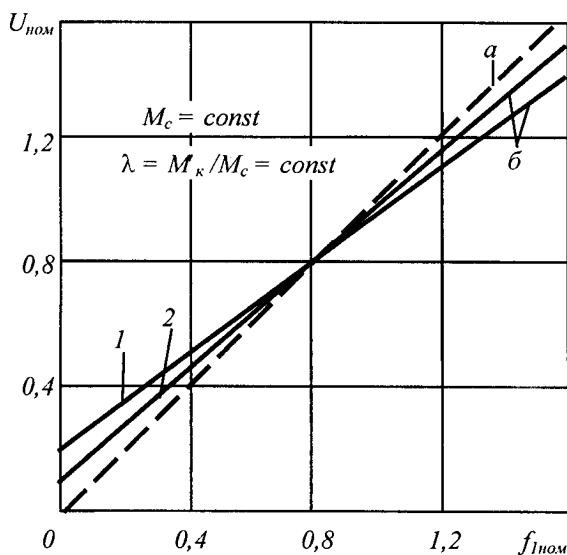


Рис. 4.45. Закон зміни напруги перетворювача частоти при регулюванні кутової швидкості асинхронного двигуна:

a — основний закон; *б* — скоригований закон;

1 — $P_n = 50$ Вт; *2* — $P_n = 14$ кВт

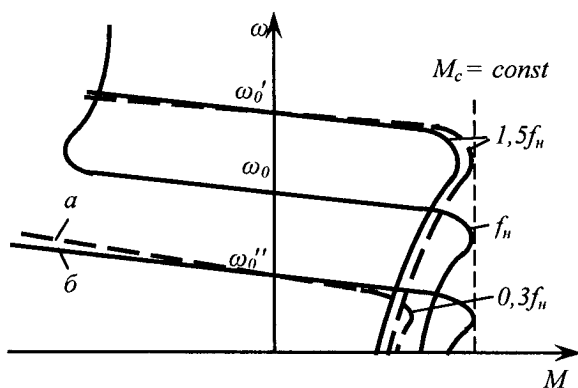


Рис. 4.46. Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні кутової швидкості:

a — зміна напруги живлення по основному закону;

б — по скоригованому закону

Жорсткість механічних характеристик при частотному регулюванні досить висока, завдяки чому в режимі рекуперативного гальмування критичний момент може бути значно більшим, ніж критичний момент в режимі двигуна. Тому в окремих випадках виникає необхідність змінювати напругу при зміні частоти струму за законом, який забезпечує обмеження критичного моменту в рекуперативному режимі до допустимого значення.

Розрахунок механічних характеристик двигуна проводиться за формулою Клосса, яку одержують при спільному розв'язанні рівнянь (4.59) і (4.63):

$$M = \frac{2M'_k(1 + d's'_k)}{s/s'_k + s'_k/s + 2d's_k}, \quad (4.65)$$

де
$$d' = \frac{R_1 f_{1*}}{R_2^1 (f_{1*}^2 + \rho_{1*}^2)}. \quad (4.66)$$

При частотному регулюванні допущення $R = 0$ не вносить похибок, що порушують сталу роботу системи, якщо регулювання швидкості обертання здійснюється ввєрх від номінального значення, та в приводах з двигунами великої потужності при регулюванні швидкості вниз від номінального значення в діапазоні до 2 – 2,5. Для більших значень діапазону регулювання необхідно напругу на виході перетворювача частоти змінювати згідно з формулою (4.63).

4.4.3. Перетворювачі частоти для керування асинхронними двигунами

Регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів зміною частоти струму є найбільш ефективне. Основна відмінність цього способу регулювання від інших полягає в роботі двигуна при різних швидкостях з малим ковзанням, а значить і невеликими втратами енергії. Частотно регульований привод не поступається за статичними і динамічними характеристиками привода постійного струму.

На першому етапі розвитку частотного асинхронного привода використовували електромеханічні перетворювачі, які склалися з чотирьох машин (рис. 4.47). Частоту струму в цьому перетворювачі регулюють зміною струму збудження генератора G , а напругу — реостатом R_{zn} в колі обмотки ротора синхронного генератора UZ . Електромеханічний перетворювач частоти дає можливість одержу-

вати синусоїдну напругу та частоту змінної величини. І, що особливо важливо, він не «засмічує» мережу живлення вищими гармонічними складовими, як це має місце при статичних перетворювачах. Недоліком електромеханічних перетворювачів частоти є завищена потужність допоміжних електричних машин: для одного асинхронного двигуна чотири машини.

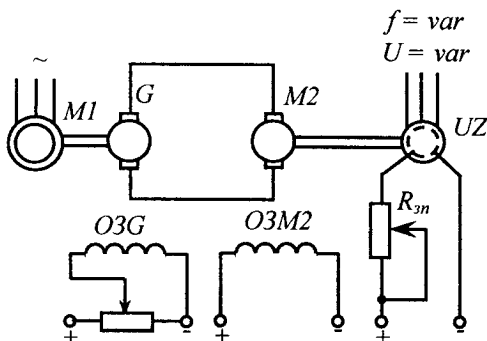


Рис. 4.47. Електромеханічний перетворювач частоти:

$M1$ — асинхронний двигун; G — генератор;
 $M2$ — двигун; UZ — синхронний генератор

У сучасних приводах використовують, як правило, тиристорні або транзисторні перетворювачі частоти. Існує два типи статичних перетворювачів частоти: з безпосереднім перетворенням частоти і напруги мережі живлення та з проміжним контуром постійного струму.

Безпосередній перетворювач частоти комутується мережею змінного струму і перетворює напругу мережі U_1 з частотою f_1 в напругу U_2 частоти f_2 . Напругу і частоту на виході перетворювача можна регулювати незалежно в межах від нуля до максимальних значень, обмежених напругою і частотою мережі.

Безпосередні перетворювачі частоти дещо простіші за будовою. У них відсутній блок випрямляча, елементи контуру реактивної потужності тощо. Проте вони мають обмежене максимальне значення вихідної частоти (до 40% частоти мережі, від якої живиться перетворювач), низький коефіцієнт потужності, великий відсоток вищих гармонік у вихідній напрузі, складну схему керування.

Перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму складаються з керованого або некерованого випрямляча VD

(рис. 4.48), фільтра Φ , мостового інвертора напруги або струму UZ та системи керування.

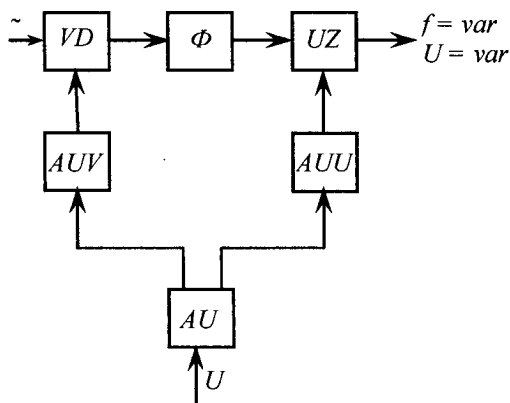


Рис. 4.48. Функціональна схема перетворювача частоти з проміжною ланкою постійного струму:

AU — блок регулювання напруги і частоти; AUV — система керування випрямлячем VD ; AUU — система керування автономним інвертором UZ ; LC — індуктивно-ємнісний фільтр

Якщо до виходу випрямляча VD в якості фільтра Φ паралельно приєднано конденсатор великої ємності, то така система є джерелом напруги, а якщо послідовно приєднано дросель великої індуктивності — джерелом струму. Інвертор, що живиться від джерела напруги, називають інвертором напруги. Інвертор з живленням від джерела струму називається інвертором струму. Інвертори напруги та інвертори струму відрізняються як будовою, так і властивостями.

Реальна схема перетворювача частоти досить складна. Умовна схема мостового інвертора і діаграма вихідної напруги наведені на рис. 4.49. Система керування тиристорами забезпечує протікання струму при додатньому напрямку через непарні тиристори ($VS1$, $VS3$, $VS5$), а при від'ємному — через парні ($VS2$, $VS4$, $VS6$). Кожен період характеризується шістьма інтервалами з різним поєднанням відкритих і закритих тиристорів. На першому інтервалі напруга на навантаженні фази A (рис. 4.49, б) за величиною і знаком така сама як і напруга фази C . Напруга на фазі B має від'ємне значення, а абсолютне її значення в два рази більше ніж на фазах A і C . Такому співвідношенню відповідає відкритий стан тиристорів $VS1$, $VS5$, $VS6$. Схема з'єднання трифазного навантаження зображена на рис. 4.50.

Як видно з рис. 4.49, б) на навантаженні формується симетрична система напруги прямокутно-ступінчастої форми, 3 перші гармоніки яких мають взаємний зсув фаз на 120° . Розклавши в ряд Фур'є криві фазної напруги, одержимо: $U = \frac{3}{\pi} U_m \left(\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right)$ (4.67).

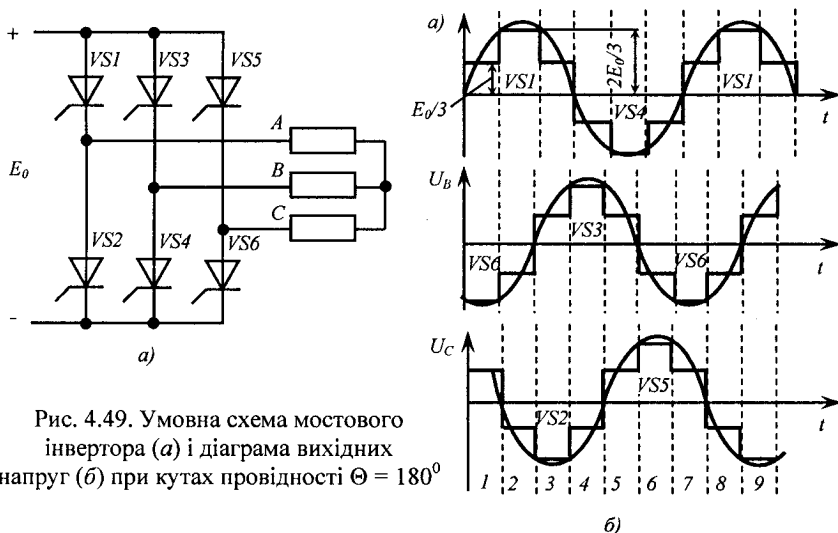


Рис. 4.49. Умовна схема мостового інвертора (а) і діаграма вихідних напруг (б) при кутах провідності $\Theta = 180^\circ$

Відповідно для лінійної напруги:

$$U = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_m \left(\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right) \quad (4.68)$$

Вирази (4.67), (4.68) не мають парних гармонік і гармонік кратних трьом. Форма лінійної напруги на виході інвертора не залежить від схеми з'єднання навантаження в зірку чи трикутник.

Інвертори можуть комутуватись від електромережі змінного струму і автономно за допомогою спеціальних блоків, що мають конденсатори й котушки індуктивності. В частотно-регульованих приводах, як правило, використовуються автономні інвертори.

На рис. 4.51 приведені умовні схеми і робочі діаграми ідеалізованих інверторів напруги і струму. Основною особливістю АІН є те, що напруга на навантаженні не залежить від нього і визначається

лише черговістю комутації тиристорів інвертора. Досягається це введенням шунтуючих діодів $VD1 — VD4$ для проведення індуктивного струму навантаження і вмиканням конденсатора C_o для замикання кола цього струму. В результаті цього АІН має жорстку зовнішню характеристику, тобто при зміні навантаження напруга АІН практично не змінюється (рис. 4.52). При використанні АІН задаючими сигналами на керований двигун є напруга і частота струму.

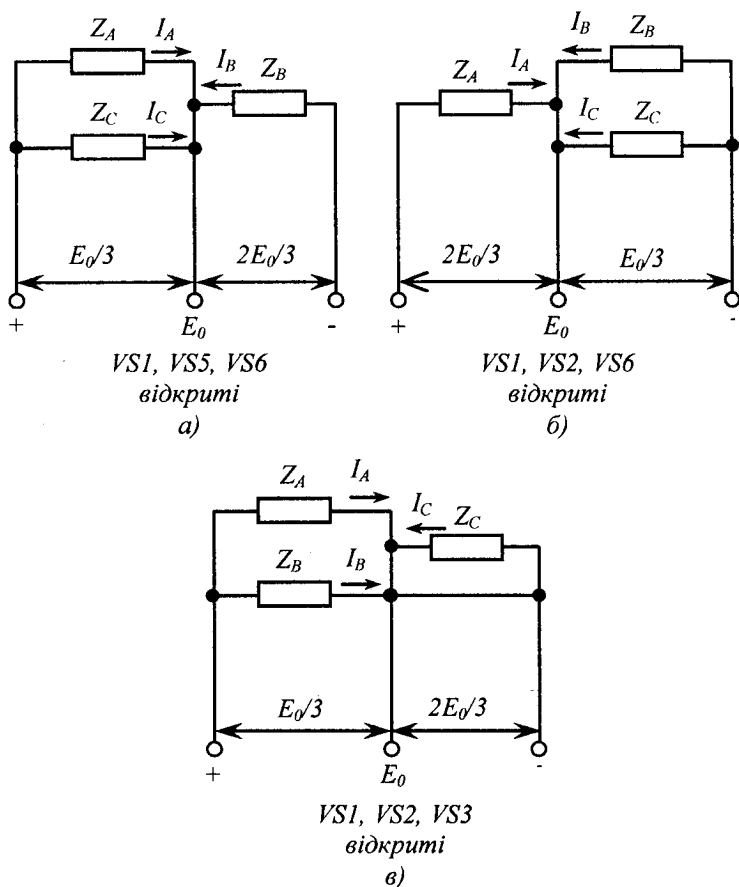


Рис. 4.50. Схеми з'єднання навантаження:
а) — на інтервалі 1; б) — на інтервалі 2; в) — на інтервалі 3

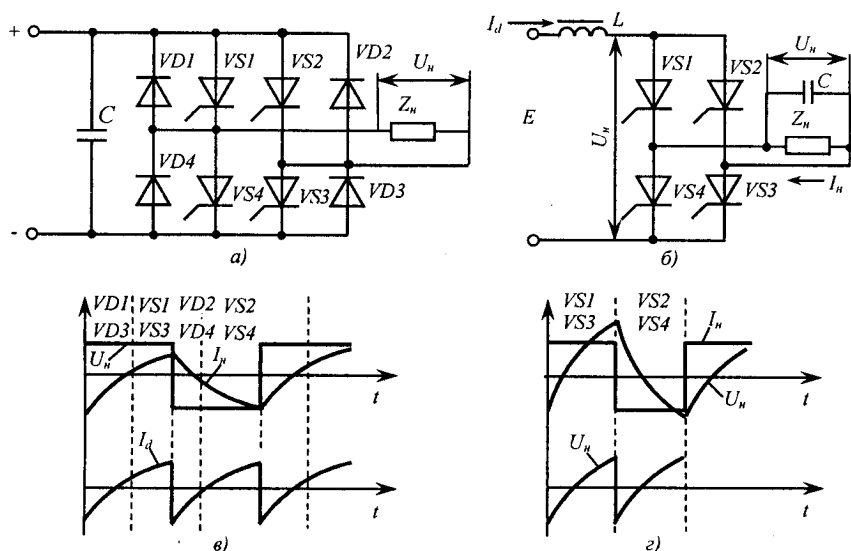


Рис. 4.51. Умовна схема однофазних інверторів напруги (а) і струму (б) і відповідно їх робочі діаграми

Автономні інвертори струму мають властивості джерела струму, що забезпечується вмиканням на вихід керованого випрямляча дроселя. В електроприводах з АІС задаючими сигналами є струм і частота. При збільшенні струму навантаження напруга на затискачах АІС знижується (рис. 4.52). АІС використовуються в частотно регульованих приводах з рекуперативним гальмуванням і частими перехідними процесами.

На протязі останніх 10—15 років в багатьох галузях економіки широко впроваджуються частотно-регульовані електроприводи на принципіально новій елементній базі, головним чином на біполярних транзисторах з ізольованим затвором IGBT, спрощена схема якого показана на рисунку 4.53. Силова частина

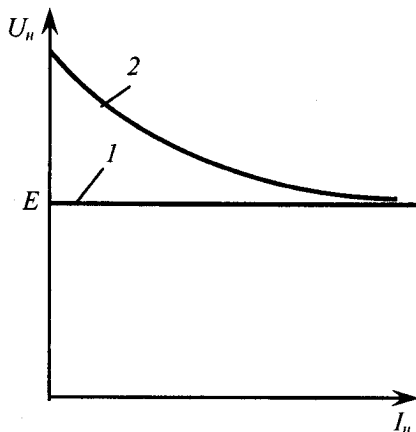


Рис. 4.52. Зовнішні характеристики ідеалізованих інверторів напруги (1) і струму (2)

перетворювача складається з вхідного випрямляча, ланки постійного струму, інвертора та системи керування. Вхідний випрямляч виконаний за схемою Ларіонова. Випрямляч приєднаний до ланки постійного струму, яка складається з термісторів R_1 і R_2 та електролітичних конденсаторів великої ємності $C1$ і $C2$. Термістори з від'ємним температурним коефіцієнтом призначені для обмеження зарядного струму при вмиканні перетворювача. В холодному стані термістори мають великий опір. Після вмикання перетворювача в мережу струм, що протікає через термістори, розігріває їх, внаслідок чого вони різко зменшують свій опір. Таким чином термістори обмежують зарядний струм конденсаторів, а в процесі роботи практично не впливають на величину напруги конденсаторів.

Конденсатори $C1$ і $C2$ згладжують напругу ланки постійного струму, фільтрують споживаний з мережі струм, забезпечують повернення реактивної енергії двигуна при вимиканні інвертора та при перехідних процесах і забезпечують повернення енергії при частотному гальмуванні двигуна M . Резистори $R2$ і $R3$, увімкнені паралельно кожному конденсатору, зрівнюють їх заряд.

До виходу ланки постійного струму приєднано трифазний інвертор напруги, який складається з трьох півмостів на транзисторах $VT2$ — $VT7$ та гальмівного ключа на транзисторі $VT1$ зі зворотним діодом $VD1$. До гальмівного ключа при необхідності приєднують гальмівний резистор, який буде розсіювати енергію в режимі частотного гальмування двигуна.

Зворотні діоди $VD2$ — $VD7$ служать для передачі енергії від двигуна до джерела живлення. Ці діоди проводять завжди, коли напрям струму є протилежним до напрямку вхідної напруги інвертора. Таким чином, інвертор наруги дає можливість для двостороннього протікання як енергії, так і струму.

Через велику частоту комутацій ключів інвертора (до 16 кГц) між додатньою та від'ємною шинами ланки постійного струму виникають великі перенапруги з частотою вільних коливань в кілька МГц. Для захисту силового модулю від пробою до його затискачів приєднано так званий снабберний конденсатор малої ємності $C3$. Індуктивність цього конденсатора в десятки разів менша індуктивності електролітичних конденсаторів, що дозволяє ефективно боротися з перенапругами.

Керування інвертором здійснюється від мікропроцесора шляхом широтно-імпульсної модуляції напруги. Транзистори інвертора працюють у ключовому режимі. Якщо шпаруватість імпульсу ключа змінювати за синусоїдним законом, то так же буде змінюватися і середнє значення напруги фази в періоді (рис. 4.54).

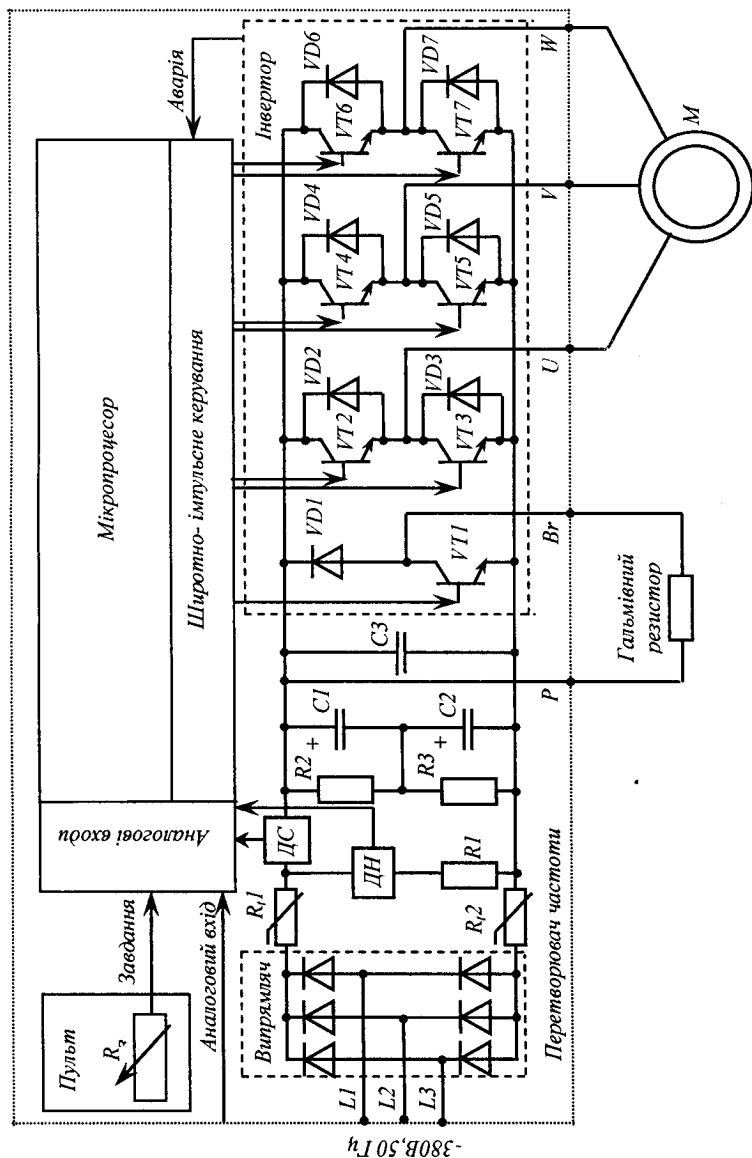


Рис. 4.53. Схема перетворювача частоти на транзисторах IGBT

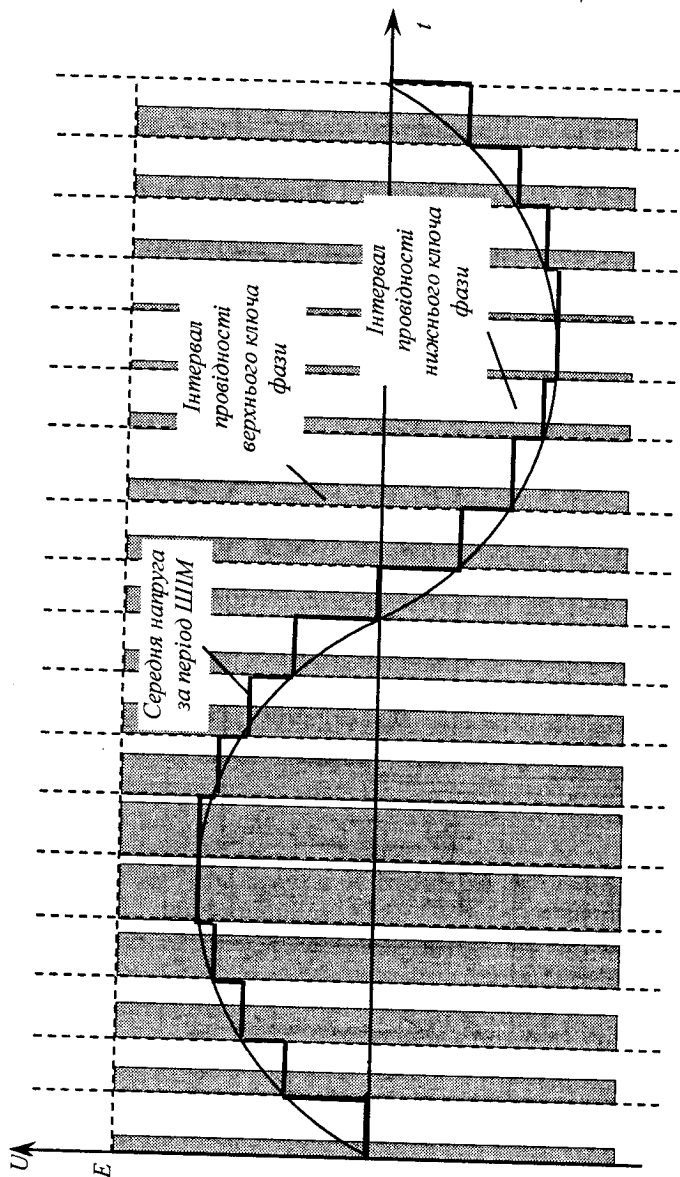


Рис. 4.54. Зміна напруги фази при зміні шпаруватості імпульсу

На входи мікропроцесора подаються аналогові сигнали задавача, зовнішніх керуючих пристроїв, величин напруги та струму випрямляча (датчики ДН і ДС), аварійного стану інверторів і ін.

В частотно керованих приводах на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором застосовують скалярне і векторне частотне керування.

При скалярному керуванні амплітуду і частоту прикладеної до двигуна напруги змінюють за певним зарані заданим законом (див. розділ 4.4.2). Скалярне керування дозволяє одержувати діапазон регулювання швидкості обертання до 1:40.

Векторне керування забезпечує безпосереднє керування крутним моментом двигуна. Крутий момент визначається струмом статора, який створює магнітне поле збудження. При безпосередньому керуванні моментом необхідно крім амплітуди змінювати і фазу струму статора, тобто вектор струму. Цим і обумовлений термін «векторне керування».

Для керування вектором струму, а, значить, положенням магнітного потоку статора відносно обертового ротора, необхідно знати точне положення ротора в який-завгодно момент часу. Для цього застосовують або виносні датчики положення ротора, або положення ротора розраховують за параметрами двигуна (за струмом і напругою статорних обмоток). Електропривод без датчика положення ротора дешевший, але векторне керування при цьому вимагає великого об'єму і високої швидкості обчислень від мікропроцесора перетворювача частоти.

Векторне керування з датчиком зворотного зв'язку за швидкістю обертання забезпечує діапазон регулювання до 1:1000 і більше, точність регулювання швидкості — соті долі процента, точність по моменту — одиниці проценту.

4.4.4. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною числа пар полюсів

У сільськогосподарському виробництві деякі машини не потребують плавного регулювання кутової швидкості. Це — припливні відцентрові вентилятори для тваринницьких, та птахівничих приміщень, деякі металообробні верстати, відцентрові сепаратори тощо. В цих випадках використовують полюсоперемикаючі (багатошвидкісні) двигуни. В серії асинхронних двигунів АИ передбачені двигуни

на дві, три і чотири частоти обертання із співвідношенням полюсів 4:2; 4:6; 8:4; 8:6; 12:6; 6:4:2; 8:4:2; 8:6:4; 12:8:6:4.

Потужності двигуна серії АІ при різному значенні полюсів залежать від кутової швидкості так:

двошвидкісних

$$P_g / P_n = (n_g / n_n)^{\alpha_1}; \quad (4.69)$$

тришвидкісних

$$\left. \begin{aligned} P_g / P_c &= (n_g / n_c)^{\alpha_1} \\ P_c / P_n &= (n_c / n_n)^{\alpha_2} \end{aligned} \right\}; \quad (4.70)$$

чотиришвидкісних

$$\left. \begin{aligned} P_g / P_{c,g} &= (n_g / n_{c,g})^{\alpha_1} \\ P_{c,g} / P_{c,n} &= (n_{c,g} / n_{c,n})^{\alpha_2} \\ P_{c,n} / P_n &= (n_{c,n} / n_n)^{\alpha_3} \end{aligned} \right\}. \quad (4.71)$$

де g — вища частота обертання; c — середня; n — нижча; c, g — середня вища; c, n — середня нижча; α — показник степеня (табл. 4.1).

У серії АІ модифікація багатшвидкісних двигунів для привода вентиляторів має показник степеня $\alpha = 3$, а відношення полюсів 4:2; 8:4; 8:6.

4.1. Значення показників степеня α

Число полюсів 2р	α_1	α_2	α_3	Число полюсів 2р	α_1	α_2	α_3
4:2	0,3-0,5	-	-	8:4:2	0,3	1	-
6:4 і 8:4	0,5-0,8	-	-	8:6:4	0,6	0,8	-
8:6 і 12:6	0,7-1,0	-	-	12:8:6:4	0,8	0,4	1,4
6:4:2	0,3	0,8	-	-	-	-	-

Двошвидкісні двигуни, що мають співвідношення числа пар полюсів 2:1 (полюси 4:2; 8:4; 12:6) мають одну полюсно-перемикаючу обмотку. На нижчій швидкості обмотка з'єднується на трикутник, а на вищій — на подвійну зірку. Двигуни для привода вентиляторів із співвідношенням полюсів 4:2; 8:4 на нижчій частоті обертання мають з'єднання обмоток статора в зірку, а на вищій — в подвійну зірку.

У тришвидкісних двигунах дві незалежні обмотки: одна полюсно-перемикаюча з числом полюсів 4:2 для двигунів з $2p = 6:4:2$, 8:4:2 і 8:4 для двигунів з $2p = 8:6:4$ та одна звичайна обмотка з числом полюсів $2p = 6$ для двигунів з $2p = 6:4:2$ і 8:6:4 і $2p = 8$ для дви-

гунів з $2p = 8:4:2$. Чотиришвидкісні двигуни з $2p = 12:6:4$ мають дві незалежні полюсно-перемикаючі обмотки з $2p = 8:4$ і $12:6$.

Для зміни числа пар полюсів у співвідношенні 1:2 виконують перемикання секцій статорної обмотки (рис. 4.55). Струм в секціях обмотки статора при номінальній напрузі не залежить від схеми з'єднання і залишається практично незмінним, незважаючи на те, що опір фази при послідовному і паралельному з'єднаннях секцій змінюється в два рази. Незмінність струму в секціях пояснюється зміною електрорушійної сили обмотки статора при зміні кутової швидкості двигуна.

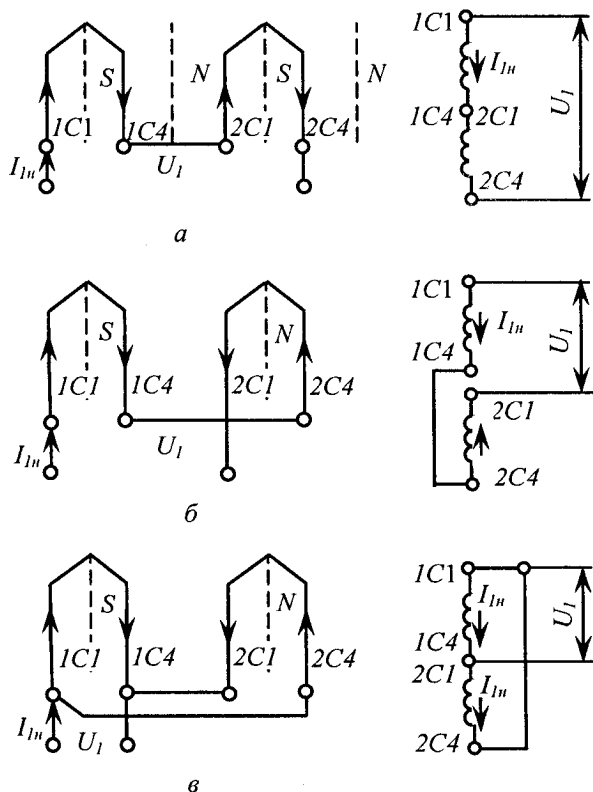


Рис. 4.55. Схеми вмикання секцій однієї фази обмотки статора, що забезпечують зміну числа пар полюсів у співвідношенні 2:1:

a — узгоджено-послідовне; *б* — зустрічно-послідовне; *в* — зустрічно-паралельне

Потужність для трьох фаз (рис. 4.55, а, б, в) залежить від типу з'єднання секцій:

узгоджено-послідовне

$$P_{a\text{доп}} = 3U_1 I_{1\text{ном}} \cdot \cos \varphi_a;$$

зустрічно-послідовне

$$P_{б\text{доп}} = 3U_1 I_{1\text{ном}} \cdot \cos \varphi_b;$$

зустрічно-паралельне

$$P_{в\text{доп}} = 3U_1 I_{1\text{ном}} \cdot \cos \varphi_v.$$

Обмотку статора двошвидкісного двигуна можна перемикає за схемами: трикутник - подвійна зірка та зірка - подвійна зірка.

При перемикає двошвидкісного двигуна з трикутника на подвійну зірку (див. рис. 4.56, а) мають місце такі співвідношення потужностей:

$$P_{1\Delta} = 3UI_{\text{ном}} \cos \varphi_{1\Delta};$$

$$P_{1YY} = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} 2I_{\text{ном}} \cos \varphi_{1YY} = 3,4UI_{\text{н}} \cos \varphi_{1YY}.$$

Якщо вважати, що $\cos \varphi_{1\Delta} \approx \cos \varphi_{1YY}$, то при перемикає двигуна на вищу швидкість потужність збільшиться на 10–13%. Так, двигун АИР100L4/2УЗ при схемі з'єднання статорної обмотки на трикутник ($n_c = 1500$ об/хв) має номінальну потужність 4,25 кВт, а при з'єднанні на подвійну зірку — 4,75 кВт. Отже, асинхронні двигуни, що мають полюсно-перемикаючу обмотку за схемою трикутник-подвійна зірка забезпечують регулювання частоти обертання при постійній потужності, тобто в другій зоні регулювання. Двигуни з такою схемою перемикає використовують для привода деяких металообробних верстатів.

Механічні характеристики двошвидкісного двигуна, що регулюється з постійною потужністю, зображені на рис. 4.57, а електромеханічні — на рис. 4.58. При перемикає двошвидкісного двигуна з вищої частоти обертання на нижчу (рис. 4.57) система з точки А переходить в режим рекуперативного гальмування (точка В). При цьому на передавальний пристрій діє максимальний момент гальмівного режиму, який може бути значно більшим за максимальний момент двигунного режиму. Передавальний пристрій двошвидкісних двигунів повинен витримувати максимальний момент рекуперативного гальмування.

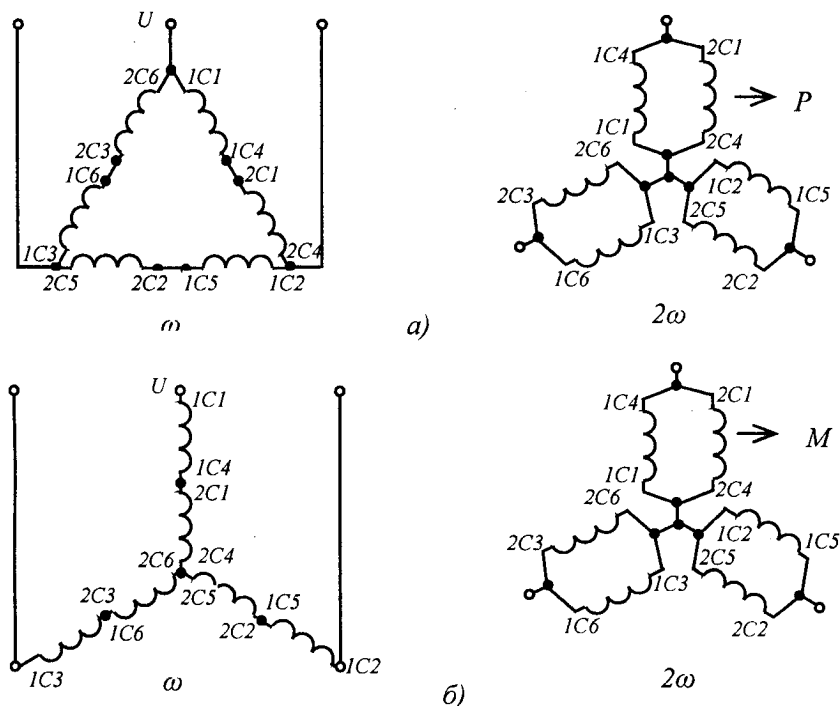


Рис. 4.56. Схеми перемикання обмоток статора:
а) з трикутника на подвійну зірку; б) із зірки на подвійну зірку

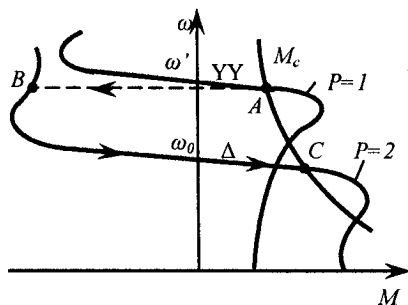


Рис. 4.57. Механічні характеристики двошвидкісного двигуна, що регулюється з постійною потужністю

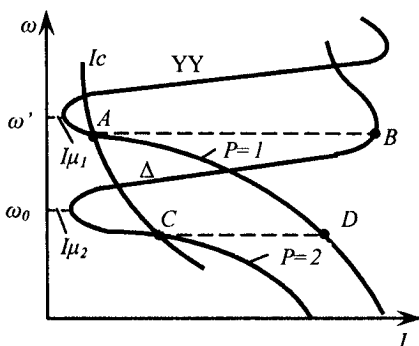


Рис. 4.58. Електромеханічні характеристики двошвидкісного двигуна, що регулюється з постійною потужністю

Аналізуючи електромеханічні характеристики двошвидкісного двигуна (рис. 4.58), що має схему перемикавання статорної обмотки з трикутника на подвійну зірку, можна зробити висновок, що перехід з вищої частоти обертання на нижчу супроводжується струмом рекуперативного гальмування нижчої частоти обертання (точка *B*). Цей струм для двигунів малої і середньої потужностей може значно перевищувати початковий пусковий струм. Збільшення струму відносно початкового пускового при перемиканні числа полюсів може призвести в окремих випадках до спрацювання захисних апаратів з електромагнітними розчіплювачами або до пошкодження обмотки ротора. При кратності відсічки електромагнітного розчіплювача 12 (автоматичні вимикачі серії АЕ20) та 14 (вимикачі серії ВА51Г) згадане вимикання, як правило, не матиме місця.

При перемиканні двошвидкісного двигуна з зірки на подвійну зірку (рис. 4.56, б) потужності двигуна визначаються залежностями:

$$P_{1Y} = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I_{ном} \cos \varphi_{1Y} = \sqrt{3} U I_{ном} \cos \varphi_{1Y};$$

$$P_{1YY} = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} 2 I_{ном} \cos \varphi_{1YY} = 2 \sqrt{3} U I_{ном} \cos \varphi_{1YY}.$$

Перемикавання статорної обмотки двошвидкісного двигуна з зірки на подвійну зірку призводить до збільшення кутової швидкості і потужності двигуна в два рази. Отже, регулювання швидкості обертання здійснюється при постійному моменті. Двигуни з перемиканням статорної обмотки з зірки на подвійну зірку використовують

для привода ліфтів та інших подібних механізмів. Механічні характеристики двошвидкісного двигуна з $M_c = \text{const}$ зображені на рис. 4.59.

Двошвидкісні двигуни серії АІ із числом полюсів у співвідношенні 6:4 та 8:6 можуть мати дві незалежні обмотки зі схемою з'єднання потрійна зірка — потрійна зірка або одну полюсно-перемикаючу обмотку по схемі з'єднання подвійна зірка (1000 об/хв) — трикутник (1500 об/хв).

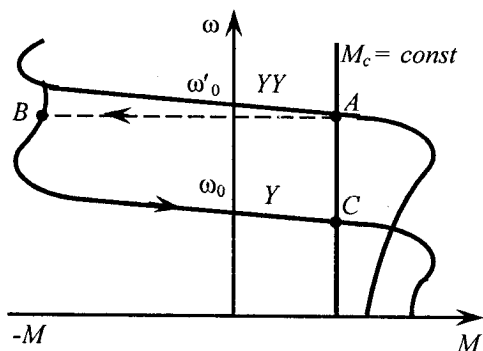


Рис. 4.59. Механічні характеристики двошвидкісного двигуна, що регулюється при $M_c = \text{const}$

Для числа полюсів 6:4, 8:6 використовуються також обмотки, що перемикаються по методу амплітудно-фазової модуляції. Перемикавання обмотки виконується по схемі трикутник — подвійна зірка.

Багатошвидкісні двигуни забезпечують регулювання кутової швидкості робочих машин, що мають різні механічні характеристики: вентиляторну, з постійним моментом, з постійною потужністю (відповідно показник степеня в рівнянні механічної характеристики робочої машини дорівнює 2; 0; -1). На всіх швидкостях двигуни працюють з ковзання 2–5 %, а, отже, і втрати потужності невеликі. Система керування двигуном порівняно проста, привод не потребує перетворювального пристрою. Багатошвидкісні двигуни, крім регулювання кутової швидкості, дають можливість здійснити ступінчастий пуск робочих машин з великим зведеним моментом інерції з метою зниження втрат енергії при пуску і запобігання надмірному нагріванню при цьому (молочні сепаратори та ін.). Діапазон регулювання кутової швидкості полюсно-перемикаючих двигунів серії АИ 1:4 (при $2p = 8:4:2$) або 1:3 (при $2p = 12:8:6:4$). Двигуни з висотами осі обертання 160–250 мм виготовляються з підвищеним пусковим моментом.

4.4.5. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною опору роторного кола

Зміну опору роторного кола здійснюють в асинхронних двигунах з фазним ротором (АИРФ), які є електричною модифікацією двигунів загального використання (АИР). Двигуни з фазним ротором використовують у приводах з тяжким пуском або тих, що потребують регулювання частоти обертання в невеликому діапазоні. Потужність двигунів з фазним ротором становить від 1,5 до 250 кВт при закритому виконанні.

Введення додаткового опору в коло ротора призводить до зменшення пускового струму (2.58), збільшення критичного ковзання (2.63), незмінності максимального моменту (2.64). Пусковий момент збільшується, поки критичне ковзання досягне одиниці (рис. 4.60).

При цьому $R'_2 = \sqrt{R_1^2 + X_K^2}$. Подальше збільшення опору роторного кола призводить до зменшення пускового моменту.

Діапазон регулювання кутової швидкості двигунів з фазним ротором за рахунок зміни опору роторного кола невеликий і становить

не більше як 1:3. Плавність регулювання кутової швидкості також низька, оскільки резистор виводиться з кола ротора дискретно.

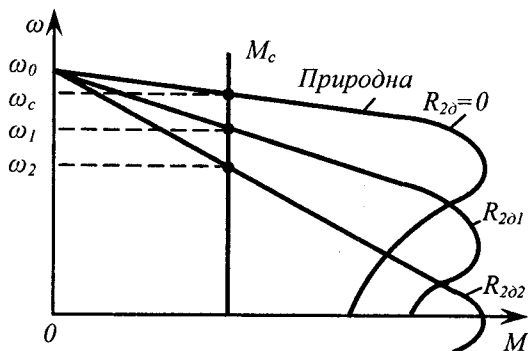


Рис. 4.60. Механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

Втрати потужності при регулюванні кутової швидкості виділяються в додатковому резисторі роторного кола і тому температура двигуна при збільшенні ковзання і номінальному струмі навантаження збільшується лише за рахунок погіршення тепловіддачі самовентильованого електродвигуна. Для забезпечення температурного режиму в межах допустимого при номінальному навантаженні застосовують незалежну вентиляцію двигуна або знижують навантаження. Для двигунів з фазним ротором з самовентильацією допустимий момент в інтервалі частоти обертання від $\omega_{\text{ном}}$ до $0,4\omega_{\text{ном}}$ визначається залежністю:

$$M_{\text{дон}} = M_{\text{ном}} \sqrt{\omega / \omega_{\text{ном}}} . \quad (4.72)$$

Якщо привод працює з незмінним статичним моментом, а двигун має самовентильацію, то при роботі на мінімальній частоті обертання з метою забезпечення допустимого температурного режиму збільшують встановлену потужність двигуна. Коефіцієнт завищення потужності при цьому визначають по залежності:

$$K_p \geq \sqrt{D} , \quad (4.73)$$

де D — діапазон регулювання кутової швидкості.

Втрати потужності в роторному колі двигуна з фазним ротором становлять:

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s = P_1 s. \quad (4.74)$$

Втрати потужності в статорному колі, як відомо, визначаються із залежності:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 \frac{R_1}{R_2}, \quad (4.75)$$

або

$$\Delta P_1 = \frac{M\omega_0 s R_1}{R'_2 + R'_{\text{доб}}}. \quad (4.76)$$

Критичні ковзання на природній і штучній характеристиках відносяться як опори роторного кола:

$$\frac{s_{\kappa.ш}}{s_{\kappa.н}} = \frac{R'_2 + R'_{2\text{доб}}}{R'_2} = \frac{s_{ш}}{s_n}, \quad (4.77)$$

де $s_{\kappa.ш}$, $s_{\kappa.н}$ — відповідно критичні ковзання на штучній і природній характеристиках; $s_{ш}$, s_n — відповідно поточні значення ковзання на штучній і природній характеристиках. Із (4.77) визначимо:

$$R'_2 + R'_{2\text{доб}} = \frac{s_{ш}}{s_n} R'_2. \quad (4.78)$$

Підставивши (4.78) в формулу (4.76) і прийнявши до уваги, що ковзання в (4.76) розглядається на штучних характеристиках, одержимо:

$$\Delta P_1 = M\omega_0 \frac{R_1}{R'_2} s_n. \quad (4.79)$$

Отже, втрати потужності в статорному колі при незмінному статичному моменті не залежать від додаткового опору роторного кола.

Регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною опору роторного кола здійснюється за допомогою досить простої контактної схеми. Цей спосіб регулювання знаходить широке застосування в приводі підйомно-транспортних механізмів.

Одним із недоліків регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів з фазним ротором зміною опору роторного кола є дискретність регулювання. Плавне безступінчасте регулювання кутової швидкості зміною опору в роторі одержують при імпульсному параметричному регулюванні, яке дає можливість створити систему автоматизованого привода із зворотними зв'язками. Схема вмикання асинхронного двигуна з фазним ротором з імпульсним регулюванням кутової швидкості та механічні характеристики для розімкненої системи регулювання зображені на рис. 4.61. Додатковий опір R вмикається в коло постійного струму роторного кола. Реактор L зменшує пульсації струму в роторі. Тиристорний ключ K за допомогою керуючого сигналу U_k відкривається і закривається. При відкритому тиристорі додатковий опір шунтується і двигун працює на природній характеристиці, а при закритому — на штучній з повністю введеним резистором.

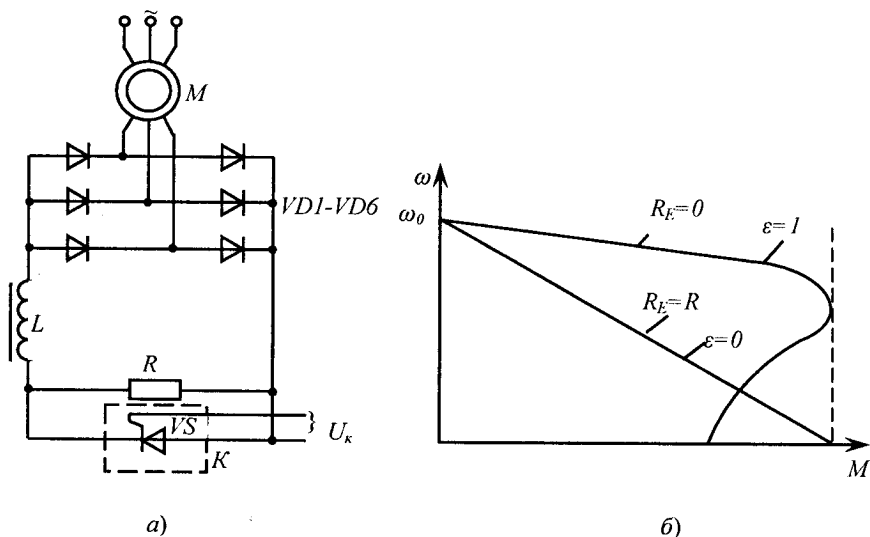


Рис. 4.61. Схема імпульсного регулювання швидкості обертання двигуна з фазним ротором (а), механічні характеристики (б)

Система керування забезпечує будь-яке проміжне значення еквівалентного опору R_e в роторному колі постійного струму. При цьому плавність і діапазон регулювання в замкнутій системі високі.

4.4.6. Асинхронний регульований електропривод у каскадних схемах

Асинхронний привод з двигунами з фазним ротором має обмежений діапазон регулювання кутової швидкості навіть в замкнених системах внаслідок значних втрат потужності, пропорційних ковзанню. Ці втрати особливо вагомі у приводах великої потужності.

Каскадні схеми вмикання асинхронних двигунів з фазним ротором дають можливість енергію втрат ковзання в роторі використовувати корисно, перетворюючи її в механічну або електричну енергію. В першому випадку має місце електромеханічний каскад, а в другому — електричний (рис. 4.62). В електромеханічному каскаді енергія ковзання ротора за допомогою випрямляча B перетворюється в енергію постійного струму і підводиться до якоря машини M . Машина M жорстко з'єднана з валом асинхронного двигуна з фазним ротором. Робоча машина PM приводиться в рух двигуном з фазним ротором AD і двигуном постійного струму M . В електричному каскаді енергія роторного кола використовується для живлення двигуна постійного струму M , який приводить в рух синхронний генератор CG . Синхронний генератор повертає енергію в електричну мережу.

У схемах електромеханічного і електричного каскадів за рахунок машини M в ротор двигуна з фазним ротором вводиться додаткова електрорушійна сила, що визначається потоком збудження машини M та її швидкістю обертання. Додаткова електрорушійна сила E_m спрямована назустріч випрямленій електрорушійній силі ротора. Отже, випрямлений струм роторного кола I_d визначається за виразом:

$$I_d = \frac{K_{cx} E_2 s - E_m}{R_e}, \quad (4.80)$$

де K_{cx} — коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення в роторному колі; для трифазної мостової схеми $X_{cx} = 1,35$; E_2 — діюче значення лінійної ЕРС ротора AD ; s — ковзання двигуна; E_m — ЕРС машини M (рис. 4.62); R_e — сумарний активний опір роторного кола, приведений до кола випрямленого струму:

$$R_e = \frac{m X_{\partial s} s}{2\pi} + 2R'_1 s + 2R_2 + R_L + R_{я.м}, \quad (4.81)$$

де m — число фаз випрямляча (для трифазної мостової схеми $m = 6$); $X_{\partial s}$ — опір розсіювання фази двигуна, $X_{\partial s} = X_1 + X_2$; R'_1 — приведений до кола ротора активний опір фази статора двигуна; R_2 — акти-

вний опір фази ротора; R_L — активний опір згладжуючого реактора; $R_{я,м}$ — активний опір якоря машини M .

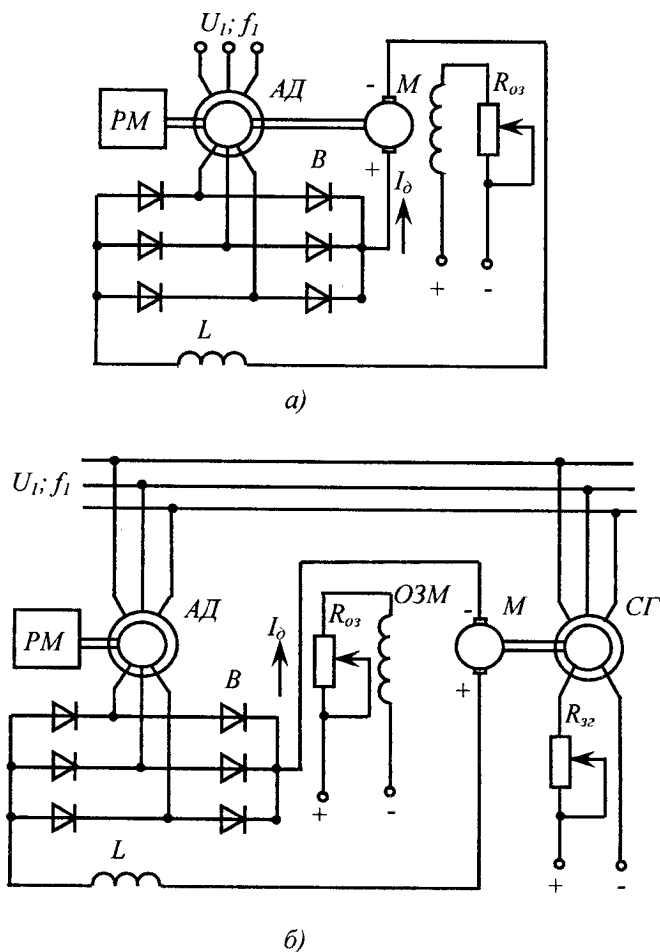


Рис. 4.62. Схеми вентильно-машинних каскадів:
а — електромеханічного; б — електричного

Якщо випрямлений струм дорівнює нулю, то і змінний струм ротора також матиме нульове значення. В схемі звичайного вмикання струм ротора дорівнює нулю лише при синхронній швидкості обертання ротора. В каскадних схемах вмикання двигуна з фазним ротором, як видно із (4.80), струм ротора може дорівнювати нулю при

різних значеннях ковзання в залежності від E_m . Величину ковзання при нульовому значенні струму в роторі визначають із виразу

$$s_0 = \frac{E_m}{K_{cx} \cdot E_2}. \quad (4.82)$$

Змінюючи збудження машини M , одержують різні значення s_0 , яким відповідають значення кутової швидкості при нульових значеннях струму. Ці кутові швидкості на відміну від синхронної, яка визначається частотою струму і числом пар полюсів, називають кутовими швидкостями холостого ходу (струм каскаду і момент дорівнюють нулю).

Регулювання швидкості електромеханічного каскаду при постійному статичному моменті пояснюється так (рис. 4.63). При роботі системи в усталеному режимі при кутовій швидкості ω_{xx2} зменшення струму збудження машини M від I_{32} до I_{31} призводить до зменшення її ЕРС, в результаті чого (4.80) збільшиться струм роторного кола асинхронного двигуна AD . Збільшення струму роторного кола збільшить момент асинхронного двигуна і машини постійного струму M . Машини AD і M з'єднані жорстко між собою і кутова швидкість їх збільшуватиметься, в результаті чого зменшиться ЕРС асинхронного двигуна, оскільки зменшиться його ковзання. Збільшення частоти обертання системи призводить до збільшення ЕРС машини M . При цьому (4.80) зменшиться випрямлений струм ротора і, як наслідок, момент каскаду зменшиться. Система прийме усталений режим на новій механічній характеристиці двигуна, що характеризується кутовою швидкістю холостого ходу ω_{xx2} (рис. 4.63, а). При збільшенні струму збудження машини M її ЕРС збільшиться, що призведе до зменшення випрямленого струму і моментів AD і M . Система при постійному статичному моменті гальмується, ЕРС AD збільшується, а M — зменшується. Наступив усталений режим при меншій кутовій швидкості. Максимальний момент механічних характеристик електромеханічного каскаду дещо менший (на 10—15 %) ніж максимальний момент природної механічної характеристики. Це пояснюється впливом явища комутації вентилів в роторному колі. Пусковий момент не залежить від струму збудження машини M . Це пояснюється тим, що при нульовому значенні кутової швидкості ЕРС машини M дорівнює нулю і на випрямлений струм роторного кола, а значить і пусковий момент двигуна AD не впливає.

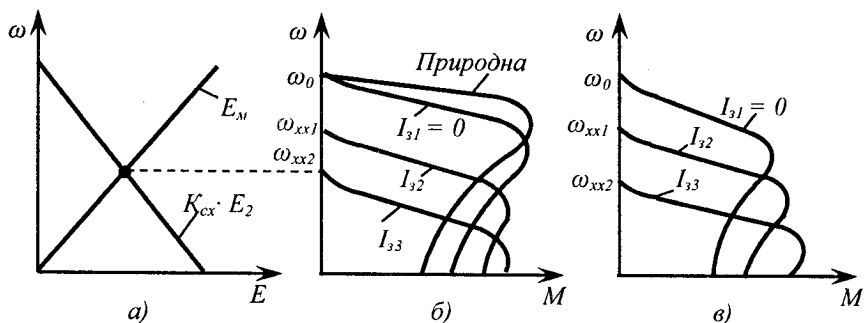


Рис. 4.63. Залежності ЕРС машин постійного струму M і асинхронного двигуна АД від швидкості обертання (а), механічні характеристики асинхронного двигуна (б) і механічні характеристики вентильно-машинного каскаду (в) при різних струмах збудження двигуна M

Механічні характеристики електромеханічного каскаду відрізняються від механічних характеристик двигуна (рис. 4.63). При нульовому значенні струму збудження машини M згадані механічні характеристики однакові. При збільшенні струму збудження машини M зростає її момент. Останній передається на вал основного двигуна. Отже, в схемі електромеханічного каскаду робоча машина PM приводиться в рух під дією моментів двигунів АД і M .

Діапазон регулювання електромеханічного каскаду обмежується потужністю машини M . Чим нижче частота обертання АД (рис. 4.62), тим більші втрати потужності ковзання. Машина M повинна бути розрахована на перетворення цих втрат. Потужність машини M орієнтовно визначають за виразом:

$$P_M = P_{a.o}(D - 1). \quad (4.83)$$

При діапазоні регулювання $D = 2$ потужність машин M і АД однакова (при постійному статичному моменті).

Плавність регулювання швидкості обертання в каскадній схемі досить висока. Кутову швидкість у схемі електричного каскаду (рис. 4.62) регулюють аналогічно як і в електромеханічному каскаді. Характерним для електричного вентильно-машинного каскаду є незмінність ЕРС машини M в усталеному режимі, а значить незмінна швидкість її обертання. Отже, синхронний генератор СГ (рис. 4.62, б) має сталу частоту струму.

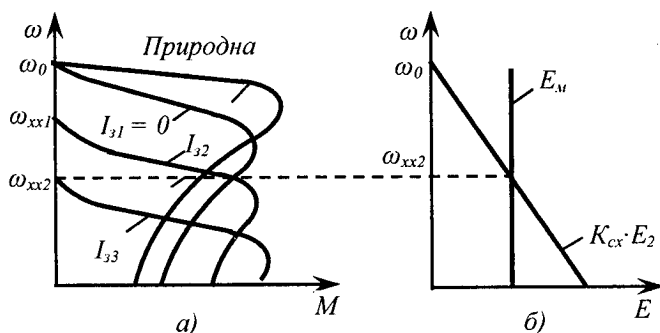


Рис. 4.64. Механічні характеристики електричного вентильно-машинного каскаду (а) та залежності ЕРС машини постійного струму E_M і асинхронного двигуна $K_{cx} \cdot E_2$ від швидкості обертання (б) при $I_{32} < I_{33}$

Електричний вентильно-машинний каскад забезпечує регулювання кутової швидкості при постійному моменті (зона 1), а електромеханічний каскад — при постійній потужності (зона 2).

При збільшенні струму збудження машини M електромеханічного і електричного каскадів збільшується ковзання асинхронного двигуна. В результаті цього (4.81) зростає еквівалентний опір, приведений до роторного кола, що призводить до зниження жорсткості регульованих механічних характеристик асинхронного двигуна порівняно з природною характеристикою.

Коефіцієнт корисної дії розглянутих каскадних схем порівняно високий і становить 0,82–0,86 при номінальному навантаженні каскаду, коефіцієнт потужності дорівнює 0,75–0,85.

Вентильно-машинні каскади не можуть працювати в режимі електричного гальмування внаслідок односторонньої провідності випрямляючого моста в колі ротора асинхронного двигуна. Індуктивність L в колі випрямленого струму згладжує пульсації струму (рис. 4.62).

Один з недоліків вентильно-машинних каскадів полягає в необхідності машини постійного струму в електромеханічному каскаді, а в електричному каскаді — ще й синхронного генератора. Сучасний рівень розвитку електронної техніки дає можливість створити асинхронно-вентильний каскад, який складається з асинхронного двигуна з фазним ротором $АД$, вентильного випрямляча в роторному колі $В$, інвертора I , трансформатора Tr та реактора L (рис. 4.65). Схема асинхронно-вентильного електричного каскаду працює аналогічно вентильно-машинному каскаду, тобто за допомогою інвертора I в

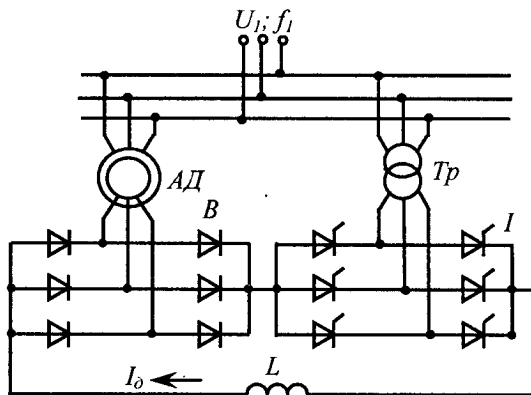
роторне коло асинхронного двигуна вводиться регульована додаткова ЕРС. При цьому випрямлений струм ротора визначається за виразом:

$$I_d = \frac{E_{d0}s - E_{d0i} \cdot \cos\beta - \sum \Delta U_s}{R_e}, \quad (4.84)$$

де E_{d0} — випрямлена ЕРС ротора. При трифазній схемі випрямлення $E_{d0} = 2,34 E_{2\kappa\phi} = 1,35 E_{2\kappa}$, E_{d0i} — випрямлена ЕРС інвертора; $E_{d0i} = 2,34 E_{2\kappa\phi}$; $\sum \Delta U_s$ — втрати напруги в вентилях роторного та інверторного кіл; β — кут регулювання інвертора; R_e — еквівалентний опір кола:

$$R_e = \frac{3X_{\partial s}s}{\pi} + \frac{3X_{mp}}{\pi} + 2R_1s + 2R_2 + 2R_{mp} + R_L, \quad (4.85)$$

де X_{mp} , R_{mp} — відповідно реактивний і активний опори трансформатора, приведені до вторинної обмотки.



4.65. Схема асинхронно-вентильного каскаду:
 B — випрямляч; I — інвертор

Якщо знехтувати величиною $\sum \Delta U$ при нульовому значенні струму роторного кола, ковзання при цьому визначається:

$$s_0 = \frac{E_{d0i} \cos\beta}{E_{d0}}. \quad (4.86)$$

Змінюючи кут випередження відкриття тиристорів, змінюють ЕРС інвертора, тоді система може працювати при різних ковзаннях. Асинхронно-вентильний каскад забезпечує регулювання швидкості вниз від номінального значення. Жорсткість механічних характеристик каскаду зменшується із збільшенням ковзання асинхронного двигуна (збільшення ЕРС інвертора). Крім того, при збільшенні ковзання зростає еквівалентний опір роторного кола, що призводить до зменшення перевантажувальної здатності двигуна. З урахуванням відзначеного діапазон регулювання становить приблизно 2:1. Збільшення діапазону регулювання потребує збільшення потужності елементів роторного кола (випрямляча, інвертора, трансформатора).

Орієнтовні механічні характеристики асинхронно-вентильного каскаду зображені на рис. 4.66.

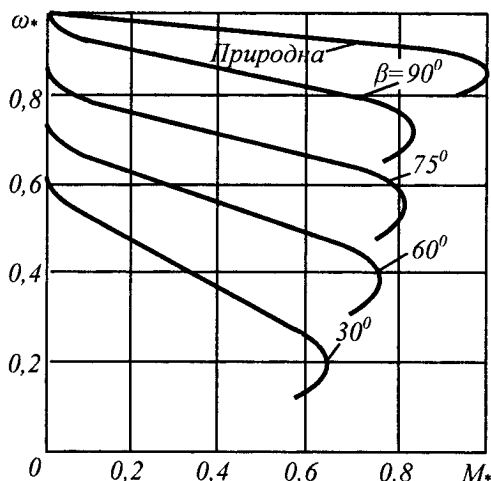


Рис. 4.66. Орієнтовні механічні характеристики асинхронно-вентильного каскаду

Для установок з регульованим приводом у невеликому діапазоні і потужністю в десятки тисяч кіловат асинхронно-вентильні схеми регулювання частоти обертання є найбільш економічні.

Вмикання каскадних схем в електричну мережу здійснюється в певній послідовності з введенням в ротор асинхронного двигуна пускових резисторів, які після пуску вимикаються, а ротор приєднується до випрямляча (на схемах 4.62, 4.65 пускові резистори не показані).

4.4.7. Регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною напруги на статорі

Кутова швидкість асинхронного двигуна безпосередньо не залежить від напруги на статорі. Після деяких перетворень виразу $\omega = \omega_0(1 - s)$ можна одержати залежність швидкості обертання від напруги на статорі:

$$\omega = \omega_0 - \frac{I_2' \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}}{K \alpha U_\phi}, \quad (4.87)$$

де K — конструктивна постійна двигуна, що враховується при визначенні моменту ($M = K \Phi I_2' \cos \psi_2$); α — коефіцієнт пропорційності між напругою і магнітним потоком ($\Phi = \alpha U_\phi$). При малих навантаженнях (малі значення I_2') зміна напруги на статорі практично не впливає на кутову швидкість. Перевантажувальна здатність двигуна при зменшенні напруги зменшується по співвідношенню: $M_{k*} = U_*^2$. Двигуни загального використання, що мають ковзання 3–4 %, в розімкнених системах при зміні напруги на статорі практично не змінюють частоти обертання (рис. 4.67).

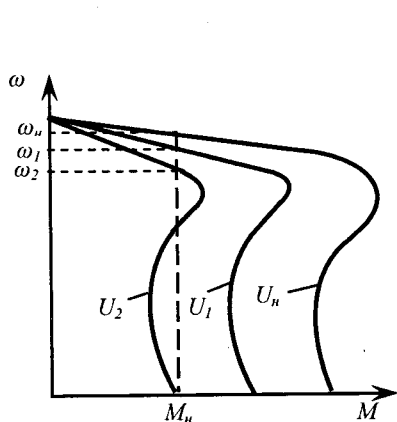


Рис. 4.67. Залежність швидкості АД загального використання від зміни напруги на статорі ($U_n > U_I > U_2$)

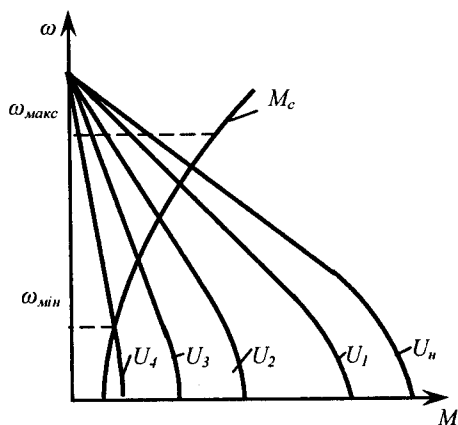


Рис. 4.68. Механічні характеристики двигуна АИРП при зміні напруги ($U_n > U_I > U_2 > U_3 > U_4$)

Якщо збільшити активний опір ротора, то збільшиться критичне ковзання і кутова швидкість при зміні напруги на статорі змінюватиметься в більших межах. Отже, навіть у розімкненій системі регулювання кутової швидкості за рахунок зміні напруги на статорі в приводах з двигунами з підвищеним ковзанням можна одержати необхідний діапазон регулювання.

В зв'язку з тим, що момент двигуна змінюється пропорційно квадрату напруги, регулювати кутову швидкість зміною напруги при постійному статичному моменті неможливо, оскільки при цьому знижується переважувальна здатність двигуна. Такі приводи в сільськогосподарському виробництві використовують для привода осьових вентиляторів серії ВО, якими комплектуються установки «Клімат» для вентиляції тваринницьких і птахівничих приміщень (рис. 4.68). Енергетичні показники регульованого електропривода при зниженні напруги нижчі, ніж при номінальній. Напругу на затискачах двигуна регулюють за допомогою автотрансформатора або тиристорного регулятора напруги (рис. 4.69). Автотрансформатор, як правило, дає можливість за допомогою комутаційних апаратів дискретно змінювати напругу на статорі двигуна. У приводах з тиристорним регулятором напруга на затискачах двигуна змінюється плавно.

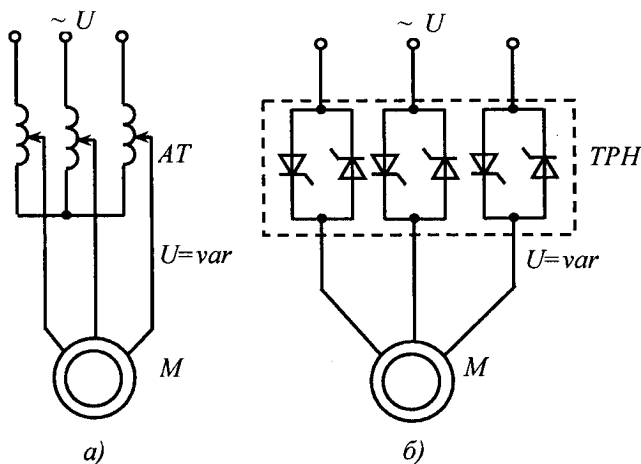


Рис. 4.69. Схема регулювання напруги на затискачах асинхронного двигуна:

а — з автотрансформатором;
б — з тиристорним регулятором напруги

4.4.8. Приклади

Приклад 1. Розрахувати та побудувати графіки законів зміни напруги при частотному регулюванні двигуна 4A132S4Y3 потужністю 7,5 кВт привода вентилятора без врахування ($R_l = 0$) та з врахуванням (скоригований закон) активного опору статора. Опори двигуна у відносних одиницях: активний опір статора $R_{l*} = 0,048$; індуктивні опори при частоті 50 Гц: короткого замикання $X_{k*} = 0,15$ та контуру намагнічування $X_{\mu*} = 3,0$. Механічна характеристика вентилятора у відносних одиницях описується залежністю $M_{c*} = f^2$.

Розв'язок

1) Знаходимо відношення опорів:

$$\rho_{lk} = R_{l*} / X_{k*} = 0,048 / 0,15 = 0,32;$$

$$\rho_{l\mu} = R_{l*} / X_{\mu*} = 0,048 / 3,0 = 0,016.$$

2) Задавшись значеннями частоти у відносних одиницях 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; і 1,0, за формулами (4.57) і (4.64) розрахуємо залежності $U_* = \varphi(f_*)$ (див. таблицю 4.1) та побудуємо їх графіки (рис. 4.70).

Таблиця 4.1

Частота, в.о.	Напруга, в.о., за законами	
	скоригованим	при $R=0$
0,10	0,15	0,01
0,20	0,22	0,04
0,30	0,28	0,09
0,40	0,34	0,16
0,50	0,413	0,25
0,60	0,5	0,36
0,70	0,6	0,49
0,80	0,71	0,64
0,90	0,85	0,81
1,00	1,00	1,00

Приклад 2. Визначити діапазони регулювання та опори додаткових резисторів в колі фазного ротора двигуна 4AK180M4Y3 для забезпечення його перевантажувальної здатності $2M_{ном}$ і $4M_{ном}$ при регулюванні з $M_c = \text{const}$. Технічні дані двигуна: номінальна потуж-

ність $P_{\text{ном}} = 18,5$ кВт; номінальна лінійна напруга обмотки статора $U_{1\text{л.ном}} = 220$ В; номінальна напруга ротора $U_{2\text{ном}} = 295$ В; номінальний струм ротора $I_{2\text{ном}} = 38$ А; $\eta_{\text{ном}} = 89\%$; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,88$; кратність максимального моменту $\mu_k = 4,0$; номінальне ковзання $s_{\text{ном}} = 0,029$; активний опір ротора, зведений до обмотки статора, у відносних одиницях $R_{2*} = 0,034$.

Розв'язок

1. Номінальний струм статора:

$$I_1 = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{1\text{л.ном}} \eta_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{ном}}} = \frac{18500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,88} = 35,8 \text{ А.}$$

2. Номінальний опір двигуна:

$$R_n = \frac{U_{\phi.\text{ном}}}{I_{\phi.\text{ном}}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 35,8} = 6,15 \text{ Ом.}$$

3. Коефіцієнт трансформації двигуна:

$$K \approx U_{1\text{л.ном}}/U_{2\text{л.ном}} = 380/295 = 1,29.$$

4. Активний опір обмотки ротора:

$$R_2 = R_{2*} R_{\text{ном}} / K^2 = 0,034 \cdot 6,15 / 1,29^2 = 0,126 \text{ Ом.}$$

5. Приймаючи, що механічні характеристики двигуна на робочій частині мають лінійний характер, на рис. 4.71 побудуємо їх графіки. З подібності трикутників $I-0-2M_{\text{ном}}$ і $s_{2Mn}-0-A$ та $I-0-4M_{\text{ном}}$ і $s_{4Mn}-0-B$ визначимо:

5.1. Ковзання при номінальному моменті на характеристиці $2M_{\text{ном}}$:

$$s_{2Mn} = M_{\text{ном}}/2M_{\text{ном}} = 0,5;$$

5.2. Ковзання при номінальному моменті на характеристиці $4M_{\text{ном}}$:

$$s_{4Mn} = M_{\text{ном}}/4M_{\text{ном}} = 0,25.$$

6. Діапазони регулювання:

6.1. При максимальному моменті $2M_{\text{ном}}$:

$$D_{2M} = \frac{1 - s_{\text{ном}}}{1 - s_{2Mn}} = \frac{1 - 0,029}{1 - 0,5} = 1,94;$$

6.2. При максимальному моменті $4M_{\text{ном}}$:

$$D_{4M} = \frac{1 - s_{\text{ном}}}{1 - s_{4Mn}} = \frac{1 - 0,029}{1 - 0,25} = 1,29.$$

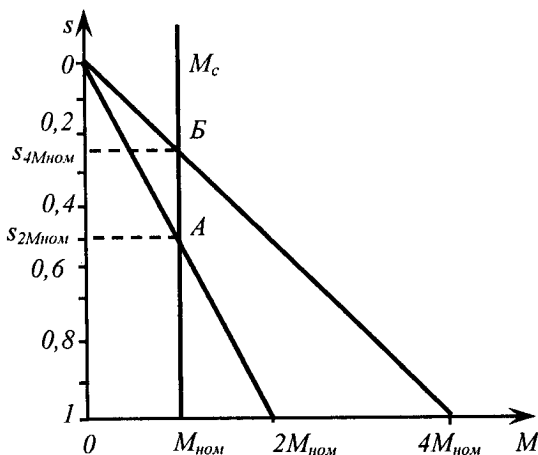


Рис. 4.71. Пускові механічні характеристики двигуна 4AK180M4У3

7. За формулою (4.78) визначаємо опори додаткових резисторів:

7.1. При максимальному моменті $2M_{\text{ном}}$:

$$R_{2\text{дон}2} = \frac{s_{2Mn}}{s_{\text{ном}}} \cdot R_2 - R_2 = \frac{0,5}{0,029} \cdot 0,126 - 0,126 = 2,05 \text{ Ом};$$

7.2. При максимальному моменті $4M_{\text{ном}}$:

$$R_{2\text{дон}4} = \frac{s_{4Mn}}{s_{\text{ном}}} \cdot R_2 - R_2 = \frac{0,25}{0,029} \cdot 0,126 - 0,126 = 0,96 \text{ Ом}.$$

4.4.9. Контрольні питання

1. Назвіть можливі способи регулювання швидкості асинхронних двигунів.
2. Охарактеризуйте показники частотного регулювання швидкості асинхронних двигунів.
3. Чому при частотному регулюванні разом із зміною частоти необхідно змінювати і напругу?

4. За яким законом необхідно змінювати напругу на затискачах асинхронного двигуна при зміні частоти струму?
5. Коли необхідно вносити корективи в основний закон зміни напруги при частотному регулюванні швидкості асинхронних двигунів?
6. З яких основних блоків складається перетворювач частоти з проміжною ланкою постійного струму?
7. Чим відрізняються інвертори напруги від інверторів струму?
8. З яких блоків складається та як працює перетворювач частоти струму з транзисторним інвертором?
9. Охарактеризуйте показники регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною кількості пар полюсів?
10. Яким чином змінюється кількість пар полюсів у двошвидкісного двигуна?
11. За якими схемами перемикання числа пар полюсів відбувається регулювання швидкості асинхронного двигуна при постійній потужності?, при постійному моменті?
12. Охарактеризуйте показники регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною опору роторного кола.
11. Які недоліки регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною опору кола ротора?
13. Як влаштована і як працює система імпульсного параметричного регулювання швидкості асинхронних двигунів з фазним ротором?
14. Яка різниця між електромеханічним і електричним вентильно-машинними каскадами з асинхронними двигунами з фазним ротором?
15. Двигуни якої електричної модифікації застосовують при регулюванні швидкості обертання зміною напруги?
16. В приводах яких машин використовують регулювання швидкості зміною напруги?



5. АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

5.1. Загальні відомості

Одним із основних недоліків розімкнених систем регулювання кутової швидкості приводів постійного та змінного струму є невеликий діапазон регулювання, що пояснюється зменшенням коефіцієнта жорсткості механічних характеристик двигунів при параметричному регулюванні. В розімкнених системах неможливо також одержати високу стабільність регулювання, оскільки збурення з боку навантаження призводить до коливання кутових швидкостей. Отже, в розімкнених системах задана кутова швидкість не стабілізується і залежить від параметрів двигуна і характеру навантаження на його валу. В ряді випадків виникає необхідність задавати певні значення кутової швидкості і відповідні моменти двигуна при цьому, тобто здійснювати регулювання координат.

Всі зазначені недоліки розімкнених систем регулювання відсутні в замкнених системах. В таких системах передбачаються керовані перетворювачі і регулятори, які дають можливість автоматично під дією зворотних зв'язків змінювати напругу, опір, частоту, струм та інші параметри. Характерною ознакою замкненої системи є зворотні зв'язки, що з'єднують її вихід з входом. Вони можуть бути жорсткі і гнучкі. Жорсткі зворотні зв'язки діють в усталеному і перехідному режимах, а гнучкі — лише в перехідному. За впливом на вихідну величину зворотні зв'язки поділяють на від'ємні і додатні. При від'ємному зворотному зв'язку сигнал у вигляді напруги подається в протифазі до задаючого сигналу, а при додатньому — узгоджено. Для формування зворотних зв'язків використовують такі вихідні величини: струм, напругу, частоту обертання тощо.

Аналіз і синтез замкнених систем регулювання координат електропривода виконуються методами теорії автоматичного регулювання.

5.2. Системи автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС НЗ

Структурна схема замкненої системи автоматичного регулювання кутової швидкості з від'ємним жорстким зв'язком по кутовій швидкості зображена на рис. 5.1. Сигнал зворотного зв'язку в схемі формується за допомогою тахогенератора $ТГ$, з'єднаного з валом двигуна $М$. Живлення двигуна — автономне від тиристорного перетворювача напруги $ПН$. На вхід системи подається задаючий сигнал кутової швидкості U_z та сигнал зворотного зв'язку $k_{зи}\omega$. На вході підсилювача $П$ формується різниця згаданих сигналів:

$$U_{ax} = U_z - k_{зи}\omega. \quad (5.1)$$

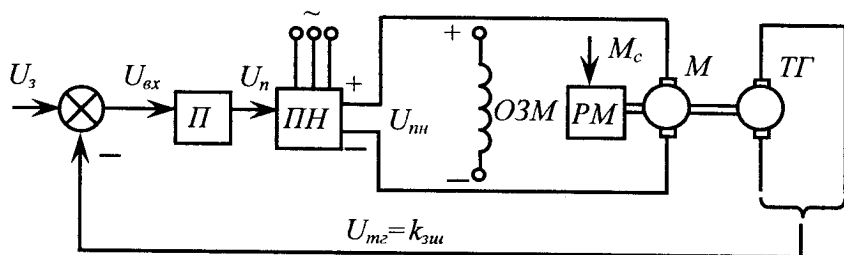


Рис. 5.1. Структурна схема системи автоматичного регулювання кутової швидкості з жорстким від'ємним зворотним зв'язком по кутовій швидкості

Принцип дії системи з зворотним від'ємним зв'язком по швидкості полягає в тому, що при збільшенні навантаження на двигун $М$ (рис. 5.1) зменшується кутова швидкість тахогенератора $ТГ$ і, як наслідок, зменшується сигнал зворотного зв'язку $k_{зи}\omega$. Сигнал на вході і відповідно на виході підсилювача $П$ зростає, в результаті чого на виході перетворювача $ПН$ напруга U_{mn} збільшується. Відбудеться автоматично компенсація зниження кутової швидкості.

В режимі неперервних струмів статична характеристика тиристорного перетворювача напруги близька до лінійної, а його динамічні властивості описуються рівнянням:

$$k'_n U_{ex} = (1 + T_n p) U_m, \quad (5.2)$$

де $k_n = U_m / U_{ex}$ — коефіцієнт передачі перетворювача з підсилювачем; T_n — стала часу перетворювача ($T_n \approx 0,01$ с).

З (5.1) і (5.2) отримуємо рівняння для швидкості ідеального холостого ходу двигуна:

$$k'_n (U_\Sigma - k_{zm} \omega) = (1 + T_n p) \omega_0, \quad (5.3)$$

де $k'_n = k_n / c_{ном}$, $\omega_0 = U_n / c_{ном}$; $c_{ном}$ — коефіцієнт ЕРС двигуна при номінальному магнітному потоці.

Рівняння електричної рівноваги для кола якоря в операторній формі має вигляд:

$$U_m = E + i_\Sigma R_{\Sigma} + L_{\Sigma} p i_\Sigma, \quad (5.4)$$

де R_{Σ} — сумарний активний опір якірного кола; L_{Σ} — сумарна індуктивність якірного кола.

Рівняння (5.4) можна записати як:

$$U_m - E = R_{\Sigma} (1 + T_e p) i_\Sigma, \quad (5.5)$$

де $T_e = L_{\Sigma} / R_{\Sigma}$ — електромагнітна стала часу.

Рівняння механічної характеристики електродвигуна при $\Phi = \Phi_{ном}$ отримуємо із (5.5):

$$\beta_0 (\omega_0 - \omega) = (1 + T_e p) M, \quad (5.6)$$

де $\beta_0 = c^2 / R_{\Sigma}$.

Механічні перехідні процеси в електроприводі описуються рівнянням руху електропривода:

$$M_0 - M_c = J p \omega = \beta_0 T_m p \omega, \quad (5.7)$$

де $T_m = J / \beta_0$ — електромеханічна стала часу.

На основі (5.1), (5.3), (5.6) і (5.7) розроблена структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання швидкості ДПС НЗ, яка показана на рис. 5.2.

Рівняння (5.3) і (5.6) описують механічну характеристику електродвигуна в регульованому електроприводі. В результаті перетворень отримуємо:

$$\omega = \frac{k'_n U_z}{(T_n + 1) + k_{зи} k'_n} - \frac{(T_n + 1)(T_e + 1)}{\beta_o [(T_n + 1) + k_{зи} k'_n]} M. \quad (5.8)$$

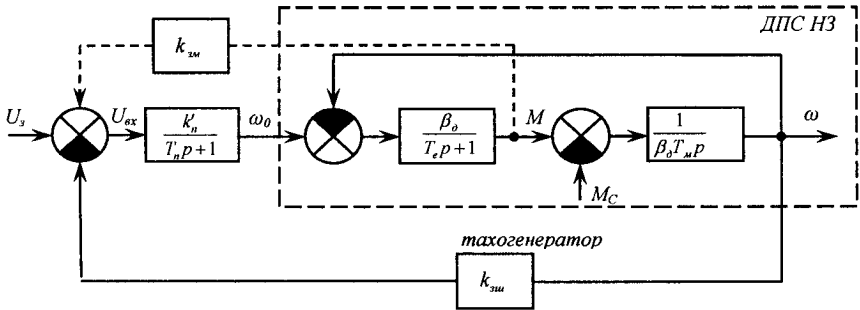


Рис. 5.2. Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання швидкості ДПС НЗ

При $p = 0$ рівняння (5.8) представляє рівняння статичної механічної характеристики:

$$\omega = \frac{k'_n U_z}{1 + k_{зи} k'_n} - \frac{1}{\beta_o (1 + k_{зи} k'_n)} M = \omega_{0зи} - \frac{M}{\beta_{зи}}. \quad (5.9)$$

Як впливає із виразу (5.9), збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку $k_{зи}$ при однакових інших умовах призводить до зменшення кутової швидкості ідеального холостого ходу та збільшення жорсткості характеристики (рис. 5.3). Механічна характеристика 1 є природна при відсутності зворотного зв'язку, тобто в розімкненій системі. Задаючий сигнал при цьому $U_{з0}$ такої величини, при якій напруга перетворювача ПН дорівнює номінальній. При введенні сигналу зворотного зв'язку знаменник правої частини виразу (5.9) збільшується і, як відзначалося, зменшується швидкість ідеального холостого ходу при одночасному збільшенні жорсткості механічної характеристики 2. Для підтримання кутової швидкості ω необхідно збільшити задаючий сигнал U_z (характеристика 3). При досить великому значенні загального коефіцієнта підсилення механічна характеристика наближається до абсолютно жорсткої, що дає можливість збільшити діапазон регулювання до 2000 : 1.

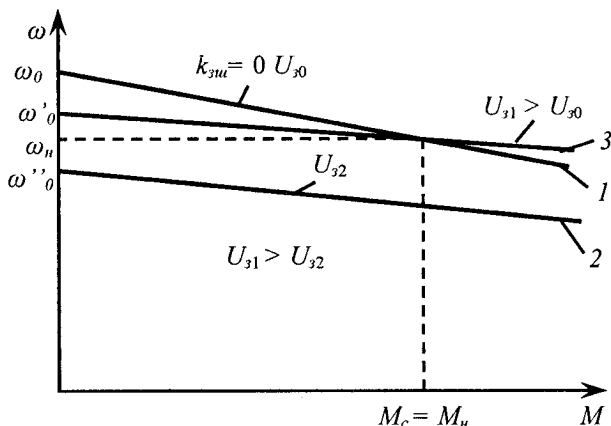


Рис. 5.3. Механічні характеристики ДПС НЗ замкнутої системи з від'ємним зворотним зв'язком по кутовій швидкості

Оскільки $k'_n k_{zm} \neq 0$, то в системі існує статична похибка регулювання, величина якої залежить від коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості. Тому доцільно вводити додатний зворотний зв'язок по моменту (струму якоря).

Структурна схема замкнутої системи з додатним зворотним зв'язком зображена на рис. 5.4.

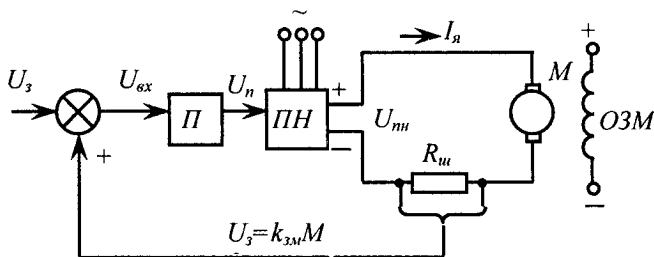


Рис. 5.4. Структурна схема системи автоматичного регулювання кутової швидкості з жорстким додатним зворотним зв'язком по струму

Вхідний сигнал на підсилювач Π в схемі з додатним зворотним зв'язком визначається залежністю:

$$U_{ox} = U_s + k_{zm} M. \quad (5.10)$$

Тоді для швидкості ідеального холостого ходу двигуна можна записати:

$$k'_n(U_g + k_{zm}M) = (1 + T_n p)\omega_0, \quad (5.11)$$

а механічна характеристика має вигляд:

$$\omega = \frac{k'_n U_g}{T_n + 1} - \frac{(T_n + 1)(T_e + 1) - \beta_o k'_n k_{zm}}{\beta_o (T_n + 1)} M. \quad (5.12)$$

Статична механічна характеристика описується рівнянням:

$$\omega = k'_n U_g - \frac{1 - \beta_o k'_n k_{zm}}{\beta_o} M. \quad (5.13)$$

Якщо вважати добуток коефіцієнтів $\beta_o k'_n k_{zm}$ незмінним, то залежність (5.13) є лінійною. Змінюючи величину опору $R_{ш}$, змінюють величину коефіцієнта зворотного зв'язку. Як додатковий опір $R_{ш}$ іноді використовують обмотку додаткових полюсів та компенсаційну обмотку електродвигуна.

Стабілізація напруги на виході перетворювача ПН здійснюється за рахунок подачі на вхід підсилювача узгодженого із задаючим сигналом зворотного зв'язку. При збільшенні навантаження напруга на затискачах двигуна M знижується за рахунок втрат її в якірному колі. При цьому збільшується спад напруги на опорі $R_{ш}$, сигнал з якого узгоджено подається на вхід підсилювача. Напруга на виході автоматично збільшується. Жорсткість механічних характеристик в цій замкненій системі залежить від сигналу зворотного зв'язку. Так, при $k_{zm} = 0$ має місце механічна характеристика 1 розімкненої системи (рис. 5.5). При співвідношенні $\beta_o k'_n k_{zm} < 1$ характеристика 2 має більшу жорсткість ніж характеристика 1. При $\beta_o k'_n k_{zm} = 1$ характеристика 3 має безкінечно велику жорсткість (паралельна осі моментів) і нарешті при $\beta_o k'_n k_{zm} > 1$ характеристика 4 має додатний коефіцієнт жорсткості. Слід відзначити, що в реальних замкнених системах з додатним зворотним зв'язком коефіцієнт передачі $\beta_o k'_n k_{zm}$ при певному значенні струму якоря (моменті) зменшується і тому механічні характеристики втрачають лінійність (характеристика 5). Ось чому зворотні додатні зв'язки по струму використовують в поєднанні з від'ємними зворотними зв'язками по швидкості.

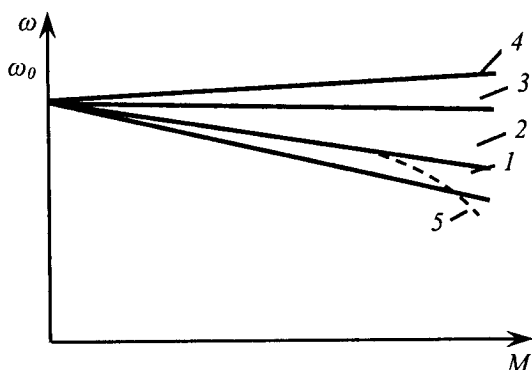


Рис. 5.5. Механічні характеристики ДПС НЗ в замкненій системі з додатним зворотним зв'язком по струму:

- 1 — $k_{zm}=0$; 2 — $\beta_o k'_n k_{zm} < 1$; 3 — $\beta_o k'_n k_{zm} = 1$;
4 — $\beta_o k'_n k_{zm} > 1$; 5 — $\beta_o k'_n k_{zm} = \text{var}$

В комбінованій системі регулювання швидкість ідеального холостого ходу двигуна визначається рівнянням:

$$k'_n(U_z - k_{zm}\omega + k_{zm}M) = (1 + T_n p)\omega_0, \quad (5.14)$$

а статична механічна характеристика має вигляд:

$$\omega = \frac{k'_n U_z}{1 + k'_n k_{zm}} - \frac{1 - \beta_o k'_n k_{zm}}{\beta_o (1 + k'_n k_{zm})} M. \quad (5.15)$$

Застосування додатного зворотного зв'язку по моменту в комбінованій системі регулювання швидкості дає можливість до нескінченності збільшити модуль жорсткості механічної характеристики шляхом підбору k_{zm} із умови $\beta_o k'_n k_{zm} = 1$. Таким чином, виключається статична похибка при збереженні динамічних показників регулювання, які визначаються коефіцієнтом підсилення і зворотного зв'язку по швидкості.

5.3. Системи автоматичного регулювання моменту ДПС НЗ

В системі автоматичного регулювання моменту ДПС НЗ застосовується від'ємний зворотний зв'язок по моменту (струму якоря).

На вході підсилювача Π (рис. 5.6) формується різниця задаючого сигналу U_z та сигналу зворотного зв'язку $k_{zm}M$:

$$U_{\text{вх}} = U_z - k_{zm}M. \quad (5.16)$$

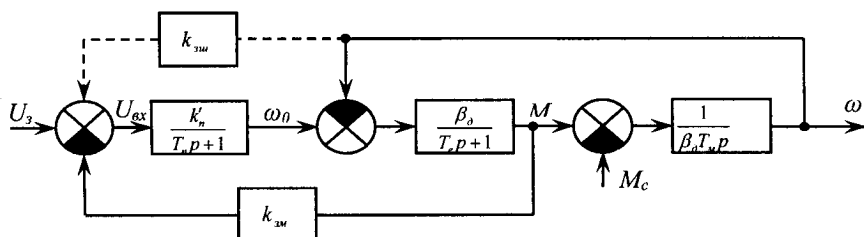


Рис. 5.6. Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання моменту

Для даної системи можна записати:

$$k'_n(U_z - k_{zm}M) = (1 + T_n p)\omega_0, \quad (5.17)$$

$$\beta_o(\omega_0 - \omega) = (1 + T_e p)M. \quad (5.18)$$

Розв'язавши (5.17) і (5.18) відносно ω , отримуємо рівняння механічної характеристики електродвигуна:

$$\omega = \frac{k'_n U_z}{T_n + 1} - \frac{(T_n + 1)(T_e + 1) + \beta_o k'_n k_{zm}}{\beta_o (T_n + 1)} M. \quad (5.19)$$

Статична механічна характеристика описується рівнянням:

$$\omega = k'_n U_z - \frac{1 + \beta_o k'_n k_{zm}}{\beta_o} M. \quad (5.20)$$

Як впливає із виразу (5.20), збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку по моменту k_{zm} призводить до зменшення жорсткості механічної характеристики (рис. 5.7). При необмеженому його зростанні жорсткість механічної характеристики наближується до нуля.

В даній системі статична точність регулювання моменту обмежена сильним збуренням, викликаним зміною швидкості. Чим менший коефіцієнт зворотного зв'язку по моменту, тим зміна швидкості істотніше впливає на момент двигуна.

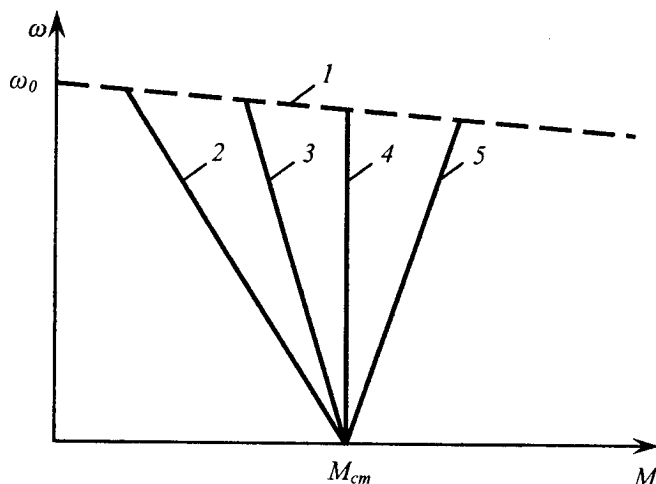


Рис. 5.7. Механічні характеристики ДПС НЗ:

1 — природна; 2 — з від'ємним зворотним зв'язком по моменту; 3, 4, 5 — з від'ємним зворотним зв'язком по моменту і додатним зворотним зв'язком по швидкості при $k'_n k_{зм} < 1$ (3), $k'_n k_{зм} = 1$ (4), $k'_n k_{зм} > 1$ (5)

Тому для зменшення залежності моменту від швидкості двигуна вводять додатний зворотний зв'язок по швидкості, який показаний на рис. 5.6 штриховою лінією. Рівняння статичної механічної характеристики для комбінованої системи регулювання моменту отримують із рівнянь:

$$k'_n(U_3 + k_{зм}\omega - k_{зм}M) = \omega_0, \quad (5.21)$$

$$\beta_o(\omega_0 - \omega) = M, \quad (5.22)$$

де $k_{зм}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості.

Звідки

$$\omega = \frac{k'_n U_3}{1 - k'_n k_{зм}} - \frac{1 + \beta_o k'_n k_{зм}}{\beta_o (1 - k'_n k_{зм})} M. \quad (5.23)$$

Як впливає із (5.23), модуль статичної жорсткості механічної характеристики в замкненій системі залежить від коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості. При зростанні $k_{зм}$ жорсткість механічної характеристики зменшується і при критичному значенні коефі-

цієнта додатного зворотного зв'язку по швидкості $k_{ш.кр} = 1/k'_n$ стає рівним нулю. При цьому статична похибка, викликана зміною швидкості, виключається, і система забезпечує регулювання моменту без введення у коло регулювання регуляторів з інтегральною характеристикою. Подальше збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості призводить до зміни знаку жорсткості механічної характеристики.

5.4. Обмеження струму і моменту ДПС НЗ у замкненій системі з нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму

В ряді випадків електропривод з ДПС НЗ повинен мати екскаваторну електромеханічну та механічну характеристики, які мають дві різко відмінні ділянки. На першій ділянці момент двигуна має менші значення і більший коефіцієнт жорсткості, а на другій — більші значення моменту і досить малий коефіцієнт жорсткості. Отже, екскаваторна характеристика при певних значеннях моменту (струму) має злам. Таку характеристику можна одержати лише в замкненій системі регулювання з нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму (рис. 5.8). Схема має елементи такі, як і схема, наведена на рис. 5.4. Крім того, схема, що формує екскаваторну характеристику, має вузол струмової відсічки (BCB). На вхід BCB подається сигнал зворотного зв'язку U_{33} . У BCB введено опорний сигнал U_{on} .

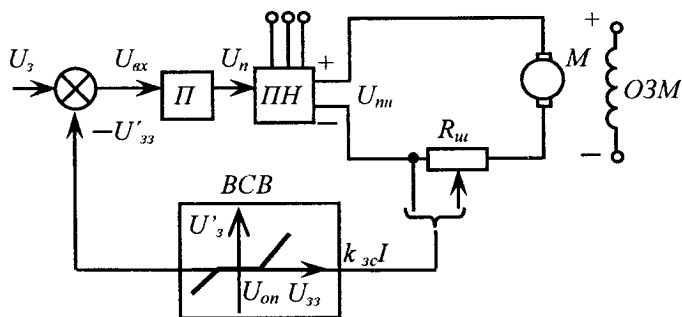


Рис. 5.8. Структурна схема системи з нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму

На виході BCB з'явиться сигнал U'_{33} лише при певному значенні вхідного сигналу U_{33} . До появи сигналу на виході система працює без зворотного зв'язку, тобто має місце розімкнена система, яка формує першу ділянку механічної характеристики. При певному значенні струму якірного кола двигуна M на виході з'являється сигнал від'ємного зворотного зв'язку по струму. Вхідний сигнал підсилювача Π зменшується при цьому ($U_{вх} = U_j - U'_{33}$) і, як наслідок, різко спадає напруга U_{nn} на виході перетворювача. Струм якірного кола, при якому на виході BCB з'являється вихідний сигнал, називають струмом відсічки ($I_{відс.}$). При цьому струмі (моменті) відбувається злам характеристики і вона переходить на другу ділянку, з круто падаючою характеристикою. Двигун зупиняється, споживаючи по якірному колу струм стопоріння $I_{ст.}$. Необхідні наперед задані величини струмів відсічки і стопоріння можна одержати за рахунок від'ємного зворотного зв'язку по струму. Отже, згадана система дає можливість обмежити струм (момент) двигуна, тобто регулювати його координати згідно з вимогами технологічного процесу. Змінюючи задаючий сигнал, одержують сімейство механічних (електромеханічних) характеристик з різною швидкістю ідеального холостого ходу, які паралельні між собою (рис. 5.9). Для одержання більш жорстких характеристик на першій ділянці систему доповнюють від'ємним зворотним зв'язком по напрузі.

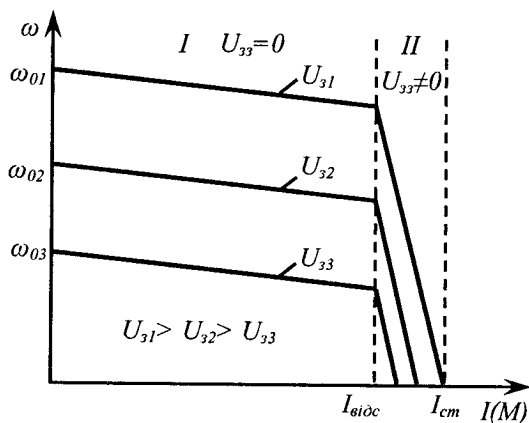


Рис. 5.9. Електромеханічні (механічні) характеристики ДПС НЗ у системі з нелінійним від'ємним зворотним зв'язком по струму

Рівняння електромеханічної та механічної характеристик на першій ділянці при відсутності від'ємного зворотного зв'язку по напрузі аналогічні рівнянням розімкненої системи керування (2.7, 2.8). При наявності на першій ділянці характеристик від'ємного зворотного зв'язку по напрузі механічна характеристика описується залежністю (5.9). Друга ділянка характеристик не потребує зміни схеми керування для збільшення її жорсткості, а тому на ній відсутній від'ємний зворотний зв'язок по напрузі. Рівняння механічної характеристики для другої ділянки в системі з від'ємним зворотним зв'язком по моменту одержують з виразу (5.20), замість моменту M підставивши різницю моментів $M - M_{відс}$:

$$\omega = k'_n U_z - \frac{1 + \beta_o k'_n k_{zm}}{\beta_o} (M - M_{відс}). \quad (5.24)$$

Рівняння електромеханічної характеристики отримуємо із (5.24):

$$\omega = \frac{k_n U_z}{c_{ном}} - \frac{R_{я\Sigma} + k_n k_{зс}}{c_{ном}} (I_{я} - I_{відс}), \quad (5.25)$$

де $k_{зс} = k_{zm}/c_{ном}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку по струму.

Описана система дає можливість зупинити двигун, не вимикаючи його з мережі автономного живлення. Струм якоря при нульовому значенні кутової швидкості називають струмом стопоріння, який визначається з формули (5.25) при $\omega = 0$:

$$I_{ст} = I_{відс} + k_n U_z / (R_{я} + R_n + R_{ш} + k_n k_{зс}). \quad (5.26)$$

При досить великому значенні загального коефіцієнта підсилення струм стопоріння наближається до струму відсічки, а електромеханічна характеристика на другій ділянці являє собою вертикальну лінію. Отже, змінюючи коефіцієнт зворотного зв'язку $k_{зс}$, змінюють загальний коефіцієнт підсилення, що дає можливість регулювати координати привода.

5.5. Автоматичне регулювання положення

Електроприводи, призначені для регулювання положення робочого органу машини, називають позиційними. Залежно від конкретних вимог технологічного процесу можливі чотири варіанти автома-

тичного регулювання положення: 1) точна зупинка електропривода; 2) безперервне автоматичне регулювання положення по відхиленню з метою забезпечення дозованих переміщень; 3) безперервне регулювання положення по відхиленню за заданою програмою (програмно-керований позиційний привод); 4) безперервне автоматичне регулювання положення по відхиленню при задаючому сигналі, який змінюється довільно (позиційний слідкуючий електропривод).

Автоматичне регулювання положення вимагає застосування датчиків для вимірювання кутового чи лінійного переміщення робочого органу механізму і використання пристроїв, які задають ці переміщення. Найчастіше для цього використовуються індуктивні датчики.

Для електроприводів позиційних механізмів окрім регулювання положення необхідне також регулювання швидкості і обмеження струму якоря в перехідних процесах допустимим значенням $I_a = I_{ст}$. Тому застосовується трикратна система регулювання положення, яка містить одноконтурну систему регулювання швидкості в системі ТП-Д з підлеглим контуром регулювання струму, доповнену інтегруючою ланкою для отримання переміщення φ із зворотним зв'язком по положенню (рис. 5.10).

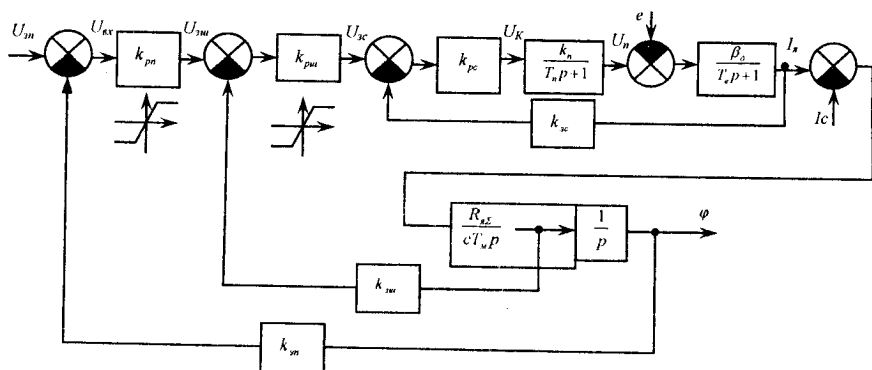


Рис. 5.10. Структурно-алгоритмічна схема

системи автоматичного регулювання положення:

$k_{рп}$ — коефіцієнт підсилення регулятора положення; $k_{шв}$ — коефіцієнт підсилення регулятора швидкості; $k_{рс}$ — коефіцієнт підсилення регулятора струму

В даній системі застосовуються П-регулятори положення, швидкості і струму. На вхід регулятора положення подається сигнал по-

хибки U_{ax} , який пропорційний відстані від початкової точки до заданої. Вихідна напруга регулятора положення є задаючим сигналом для регулятора швидкості, а регулятора швидкості – для регулятора струму. Регулятор положення задає прискорення електропривода. Якщо U_{ax} і відповідно значення швидкості настільки великі, що $I_{макс} > I_{ст}$, то регулятор швидкості переходить на насичену ділянку своєї характеристики, забезпечуючи $U_{zc} = U_{zc\ макс} = k_{zc} I_{ст} = const$. Система регулювання положення розмикається, і йде процес гальмування при $I_a = I_{ст} = const$. При $I_{макс} < I_{ст}$ система залишається лінійною.

Слідкуючим називають електропривод, за допомогою якого виконавчий орган робочої машини з певною точністю відтворює рух, заданий керуючим пристроєм, положення якого змінюється за наперед невідомим законом.

Слідкуючий електропривод містить розглянуту триконтурну систему регулювання, що забезпечує відтворення з певною точністю положення задаючого органу, яке змінюється за довільним законом. В даній системі регулювання для усунення статичної похибки регулювання застосовують ПІ-регулятори швидкості.

5.6. Автоматичне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною напруги живлення з від'ємним зворотним зв'язком по швидкості

Замкнена система регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів дає можливість одержати якісно нові характеристики електропривода. Якщо в розімкненій системі робота двигуна при ковзанні більше критичного є статично нестійкою, то в замкненій системі при згаданому ковзанні робота двигуна може бути стійкою. Як видно з рис. 5.11, б) перевантажувальна здатність двигуна в замкненій системі лишається високою, жорсткість характеристик стала, плавність регулювання висока, діапазон регулювання має значення до 10. Схема системи регулювання кутової швидкості проста. Але разом з цим у неї є суттєвий недолік. При низьких частотах обертання двигуна зростають значення ковзання і, як наслідок, великі втрати потужності. В тривалому режимі роботи двигун буде перегріватись. Якщо при цьому використовується двигун з фазним ротором і в роторне коло увімкнений додатковий резистор, то втрати енергії винесені за межі двигуна. Отже, він не буде перегріватися.

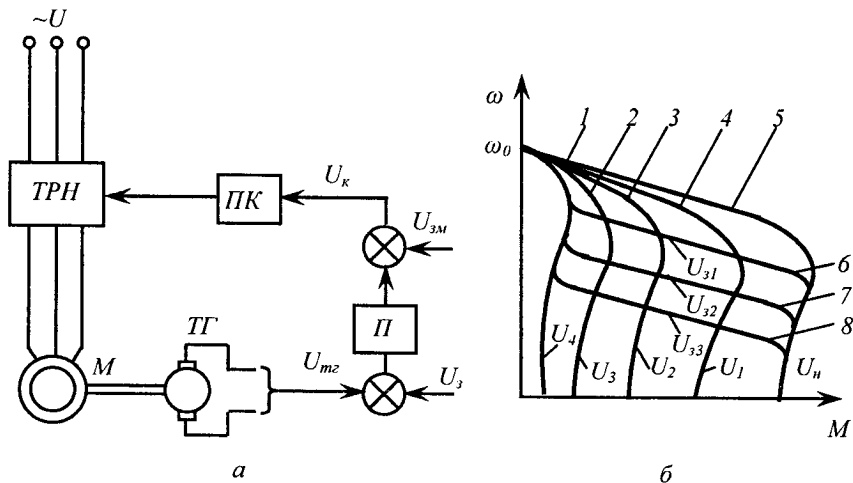


Рис. 5.11. Регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною напруги на статорі в замкненій системі:
 а — схема регулювання; б — механічні характеристики: 1 — 5 — в розімкненій системі $U_n > U_1 > U_2 > U_3 > U_4$; 6 — 8 — в замкненій системі $U_{31} > U_{32} > U_{33}$; П — підсилювач; ПК — пристрій керування

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором в замкнених системах регулювання кутової швидкості зміною напруги на статорній обмотці використовують в установках, де низькі швидкості відпрацьовуються короткочасно перед зупинкою механізму. В тривалому режимі даний спосіб регулювання не використовується внаслідок перегрівання двигуна при великих значеннях ковзання.

Тиристорні регулятори напруги можуть мати реверсивне виконання, а також здійснювати динамічне гальмування.

Напруга на виході тиристорного перетворювача напруги несинусоїдальна, залежить від кута регулювання α та від кута активно-індуктивного навантаження φ , яким для тиристорного перетворювача напруги є асинхронний двигун при певних ковзаннях. Електромагнітний момент двигуна визначається першою гармонікою напруги, а впливом вищих гармонік можна знехтувати.

Статичні характеристики тиристорного перетворювача напруги (рис. 5.12) є нелінійними та неоднозначними у зв'язку із суттєвою залежністю напруги від кута навантаження. При $s_k < s < 1$ зміни кута φ є несуттєвими і знаходяться у межах 40–60°. Для цієї області статичну характеристику перетворювача можна лінеаризувати:

$$U_n = k_n U_{\text{вх}} = k_n (U_3 - k_{\text{зи}} \omega), \quad (5.27)$$

де k_n — коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача напруги, $k_{\text{зи}}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості.

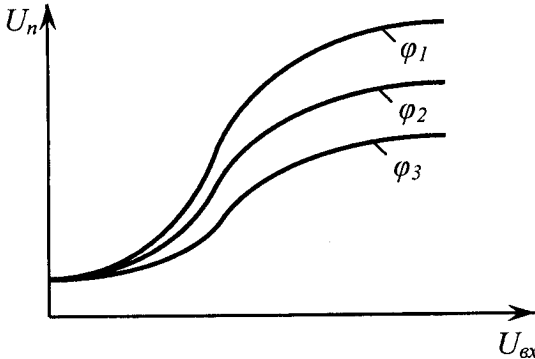


Рис. 5.12. Статичні характеристики тиристорного перетворювача напруги

Момент асинхронного електродвигуна пропорційний квадрату напруги. Але для режимів малих відхилень від точки статичної рівноваги дану залежність можна лінеаризувати:

$$M = k_M U. \quad (5.28)$$

Підставивши (5.28) у (5.27), отримаємо рівняння механічної характеристики електродвигуна:

$$\omega = \frac{U_3}{k_{\text{зи}}} - \frac{M}{k_M k_n k_{\text{зи}}} = \omega_{03} - \frac{M}{\beta_3}. \quad (5.29)$$

Таким чином, при прийнятих допущеннях у замкненій системі формується лінійна механічна характеристика зі швидкістю ідеального холостого ходу і жорсткістю, які визначаються коефіцієнтом зворотного зв'язку по швидкості $k_{\text{зи}}$. При досить великих значеннях $k_{\text{зи}}$ рівняння (5.29) задовільно описує реальну механічну характеристику. Як показано на рис. 5.11, б) відмінності виявляються лише у режимі, близькому до холостого ходу, і при значеннях напруги, близьких до номінальної.

5.7. Автоматичне частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів

Частотно-регульовані приводи мають високі показники: діапазон регулювання, плавність, коефіцієнт жорсткості механічних характеристик. Робота на штучних механічних характеристиках відбувається при ковзаннях, близьких до номінальних. Отже, втрати ковзання в роторі не перевищують номінальних.

У замкненій системі регулювання частотний привод автоматично підтримує перевантажувальну здатність та частоту обертання в заданих межах.

Структурна схема замкненої системи автоматичного частотного регулювання зображена на рис. 5.13. В схемі використовується перетворювач частоти з автономним інвертором струму АІС, що дає можливість без доповнення схеми переводити двигун M в режим рекуперативного гальмування. Схема має від'ємний зворотний зв'язок по кутовій швидкості (сигнал U_ω) та від'ємний зворотний зв'язок по струму (сигнал U_i), що формується датчиком струму ДС. Керований випрямляч КВ та автономний інвертор струму АІС мають відповідні системи керування СКВ та СКІ.

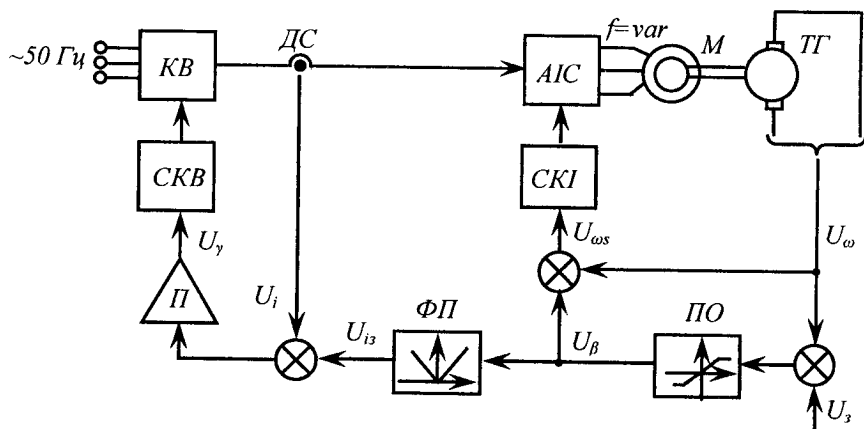


Рис. 5.13. Спрощена схема замкненої системи частотного регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна

Частота струму регулюється задаючим сигналом U_z . Різниця сигналів U_z і U_ω дає сигнал абсолютного ковзання U_β , який, пройшов-

ши через пристрій обмеження $ПО$, додається до сигналу U_ω і в результаті формується сигнал $U_{\omega s}$ на вході $СКИ$. Крім того, сигнал U_β після функціонального перетворювача $\PhiП$ створює задаючий сигнал по струму U_{i3} . Останній разом з сигналом зворотного зв'язку по струму U_i надходить через підсилювач $П$ на вхід системи керування вентилями у вигляді сигналу U_γ .

Пристрій обмеження $ПО$ формує вихідний сигнал U_β , лінійний при певних значеннях задаючого сигналу і сигналу зворотного зв'язку. При різкому зростанні U_3 або перевантаженнях двигуна $ПО$ обмежує сигнал U_β , а значить і U_{i3} . У цьому режимі обмежується момент і характеристика двигуна стає абсолютно м'якою.

При частотному регулюванні швидкості необхідно змінювати напругу для забезпечення незмінною перевантажувальну здатність двигуна та формування рівномірно прискореного протікання перехідних процесів. Тому система регулювання повинна містити контур регулювання моменту.

В даному випадку система регулювання містить регулятор швидкості та від'ємний зворотний зв'язок по швидкості. Структурно-алгоритмічна схема представлена на рис. 5.14. В ній у передаточній функції пропорційного регулятора врахована мала стала часу фільтру T_ϕ , а передаточна функція лінеаризованого асинхронного двигуна отримана із рівняння:

$$(1 + T_e p)M = k_M U, \quad (5.30)$$

де $T_e = \frac{1}{2\pi f s_k}$ — електромагнітна стала часу асинхронного двигуна.

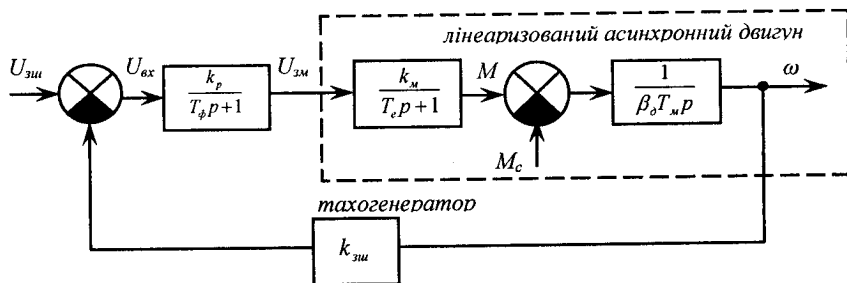


Рис. 5.14. Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання швидкості асинхронного двигуна при частотному регулюванні

За допомогою структурно-алгоритмічної схеми системи автоматичного регулювання швидкості (рис. 5.14) можна записати:

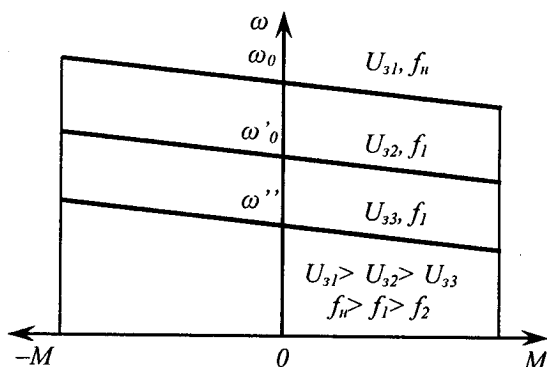
$$(1 + T_\phi p)(1 + T_e p)M = k_p k_m (U_3 - k_{зи} \omega), \quad (5.31)$$

звідки при $p = 0$ отримаємо рівняння статичної механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U_3}{k_{зи}} - \frac{M}{k_m k_p k_{зи}} = \omega_{03} - \frac{M}{\beta_3}. \quad (5.32)$$

Таким чином, при прийнятих допущеннях у замкненій системі частотного регулювання швидкості формується лінійна механічна характеристика зі швидкістю ідеального холостого ходу і жорсткістю, які визначаються коефіцієнтом зворотного зв'язку по швидкості $k_{зи}$.

Орієнтовні механічні характеристики при частотному регулюванні кутової швидкості зображені на рис. 5.15. Діапазон регулювання становить близько 30 : 1.



5.15. Механічні характеристики асинхронного двигуна в замкненій системі при частотному регулюванні

5.8. Питання для самоконтролю

1. Які зворотні зв'язки застосовують у системі автоматичного регулювання швидкості ДПС НЗ?

2. Як впливає введення від'ємного зворотного зв'язку по швидкості на жорсткість механічної характеристики та швидкість ідеального холостого ходу ДПС НЗ?
3. Як впливає введення додатного зворотного зв'язку по моменту на жорсткість механічної характеристики ДПС НЗ?
4. Як у замкненій системі регулювання швидкості ДПС НЗ можна сформулювати абсолютну жорстку механічну характеристику?
5. Які зворотні зв'язки застосовують у системі автоматичного регулювання моменту ДПС НЗ?
6. Як впливає введення від'ємного зворотного зв'язку по моменту на жорсткість механічної характеристики ДПС НЗ?
7. Як у замкненій системі регулювання моменту ДПС НЗ можна сформулювати абсолютну м'яку механічну характеристику?
8. Які зворотні зв'язки застосовують у системі автоматичного регулювання положення ДПС НЗ?
9. Яка механічна характеристика формується у системі автоматичного регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною напруги на статорі? Від чого залежить її жорсткість?
10. Яка механічна характеристика формується у системі автоматичного регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною частоти струму? Від чого залежить її жорсткість?



6. ЕНЕРГЕТИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

6.1. Основні енергетичні показники роботи електропривода

До основних енергетичних показників роботи ЕП належать втрати потужності та енергії, коефіцієнт корисної дії (ККД) η і коефіцієнт потужності $\cos\phi$. В ЕП із перетворювачами на основі напівпровідникових приладів (наприклад, вентильний регульований ЕП) суттєвим показником є коефіцієнт спотворення K_c , який характеризує ступінь відхилення струму і напруги від синусоїдної форми і дорівнює відношенню діючого значення першої гармоніки струму до діючого значення несинусоїдного струму, тобто $K_c = \frac{I_1}{I}$.

Енергетичні показники ЕП суттєво залежать від режиму його роботи, характеру зміни моменту навантаження і способів регулювання координат. Звичайно енергетичні показники нерегульованого і регульованого ЕП визначають окремо при їх роботі в усталеному і перехідному режимах.

Потужність P_p , споживана електроприводом з мережі, витрачається на: реалізацію руху ВОРМ $P_m = M_m \cdot \omega_m$; зміну запасу кінетичної і потенціальної енергії в механічній частині ЕП; зміну запасу ЕЕ в ємностях та індуктивностях електричної частини; розсіювання у вигляді теплоти. В теплоту перетворюються втрати: в обмотках електричного й електромеханічного перетворювачів і керуючих пристроїв; пов'язані з перемагнічуванням сталі; в ємностях; на тертя у механічній частині.

Економічність роботи ЕП в будь-якому режимі характеризується відношенням виконаної механічної роботи до кількості електроенергії, спожитої з мережі:

$$\eta_y = \frac{A_{\text{мех}}}{A_{\text{ел}}} = \frac{\int_0^{T_y} M_{\text{м}}(t) \omega_{\text{м}}(t) dt}{\int_0^{T_y} P dt}, \quad (6.1)$$

де η_y — цикловий ККД ЕП; T_y — тривалість робочого циклу; $\Delta A_{\text{мех}}$, $\Delta A_{\text{ел}}$ — корисна механічна робота і споживана з мережі електрична енергія; P_1 — потужність, споживана ЕП з мережі.

Приймаючи для окремих відрізків часу потужність сталою, замість формули (6.1) одержимо:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (6.2)$$

При відомих значеннях ККД перетворювача ЕЕ $\eta_{\text{н.ел}}$, двигуна $\eta_{\text{дв}}$ і механічних передач $\eta_{\text{мех}}$, вираз (6.2) буде мати такий вигляд:

$$\eta = \eta_{\text{н.ел}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{мех}}. \quad (6.3)$$

В ЕП змінного струму з'являється реактивна складова струму, яка не приймає безпосередньої участі у створенні активної потужності, але сприяє нагріванню ЕД. Так, якщо втрати під час передачі потужності постійним струмом $\Delta P_{\text{н.с.}}$, то при передачі тієї самої потужності змінним струмом, враховуючи $\cos \varphi$ ЕД, втрати її будуть:

$$\Delta P_{\text{з.с}} = \frac{\Delta P_{\text{н.с.}}}{\cos^2 \varphi}. \quad (6.4)$$

Економічність споживання активної потужності приводів із тиристорними перетворювачами характеризується коефіцієнтом потужності

$$K_n = K_c \cos \varphi_1, \quad (6.5)$$

де φ_1 — кут зсуву першої гармоніки струму.

6.2. Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в нерегульованому електроприводі при роботі в усталеному режимі

Потужність втрат у нерегульованому ЕП складається з потужності втрат у двигуні і механічній частині. Втрати потужності в механічній передачі $\Delta P_{\text{мех}}$ зумовлені в основному тертям у рухомих частинах. Ці втрати оцінюються величиною ККД, значення якого для різних видів передач і при різних навантаженнях є в довідковій літературі.

Втрати потужності у двигуні є сумою постійних ΔP_c і змінних ΔP_v втрат:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_v. \quad (6.6)$$

Під постійними втратами потужності розуміють втрати потужності, що не залежать від струму двигуна. До них належать: втрати в сталі магнітопровода, на тертя в підшипниках, вентиляційні, в провідниках обмоток збудження ДПС та синхронних двигунів.

Під змінними втратами розуміють такі, які виникають у провідниках обмоток двигуна під час протікання по них струму навантаження.

Змінні втрати потужності у двигунах постійного струму можна подати у вигляді:

$$\Delta P_v = I^2 R_{\text{ов}} = I_{\text{ном}}^2 R_{\text{ов}} \left(\frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2 = \Delta P_{v, \text{ном}} \left(\frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2 = \Delta P_{v, \text{ном}} K_z^2, \quad (6.7)$$

де K_z — коефіцієнт завантаження двигуна; $\Delta P_{v, \text{ном}} = I_{\text{ном}}^2 \cdot R_{\text{ов}}$ — втрати потужності в колі якоря при номінальному навантаженні; I_n — номінальний струм двигуна; $R_{\text{ов}}$ — внутрішній опір кола якоря.

Змінні втрати в трифазних асинхронних двигунах:

$$\Delta P_v = 3I_1'^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = 3I_{2\text{ном}}'^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\sigma_{2\text{ном}}^2} \right) \left(\frac{I_2'}{I_{2\text{ном}}'} \right) = \Delta P_{v, \text{ном}} K_z^2, \quad (6.8)$$

де $\Delta P_{v, \text{ном}} = 3I_{2\text{ном}}'^2 \left(R_2' + \frac{R_1}{\sigma^2} \right)$ — номінальні змінні втрати потужності;

$\sigma_{\text{ном}} = \frac{I_{2\text{ном}}'}{I_{1\text{ном}}} \approx 0,85 \dots 0,95$, $\sigma = \frac{I_2'}{I_1}$ — відповідно номінальна і поточна

кратності зведеного струму ротора і статора. Орієнтовні значення σ залежно від ковзання знаходять за кривими рис. 6.1.

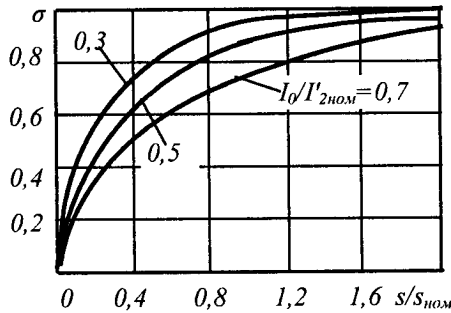


Рис. 6.1. Залежність відношення зведеного струму ротора і статора АД від ковзання при різних кратностях струму холостого ходу

Змінні втрати потужності у синхронних двигунах складають:

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 = 3I_{1\text{ном}}^2 R_1 \left(\frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} \right)^2 = \Delta P_{v\text{ном}} \left(\frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} \right)^2 = \Delta P_{v\text{ном}} K_3^2. \quad (6.9)$$

Таким чином, змінні втрати потужності у двигунах різних типів, як це видно із рівнянь (6.7, 6.8, 6.9), визначають за однаковим виразом:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v\text{ном}} K_3^2. \quad (6.10)$$

Повні втрати потужності в двигуні:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{v\text{ном}} K_3^2 = \Delta P_{v\text{ном}} \left(\frac{\Delta P_c}{\Delta P_{v\text{ном}}} + K_3^2 \right) = \Delta P_{v\text{ном}} (\alpha + K_3^2), \quad (6.11)$$

де $\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{v\text{ном}}}$ — коефіцієнт втрат. Величина α залежить від номінальної потужності та кутової швидкості і для ДПС НЗ знаходиться в межах 1...1,5; для АД з КЗР $\alpha = 0,5...0,9$.

Втрати потужності під час роботи двигуна в номінальному режимі, коли $K_3 = 1$, знаходять за паспортними даними двигуна:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}. \quad (6.12)$$

Втрати потужності при холостому ході:

$$\Delta P_o = \Delta P_{ном} \frac{\alpha}{(\alpha + 1)} = \frac{P_{ном} \alpha (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном} (\alpha + 1)}. \quad (6.13)$$

Постійні втрати потужності:

$$\Delta P_c = \Delta P_{v,ном}. \quad (6.14)$$

Повні втрати потужності при i -му навантаженні двигуна:

$$\Delta P_i = P_i \cdot \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}, \quad (6.15)$$

де η_i — ККД електродвигуна при навантаженні P_i .

Враховуючи, що під час роботи на природній характеристиці $K_3 = \frac{I}{I_n} \approx \frac{P}{P_n}$, то з урахуванням (6.11) ККД двигуна знайдеться:

$$\eta_{ог} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{ог}} = \frac{K_3}{K_3 + \frac{\Delta P_{v,ном}}{P_{ном}} (\alpha + K_3^2)}. \quad (6.16)$$

У номінальному режимі $K_3 = 1$ і вираз (6.16) буде:

$$\eta_{ном} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{v,ном}}{P_{ном}} (\alpha + 1)}. \quad (6.17)$$

Якщо за допомогою виразу (6.6) виключити з рівняння (6.17) $P_{ном}$, то одержимо ККД у загальній формі, де параметрами будуть α і $\eta_{ном}$:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}} \cdot \frac{\frac{\alpha}{K_3} + K_3}{\alpha + 1}}. \quad (6.18)$$

Залежність ККД від коефіцієнта завантаження має максимум при:

$$K_{3,опт} = \sqrt{\alpha}. \quad (6.19)$$

Максимальне значення ККД двигуна:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{\text{в.ном}}}{\sqrt{\alpha} P_{\text{ном}}}}. \quad (6.20)$$

Наприклад, якщо $\alpha = 1$, то ККД буде максимальним при $K_s = 1$, що відповідає повному навантаженню. Якщо $\alpha = 0,5$, то $K_s = \sqrt{0,5} = 0,71$, і відповідно крива ККД буде мати максимум при навантаженні двигуна, що дорівнює 71% від номінального. З аналізу виразу (6.19) витікає, що максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому змінні і постійні втрати однакові. В довідниках та каталогах на АД наводять залежності $\eta = f(K_s)$ і $\cos \varphi = \psi(K_s)$. (рис. 6.2).

Для електродвигунів змінного струму $\cos \varphi$ є важливим енергетичним показником, який залежить від навантаження на валу двигуна і показує, яка частина повної електричної потужності, що надходить з мережі, перетворюється на активну потужність. Характер зміни цієї залежності показано на рис. 6.2, б). При відсутності навантаження ($P_m = 0$) двигун споживає незначну активну потужність, яка практично дорівнює постійним втратам, і значну реактивну потужність, яка витрачається в основному на створення магнітного поля двигуна. В цьому випадку $\cos \varphi$ має невелике значення.

Якщо навантаження збільшується, споживання реактивної потужності змінюється мало і тоді підвищується $\cos \varphi$. Подальше збільшення навантаження призводить до росту споживання реактивної потужності за рахунок потоків розсіювання, що призводить до зменшення $\cos \varphi$.

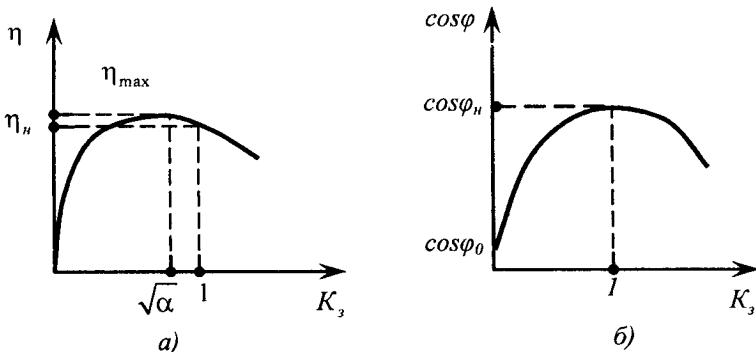


Рис. 6.2. Залежності ККД (а) і $\cos \varphi$ (б) від кратності навантаження двигуна

З викладеного видно, що для кращого використання ЕЕ, зведення до мінімуму її втрат, досягнення максимального значення ККД двигуна в усталених режимах ЕП, кутова швидкість яких не регулюється, необхідно забезпечити номінальне завантаження та обмежити тривалість холостого ходу двигуна.

При наявності малозавантажених двигунів доцільно провести їх заміну на двигуни менших габаритів, потужність яких відповідає реальній потужності навантаження.

Розрахунки показують, що коли середнє навантаження двигуна складає менше 45% його номінальної потужності, то заміна цього двигуна менш потужним завжди доцільна. При завантаженні двигунів більше 70% номінальної потужності їх заміна взагалі недоцільна. Коли двигуни завантажені в межах 45...70% доцільність їх заміни повинна бути визначена додатковими розрахунками.

Для поліпшення енергетичних показників ЕП змінного струму шляхом підвищення їх коефіцієнта потужності можуть бути здійснені наступні заходи: заміна малозавантажених електродвигунів двигунами меншої потужності; обмеження холостого ходу АД шляхом автоматизації процесу завантаження РМ; заміна асинхронних двигунів синхронними, коли це економічно виправдано; використання СД або компенсуючих конденсаторів.

6.3. Втрати потужності в регульованому електроприводі при роботі в усталеному режимі

Визначення енергетичних показників роботи регульованих електроприводів є більш складною задачею, ніж нерегульованих. Факторами, які ускладнюють рішення цієї задачі, є:

1) зміна швидкості двигуна, яка призводить в загальному випадку до зміни постійних втрат потужності ΔP_c в двигуні. Особливо суттєво змінюються постійні втрати при регулюванні струму збудження ДПС НЗ і СД;

2) наявність силового перетворювача в ЕП вимагає додаткових розрахунків з визначення втрат потужності і енергії в перетворювачах;

3) спотворення синусоїдної форми кривих струму і напруги мережі змінного струму регульованим ЕП постійного струму вимагає визначення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ і коефіцієнта спотворення K_c ;

4) різноманітність способів регулювання двигунів, кожен з яких характеризується своїми енергетичними показниками.

Способи регулювання швидкості двигунів поділяються на економічні, яким відповідають незначні втрати, і неекономічні, пов'язані з суттєвими втратами потужності і енергії. До економічних способів належать, наприклад, частотне регулювання швидкості АД, регулювання швидкості АД в каскадних схемах, у яких частина втрат енергії повертається до мережі або після відповідного перетворення передається на вал двигуна; регулювання кутової швидкості ДПС НЗ за допомогою керованих перетворювачів. Найекономічнішими є системи, які забезпечують споживання з мережі стільки потужності, скільки її потрібно для приводу ВОРМ та на покриття втрат у двигуні і механізмі при тій чи іншій швидкості. Такі можливі системи з перетворювачами.

До неекономічних способів належить регулювання введенням опору в коло якоря або ротора. В цьому випадку чим більший діапазон регулювання, тим більша частина споживаної з мережі потужності розсіюється на резисторах у вигляді теплоти. Некономічним є також регулювання швидкості АД при несиметричній напрузі живлення.

Регульований електропривод з ДПС НЗ. Постійні втрати потужності ДПС НЗ складаються із втрат в колі збудження ΔP_z , механічних ΔP_m і втрат у сталі $\Delta P_{ст}$. Дві останні складові можуть бути визначені за наближеною формулою:

$$\Delta P_m + \Delta P_{ст} \approx (\Delta P_m + \Delta P_{ст})_{ном} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (6.21)$$

де $(\Delta P_m + \Delta P_{ст})_{ном}$ — втрати механічні і в сталі при номінальній кутовій швидкості.

Змінні втрати в якірному колі ДПС:

$$\Delta P_v = I^2 R_{\partial\partial} = M(\omega_{0p} - \omega), \quad (6.22)$$

де ω_{0p} — швидкість ідеального холостого ходу двигуна при його роботі на штучній (регульовальній) характеристиці; $R_{\partial\partial}$, I_a — відповідно опір і струм якірного кола; M — електромагнітний момент двигуна при кутовій швидкості ω .

При регулюванні швидкості ДПС НЗ реостатним способом $\omega_{o.p} = \omega_{o.ном}$, тому змінні втрати потужності зростають пропорційно відносному перепаду швидкості $\delta = \frac{\omega_{o.ном} - \omega}{\omega_{o.ном}}$:

$$\Delta P_v = M \omega_{o.ном} \delta. \quad (6.23)$$

а повні втрати в якірному колі двигуна визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\delta\phi} = \Delta P_z + (\Delta P_m + \Delta P_{ст})_{ном} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + M(\omega_{o.p} - \omega), \quad (6.24)$$

де ΔP_z — втрати потужності в колі збудження.

Постійні втрати при зниженні швидкості зменшуються. Зміна сумарних втрат при цьому визначається співвідношенням постійних і змінних втрат для реального навантаження і конкретного двигуна.

При регулюванні швидкості ослабленням поля збудження двигуна при $P_m = const$ втрати в колі збудження ΔP_z зменшуються внаслідок зменшення струму збудження. Разом з тим, у результаті збільшення швидкості зростають механічні втрати ΔP_m . Тому постійні втрати можна вважати незмінними, якщо $\Delta P_z \approx \Delta P_m$. Крім того, коли $P_m = const$, $I_a = I_{a.ном} = const$, то й змінні втрати залишаються незмінними при різних швидкостях. Отже,

$$\Delta P = \Delta P_{c.ном} + \Delta P_{v.ном} \approx const, \quad (6.25)$$

тобто при регулюванні з постійною потужністю втрати в двигуні незмінні.

При регулюванні швидкості ДПС НЗ зміною напруги на якорі за допомогою керованого перетворювача необхідно визначати втрати потужності в двигуні і перетворювачі, а також коефіцієнти потужності і спотворення.

Постійні втрати ΔP_c в статичному напівпровідниковому перетворювачі визначаються головним чином втратами в сталі силового трансформатора і реакторів. Ці втрати залишаються практично незмінними у всіх режимах роботи ЕП і дорівнюють номінальним:

$$\Delta P_{c.n} = \Delta P_{c.n.ном} = const, \quad (6.26)$$

Змінні втрати потужності в перетворювачі $\Delta P_{v.n}$ визначаються втратами в міді обмоток силового трансформатора і реактора ΔP_p та вентиліях $\Delta P_{вент}$:

$$\Delta P_{v.n} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 + 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 + \Delta P_p + \Delta P_{вент}, \quad (6.27)$$

де I_1, I_2 — первинний і вторинний струми трансформатора; R_1 і R_2 — активний опір первинної і вторинної обмоток трансформатора.

Вираз (6.27) після деяких перетворень можна записати у вигляді

$$\Delta P_{v.n} \approx (\Delta P_{к.з} + \Delta P_{p.ном}) \left(\frac{I}{I_{ном}} \right)^2 + \Delta P_{вент.ном} \frac{I}{I_{ном}}, \quad (6.28)$$

де $\Delta P_{к.з}$ — втрати короткого замикання в трансформаторі; $\Delta P_{p.ном}$, $\Delta P_{вент.ном}$ — втрати при номінальному струмі в реакторі і вентиліях.

При регулюванні кутової швидкості ДПС зміною напруги при сталому моменті навантаження $M_c = M_{ном}$ струм якоря залишається незмінним і дорівнює номінальному, разом з цим є незмінними та дорівнюють номінальним і змінні втрати, тобто $\Delta P_v = \Delta P_{v.ном}$. Постійні втрати потужності при даному способі регулювання визначаються за формулою (6.21).

Якщо регулювання швидкості ДПС здійснюється при умові рівності часу його роботи на кожній швидкості в діапазоні D , а також при однаковій різниці швидкостей на сусідніх регульовальних характеристиках, то ККД такого регулюючого циклу $\eta_{p.ц}$ може бути визначений за формулою:

$$\eta_{p.ц} = \frac{\eta_{ном}(D+1)}{2D}. \quad (6.29)$$

Регульований електропривод з асинхронним електродвигуном. До постійних втрат в АД відносяться механічні втрати ΔP_m , втрати в сталі статора ΔP_{cm1} і в сталі ротора ΔP_{cm2} та втрати в міді обмотки статора від струму намагнічування I_μ :

$$\Delta P_c = \Delta P_m + \Delta P_{cm1} + \Delta P_{cm2} + 3I_\mu^2 R_1. \quad (6.30)$$

Механічні втрати визначаються за наближеною формулою

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{м.ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2, \quad (6.31)$$

де $\Delta P_{\text{м.ном}}$ — механічні втрати при номінальній швидкості.

Втрати в сталі від вихрових струмів і гістерезису пропорційні квадрату амплітуди індукції B_{max} та частоті в степені 1,3. Вважаючи, що при регулюванні швидкості справедлива рівність

$$\frac{B_{\text{max}}}{B_{\text{max.ном}}} = \frac{E_1}{E_{1\text{ном}}} \approx \frac{U}{U_{\text{ном}}}, \quad (6.32)$$

а об'єми сталі ротора і сталі статора однакові, отримаємо загальний вираз для сумарних втрат у сталі АД з урахуванням зміни напруги U , частоти f_1 і ковзання s :

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ст}} &= \Delta P_{\text{ст1}} + \Delta P_{\text{ст2}} \approx \Delta P_{\text{ст1ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \right)^{1,3} + \\ &+ \Delta P_{\text{ст1ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \left(\frac{f_1 s}{f_{1\text{ном}}} \right)^{1,3} = \Delta P_{\text{ст1ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \right)^{1,3} (1 + s^{1,3}). \end{aligned} \quad (6.33)$$

де $\Delta P_{\text{ст1ном}}$ — втрати в сталі статора при номінальних значеннях частоти і напруги живлення.

При реостатному регулюванні швидкості АД з фазним ротором ($U = U_{\text{ном}}$, $f_1 = f_{1\text{ном}}$) вираз (6.33) має вигляд:

$$\Delta P_{\text{ст}} \approx \Delta P_{\text{ст1ном}} (1 + s^{1,3}). \quad (6.34)$$

Якщо допустити, що при зменшенні швидкості зростають ковзання і втрати в сталі, що компенсується зменшенням механічних втрат, то постійні втрати можна вважати незмінними і рівними номінальним втратам:

$$\Delta P_{\text{с}} = \Delta P_{\text{м.ном}} + \Delta P_{\text{ст1.ном}} + 3I_{\mu}^2 R_1 \approx \text{const.} \quad (6.35)$$

Змінні втрати потужності при реостатному регулюванні швидкості АД визначаються виразом (6.8), який, якщо його записати через механічні величини, має вигляд:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v2} + \Delta P_{v1} = M\omega_0 \left(s + s_{ном} \frac{R_1}{R_2} \right), \quad (6.36)$$

де R_2' — опір кола ротора, зведений до обмотки статора; ΔP_{v2} , ΔP_{v1} — змінні втрати потужності в колах ротора і статора; ω_0 — синхронна кутова швидкість АД; M — момент АД при поточному ковзанні s ; $s_{ном}$ — номінальне ковзання АД.

При вентиляторному характері навантаження момент залежить від швидкості

$$M_c = M_{ном} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (6.37)$$

а втрати потужності в колі ротора АД визначаються такою залежністю від швидкості:

$$\Delta P_{v2} = M_{ном} \left(\frac{\omega_0}{\omega_{ном}} \right)^2 (\omega_0 - \omega). \quad (6.38)$$

Залежність (6.38) має екстремум при $\omega_{max} = \frac{2\omega_0}{3}$. Величина втрат за цієї швидкості має максимальне значення:

$$\Delta P_{v2\max} = \frac{4}{27} M_{ном} \omega_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega_{ном}} \right)^2. \quad (6.39)$$

При частотному способі регулювання швидкості АД робоче ковзання двигуна залишається невеликим у всьому діапазоні регулювання. Тому втратами в сталі ротора при малих частотах струму можна знехтувати і вираз (6.33) при регулюванні за законом $\frac{U}{f_1} = const$ матиме вигляд:

$$\Delta P_{ст} \approx \Delta P_{ст1ном} \left(\frac{U}{f_1} \right)^2 \frac{f_1^{3,3}}{U_{ном}^2} f_{1ном}^{1,3} = \Delta P_{ст1ном} \left(\frac{f_1}{f_{1ном}} \right)^{3,3}. \quad (6.40)$$

Якщо регулювання швидкості частотним способом здійснюється при $M = M_{ном}$, то перепад швидкості $\Delta\omega = \omega_0 s \approx \omega_0 s_{ном}$ і змінні втрати, визначені виразом (6.36), залишаються незмінними

$$\Delta P = \Delta P_{ном} = M_{ном} \cdot \omega_0 s_{ном} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = const. \quad (6.41)$$

6.4. Втрати енергії в нерегульованому електроприводі в перехідних режимах роботи і способи їх зниження

6.4.1. Визначення енергетичних показників роботи електропривода в перехідних режимах

Визначення енергетичних показників роботи ЕП в перехідних режимах є не менш важливою задачею, ніж для усталеного режиму роботи. Визначається це у першу чергу тим, що у перехідних режимах струми в обмотках двигуна значно перевищують номінальні значення і спричиняють підвищення втрат енергії, чим суттєво впливають на нагрівання двигуна. Особливо важливе значення має визначення втрат електроенергії в перехідних режимах для ЕП, у яких динамічний режим є основним і вони практично не виходять із перехідних режимів. До таких приводів належать, наприклад, ЕП підйомних кранів, прокатних станів, стругальних верстатів тощо. У загальному випадку втрати енергії за час перехідного процесу можуть бути визначені так:

$$\Delta A = \int_0^t \Delta P dt = \int_0^t (\Delta P_c + \Delta P_v) dt = \int_0^t \Delta P_c dt + \int_0^t \Delta P_v dt = \Delta A_c + \Delta A_v, \quad (6.42)$$

де ΔA_c і ΔA_v — втрати енергії відповідно постійні і змінні.

Величина ΔA_c легко визначається при незмінному значенні постійних втрат потужності ΔP_c за час перехідного процесу $t_{n,n}$:

$$\Delta A_c = \int_0^t \Delta P_c dt = \Delta P_c t_{n,n}. \quad (6.43)$$

Складову втрат ΔA_v можна визначити, використавши формули (6.7) — (6.9), в яких змінні втрати потужності виражені через електричні величини — струм і опір:

$$\Delta A_v = \int_0^{t_{n,n}} I^2(t) R dt = \int_0^t \Delta P_v dt. \quad (6.44)$$

При визначенні складових ΔA_v за виразом (6.44) виникають труднощі, пов'язані з тим, що необхідно знати закони зміни струму і опору двигуна в перехідному процесі. Оскільки вказані залежності не мають аналітичного виразу, то точне визначення інтегралу (6.44)

неможливе. Більш зручним є визначення ΔA_v у випадку, коли змінні втрати потужності ΔP_v виражені через механічні величини.

6.4.2. Втрати енергії в двигунах постійного та змінного струму при роботі без навантаження ($M_c = 0$)

Втрати потужності в колі якоря (ротора) можна записати для:

ДПС НЗ:
$$\Delta P_{v2} = M \omega_0 - M \omega = M \omega_0 \delta, \quad (6.45)$$

де $\delta = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ — відносний статичний перепад швидкості;

АД:
$$\Delta P_{v2} = M \omega_0 - M \omega = M \omega_0 s. \quad (6.46)$$

Втрати ЕЕ за час перехідного процесу відповідно з (6.44) визначаються для:

ДПС НЗ:
$$\Delta A_{20} = \int_0^t \Delta P_{v2} dt = \int_0^{t_{n,n}} M \omega_0 \delta dt = \int_0^t (M \omega_0 - M \omega) dt. \quad (6.47)$$

АД:
$$\Delta A_{20} = \int_0^t \Delta P_{v2} dt = \int_0^{t_{n,n}} M \omega_0 s dt = \int_0^t (M \omega_0 - M \omega) dt. \quad (6.48)$$

Виключимо з виразу (6.47) і (48) час як змінну величину, скориставшись основним рівнянням руху $M = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$, звідки для:

ДПС НЗ:
$$dt = J \frac{d\omega}{M} = -J \omega_0 \frac{d\delta}{M}. \quad (6.49)$$

АД:
$$dt = J \frac{d\omega}{M} = -J \omega_0 \frac{ds}{M}. \quad (6.50)$$

Тоді для

ДПС НЗ:
$$\Delta A_{20} = \int_{\delta_{\text{поч}}}^{\delta_{\text{кін}}} -J \omega_0^2 \delta d\delta = J \frac{\omega_0^2}{2} (\delta_{\text{поч}}^2 - \delta_{\text{кін}}^2). \quad (6.51)$$

АД:
$$\Delta A_{20} = \int_{s_{\text{поч}}}^{\delta_{\text{кін}}} -J \omega_0^2 s ds = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2). \quad (6.52)$$

При розв'язку рівнянь (6.51) і (6.52) слід враховувати, що в момент часу $t = 0$ $\delta = \delta_{\text{поч}}$ і $s = s_{\text{поч}}$, а в кінці перехідного процесу при $t = t_{\text{н.п}}$ $\delta = \delta_{\text{кін}}$ і $s = s_{\text{кін}}$.

За рівняннями (6.51) і (6.52) можна знайти втрати енергії при відомих моменті інерції J , швидкості ідеального холостого ходу (синхронній швидкості) ω_0 , та межах регулювання $\delta_{\text{поч}}$, $\delta_{\text{кін}}$, $s_{\text{поч}}$, $s_{\text{кін}}$. При користуванні ним не потребуються залежності зміни координат ЕП в функції часу. З виразів (6.51) і (6.52) видно, що втрати енергії в якорі (роторі) при перехідних процесах без навантаження не залежать від форми механічної характеристики і тривалості перехідного процесу. Втрати визначаються тільки запасом кінетичної енергії при кутові швидкості ω_0 і границями зміни $\delta(s)$. Отже, втрати під час розгону двигуна при прямому вмиканні або при реостатному розгоні будуть однаковими.

При пуску двигуна без навантаження і при $\omega_{\text{поч}} = 0$, $\omega_{\text{кін}} \approx \omega_0$, $\delta(s)_{\text{поч}} = 1$, $\delta(s)_{\text{кін}} \approx 0$ втрати енергії будуть:

$$\Delta A_{20\text{н}} = J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (6.53)$$

Отже, чисельно втрати енергії дорівнюють запасу кінетичної енергії у механічній частині ЕП в кінці пуску.

При динамічному гальмуванні вся кінетична енергія системи, що гальмується, перетворюється в теплоту в якорному (роторному) колі двигуна. Для цього режиму $\delta(s) = \frac{\omega}{\omega_0}$, і тоді $\delta(s)_{\text{поч}} = 1$, $\delta(s)_{\text{кін}} = 0$, а втрати з (6.51) або (6.52) визначаються:

$$\Delta A_{20\text{д.г}} = J \frac{\omega_0^2}{2} (\delta_{\text{поч}}^2 - \delta_{\text{кін}}^2) = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) = J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (6.54)$$

При гальмуванні противмиканням $\omega_{\text{поч}} = -\omega_0$, $\omega_{\text{кін}} = 0$. Тоді $\delta(s)_{\text{поч}} = 2$, $\delta(s)_{\text{кін}} = 1$, і втрати згідно з (6.51) або (6.52) будуть:

$$\Delta A_{20\text{г.п.в}} = 3J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (6.55)$$

Таким чином, втрати енергії під час гальмування противмиканням втричі більші, ніж втрати під час розгону або динамічному гальмуванні.

При реверсуванні $\omega_{\text{поч}} = -\omega_0$, $\omega_{\text{кін}} \approx \omega_0$, тоді $\delta(s)_{\text{поч}} = 2$, $\delta(s)_{\text{кін}} \approx 0$, і втрати енергії становлять

$$\Delta A_{20p} = 4J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (6.56)$$

У цьому випадку втрати дорівнюють сумі втрат при гальмуванні противмиканням і при розгоні.

Залежності (6.53...6.56) описують повні втрати у двигунах постійного струму незалежного збудження, тобто $\Delta A_{20} = \Delta A_v$.

За цими ж рівняннями визначають втрати енергії в колі ротора двигунів змінного струму.

Повні втрати енергії в асинхронному двигуні крім втрат в роторі ΔA_{20} включають також і втрати в обмотці статора ΔA_{10} . Останні можна виразити так:

$$\Delta A_{10} = \Delta A_{20} \frac{R_1}{R'_2}. \quad (6.57)$$

Тоді повні втрати енергії в асинхронному двигуні:

$$\Delta A_{v0} = J \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2). \quad (6.58)$$

6.4.3. Втрати енергії при роботі з навантаженням ($M_c = 0$)

Для визначення втрат енергії при наявності навантаження скористаємося формулами (6.45...6.48), в яких момент двигуна подано через статичний момент навантаження M_c і динамічний момент:

$$\begin{aligned} \Delta A_{2\text{ном}} &= \int_0^t M (\omega_0 - \omega) dt = \int_0^t (M_c + M_{\text{дин}}) (\omega_0 - \omega) dt = \\ &= \int_0^t \left(M_c + J \frac{d\omega}{dt} \right) (\omega_0 - \omega) dt = \int_0^t M_c (\omega_0 - \omega) dt + \int_{\omega_{\text{поч}}}^{\omega_{\text{кін}}} J (\omega_0 - \omega) d\omega = (6.59) \\ &= \int_0^{t_{n,n}} M_c (\omega_0 - \omega) dt + J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2). \end{aligned}$$

Труднощі, які виникають під час розв'язування рівняння (6.59), пов'язані з тим, що момент M_c і швидкість ω можуть бути нелінійними функціями часу. Якщо $M_c = \text{const}$, то рівняння (6.55) приймає вигляд:

$$\begin{aligned}\Delta A_{2n} &= \frac{J\omega_0^2(s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2)}{2} + M_c\omega_0 t_{n,n} - M_c \int_0^{t_{n,n}} \omega dt = \\ &= \Delta A_{20} + M_c\omega_0 t_{n,n} - M_c \int_0^{t_{n,n}} \omega dt\end{aligned}\quad (6.60)$$

Перший член правої частини виразу (6.60) являє собою втрати енергії при $M_c = 0$, а другий і третій члени визначають втрати енергії, спричинені наявністю моменту навантаження M_c . Для визначення ΔA_{2n} необхідні аналітичні вирази залежності $\omega(t)$. Якщо такого виразу немає або він складний, то можливе використання графоаналітичного методу.

При наближених розрахунках вважають, що момент двигуна в перехідному процесі залишається постійним і рівним середньому значенню $M = M_{\text{сеп}} = \text{const}$. Тоді, скориставшись формулою (6.49), запишемо:

$$dt = -J \frac{ds}{M_{\text{сеп}} \pm M_c}, \quad (6.61)$$

де мінус у знаменнику відповідає пуску двигуна, а плюс — гальмуванню. Якщо вираз (6.61) підставити в рівняння (6.48), одночасно змінюючи межі інтегрування, то одержимо:

$$\begin{aligned}\Delta A_{2\text{ном}} &= \int_{s_{\text{поч}}}^{s_{\text{кін}}} - \frac{M_{\text{сеп}} J \omega_0^2 s ds}{M_{\text{сеп}} \pm M_c} = \frac{M_{\text{сеп}}}{M_{\text{сеп}} \pm M_c} J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) = \\ &= \frac{M_{\text{сеп}}}{M_{\text{сеп}} \pm M_c} \Delta A_{20}\end{aligned}\quad (6.62)$$

Для визначення повних втрат у АД можна використовувати такі вирази:

$$\Delta A_{1\text{ном}} = \Delta A_{2\text{ном}} \frac{R_1}{R_2}, \quad (6.63)$$

$$\Delta A_{\text{ном}} = \Delta A_{1\text{ном}} + \Delta A_{2\text{ном}}. \quad (6.64)$$

Із виразу (6.62) видно, що втрати енергії в двигуні, який працює з реактивним навантаженням, порівняно з роботою вхолосту збільшуються при розгоні і зменшуються при гальмуванні. Це пояснюється тим, що при гальмуванні частина кінетичної енергії витрачається на подолання моменту навантаження.

Визначення шляхів зниження втрат електроенергії у перехідних процесах має важливе значення, особливо для ЕП, у яких перехідні процеси складають суттєву частину загального циклу їх роботи.

Аналізуючи одержані вирази і, зокрема (6.52), можна визначити два основних напрямки зменшення втрат електроенергії у перехідних процесах:

- 1) зменшення сумарного моменту інерції J механічної частини ЕП;
- 2) регулювання в перехідному процесі швидкості ідеального холостого ходу. Зменшення J досягається використанням малоінерційних двигунів або використанням двох двигунів половинної потужності замість одного (див. розд. 5). Останнє можливо тому, що потужність двигуна пропорційна квадрату діаметра якоря (ротора), а момент інерції — четвертому ступеню.

Рациональне використання механічної передачі, пов'язане з вибором відповідних форм елементів, конструкційних матеріалів і оптимального передаточного числа редуктора, також призводить до зниження моменту інерції. При використанні АД із перемиканням числа пар полюсів втрати енергії зменшуються при організації пуску та гальмуванні шляхом переходу з однієї характеристики на іншу. Так, при розгоні вхолосту до швидкості ω_{01} (рис. 6.3) за характеристикою 1, яка відповідає числу пар полюсів p_1 , втрати енергії при прямому пуску відповідно до виразу (6.50) та з урахуванням того, що $s_{\text{поч}} = 1$, $s_{\text{кін}} = 0$, будуть:

$$\Delta A_{2np} = J \frac{\omega_{01}^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) = J \frac{\omega_{01}^2}{2}. \quad (6.65)$$

Втрати при пуску у два ступені будуть:

- а) пуск за характеристикою 2 ($p_2 = 2p_1$) від $s_{\text{поч}} = 1$ до $s_{\text{кін}} = 0$ при $\omega_{02} = 0,5\omega_{01}$:

$$\Delta A_{2cm.1} = J \frac{\omega_{02}^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) = J \frac{\omega_{01}^2}{8}; \quad (6.66)$$

б) пуск за характеристикою 1 від $s_{\text{поч}} = 0,5$ до $s_{\text{кін}} = 0$ при ω_{01} :

$$\Delta A_{2cm.2} = J \frac{\omega_{01}^2}{2} \cdot (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) = J \frac{\omega_{01}^2}{8}. \quad (6.67)$$

Сумарні втрати при розгоні у два ступені:

$$\Delta A_{2cm} = \Delta A_{2cm.1} + \Delta A_{2cm.2} = J \frac{\omega_{01}^2}{4}. \quad (6.68)$$

Отже, в результаті зміни ω_0 в перехідному процесі втрати зменшуються вдвоє. Зниження втрат в роторі викликає зменшення втрат і в статорі двигуна. Ефект зменшення втрат енергії досягається також при організації гальмування у два етапи:

1) послідовним переходом з характеристики 1, яка відповідає меншому числу полюсів p_1 , на характеристику 2 ($p_2 = 2 p_1$) на рис. 6.3. При цьому вдвічі зменшується синхронна швидкість і двигун переходить в режим рекуперативного гальмування з віддачею енергії в мережу ($s_{\text{поч}} = -1, s_{\text{кін}} = 0$):

$$\Delta A_{2cm.1} = J \frac{\omega_{01}^2}{2} \cdot (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) = J \frac{\omega_{02}^2}{2} = J \frac{\omega_{01}^2}{8}, \quad (6.69)$$

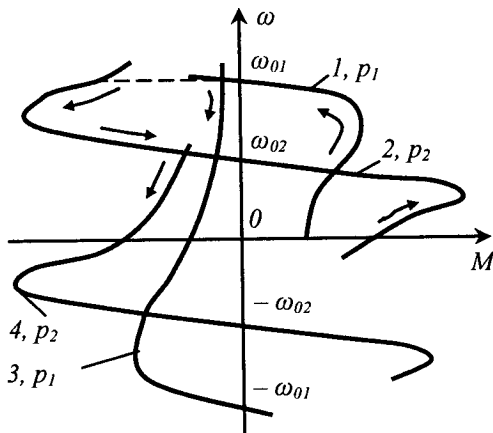


Рис. 6.3. До визначення втрат енергії при перехідних процесах у двошвидкісному АД

2) після досягнення швидкості ω_{02} зміною послідовності чергування фаз двигун переводять в режим гальмування противмиканням

при $s_{\text{поч}} = 2, s_{\text{кін}} = 1, \omega_{02} = \frac{\omega_{01}}{2}$.

Втрати енергії при цьому:

$$\Delta A_{2cm.2} = J \frac{\omega_{02}^2}{2} (s_{пoc}^2 - s_{кин}^2) = 3 J \frac{\omega_{02}^2}{2} = 3 J \frac{\omega_{01}^2}{8}. \quad (6.70)$$

Сумарні втрати при ступінчастому гальмуванні:

$$\Delta A_{2cm} = \Delta A_{2cm.1} + \Delta A_{2cm.2} = J \frac{\omega_{01}^2}{2}. \quad (6.71)$$

Отже, при ступінчастому гальмуванні із зниженням ω_0 втрати становлять тільки третю частину втрат при прямому гальмуванні з вищої швидкості.

6.5. Втрати енергії в регульованому електроприводі у перехідних процесах і способи їх зниження

До основної системи регульованого електропривода змінного і постійного струму відносяться системи керований випрямляч — двигун постійного струму ($КП - Д$) і перетворювач частоти — асинхронний двигун ($ПЧ - АД$).

Важливою особливістю роботи системи $КП - Д$ є можливість суттєво скоротити втрати енергії в перехідних процесах. Цього можна досягти шляхом плавної зміни в перехідних процесах швидкості ідеального холостого ходу двигуна, що досягається відповідною зміною напруги або частоти за допомогою керованого перетворювача. Проте наявність перетворювача у системі електропривода спонукає до втрат у самому перетворювачі, зміни $\cos\phi$ і коефіцієнта спотворення форми струму.

Розглянемо втрати енергії в перехідних процесах у системі $КП - Д$ при лінійній зміні в часі ЕРС перетворювача і відповідно швидкості ідеального холостого ходу при розгоні вхолосту. Розгін поділимо на два етапи. На першому $0 < t < t_{n.o.}$ швидкість ідеального холостого ходу змінюється за лінійним законом (рис. 6.4)

$$\omega_o = \varepsilon \cdot t + \omega_{o.пoc.}, \quad (6.72)$$

де $\varepsilon = d\omega_o(t)/dt$ — кутове прискорення (темп зміни швидкості ω_o).

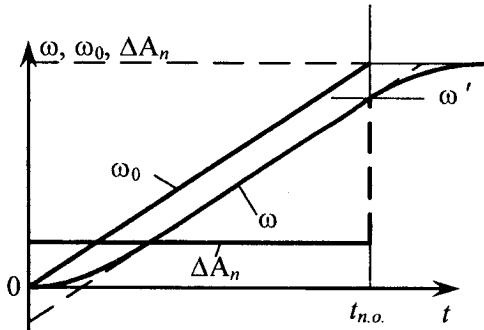


Рис. 6.4. Графіки $\omega(t)$, $\omega_0(t)$ і втрат при розгоні вхолосту двигуна у системі КП-Д

Швидкість якоря і момент при пуску з нульовими початковими умовами і $M_c = 0$ ($\omega_{\text{поч}} = \omega_{\text{поч}} = 0$) для першого етапу перехідного процесу запишуться відповідно рівняннями:

$$\omega(t) = \varepsilon_o(t) - T_m \varepsilon_o \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right), \quad (6.73)$$

$$M = M_o \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right). \quad (6.74)$$

На другому етапі при $t > t_{n.o.}$ $\omega_o = \text{const}$, а кутова швидкість і момент описуються рівняннями:

$$\omega(t) = \omega_o + (\omega' - \omega_o) e^{-\frac{t-t_{n.o.}}{T_m}}; \quad (6.75)$$

$$M = M_o e^{-\frac{t-t_{n.o.}}{T_m}}, \quad (6.76)$$

де ω' — початкове значення швидкості для другого етапу.

Взагалі $T_m \ll t_{n.o.}$, тому тривалість перехідного процесу визначається часом наростання напруги на якорі або частоти струму статора до усталеного значення. Тому в рівнянні (6.47) приймемо $t_{n.n.} < t_{n.o.}$. При лінійній залежності $\omega(t)$ матимемо:

$$\left. \begin{aligned} \omega(t) &= \varepsilon_o t - T_m \varepsilon_o; & \omega_o - \omega &= T_m \varepsilon_o \\ M &= J \frac{d\omega}{dt} = J \varepsilon_o; & \varepsilon_o t_{n.o.} &= \omega_o \end{aligned} \right\} \quad (6.77)$$

Згідно з (6.47)

$$\Delta A_{20n} = \int_0^{t_{n.o.}} J \varepsilon_o T_m dt, \quad (6.78)$$

або

$$\Delta A_{20n} = J \frac{\omega_o^2}{2} \frac{2T_m}{t_{n.o.}}. \quad (6.79)$$

Порівнюючи (6.53) і (6.79), можна зробити висновок, що при $t_{n.o.} \gg T_m$ втрати енергії при розгоні з лінійним наростанням напруги (частоти) значно менші, ніж при розгоні з незмінною напругою (частотою). Для зменшення втрат енергії в регульованих ЕП слід прагнути до зменшення відношення $\frac{T_m}{t_{n.o.}}$.

Невеликі втрати в перехідних процесах в системі генератор — двигун ($\Gamma - Д$). Якщо на вхід системи $\Gamma - Д$ сигнал керування подається ступінчасто, то швидкість ідеального ходу двигуна змінюється за експоненціальним законом. При пуску двигуна вхолосту ($M_c = 0$) втрати в якірному колі визначаються за формулою:

$$\Delta A_{20n} = \int_0^{t_{n.o.}} I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я.з}} + R_{\text{я.об}}) dt. \quad (6.80)$$

Підставивши у (6.80) $I_{\text{я}}(t)$, що дорівнює

$$I_{\text{я}}(t) = I_{\text{к.з}} \left(e^{\frac{t}{T_{\text{з}}}} - e^{\frac{t}{T_m}} \right) \frac{1}{m-1}, \quad (6.81)$$

де $m = \frac{T_{\text{з}}}{T_m}$ — відношення сталої часу обмотки збудження генератора до електромеханічної сталої часу привода, після інтегрування одержимо:

$$\Delta A_{20n2-o} = J \frac{\omega_o^2}{2} \cdot \frac{1}{m+1}. \quad (6.82)$$

Звідси видно, що втрати енергії у ДПС НЗ у системі $\Gamma - Д$ зменшуються в $m + 1$ разів порівняно з відповідними втратами при подачі на якір нерухомого двигуна повної напруги.

6.6. Шляхи енергозбереження в електроприводі

Абсолютна більшість ЕП сільськогосподарських електроприводів нерегульовані, в них найчастіше перетворювачем ЕЕ в МЕ є АД з короткозамкненим ротором.

Перший шлях енергозбереження на стадії проектування — удосконалення алгоритмів вибору ЕД для конкретних установок. ЕД заниженої потужності швидко виходить з ладу, ЕД завищеної потужності неефективно перетворює ЕЕ, має високі питомі втрати потужності в самому ЕД і в мережі живлення (низький $\cos\phi$). Розв'язання задачі вибору ЕД не завжди елементарно, а помилка при виборі ЕД може призвести до значних збитків, зниження економічності масового нерегульованого ЕП

Другий шлях — перехід на енергозберігаючі двигуни, в яких за рахунок збільшення маси активних матеріалів (заліза і міді) підвищені номінальні значення ККД і $\cos\phi$.

Третій шлях забезпечення раціональних режимів роботи ЕП — створення спеціальних додаткових технічних засобів, що забезпечують у нерегульованому ЕП мінімізацію шкідливого впливу відхилення навантаження від номінального на енергетичні показники. Ці технічні засоби — спеціальні регулятори ЕЕ, які вмикають між мережею і статором ЕД — крім функцій енергозбереження виконують і інші, часто не менше важливі функції — керують режимами пуску і гальмування, іноді регулюють швидкість і момент, здійснюють захист, діагностику та інше, тобто підвищують технічний рівень ЕП в цілому, збільшують його надійність.

Четвертий шлях — виключення необґрунтованих режимів холостого ходу. Під холостим ходом у даному випадку розуміють роботу ЕД як при відеднаному механізмі, так і при механізмі, що не виконує корисної роботи. Наприклад, корм для обробки не поступає в дробарку, або матеріал на транспортер.

П'ятий шлях — перехід від нерегульованого ЕП до регульованого. Аналіз енергетичних характеристик елементів силового каналу ЕП показує, що принципово є два шляхи для зменшення енергоспоживання: за рахунок зниження втрат в силових перетворювачах ЕП і

за рахунок регулювання технологічних показників РМ при зміні швидкості ЕП. Фактично і другий шлях приводить до зниження втрат енергії в РМ, яка при регулюванні швидкості точніше з точки зору енергетичних витрат пристосовується до вимог технологічного процесу. При переході до регульованого ЕП економія енергії часто досягається за рахунок того технологічного процесу, який привод обслуговує, причому економія інколи в багато разів перевищує власне споживання ЕП. Так, перехід від незмінної швидкості транспортера, що доставляє різноманітні деталі в піч для їх загартування, до регульованої, оптимізує термічний процес по енергетичному критерію.

Існують і інші шляхи, такі як підвищення якості ремонту ЕД, використання перемикачів обмоток ЕД з «трикутника» на «зірку», застосування синхронних двигунів тощо.

6.7. Приклад

Розрахувати величини втрат енергії при прямому і ступінчастому пусках до вищої швидкості та прямому і ступінчастому гальмуванні з вищої швидкості трифазного двошвидкісного АД з КЗ ротором АИР100S4/2 без навантаження ($M_c = 0$) з такими технічними даними: $P_{ном.в} = 3,0 \text{ кВт}$; $P_{ном.н} = 3,75 \text{ кВт}$; $n_{0в} = 3000 \text{ об/хв}$; $n_{0н} = 1500 \text{ об/хв}$; $J_{рот} = 0,0087 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $(R_1/R'_2)_в = 1,3$; $(R_1/R'_2)_н = 1,8$.

Розв'язок

1. Вища та нижча кутові синхронні швидкості двигуна:

$$\omega_{0в} = \pi n_{0в} / 30 = 3,14 \cdot 3000 / 30 = 314 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{0н} = \pi n_{0н} / 30 = 3,14 \cdot 1500 / 30 = 157 \text{ рад/с}.$$

2. Повні втрати у двигуні при прямому пуску до вищої швидкості:

$$\begin{aligned} \Delta A_{0н.в} &= J \frac{\omega_{0в}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) = \\ &= 0,087 \cdot \frac{314^2}{2} (1 + 1,3) (1^2 - 0) = 9865 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

3. Втрати при ступінчастому пуску:

а) до швидкості $\omega_{0н}$

$$\Delta A_{0н.н} = J \frac{\omega_{0н}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) = 0,087 \cdot \frac{157^2}{2} (1 + 1,8) (1^2 - 0) = 3002 \text{ Дж}.$$

б) до швидкості від $\omega_{0н}$ до $\omega_{0в}$:

$$\Delta A_{0н.н-в} = J \frac{\omega_{0в}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) =$$

$$= 0,087 \cdot \frac{314^2}{2} (1 + 1,3) (0,5^2 - 0) = 2466 \text{ Дж}$$

4. Відношення втрат при прямому пуску до втрат при ступінчастому:

$$K_{втр.п} = \Delta A_{0н'} / (\Delta A_{0нн} + \Delta A_{0нс}) = 9865 / (3002 + 2466) = 1,8.$$

5. Втрати енергії при одноступінчастому гальмуванні противмиканням від вищої швидкості до зупинки:

$$\Delta A_{0з.в-0} = J \frac{\omega_{0в}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) =$$

$$= 0,087 \cdot \frac{314^2}{2} (1 + 1,3) (2^2 - 0^2) = 29593 \text{ Дж.}$$

6. Втрати енергії при двоступінчастому гальмуванні:

а) рекуперативне (генераторне) гальмування від швидкості $\omega_{0в}$ до $\omega_{0н}$:

$$\Delta A_{0з.р.в-н} = J \frac{\omega_{0н}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) =$$

$$= 0,087 \cdot \frac{157^2}{2} (1 + 1,8) [(-1)^2 - 0] = 3002 \text{ Дж;}$$

б) гальмування противмиканням від швидкості $\omega_{0н}$ до 0:

$$\Delta A_{0з.н.н-0} = J \frac{\omega_{0н}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) =$$

$$= 0,087 \cdot \frac{157^2}{2} (1 + 1,8) (1,5^2 - 1^2) = 9006 \text{ Дж;}$$

в) сумарні втрати при ступінчастому гальмуванні:

$$\Delta A_{0зв-0} = \Delta A_{0з.р.в-н} + \Delta A_{0з.н.н-0} = 3002 + 9006 = 12008 \text{ Дж.}$$

7. Відношення втрат при одноступінчастому гальмуванні до втрат при двоступінчастому:

$$K_{втр.з} = \Delta A_{0з.в-0} / \Delta A_{0з.н.1-2} = 29593 / 12008 = 2,5.$$

Відношення $K_{втр.1}$ і $K_{втр.2}$ не відповідають висновкам з формул (6.61 і 6.67) тому, що відношення R_1/R'_2 на обох швидкостях різні.

6.8. Питання для самоконтролю

1. Назвіть основні енергетичні показники ЕП.
2. Чим характеризується економічність роботи ЕП?
3. Як визначається цикловий ККД ЕП?
4. Що таке коефіцієнт спотворення?
5. Як розглядаються потужність втрат в нерегульованому ЕП і двигуні?
6. Що таке постійні і змінні втрати потужності в ЕП?
7. Як знайти втрати потужності при номінальному режимі двигуна і при холостому ході?
8. Як змінюються величини ККД і $\cos\phi$ від відносного навантаження?
9. З чого складаються постійні втрати потужності в ДПС НЗ в регульованому ЕП?
10. Як визначаються повні втрати потужності при регулюванні швидкості ДПС НЗ?
11. Як визначаються постійні втрати потужності в АД регульованого ЕП?
12. Які фактори впливають на величину втрат енергії в перехідних режимах?
13. Проаналізуйте вираз втрат енергії в перехідному процесі при $M_c = 0$.
14. Яке співвідношення між втратами енергії при пуску двигуна без навантаження і при динамічному гальмуванні?
15. Наведіть вирази для визначення втрат енергії при гальмуванні противмиканням і реверсі.
16. Як впливає на величину втрат енергії навантаження в перехідних процесах?
17. Які складові втрат енергії у перетворювачах частоти і чим визначаються в них змінні втрати?
18. Вкажіть шляхи зменшення втрат енергії в електроприводах.



7. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА ПОТУЖНІСТЮ

7.1. Класи нагрівостійкості ізоляції обмоток електродвигунів. Нагрівання та охолодження електродвигунів

При створенні нових ЕП сільськогосподарських машин або їх модернізації в проектах вибирають такі серійні ЕД, які здатні забезпечити надійну і економічну роботу виконавчих органів робочих машин (ВОРМ). Їх паспортні дані (потужність, напруга, струм тощо) повинні бути близькими до розрахункових, а конструктивне виконання відповідало б способу розміщення в ЕП і умовам навколишнього середовища. Правильно вибраною потужністю ЕД слід вважати потужність, яка визначена в строгій відповідності з режимом роботи ВОРМ і очікуваного навантаження.

Завищення потужності ЕД проти необхідної для РМ веде до зростання габаритів, маси і вартості ЕП, а також до зниження його енергетичних показників: коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності двигунів змінного струму. Зниження потужності ЕД призводить до зниження швидкості обертання (крім синхронних двигунів) при розрахунковому завантаженні РМ, при цьому знижується продуктивність РМ, а іноді — і якість отриманої продукції. Крім того, тривале перевантаження ЕД заниженої потужності викликає перегрівання ізоляції обмоток більше за допустиме, внаслідок цього відбувається інтенсивне старіння ізоляції і різко скорочується строк її служби. В електричних машинах використовують ізоляційні матеріали таких класів нагрівостійкості: А, Е, В, F, Н, С (табл. 7.1).

При виготовленні сучасних ЕД у більшості випадків застосовують ізоляції класів В, F і Н.

Нагрівання ЕД є наслідком втрати частини ЕЕ в ЕД при перетворенні її в механічну енергію. Дотримання встановлених обмежень за допустимою температурою нагрівання забезпечує нормативну тривалість служби електричної машини в межах 15—20 років. Допустимим тепловим режимом ЕД вважається такий режим роботи, при якому тривалість служби його ізоляції T_i не буде меншою за передбачуваний. Тривалість служби ізоляції T_i дуже залежить від температури нагрівання Θ_i . Ця залежність має нелінійний характер і може бути визначена як експонента:

$$T_i = K e^{-\Theta_i}, \quad (7.1)$$

де K — константа; $f(\Theta_i)$ — залежність, яка визначається класом ізоляції.

При тривалому режимі роботи ЕД із сталим навантаженням визначення тривалості служби ізоляції не викликає особливих труднощів.

Якщо періоди нагрівання ізоляції змінюються періодами охолодження і ці процеси мають різну інтенсивність, визначення тривалості строків служби ізоляції ускладнюється. Коли коливання температури незначні, то можлива лінеаризація кривих нагрівання навколо точки середньої температури. В такому випадку при розрахунку старіння ізоляції виходять із цього середнього значення. Температура певної частини ЕД залежить не тільки від навантаження (втрат потужності), а й від температури охолоджуючого середовища. Найчастіше це повітря. В реальних умовах роботи електродвигунів температура охолоджуючого повітря змінюється в широких межах. Стандартом встановлена допустима гранична температура охолоджуючого повітря $+40^\circ\text{C}$. У зв'язку з цим, поряд із допустимою температурою $\Theta_{\text{доп.}}$ нагрівання елементів ЕД, прийнято вказувати допустиме перевищення температури $\tau_{\text{доп.}}$ над температурою охолоджуючого середовища, яке визначається різницею $\tau_{\text{доп.}} = \Theta_{\text{доп.}} - \Theta_{\text{с.}}$

7.1. Допустимі граничні температури нагрівання для ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості

Клас нагрівостійкості ізоляції	Допустима гранична температура, °C	Короткий перелік основних груп ізоляційних матеріалів
Y	90	Непросочені і не занурювані в рідкий електроізоляційний матеріал. Волоконні матеріали із целюлози, бавовни або натурального, штучного і синтетичного шовку, а також відповідні даному класу інші матеріали та інші сполучення матеріалів.
A	105	Волоконні матеріали із целюлози, бавовни або натурального, штучного і синтетичного шовку, просочені рідким електроізоляційним матеріалом
E	120	Синтетичні органічні матеріали (плівки, волокна, смоли, компаунди та ін.)
B	130	Матеріали на основі слюди (у тому числі на органічних підкладках), азбесту і скловолкна, що застосовуються з органічними зв'язуючими і просочуючими сполуками
F	155	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолкна, що застосовуються, із синтетичними зв'язуючими і просочуючими сполуками, які відповідають даному класові нагрівостійкості
H	180	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолкна у сполученні з кремнійорганічними зв'язуючими і просочуючими сполуками, кремнійорганічні еластомери
C Вище 180 °C	200	Слюда, керамічні матеріали, скло, кварц або їх комбінації без зв'язуючих або з неорганічними і елементарноорганічними сполуками
	220	
	250	

7.2. Нагрівання та охолодження електродвигунів

Дослідження процесів нагрівання та охолодження ЕД являє собою дуже складну задачу, оскільки двигун складається з деталей і вузлів різної конфігурації, виготовлених із різних матеріалів, які мають різні теплоємності і теплопередачі. Неоднаковими є умови нагрівання окремих частин двигуна, а напрямок теплових потоків залежить від режиму роботи ЕД. Наприклад, при холостому ході основна кількість теплоти виділяється у сталі статора, а при навантаженні — в обмотках ЕД.

При проектуванні і дослідженні теплових режимів ЕД їх часто розглядають у вигляді двоелементної моделі, одним з елементів якої є електрична обмотка, а другим магнітопровід.

З метою спрощення дослідження процесів нагрівання та охолодження ЕД допускають:

1) двигун розглядається як однорідне тіло із сталою теплоємністю, яке має нескінченно велику теплопровідність і однакову температуру у всіх точках у будь-який момент часу;

2) тепловіддача в навколишнє середовище прямо пропорційна різниці температур ЕД і навколишнього середовища;

3) теплоємність навколишнього середовища нескінченно велика, тобто під час нагрівання ЕД її температура не змінюється;

4) теплоємність, потужність теплових втрат і коефіцієнт тепловіддачі двигуна не залежать від його температури.

Для визначення характеру процесу зміни температури ЕД розглянемо баланс теплової енергії $\Delta P dt$, яка виділяється у ЕД за елементарний проміжок часу dt . Одна частина цієї теплоти $A dt$ віддається в навколишнє середовище, а друга частина $C d\tau$ витрачається на підвищення температури ЕД. Таким чином, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau, \quad (7.2)$$

де ΔP — втрати потужності в ЕД, $\frac{Дж}{с}$; A — тепловіддача ЕД, тобто кількість теплоти, що віддається в навколишнє середовище за 1 с при різниці температур ЕД і навколишнього середовища в $1^{\circ}C$, $\frac{Дж}{с \cdot ^{\circ}C}$; τ — перевищення температури ЕД над температурою охолоджуючого середовища, $^{\circ}C$; C — теплоємність ЕД, $\frac{Дж}{^{\circ}C}$; $d\tau$ — приріст температури ЕД, $^{\circ}C$, за нескінченно малий проміжок часу.

Розділимо рівняння (7.2) на $A dt$, одержимо:

$$\frac{\Delta P}{A} = \tau + \frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt}. \quad (7.3)$$

Таким чином, теплові процеси в двигуні при прийнятих припущеннях описуються лінійним диференціальним рівнянням першого порядку.

Розв'яжемо рівняння (7.3) відносно dt :

$$dt = \frac{\frac{C}{A} d\tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau}. \quad (7.4)$$

Проінтегрувавши вираз (7.4), одержимо:

$$t = -\frac{C}{A} \ln \left(\frac{\Delta P}{A} - \tau \right) + K. \quad (7.5)$$

Стала інтегрування K знайдеться з початкових умов, коли $t = 0$:

$$K = \frac{C}{A} \ln \left(\frac{\Delta P}{A} - \tau_{\text{поч}} \right), \quad (7.6)$$

де $\tau_{\text{поч}}$ — початкове перевищення температури ЕД над температурою охолоджуючого середовища, $^{\circ}\text{C}$.

Підставивши значення K із виразу (7.6) у рівняння (7.5) знайдемо:

$$t = -\frac{C}{A} \ln \frac{\frac{\Delta P}{A} - \tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau_{\text{поч}}}. \quad (7.7)$$

Пропотенціювавши, одержимо:

$$e^{-\frac{t}{T_H}} = \frac{\frac{\Delta P}{A} - \tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau_{\text{поч}}}. \quad (7.8)$$

Розв'язавши вираз (7.5) відносно τ , одержимо рівняння нагрівання ЕД:

$$\tau = \frac{\Delta P}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_H}}, \quad (7.9)$$

де T_H — стала часу нагрівання ЕД, с.

Згідно з прийнятими допущеннями теплоємність C і тепловіддача A ЕД в процесі нагрівання залишаються незмінними. Отже, їх відношення є також незмінним, має розмірність часу і називається сталою часу нагрівання ЕД:

$$T_n = \frac{C}{A}. \quad (7.10)$$

Стандартом визначено, що *сталою часу нагрівання ЕД називають час, протягом якого перевищення температури ЕД, який працює з постійним навантаженням і з віддачею теплоти в охолоджуюче середовище, змінюючись за експоненціальним законом, зростає від нуля до $0,632 \cdot \tau_y$.*

Фізичне значення сталої часу полягає в тому, що вона чисельно дорівнює умовному часу, за який ЕД нагрівся б від $\tau_{поч} = 0$ до ustalenoї температури τ_y при відсутності тепловіддачі в навколишнє середовище.

Аналізуючи рівняння (7.9), можна зробити висновок, що при сталих теплових втратах ΔP процес нагрівання ЕД описується експоненціальним законом. На початку процесу, коли $t = 0$, початкове перевищення температури ЕД було $\tau = \tau_{поч}$, а за нескінченно тривалий час $t = \infty$ настає теплова рівновага, тобто перевищення температури досягає деякого усталеного значення (рис. 7.1):

$$\tau_y = \frac{\Delta P}{A}. \quad (7.11)$$

Після підстановки значення усталеної температури рівняння нагрівання ЕД записують так:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \tau_{поч} e^{-\frac{t}{T_n}} = (\tau_{поч} - \tau_y) e^{-\frac{t}{T_n}} + \tau_y. \quad (7.12)$$

Якщо на початку нагрівання ЕД його температура дорівнює температурі охолоджуючого середовища ($\tau_{поч} = 0$), то рівняння (7.12) має вигляд:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right). \quad (7.13)$$

За рівняннями (7.12 і 7.13) побудовані криві 2 і 4 нагрівання ЕД (рис. 7.1) відповідно для $\tau_{поч} = 0$ і $\tau_{поч} > 0$ при одному і тому ж навантаженні (однакових втратах потужності ΔP). Якщо навантаження ЕД зменшити, зменшаться і втрати потужності в ньому ($\Delta P > \Delta P_1$), що призведе до зниження усталеного перевищення температури

($\tau_{y1} < \tau_y$). Цьому випадку відповідає крива 1 за умови, що $\tau_{поч} = 0$. Крива 3 нагрівання ЕД побудована за даними, одержаними експериментально. Як видно з графіка, на початку процес нагрівання за даними експерименту інтенсивніший, ніж теоретично описаний експонентою. І тільки при $\tau > (0,5...0,6) \cdot \tau_y$ експериментальна крива наближається до теоретичної.

Відповідно і стала часу реального процесу нагрівання ЕД не є сталою, а має найменше значення на початку процесу і найбільше — в кінці. Це пояснюється тим, що на відміну від прийнятої моделі на початку процесу завдяки тепловим опорам температура тепловіддаючих поверхонь ЕД значно нижча, ніж температура гріючих поверхонь (мідь обмотки), а значить, і нижча його тепловіддавальна здатність. Тому на підвищення температури витрачається більша частина енергії, ніж це передбачається теоретично.

Рівняння (7.12) можна використати і для опису процесу охолодження вимкненого ЕД або при зменшенні його завантаження. Для цього потрібно лише підставити в нього відповідні значення $\tau_{поч}$ і τ_y . Якщо нагрітий ЕД вимкнено з мережі, то втрати потужності в ньому дорівнюють нулю ($\Delta P = 0$) і згідно з виразом (7.11) $\tau_y = 0$. У цьому випадку процес охолодження характеризується кривою 1 (рис. 7.2). При зменшенні навантаження усталена температура $\tau_{y.o.}$ буде нижчою за початкову $\tau_{n.o}$ і процес описується кривою 2.

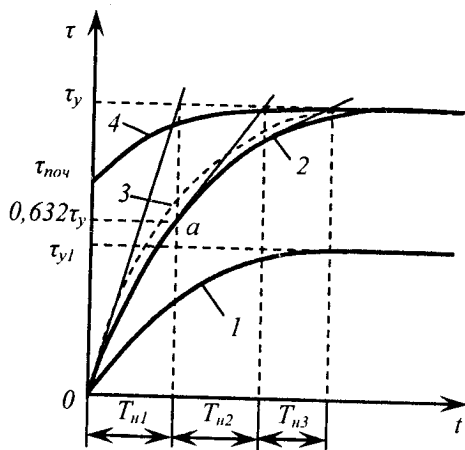


Рис. 7.1. Криві нагрівання електродвигуна

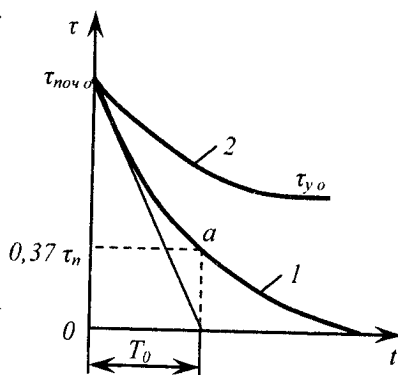


Рис. 7.2. Криві охолодження електродвигуна

Згідно з рівнянням (7.12) час зміни температури від початкового до усталеного значення нескінченно великий. Практично ж теплова рівновага настає за час $t \approx (3...5)T_n$, тобто коли перевищення температури досягне $(0,95...0,99)\tau_y$. Для ЕД малої потужності T_n становить десятки хвилин, для потужних ЕД — 2..3 години.

Коли при охолодженні ЕД після його зупинки умови тепловіддачі змінюються, то змінюється і стала часу.

Кількісне погіршення тепловіддачі характеризується коефіцієнтом погіршення тепловіддачі при нерухомому роторі:

$$\beta_o = \frac{A_o}{A}, \quad (7.14)$$

де A_o , A тепловіддача відповідно при нерухомому роторі і при номінальній швидкості обертання. Коефіцієнт погіршення тепловіддачі у перехідних режимах роботи (пуск, гальмування) $\beta_{n.n.}$ визначається як:

$$\beta_{n.n.} = \frac{1 + \beta_o}{2}. \quad (7.15)$$

Електродвигуни різного виконання за способом охолодження мають приблизно такі значення коефіцієнта β_o :

- закритий з незалежною вентиляцією — 1,0;
 - закритий без примусового охолодження — 0,95...0,98;
 - закритий самовентильований — 0,45...0,55;
 - захищений самовентильований — 0,25...0,35
- Дійсно, при $A = 0$ рівняння (7.2) матиме вигляд:

$$\Delta P dt = C d\tau. \quad (7.16)$$

При умові, коли $t = 0$ і $\tau_{noc} = 0$, після інтегрування лівої частини від 0 до τ_y одержимо:

$$\Delta P t_y = C \tau_y, \text{ звідки } t_y = \frac{C \tau_y}{\Delta P} = \frac{C}{A} = T_n,$$

тобто час нагрівання ЕД до усталеної температури чисельно дорівнює сталій часу нагрівання. З урахуванням (7.14) стала часу охолодження нерухомого ЕД визначається:

$$T_o = \frac{C}{A_o} = \frac{C}{A \beta_o} = \frac{T_n}{\beta_o}. \quad (7.17)$$

Якщо $\beta_0 \leq 1$, то $T_0 \geq T_n$, тобто охолодження ЕД з нерухомим ротором відбувається повільніше, ніж його нагрівання.

Сталу часу нагрівання можна визначити різними методами. Розглянемо деякі з них.

Метод нормованого значення. Якщо в рівнянні (7.13) прийняти $t = T_n$, то можна одержати: $\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{T_n}{T_n}} \right) = 0,632 \tau_y$.

Отже, якщо побудувати криву $\tau(t)$ і на осі τ (рис.7.1) відкласти значення $0,632 \cdot \tau_y$, то цьому значенню перевищення температури ЕД відповідає час від початку вмикання $t = 0$ до $t = T_n$, який знаходять на осі t .

Метод дотичної. Сталу часу нагрівання можна визначити графічно (рис.7.1). Для цього потрібно провести дотичну до кривої нагрівання (краще у другій половині кривої). Відрізок, взятий між точкою перетину дотичної з лінією усталеного перевищення температури τ_y і вертикаллю, поставленою з точки дотику, дорівнює в масштабі часу t сталій часу T_n .

Для більшої точності визначення T_n , проводять три дотичних до точок (у другій її половині) і знаходять середнє значення визначених сталих часу. Сталу часу охолодження визначають відрізком осі абсцис (рис.7.2), відтятим дотичною до будь-якої точки кривої охолодження і перпендикуляром, опущеним з цієї точки на вісь абсцис. При зменшенні навантаження усталена температура $\tau_{y,0}$ буде нижчою за початкову $\tau_{поч,0}$, а процес описується кривою 2 (рис.7.2).

Аналітичний метод. Сталу часу нагрівання ЕД можна наближено визначити за формулою:

$$T_n = \frac{C}{A} = \frac{c_1 m}{A} = \frac{c_1 m \tau_{дон} \eta_{ном}}{P_{ном} 10^3 (1 - \eta_{ном})}, \quad (7.18)$$

де c_1 — питома теплоємність матеріалів двигуна, $\frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C} \cdot \text{кг}}$; $\tau_{дон}$ — допустиме перевищення температури ЕД над температурою охолоджуючого середовища, $^\circ\text{C}$; $P_{ном}$ — номінальна потужність ЕД, кВт; $\eta_{ном}$ — номінальне значення коефіцієнта корисної дії; A — тепло-віддача ЕД, $\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$, яка дорівнює:

$$A = \frac{\Delta P_{ном}}{\tau_{доп}} = \frac{P_{ном} \cdot (1 - \eta_{ном})}{\tau_{доп} \cdot \eta_{ном}}. \quad (7.19)$$

Усталене значення перевищення температури ЕД для кожного i -того значення навантаження визначиться як:

$$\tau_{y,i} = \frac{\Delta P_i}{A}. \quad (7.20)$$

При сталій швидкості обертання ротора двигуна значення A і T_n незмінні. Таким чином, підставляючи в рівняння нагрівання відповідні втрати потужності, одержимо дані, за якими буде побудовано сімейство кривих нагрівання (рис. 7.3), які різняться одна від одної тільки величиною усталеного перевищення температури ЕД.

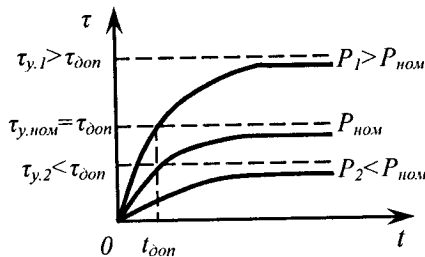


Рис. 7.3. Криві нагрівання електродвигуна при різних його навантаженнях

Аналізуючи криві (рис. 7.3), приходимо до висновку, що при $\Delta P_2 < \Delta P_{ном}$ перевищення температури ЕД не досягає номінального (допустимого) значення. При $\Delta P_1 > \Delta P_{ном}$ перевищення температури ЕД буде більшим за номінальне, що свідчить про перевантаження ЕД. В цьому режимі допустима тривалість роботи ЕД визначається часом нагрівання його обмоток до допустимої температури даного класу ізоляції.

Використовуючи криві нагрівання даного двигуна, можна визначити тривалість роботи ЕД в режимі теплового перевантаження. Цей час $t_{доп}$ (рис.7.3) буде визначатися точкою перетину кривої нагрівання перевантаженого ЕД з асимптотою, що відповідає значенню τ_y при номінальному навантаженні. Для кривої нагрівання, що відповідає втратам потужності $\Delta P_{ном}$, тривалість часу роботи ЕД не обме-

жується, тому що за час роботи ЕД не нагрівається вище допустимої температури.

Оскільки теплове перевантаження ЕД обмежується теплостійкістю його ізоляції, то, користуючись кривими нагрівання, в практичній роботі можна визначити його номінальну потужність.

Припустимо, що для даного ЕД з якихось причин невідома номінальна потужність, але відомий клас ізоляції, а отже і $\tau_{\text{доп}}$. Тоді $\Delta P_{\text{ном}} = A\tau_{\text{доп}}$. Ввімкнемо цей двигун на навантаження P_i (струм навантаження I_i) і при усталеній роботі визначимо його температуру Θ_y . Відповідно до закону експоненціальної функції при $t = \infty$ $\tau_{yi}A = \Delta P_i$. Приймаючи, що нагрівання ЕД обумовлене в основному змінними втратами потужності у двигуні $\Delta P_{v.\text{ном}}$, які є функцією струму навантаження, можна записати:

$$\frac{\tau_{\text{доп}}}{\tau_{yi}} = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{\Delta P_i} = \frac{\Delta P_{v.\text{ном}}}{\Delta P_{i.v}} \approx \frac{I_{\text{ном}}^2}{I_i^2} = \frac{P_{\text{ном}}^2}{P_i^2}, \quad (7.21)$$

де $\Delta P_{v.\text{ном}}$ і $\Delta P_{i.v}$ — змінні втрати потужності відповідно при номінальному і i -тому навантаженні; τ_{yi} — усталене перевищення температури двигуна над температурою охолоджуючого середовища, яке визначається $\tau_{yi} = \Theta_y - \Theta_c$.

$$\text{Звідси:} \quad I_{\text{ном}} = I_i \sqrt{\frac{\tau_{\text{доп}}}{\tau_{yi}}} \quad \text{або} \quad P_{\text{ном}} = P_i \sqrt{\frac{\tau_{\text{доп}}}{\tau_{yi}}} \quad (7.22)$$

Обмотки електродвигуна досягають допустимого перевищення температури над температурою охолоджуючого середовища при номінальному завантаженні, температурі охолоджуючого середовища $+40^\circ\text{C}$ і висоті над рівнем моря 1000 м. Якщо температура охолоджуючого середовища перевищує $+40^\circ\text{C}$ або двигун працює на висоті більше 1000 м над рівнем моря, то навантаження на нього повинно бути зменшене. При температурі нижче $+40^\circ\text{C}$ теоретично допустимо збільшення навантаження двигуна понад номінальне. Але на практиці цього не допускають з двох причин. По-перше, різниця між середньою і максимальною температурою (найбільш нагрітої частини обмотки) зростає приблизно пропорційно квадратові

коефіцієнта завантаження двигуна, а це може призвести до місцевого перегрівання обмотки. По друге, при цьому знижується перевантажувальна здатність двигунів, особливо асинхронних.

7.3. Навантажувальні діаграми

Вихідними даними для вибору електродвигуна за потужністю та подальших його перевірок є навантажувальна діаграма і механічна характеристика робочої машини, кінематична схема приводу та моменти інерції системи електродвигун — робоча машина.

Навантажувальною діаграмою робочої машини називається залежність моменту статичних опорів і статичної потужності робочої машини від часу, тобто $M_c = f(t)$, $P_c = f(t)$. Залежно від характеру робочого процесу навантажувальні діаграми можна умовно розділити на три групи.

1. Навантажувальні діаграми робочих машин, у яких статичний момент або потужність у процесі роботи не змінюються. До них належать навантажувальні діаграми насосів, вентиляторів при постійній подачі, зерноочисних машин, конвеєрів при роботі з постійним завантаженням тощо.

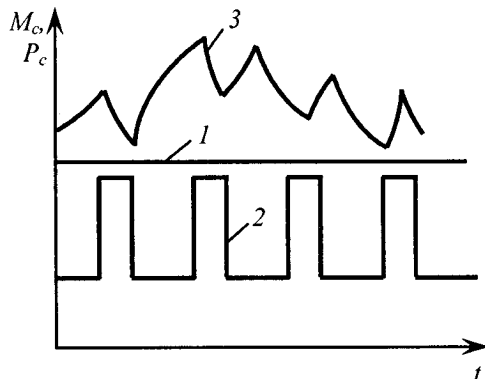
2. Навантажувальні діаграми машин, у яких статичний момент або потужність змінюються у часі періодично з певною закономірністю. Це сіно- та соломопреси, лісопильні рами, штампувальні верстати, порційні змішувачі кормів, підйомники та ін.

3. Навантажувальні діаграми робочих машин, у яких статичний момент або потужність змінюються у часі випадково. До них відносяться навантажувальні діаграми кормодробарок, змішувачів безперервної дії, плющилок, гноєтранспортерів тощо. Величина навантаження цих машин залежить не тільки від об'єктивних факторів (кількісні та якісні показники перероблюваного або транспортованого продукту), а й від суб'єктивних (наприклад, від робітника, що подає солом у соломосилосорізку).

На рис. 7.4 наведені статичні навантажувальні діаграми вентилятора, штампувального верстата і кормодробарки, характерні для 1, 2 і 3 груп відповідно.

Навантажувальні діаграми перших двох груп можна з достатньою для практики точністю розрахувати аналітично. Розрахунок навантажувальної діаграми третьої групи дає дуже наближені результати. Тому для вибору потужності двигуна їх знімають експериментально. Для цього на робочу машину встановлюють електро-

двигун орієнтовно вибраної потужності. Під час роботи на різних режимах самописними приладами записують струм чи потужність, споживані двигуном з мережі, або момент, який двигун розвиває на валу. Одержані графіки називають навантажувальними діаграмами двигуна (приводу).



7.4. Навантажувальні діаграми робочих машин:

1 — вентилятора; 2 — штампувального верстата; 3 — дробарки кормів

Навантажувальна діаграма двигуна враховує не тільки статичні, а й динамічні навантаження, що виникають при роботі системи електродвигун — робоча машина. Оскільки перехідні процеси в системі помітно впливають на зміну потужності, моменту або струму двигуна, то при роботі із змінним навантаженням навантажувальна діаграма двигуна відрізняється від статичної навантажувальної діаграми робочої машини (рис. 3.11). Різниця між ними тим більша, чим більший коефіцієнт інерції системи та чим м'якша механічна характеристика двигуна. Тому методики вибору електродвигунів за потужністю при постійних значеннях навантаження і швидкості обертання та при змінних цих параметрах суттєво різняться між собою.

7.4. Класифікація номінальних режимів роботи електричних двигунів

Номінальним режимом роботи електричної машини називають режим роботи, для якого машина призначається підприємством — виготувачем і який наведено у її паспорті. Сучасними стандартами передбачено вісім номінальних режимів роботи ЕД з умовним позначенням від S1 до S8.

1. Тривалий номінальний режим (S1) — режим роботи ЕД при незмінному навантаженні, причому за час роботи ($t_p > 3T_n$) перевищення температури усіх частин ЕД досягає усталеного значення. Залежності потужності ЕД $P(t)$, втрат $\Delta P(t)$, нагрівання ЕД — перевищення температури $\tau(t)$ для режиму S1 показані на рис. 7.5, а).

Прикладами механізмів з таким технологічним режимом можуть бути відцентровий насос з сталими значеннями висоти всмоктування, тиску в напірному трубопроводі і продуктивності, компресорні і вентиляторні установки, конвеєри з сталою масою транспортованого матеріалу, зерноочисні машини, силосорізки, металорізальні верстати, установки безперервного транспорту.

2. Короткочасний номінальний режим роботи (S2) — режим, коли періоди роботи ЕД з номінальним навантаженням чергуються з періодами вимикання його з електромережі, причому тривалість періоду роботи ($t_p \ll 3T_n$, $t_0 > 3T_n$) настільки мала, що ЕД не встигає нагрітися до усталеної температури, а за час паузи охолоджується до температури охолоджуючого середовища Θ_c (рис. 7.5, б). Режим S2 характеризується тривалістю робочого періоду. Стандартні тривалості робочого періоду t_p : 10, 30, 60, 90 хв. Але умови виробництва вимагають широкої номенклатури, тому налагоджено випуск двигунів з іншими тривалостями роботи, наприклад, 1; 2,5; 5; 8; 13; 18 хв та ін. Стандартні значення тривалості вмикання вказують після позначення режиму, наприклад, S2, 30 хв. У короткочасному режимі працюють ЕД приводів конвеєрів для роздавання кормів, прибирання гною, повороту лотків в інкубаторі та ін. Якщо тривалість роботи ЕД перевищує 90 хв, то режим роботи вважають тривалим.

3. Повторно-короткочасний номінальний режим (S3) — це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періодів роботи з постійним навантаженням і вимкненого нерухомого стану, причому тривалості періодів роботи $t_p \ll 3T_n$ і пауз $t_0 \ll 3T_n$ настільки малі, що за час роботи ЕД не встигає нагрітися до практично усталеної температури, а за час паузи не встигає охолонути до температури охолоджуючого середовища (рис. 7.5, в). Тривалість одного робочого циклу $t_q = (t_p + t_0)$ приймають не більше 10 хв. Режим характеризується тривалістю вмикання ТВ%, яка визначається за формулою:

$$TB \% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 \% = \frac{t_p}{t_q} \cdot 100 \% \quad (7.23)$$

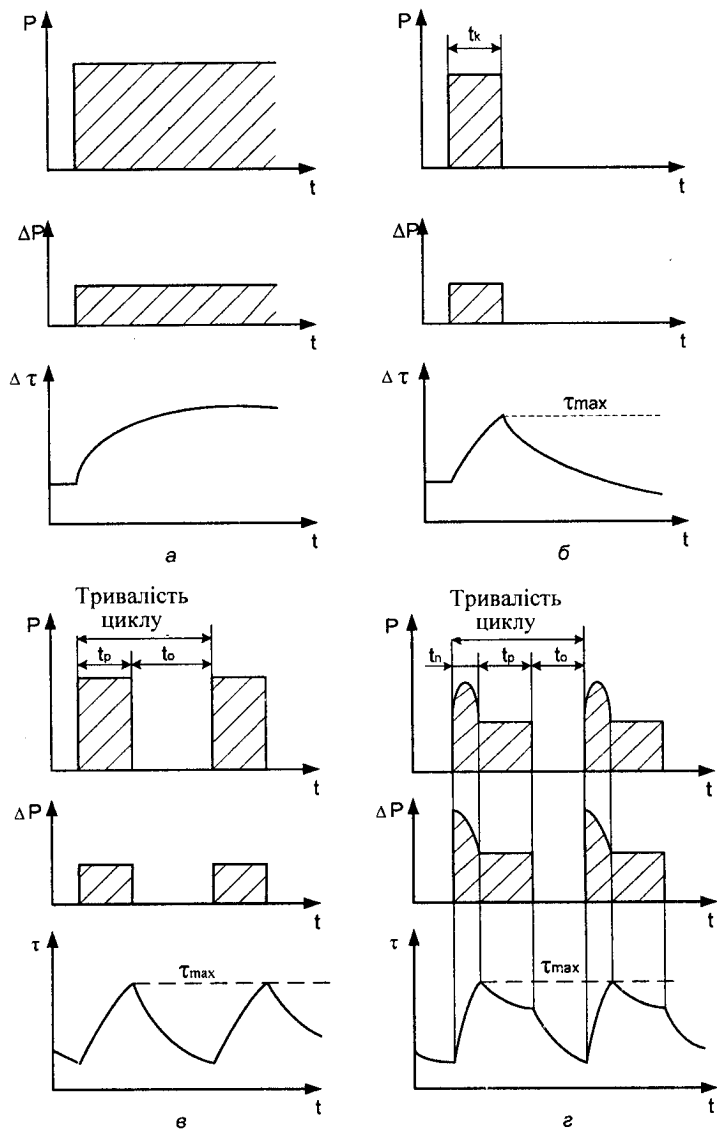


Рис. 7.5, а, б, в, г. Залежність потужності на валу двигуна P , потужності втрат ΔP , температури τ від часу: а — у тривалому режимі роботи (S1); б — у короткочасному режимі роботи (S2); в — у повторно-короткочасному режимі роботи (S3); г — у повторно-короткочасному режимі з частими пусками (S4).

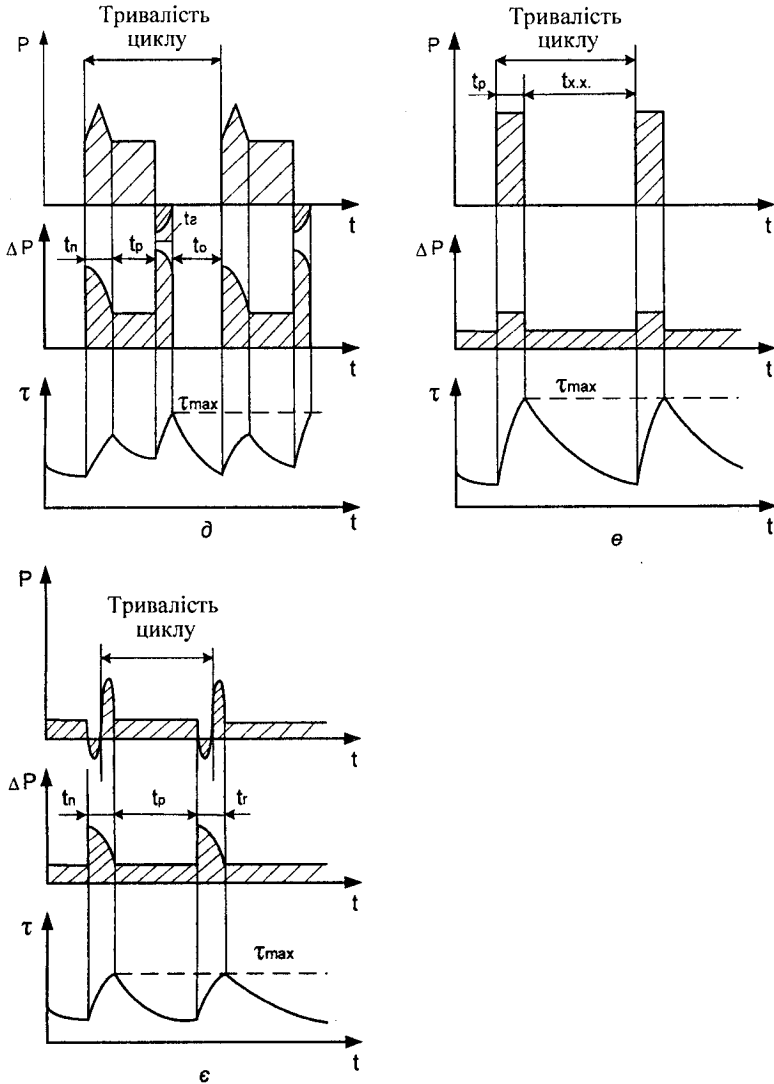


Рис. 7.5, δ , e . Залежність потужності на валу двигуна P , потужності втрат ΔP , температури τ від часу:
 δ — у повторно-короткочасному режимі з частими пусками і електричним гальмуванням (S5); e — у переміжному режимі (S6);
 ϵ — у переміжному режимі з частими реверсами (S7)

Стандартні значення ТВ%, на які розраховуються і випускаються ЕД встановлено такі: 15, 25, 40 і 60 %. Якщо $ТВ > 60$ % або $t_{\eta} > 10$ хв, то режим роботи вважають тривалим із змінним навантаженням.

У повторно-короткочасному режимі працюють ЕД приводів деяких безбаштових насосних установок для води, кранів, підйомників тощо.

4. Повторно-короткочасний номінальний режим із частими пусками (S4) — це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періодів пуску, роботи з постійним навантаженням і періоду вимкненого стану. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 7.5, з). Режим характеризується тривалістю вмикання (ТВ), кількістю пусків за годину і коефіцієнтом інерції ЕП, наприклад: S4 25%, число пусків за годину 60, FJ = 10.

Нормовані значення коефіцієнта інерції 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10. Тривалість вмикання ЕД визначається за формулою:

$$ТВ \% = \frac{t_p + t_n}{t_n + t_p + t_0} \cdot 100 \%, \quad (7.24)$$

де t_n — тривалість пуску.

Нормовані значення ТВ: 15; 25; 40 і 60 %. Нормоване число пусків за годину: 30; 60; 120 і 240.

5. Повторно-короткочасний номінальний режим із частими пусками і електричним гальмуванням (S5) — це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду пуску, періоду роботи з постійним навантаженням, періоду швидкого електричного гальмування і періоду вимкненого стану. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 7.5, д). У цьому режимі втрати потужності при пуску і електричному гальмуванні суттєво впливають на перевищення температури двигуна. Режим характеризується такими ж номінальними даними, як і режим S4.

Нормовані значення коефіцієнта інерції в режимі S5: 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4. Тривалість вмикання визначається за формулою:

$$ТВ = \frac{t_n + t_p + t_z}{t_n + t_p + t_z + t_0} 100\%, \quad (7.25)$$

де t_z — тривалість електричного гальмування.

Нормовані значення коефіцієнта інерції в режимі S5: 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4.

Тривалість вмикання визначається за формулою:

$$TB = \frac{t_n + t_p + t_z}{t_n + t_p + t_z + t_0} 100\%, \quad (7.25, a)$$

де t_z — тривалість електричного гальмування.

6. Номінальний переміжний режим (S6) — це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду роботи з постійним навантаженням і періоду холостого ходу. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 7.5, е). Цей режим характеризується тривалістю навантаження (ТН), яка визначається за формулою:

$$TH \% = \frac{t_p}{t_p + t_{x.x}} \cdot 100 \%, \quad (7.26)$$

де $t_{x.x}$ — тривалість періоду холостого ходу.

У цьому режимі тривалість циклу не перевищує 10 хв. Стандар-тні тривалості навантаження ТН: 15; 25; 40 і 60 % вказують після умовного позначення режиму. Наприклад: S6 40%. У цьому режимі працюють двигуни пилорами, циркулярки та ін.

7. Номінальний переміжний режим з частими реверсами (S7) — це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду пуску, періоду роботи з постійним навантаженням, періоду електричного гальмування. Періоду вимкненого стану відсутній. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 7.5, є). Нормується кількість реверсів за годину (30; 60; 120; 240) і коефіцієнт інерції 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10. Наприклад: S7, FJ = 4, число реверсів за годину 120.

8. Номінальний переміжний режим з двома або більше ступеннями частот обертання (S8) — це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду прискорення, періоду роботи з постійним навантаженням, що відповідає заданій частоті обертання, за яким слідує один або кілька періодів роботи з іншим постійними навантаженнями, що відповідають іншим частотам обертання. Періоду вимкненого стану відсутній.

Тривалість кожного робочого періоду недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис. 7.5, ж). У цьому режимі втрати потужності при переході з однієї частоти обертання на іншу суттєво впливають на перевищення температури двигуна.

Для типового режиму S8 після скороченого позначення вказують коефіцієнт інерції FJ, число циклів за годину, а також навантаження, частоту обертання і тривалість вмикання на кожному ступені частоти обертання. Наприклад: S8 FJ = 1,6; число циклів за годину 60;

16 кВт, 740 об/хв, 30 %;

40 кВт, 1460 об/хв, 30 %;

25 кВт, 980 об/хв, 40 %;

Тривалість вмикання на окремих ступенях (рис. 7.4, ж) визначається за формулами:

$$TB_1 = \frac{t_n + t_{p1}}{t_n + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\%; \quad (7.27)$$

$$TB_2 = \frac{t_{e1} + t_{p2}}{t_n + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\%; \quad (7.28)$$

$$TB_3 = \frac{t_{e2} + t_{p3}}{t_n + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\%, \quad (7.29)$$

де t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} — тривалість навантаження на кожному ступені обертання; t_{e1}, t_{e2} — тривалість електричного гальмування при переході з однієї частоти обертання на іншу; t_n — тривалість пуску.

Визначення необхідної потужності і вибір конкретного ЕД для кожного з можливих режимів роботи повинні забезпечити близький до номінального тепловий режим двигуна і, отже, його нормативне використання за тривалістю служби.

Необхідною умовою для визначення потужності ЕД є наявність навантажувальної діаграми ЕП або приводного механізму.

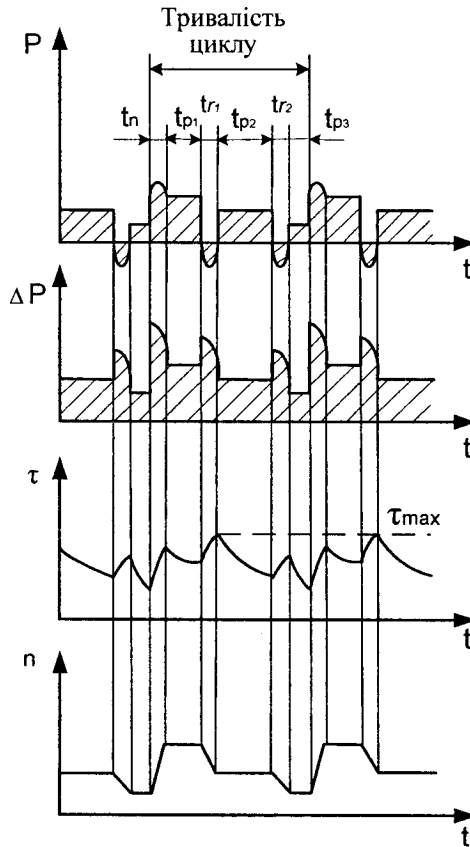


Рис. 7.5, ж. Залежність потужності на валу двигуна P , потужності втрат ΔP , температури τ і частоти обертання n від часу у переміжному режимі роботи з трьома ступенями частот

7.5. Вибір електродвигунів за потужністю для тривалого режиму роботи

Незмінне навантаження. Навантажувальна діаграма РМ з незмінним навантаженням зображена на рис. 7.5, а. При відомій потужності РМ P_m , розрахункова потужність двигуна $P_{\text{ов.розр}}$ визначається:

$$P_{\text{ов.розр}} = \frac{K_{\text{зан}} P_{\text{м}}}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (7.30)$$

де $K_{\text{зан}}$ — коефіцієнт запасу; $\eta_{\text{пер}}$ — ККД механічного передавального пристрою.

Номінальна потужність двигуна повинна бути не меншою за розрахункову, тобто:

$$P_{\text{ов.ном}} \geq P_{\text{ов.розр}}. \quad (7.31)$$

При виконанні цієї умови максимальне перевищення температури обмоток буде не вище гранично допустимого: $\tau_{\text{max}} \leq \tau_{\text{доп}}$.

Якщо навантажувальна діаграма РМ задана функцією $M_c = f(t)$, то потужність двигуна розраховується за формулою:

$$P_{\text{ов.розр}} = K_{\text{зан}} \frac{M_c \omega}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (7.32)$$

де M_c — момент статичних опорів на приводному валу машини, Н·м; ω — кутова швидкість приводного вала РМ, рад/с.

Потужності, споживані РМ при незмінному навантаженні, у багатьох випадках розраховуються за простими формулами. Так, потужність, кВт, для приводу насоса визначають з виразу:

$$P_{\text{м}} = \frac{Q \rho H g 10^{-3}}{\eta_{\text{нас}}}, \quad (7.33)$$

де Q — подача насоса, м³/с; ρ — густина рідини, що подається насосом, кг/м³; H — розрахунковий напір, м; g — прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $\eta_{\text{нас}}$ — ККД насоса.

Потужність, кВт, для приводу вентилятора:

$$P_{\text{м}} = \frac{L p 10^{-3}}{\eta_{\text{в}}}, \quad (7.34)$$

де L — подача вентилятора, м³/с; p — напір вентилятора, Па; η — ККД вентилятора.

Потужність, споживана скребковим конвеєром при транспортуванні суцільним потоком:

$$P_m = Q g(L f \cos \alpha + H) 10^{-3}, \quad (7.35)$$

де Q — розрахункова продуктивність конвеєра, кг/с; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; H — висота підйому продукту, м; L — довжина конвеєра, м; f_c — коефіцієнт опору рухові; α — кут нахилу конвеєра.

У тому випадку, якщо пусковий момент (момент зрушення) робочої машини дуже великий, необхідна перевірка вибраного двигуна за умовами пуску. Двигун успішно запуститься, якщо:

$$M_n = M_{ном} M_n^* \geq (1,2 \dots 1,3) M_{с.зв.}, \quad (7.36)$$

де M_n , $M_{ном}$ — відповідно пусковий і номінальний моменти двигуна, Н · м; M_n^* — кратність пускового моменту; $M_{с.зв.}$ — зведений до вала двигуна момент зрушення РМ, Н · м.

Для приводів з великим коефіцієнтом інерції необхідна також перевірка двигуна на нагрівання під час пуску. З цією метою визначають час пуску привода t_n і порівнюють з допустимим часом пуску $t_{дон}$ за умовою:

$$t_n \leq t_{дон}. \quad (7.37)$$

Перевірити двигун на нагрівання під час пуску можна й іншим способом. Перегрівання двигуна понад допустиму температуру не буде при умові:

$$\tau_{дон} \geq V_t t_n, \quad (7.38)$$

де $\tau_{дон}$ — допустиме перевищення температури обмотки над температурою охолоджуючого середовища, °С; V_t — швидкість наростання температури обмотки при загальмованому роторі (якорі), °С/с; t_n — час пуску привода, с.

Для деяких серій двигунів величина V_t наводиться у довідниках. Орієнтовно швидкість наростання температури обмоток двигуна можна визначити за формулою:

$$V_t = \frac{(K_i j)^2}{200}, \quad (7.39)$$

де j — щільність струму в обмотці з мідного проводу при номінальному режимі, А/мм²; K_i — кратність пускового струму.

Змінне навантаження. Вибір ЕД за потужністю для тривалого режиму роботи із змінним навантаженням, коли послідовно змінюються робочі цикли і паузи, являє собою складну задачу. Дійсно, якщо вибрати ЕД за максимальним значенням навантаження, то ЕД в тепловому відношенні буде недовантаженим, навпаки, вибір ЕД за мінімальним значенням навантаження призведе до його перегрівання. Як перший, так і другий випадки не можуть бути раціональним розв'язанням поставленої задачі.

Вибір потужності за середніми значеннями навантаження допустимо тільки при незначних коливаннях навантаження. В іншому випадку ЕД може перегріватися, оскільки при цьому не враховують квадратичну залежність втрат потужності в ЕД від струму, що протікає в обмотках.

Відомо, що довговічність ізоляції залежить від її температури, тому при змінному навантаженні потужність ЕД слід вибирати так, щоб в момент максимальних навантажень температура ізоляції обмоток не перевищувала допустимої:

$$\tau_{max} \leq \tau_{доп} . \quad (7.40)$$

Тому для тривалого режиму із змінним навантаженням спочатку орієнтовано розраховують потужність (момент) на валу ЕД за середнім значенням статичної діаграми навантаження РМ, помноживши його на коефіцієнт, який наближено враховує перевищення потужності (моменту) ЕД над середньою потужністю (моментом) навантаження:

$$P_{ном} \geq (1,2...1,3)P_{ср.дср} = (1,2...1,3) \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n t_i} . \quad (7.41)$$

$$\text{або} \quad M_{ном} \geq (1,2...1,3)M_{ср.дср} = (1,2...1,3) \frac{\sum_1^n M_i t_i}{\sum_1^n t_i} , \quad (7.42)$$

де $P_{ср.дср}$, $M_{ср.дср}$ відповідно номінальні значення потужності і моменту двигуна; $P_{ср.дср}$, $M_{ср.дср}$ — відповідно середнє значення потужності і моменту за навантажувальною діаграмою.

Користуючись каталожними даними попередньо вибраного двигуна і даними робочої машини, розраховують перехідні процеси в

приводі і будують навантажувальну діаграму двигуна. За допомогою останньої можна розрахувати і побудувати криву нагрівання двигуна, за якою визначають максимальне перевищення температури обмотки τ_{max} . Якщо мати на увазі, що усталене перевищенням температури обмотки над температурою охолоджуючого середовища ЕД у такому режимі роботи можливе через велику кількість циклів, то метод остаточного вибору потужності ЕД за кривими нагрівання стає дуже трудомістким і малоприматним, тим більше, значення сталої нагрівання в каталожних даних двигунів не приводиться, а її обчислення занадто наближене.

На практиці для перевірки попередньо вибраного двигуна користуються простішими методами, до яких відносяться метод середніх втрат потужності і метод еквівалентних значень величин (струму, потужності або моменту).

Обґрунтування можливості застосування методів середніх втрат потужності і еквівалентних величин.

Теоретично обґрунтувати правомірність цих методів можна, розглядаючи процес нагрівання ЕД, який працює в тривалому режимі із змінним навантаженням.

Припустимо, що робочий цикл будь якої РМ складається із n ділянок з навантаженням $P_1, P_2, \dots, P_n$ на проміжках часу $t_1, t_2, \dots, t_n$, (рис. 7.6).

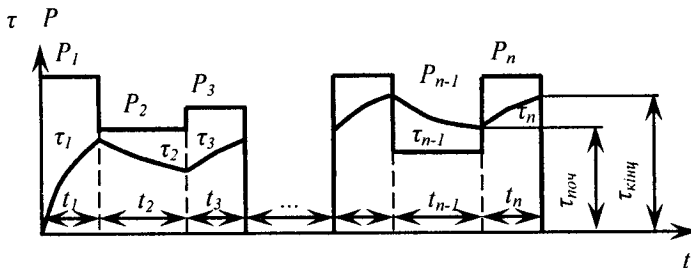


Рис. 7.6. Графік нагрівання двигуна в тривалому режимі змінного навантаження

Тривалість одного циклу набагато менша сталої часу нагрівання T_n ЕД, а кількість робочих циклів і пауз, які повторюються, необмежена. Тоді, починаючи з деякого віддаленого циклу процес нагрівання двигуна носитиме усталений характер, а це означає, що тем-

пература в кінці наступного циклу мало відрізняється від температури в кінці попереднього циклу. Знайдемо закон зміни температури ЕД в кінці кожної ділянки графіка втрат, показаного на рис. 7.6, вважаючи, що стала часу нагрівання T_n і тепловіддача двигуна відомі, а температура навколишнього середовища за весь період роботи ЕД залишається сталою.

Перевищення температури ЕД в кінці першої ділянки графіка втрат, тобто за час t_1 :

$$\tau_1 = \frac{\Delta P_1}{A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_n}} \right) + \tau_{\text{ноч}} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_n}}, \quad (7.43)$$

в кінці другої ділянки:

$$\begin{aligned} \tau_2 = \frac{\Delta P_2}{A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_n}} \right) + \tau_1 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_n}} = \frac{\Delta P_2}{A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_n}} \right) + \\ + \frac{\Delta P_1}{A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_n}} \right) \cdot e^{-\frac{t_2}{T_n}} + \tau_{\text{ноч}} \cdot e^{-\frac{(t_1+t_2)}{T_n}}. \end{aligned} \quad (7.44)$$

Нехтуючи відхиленням перевищення температури у середині циклу, виразимо максимальне перевищення температури ЕД в кінці віддаленого циклу через середні за величиною і тією ж тривалістю

за часом втрати, тобто при $\tau_{\text{кінц}} = \frac{\Delta P_{\text{ср}}}{A}$ одержимо:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{\text{ср}}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_u}{T_n}} \right) = \frac{\Delta P_1}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_n}} \right) e^{-\frac{t_u-t_1}{T_n}} + \frac{\Delta P_2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_n}} \right) e^{-\frac{t_u-t_1-t_2}{T_n}} + \dots + \\ + \frac{\Delta P_{n-1}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{n-1}}{T_n}} \right) e^{-\frac{t_u-t_1-t_2-\dots-t_{n-1}}{T_n}} + \frac{\Delta P_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T_n}} \right). \end{aligned} \quad (7.45)$$

Із рівняння (7.45) видно, що нагрівання ЕД, викликане втратами при роботі в тривалому режимі із змінним навантаженням, можна замінити таким же нагріванням, але при сталому тривалому навантаженні. На цьому положенні базується метод визначення потужності ЕД за середніми втратами потужності і метод еквівалентного струму, моменту або потужності.

Використовуючи порядок розкладання в ряд Маклорена показникової функції вигляду $e^{-y} = 1 - y + \frac{y^2}{2!} - \frac{y^3}{3!} + \dots + \frac{(-y)^n}{n!}$ до виразів, що стоять у лівій і правій частинах рівняння (7.45), та обмежуючись двома складовими цього ряду, з огляду на малість інших $\left(e^{-y} \approx 1 - \frac{y}{1!}\right)$, після перетворень вираз матиме вид:

$$\frac{\Delta P_{cp} t_n}{AT_n} = \frac{\Delta P_1 t_1}{AT_n} + \frac{\Delta P_2 t_2}{AT_n} + \dots + \frac{\Delta P_n t_n}{AT_n}, \quad (7.46)$$

звідки

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (7.47)$$

де $y = \frac{t}{T_n}$ — відношення тривалості циклу або його частини до сталої часу нагрівання ЕД.

Вираз (7.47) використовують при виборі потужності ЕД з незаалежною вентиляцією та самовентиляцією, якщо останні працюють з постійною швидкістю. Якщо ЕД з самовентиляцією працюють із змінною швидкістю (пуск, гальмування, зупинка), необхідно враховувати вплив погіршення умов охолодження на номінальну потужність ЕД.

Відомо, що стала часу нагрівання при зменшенні частоти обертання або при зупинці двигуна збільшується, так як зменшується тепловіддача.

Значення коефіцієнтів зміни тепловіддачі при перехідних процесах $\beta_{n,n}$ і при зупинці β_0 визначаються відповідно до (7.14) і (7.15).

При врахуванні коефіцієнтів зміни тепловіддачі формула для визначення середніх втрат потужності, що відповідають графіку (рис. 7.7), має вигляд:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 + \Delta P_4 t_4}{\beta_{n,n}(t_1 + t_3) + t_2 + \beta_0 t_0}, \quad (7.48)$$

де $P_4 = 0$; $\Delta P_4 \cdot t_4 = 0$; $t_4 = t_0$; $\beta_{n,n} = \frac{1 + \beta_0}{2}$; t_1 і t_3 — відповідно час пуску і гальмування; t_3 і t_4 — відповідно час роботи і паузи.

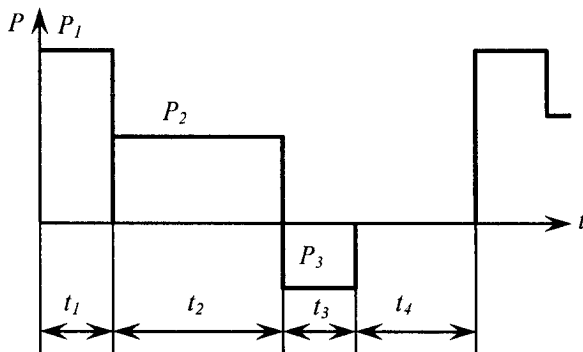


Рис. 7.7. Графік робочого циклу

Для номінального режиму роботи ЕД справедливий вираз $\tau_{\text{дон}} = \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{A}$. Якщо ЕД вибрано вірно, то виконується умова:

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}}. \quad (7.49)$$

При цьому середнє перевищення температури двигуна буде не більшим за допустиме $\tau_{\text{ср}} \leq \tau_{\text{дон}}$. При виконанні цієї умови перевірку ЕД за нагріванням закінчують. Якщо середні втрати за цикл виявляються більшими за номінальні або набагато меншими ($\Delta P_{\text{ср}} \ll \Delta P_{\text{ном}}$), це значить, що у першому випадку двигун вибраний заниженої потужності, і при роботі він перегріватиметься. У другому випадку потужність двигуна завищена. В обох випадках необхідно вибрати інший ЕД і повторити розрахунки $\Delta P_{\text{ср}}$.

Методика перевірки потужності попередньо вибраного двигуна за методом середніх втрат:

1. Користуючись навантажувальною діаграмою РМ $P_c = f(t)$ або $M_c = f(t)$, каталожними даними попередньо вибраного ЕД за умовою (7.41) або (7.42) і зведеним до його валу моментом інерції системи ЕД — РМ розраховують перехідні процеси ЕП і будують навантажувальну діаграму двигуна $P = f(t)$.

Якщо графік останньої має криволінійний характер, його заміняють ступінчастим (рис. 7.8, а). При цьому середню потужність на трапецієподібних ділянках (рис. 7.8, в) визначають за формулою:

$$P_{\text{ср.тран}} = \frac{P_2 + P_3}{2}, \quad (7.50)$$

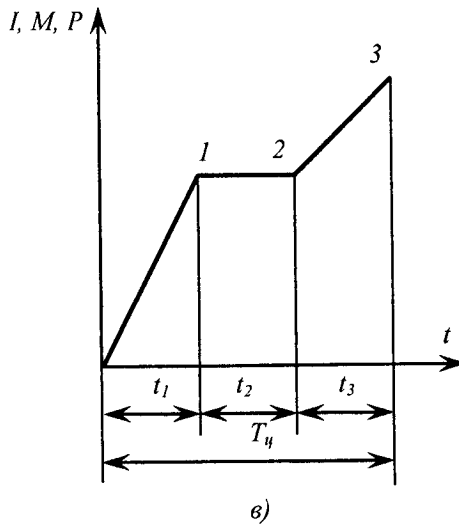
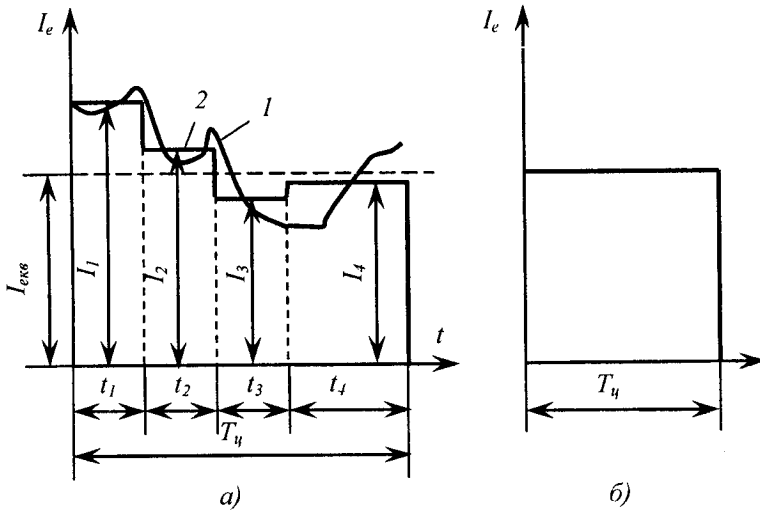


Рис. 7.8. а, б) — Діаграма еквівалентного струму;
 в) — Діаграма навантаження двигуна з ділянками трикутної, прямокутної і трапецієподібної форми

а на трикутних (рис.7.8, в):

$$P_{\text{ср.трик}} = \frac{P_1}{2}. \quad (7.51)$$

2. За формулою (6.18) визначають ККД ЕД при i -тих навантаженнях.

3. За формулою (6.15) розраховують втрати потужності для кожної ділянки діаграми навантаження і будують графік втрат.

4. За формулою (7.47) або (7.48) (залежно від режиму роботи) визначають середнє значення втрат і вибраний двигун перевіряють на нагрівання під час роботи за умовою (7.49).

5. Після перевірки по тепловому режиму вибраний ЕД треба перевірити на перевантажувальну здатність:

$$M_{\text{max.діаг}} \leq M_{\text{доп}}, \quad (7.52)$$

де $M_{\text{max.діаг}}$ — максимальний момент із навантажувальної діаграми ЕД; $M_{\text{доп}}$ — допустимий за перевантаженням момент двигуна.

Різні типи двигунів мають різну перевантажувальну здатність. Так для асинхронних двигунів максимальний допустимий момент визначається з умови можливого зниження напруги живлення на 10 %:

$$M_{\text{доп}} = K_U^2 M_{\text{ном}} M_k^* \geq M_{\text{max.діаг}}, \quad (7.53)$$

де M_k^* — кратність максимального моменту ЕД; K_U — коефіцієнт запасу за встановленою потужністю електроприводу, необхідний для врахування відхилення напруги живлення.

Перевантажувальна здатність синхронних двигунів знаходиться в межах $(2,5 - 3) M_{\text{ном}}$, а при форсуванні збудження її можна збільшити до $4 M_{\text{ном}}$.

Перевантажувальна здатність двигунів постійного струму обмежується умовами комутації на якорі і залежить від конструкції двигуна, системи збудження і швидкості обертання якоря. Так, для двигунів загального призначення незалежного і паралельного збудження наближено можна прийняти $M_{\text{доп}} = (2,0...2,5) M_{\text{ном}}$, а для послідовного і змішаного збудження $M_{\text{доп}} = (2,5...3,0) M_{\text{ном}}$.

6. Асинхронні короткозамкнені двигуни додатково перевіряються за умовами пуску при можливому зниженні напруги живлення на 10 %:

$$M_{n(u)} = K_u^2 M_{ном} M_n^* > M_{p.дiаг.}, \quad (7.54)$$

де $M_{n(u)}$ — пусковий момент ЕД при зниженні напруги живлення;

M_n^* — кратність пускового моменту; $M_{p.дiаг.}$ — момент зрушення ВОРМ, визначений за механічною її характеристикою.

Метод середніх втрат є універсальним і найбільш точним методом перевірки вибраного двигуна за умовами нагрівання. Але користування цим методом ускладнюється тим, що залежність ККД від ступеня завантаження двигуна в довідковій літературі, як правило, не наводиться. Тому на практиці частіше користуються методами еквівалентних величин.

Еквівалентними називають такі незмінні в часі значення струму, моменту або потужності, які викликають у двигуні такі ж втрати потужності, як і реально змінні ці величини.

Метод еквівалентного струму. Відомо, що втрати потужності в електродвигунах поділяють на постійні і змінні. Постійні втрати не залежать від ступеня завантаження двигуна. Змінні втрати пропорційні квадратові струму головного кола: струмові якоря у двигунів постійного струму, струмові статора і ротора — в асинхронних машин.

Виходячи з цього, можна записати, що при використанні двигуна постійного струму середня потужність, яка в ньому втрачається при завантаженні еквівалентним струмом, дорівнює:

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_c + \Delta P_v = \Delta P_c + I_e^2 R, \quad (7.55)$$

де ΔP_c — потужність постійних втрат; ΔP_v — змінні втрати потужності; I_e — еквівалентний струм головного кола; R — опір обмотки двигуна.

Замінімо втрати потужності на кожній ділянці у виразі (7.47) через відповідні постійні і змінні складові:

$$\Delta P_c + I_e^2 R = \frac{(\Delta P_c + I_1^2 R)t_1 + (\Delta P_c + I_2^2 R)t_2 + \dots + (\Delta P_c + I_n^2 R)t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (7.56)$$

Після нескладних перетворень виразу (7.56) знайдемо еквівалентний струм, що відповідає наведеному графіку на рис. 7.8, б):

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n I_i^2 \cdot t_i}{T_u}}, \quad (7.57)$$

де n — число ділянок у робочому циклі; $T_u = t_1 + t_2 + t_3$ — тривалість робочого циклу.

При погіршенні умов охолодження ЕД, наприклад при перехідних процесах і під час пауз, вводять коефіцієнти, які скорочують відповідні періоди, враховуючи тим самим погіршення умов охолодження:

$$T'_u = \beta_{n,n} \cdot (t_n + t_o) + \beta_o \cdot t_o + \sum t_{pi}, \quad (7.58)$$

де t_n, t_o, t_0, t_{pi} — періоди, відповідно пуску, гальмування, паузи, роботи на i -тій ділянці графіка.

Оскільки $T'_u < T_u$, то розрахункове значення еквівалентного струму зростає.

Якщо на графіку струм змінюється плавно, то його еквівалентне значення визначається за формулою:

$$I_e = \sqrt{\frac{\int_0^{T_u} I_{(t)}^2 dt}{T_u}}. \quad (7.59)$$

У тому випадку, коли графік навантажувальної діаграми ЕД представлений у вигляді кривої (рис.7.8, а, крива 1) або ламаної лінії, його слід перетворити у ступінчастий (рис.7.8, а, лінія 2) так, щоб останній охоплював таку ж площу, як і реальний. Для цього ділянки трапецієподібної форми (рис.7.8, в) замінюють еквівалентним прямокутником за виразом

$$I_e = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_2 I_3 + I_3^2}{3}}. \quad (7.60)$$

Еквівалентний струм ділянки трикутної форми (рис. 7.8, в) знаходять з рівняння:

$$I_e = \frac{I_1}{\sqrt{3}}. \quad (7.61)$$

Перевірка попередньо вибраного ЕД за потужністю методом еквівалентного струму провадиться за умовою:

$$I_e \leq I_{ном}, \quad (7.62)$$

де $I_{ном}$ — номінальний струму електродвигуна.

Якщо умова (7.62) не виконується, то приймають ЕД більшої потужності і розрахунок повторюють. Після цього ЕД перевіряють на допустиме перевантаження за умовами (7.52) і (7.53).

При виводі рівняння (7.57) прийняті допущення, що на всіх ділянках навантажувальної діаграми втрати потужності на збудження, втрати в сталі і механічні, а також опір головних кіл двигуна незмінні. З урахуванням вказаних допущень метод еквівалентного струму можна застосовувати для перевірки на нагрівання майже всіх типів електродвигунів з достатньою для практики точністю. Метод дає велику похибку при перевірці двигуна з перемиканням головних кіл і АД з обмоткою ротора, виконаною у вигляді з подвійної клітки або з глибоким пазом, що працюють у режимах з частими пусками і гальмуваннями (S3, S4 і S5).

Порівняно з методом середніх втрат перевагою методу еквівалентного струму є те, що при відомому навантаженні ЕД $I = f(t)$ знайти струм значно легше, ніж втрати потужності. Однак, метод еквівалентного струму потребує незмінності опору силового кола ЕД, а для АД — незмінності кутової швидкості, що гарантує сталість параметрів роторного кола.

Метод еквівалентного моменту доцільно застосовувати в тому випадку, коли вибір потужності ЕД бажано пов'язати безпосередньо з режимом роботи РМ, поклавши в основу графік статичного моменту $M_c = f(t)$ і відповідний до нього графік моменту ЕД. Формулу для еквівалентного моменту виводять безпосередньо з формули еквівалентного струму, при умові, що потік збудження практично не змінюється із зміною навантаження. Помноживши ліву і праву частини виразу I_e на величину $k \Phi_{ном}$, матимемо вираз для еквівалентного моменту:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_i^2 \cdot t_i}{T_y}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (7.63)$$

Якщо графік зміни моменту має вигляд нерівнобічної трапеції, то еквівалентний момент визначають аналогічно (7.60) за формулою:

$$M_e = \sqrt{\frac{(M_1^2 + M_1 \cdot M_2 + M_2^2)}{3}}, \quad (7.64)$$

де M_1, M_2 — моменти, що відображені на діаграмі навантаження боковими сторонами трапеції.

Для трикутних ділянок графіка аналогічно (7.61):

$$M_e = \frac{M_1}{\sqrt{3}}. \quad (7.65)$$

При правильному виборі ЕД повинна задовольнятися умова:

$$M_{ном} \geq M_e, \quad (7.66)$$

тобто номінальний момент вибраного ЕД повинен дорівнювати або бути більшим еквівалентного моменту.

Зважаючи на вказані раніше обмеження, метод можна застосовувати для перевірки ДПС НЗ, якщо вони працюють з незмінним магнітним потоком. З певними допущеннями метод може бути використаний і для АД та синхронних двигунів, які працюють з навантаженням, близьким до номінального, тобто коли момент двигуна приблизно пропорційний струмові.

Методом еквівалентної потужності зручно користуватися при перевірці потужності електродвигунів, що працюють зі швидкістю, яка мало змінюється, тобто $\omega = const = \omega_{ном}$. В цьому випадку потужність пропорційна моментові: $P = M\omega_{ном}$. Коли кутова швидкість ЕД на окремих ділянках циклу мало змінюється, то нагрівання ЕД можна оцінити, використовуючи цей метод. Помноживши праву і ліву частину рівняння (7.63) на $\omega_{ном}$, одержимо вираз для визначення еквівалентної потужності P_e :

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2 \cdot t_i}{T_{\Sigma}}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (7.67)$$

де P_e — еквівалентна потужність.

Двигун за потужністю вибраний вірно, якщо:

$$P_e \leq P_{ном}. \quad (7.68)$$

Метод еквівалентної потужності може бути використаний для перевірки на нагрівання синхронних і асинхронних двигунів, а також двигунів постійного струму паралельного або незалежного збудження, якщо вони працюють із номінальною або близькою до номінальної швидкістю і номінальним магнітним потоком.

Методом еквівалентної потужності можна скористатися і при змінній швидкості обертання. Для цього потужність P_i при швидкості ω_i потрібно привести до еквівалентної потужності P_{ei} при швидкості $\omega_{ном}$:

$$P_{ei} = P_i \frac{\omega_{ном}}{\omega_i} \quad (7.69)$$

і ввести в рівняння (7.67) замість P_1, P_2, P_3 .

Якщо із зміною швидкості обертання змінюється і тепловіддача двигуна, то в рівняння (7.67) слід також ввести коефіцієнт погіршення тепловіддачі β .

Тоді еквівалентна потужність визначиться за формулою:

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(P_i \frac{\omega_{ном}}{\omega_i} \right)^2 t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_i t_i}}. \quad (7.70)$$

Порядок розрахунку потужності двигуна методом еквівалентних величин такий.

Розраховують або одержують експериментально навантажувальну діаграму робочої машини $M_c=f(t)$ або $P_c=f(t)$.

Визначають середнє значення потужності або моменту і за формулами (7.41) або (7.42) з каталогу попередньо вибирають електродвигун.

Користуючись технічними даними двигуна, зведеним до його валу моментом інерції системи електродвигун — робоча машина і навантажувальною діаграмою робочої машини, розраховують перехідні процеси, на основі яких будують навантажувальну діаграму двигуна.

Для більшості сільськогосподарських машин через випадковий характер навантаження статичну навантажувальну діаграму одержа-

ти неможливо. В такому разі попередньо вибирають двигун з певним перебільшенням потужності (іноді потужність двигуна приймають за аналогіями з подібними машинами), а потім при номінальному навантаженні робочої машини самописними приладами експериментально записують навантажувальну діаграму двигуна: споживаний струм $I = f(t)$ або споживану потужність $P_I = f(t)$.

Одержану навантажувальну діаграму двигуна обробляють раніше описаним методом і визначають еквівалентні значення струму I_e або споживаної двигуном потужності P_{Ie} .

Перевіряють вибраний електродвигун по тепловому режиму за умовами:

$$I_{ном} \geq I_e \text{ або } \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} \geq P_{Ie}, \quad (7.71)$$

де $I_{ном}$, $P_{ном}$, $\eta_{ном}$ — номінальні значення струму, потужності і ККД двигуна.

Після перевірки на нагрівання двигун перевіряють на перевантажувальну здатність і за умовами пуску.

Методами еквівалентного моменту та еквівалентної потужності можна користуватися для попереднього вибору потужності двигуна за навантажувальною діаграмою робочої машини або за спрощеною навантажувальною діаграмою двигуна. Остання будується без урахування моменту інерції системи, тобто з припущенням, що момент або потужність двигуна в кожний момент часу дорівнюють відповідним статичним значенням. Такий вибір точніший, ніж за середніми значеннями.

7.6. Вибір двигунів за потужністю для короткочасного режиму роботи

Основною ознакою короткочасного режиму роботи є те, що перевищення температури двигуна в кінці робочого періоду t_k не досягає усталеного значення (рис. 7.9). Тому, якщо прийняти ЕД тривалого режиму і завантажити до номінальної потужності ($P_k = P_{ном}$), то перевищення його температури за час t_k досягне значення $\tau_I < \tau_{дон}$ (крива 1 на рис. 7.9). Тобто, двигун не буде повністю використаний за нагрівостійкістю.

Тому очевидно, що для роботи в режимі S2 двигун режиму S1 слід вибирати з перевантаженням, щоб $P_k > P_{ном}$. У такому випадку

усталене перевищення температури τ_{y2} буде більшим за допустиме. Але до кінця робочого періоду t_k поточне перевищення температури досягне гранично допустимого значення $\tau = \tau_{\text{доп}}$ (крива 2 на рис. 7.9). Таким чином, двигун може бути повністю використаний за нагрівостійкістю. Перевантаження може бути значним при малих значеннях t_k .

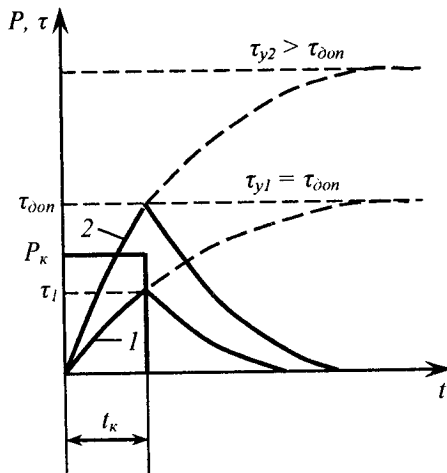


Рис. 7.9. Графік роботи двигуна в короткочасному режимі:
1 — крива нагрівання двигуна, вибраного за номінальною потужністю;
2 — крива нагрівання двигуна, вибраного з перевантаженням

Промисловість виготовляє спеціальні двигуни для короткочасного режиму. Основними параметрами, що їх характеризують, є номінальна потужність $P_{\text{ном}}$ і тривалість короткочасної роботи t_k .

Стандартом передбачено тривалості короткочасної роботи 10, 30, 60 і 90 хв. Але умови виробництва вимагають ширшої номенклатури, тому налагоджено випуск двигунів з іншими тривалостями роботи, наприклад, 1; 2,5; 5; 8; 13; 18,5 хв.

Спеціальні двигуни, призначені для короткочасного режиму роботи, мають ряд особливостей. У них збільшена перевантажувальна здатність, змінене співвідношення втрат у міді і сталі. Двигуни з малою тривалістю короткочасної роботи не мають спеціального вентилятора для охолодження, завдяки чому зменшуються механічні втрати і знижується вартість двигунів.

Потужність спеціальних двигунів для короткочасного режиму роботи вибирається за умовами:

$$\left. \begin{array}{l} P_{ном} > P_{\kappa}, \\ t_{\kappa,кат} > t_{\kappa}, \end{array} \right\} \quad (7.72)$$

де $P_{ном}$ — номінальна потужність двигуна в короткочасному режимі роботи; P_{κ} — потужність навантаження, визначена за навантажувальною діаграмою; $t_{\kappa,кат}$ — каталожне значення тривалості роботи двигуна; t_{κ} — фактична тривалість короткочасної роботи за навантажувальною діаграмою. При роботі двигуна із зміним навантаженням потужність навантаження P_{κ} визначається методами середніх втрат або еквівалентних величин.

Навантажувальна діаграма може бути задана і залежностями $M = f(t)$ або $I = f(t)$. У таких випадках умову (7.72) перевіряють залежностями:

$$M_{ном} \geq M_{\kappa} \quad (7.73, а)$$

або

$$I_{ном} \geq I_{\kappa} \quad (7.73, б)$$

де $M_{ном}$, $I_{ном}$ — відповідно номінальний момент і номінальний струм двигуна; M_{κ} , I_{κ} — відповідно момент і струм за навантажувальною діаграмою.

Якщо час роботи t_{κ} не збігається з каталожним значенням $t_{\kappa,кат}$, навантаження P_{κ} , при якому двигун буде повністю використаний за нагрівостійкістю, може бути знайдене при таких розрахунках.

Перевищення температури двигуна, що працює з номінальним навантаженням нормований період часу $t_{\kappa,кат}$, дорівнює:

$$\tau = \tau_{дон} = \frac{\Delta P_{ном}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{\kappa,кат}}{T_n}} \right), \quad (7.74)$$

де $\Delta P_{ном}$ — номінальні втрати в двигуні; A — тепловіддача двигуна; T_n — стала часу нагрівання.

За час фактичної роботи t_{κ} двигун досягне допустимого перевищення температури, розвиваючи потужність P_{κ} , відмінну від номінальної. При цьому:

$$\tau_{дон} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_n}} \right). \quad (7.75)$$

Прирівнявши (7.74) і (7.75), одержимо:

$$\frac{\Delta P_{ном}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{\kappa,кат}}{T_n}} \right) = \frac{\Delta P_{\kappa}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_n}} \right),$$

звідси:

$$\frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{ном}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{\kappa, кат}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_n}}}. \quad (7.76)$$

Втрати потужності у двигуні поділяються на постійні K і змінні ΔP_v . Оскільки змінні втрати пропорційні квадратові потужності навантаження двигуна, то можна записати:

$$\frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{ном}} = \frac{K + \Delta P_{vном} \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{ном}} \right)^2}{K + \Delta P_{vном}} = \frac{\alpha + \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{ном}} \right)^2}{\alpha + 1}, \quad (7.77)$$

де $\Delta P_{vном}$ — змінні втрати при номінальному навантаженні двигуна;
 $\alpha = \frac{K}{\Delta P_{vном}}$ — відношення постійних втрат до номінальних змінних.

Підставимо значення (7.77) в (7.76):

$$\frac{\alpha + \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{ном}} \right)^2}{\alpha + 1} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{\kappa, кат}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_n}}},$$

звідки потужність P_{κ} визначиться:

$$P_{\kappa} = P_{ном} \sqrt{(\alpha + 1) \frac{1 - e^{-\frac{t_{\kappa, кат}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_n}}} - \alpha}. \quad (7.78)$$

При практичних розрахунках визначення потужності P_{κ} за формулою (7.78) ускладнюється відсутністю точних значень α і T_n . Тому з достатньою для практики точністю перерахунок потужності на іншу тривалість роботи можна проводити за спрощеною формулою, в основу якої покладено рівність еквівалентної потужності при різних тривалостях роботи:

$$P_{\kappa} = P_{ном} \sqrt{\frac{t_{\kappa, кат}}{t_{\kappa}}}. \quad (7.79)$$

Якщо навантажувальна діаграма задана моментом або струмом, то відповідно:

$$M_k = M_{ном} \sqrt{\frac{t_{к,кат}}{t_k}}; \quad (7.80, а)$$

$$I_k = I_{ном} \sqrt{\frac{t_{к,кат}}{t_k}}. \quad (7.80, б)$$

Після вибору за потужністю двигун при потребі перевіряють за умовами пуску і на перевантажувальну здатність.

Якщо спеціальних двигунів для короткочасного режиму роботи немає, можна використати двигуни, призначені для тривалого режиму. При цьому розрахунок потужності проводиться з умов допустимого нагрівання і механічного перевантаження.

Для кількісної оцінки допустимого перевантаження використовуються коефіцієнти термічного p_t і механічного p_m перевантаження.

Коефіцієнт термічного перевантаження являє собою відношення втрат потужності при короткочасному режимі до втрат потужності при тривалому (номінальному) режимі:

$$p_t = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_{ном}}. \quad (7.81)$$

Для виведення залежності коефіцієнта термічного перевантаження скористаємося рівняннями кривих нагрівання двигуна (рис. 7. 9). Рівняння кривої 1 нагрівання при номінальному навантаженні:

$$\tau = \tau_{y1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right). \quad (7.82)$$

Крива 2 характеризує нагрівання двигуна, що працює з перевантаженням ($P_k > P_{ном}$) і описується рівнянням:

$$\tau = \tau_{y2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right). \quad (7.83)$$

Для повного використання за нагрівостійкістю треба, щоб за час короткочасної роботи t_k перевищення його температури досягло гранично допустимого значення τ_{yl} , тобто:

$$\tau = \tau_{y1} = \tau_{y2} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}} \right). \quad (7.84)$$

Згідно з виразом (7.12) усталене перевищення температури при номінальному завантаженні двигуна:

$$\tau_{y1} = \frac{\Delta P_{ном}}{A}, \quad (7.85)$$

а при короткочасному навантаженні:

$$\tau_{y1} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{A}. \quad (7.86)$$

Тоді з врахуванням (7.84), (7.85) і (7.86) рівняння (7.81) запишеться:

$$p_t = \frac{\tau_{y2}}{\tau_{y1}} = \frac{\tau_{y2}}{\tau_{y2} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}} \right)} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}}. \quad (7.87)$$

Прийнявши допущення, що зі зміною навантаження швидкість обертання двигуна залишається постійною, коефіцієнт механічного перевантаження можна виразити як відношення потужності короткочасного режиму до номінальної потужності двигуна:

$$p_m = \frac{P_k}{P_{ном}}. \quad (7.88)$$

Скориставшись рівнянням (7.77), яке запишемо як

$$p_t = \frac{\alpha + \left(\frac{P_{\kappa}}{P_{ном}} \right)^2}{\alpha + 1},$$

одержимо:

$$p_m = \frac{P_k}{P_{ном}} = \sqrt{(\alpha + 1) p_t - \alpha}.$$

Підставивши значення p_t з формули (7.87), остаточно запишемо:

$$p_m = \sqrt{\frac{\alpha + 1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}} - \alpha}. \quad (7.89)$$

Оскільки при роботі двигуна з перевантаженням змінні втрати значно перевищують постійні, то з достатньою для практики точністю постійними втратами можна знехтувати. Тоді коефіцієнт механічного перевантаження визначиться за формулою:

$$p_m = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}}} = \sqrt{p_t} . \quad (7.90)$$

Розрахунки за формулами (7.87) і (7.89) показують, що значення коефіцієнта механічного перевантаження менші, ніж термічного, особливо при малих тривалостях роботи (рис. 7.10). Тому при перевірці потужності двигуна, призначеного для роботи в тривалому режимі, умовам роботи в короткочасному режимі частіше користуються коефіцієнтом p_m . Максимальна потужність, яку може розвинути двигун, працюючи короткочасно, визначається за виразом:

$$P_{к.макс} = p_m P_{ном} . \quad (7.91)$$

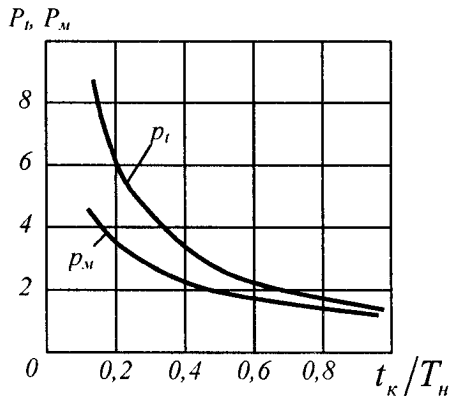


Рис. 7.10. Залежність коефіцієнтів термічного (p_t) і механічного (p_m) перевантаження ЕД при короткочасному режимі роботи ($\alpha = 1$) від відносної тривалості робочого періоду

З графіків (рис. 7.10) видно, що при відношенні t_k/T_n близько 0,35 коефіцієнт механічного перевантаження дорівнює приблизно 2,5. Це відповідає перевантажувальній здатності двигунів постійного струму і дещо нижче перевантажувальній здатності деяких асинхронних

двигунів при номінальній напрузі живлення. Тому двигуни режиму S1, вибрані для роботи в режимі S2, необхідно перевірити на перевантажувальну здатність. При малих значеннях t_k/T_n потужність краще вибирати за максимальним моментом.

Потужність двигунів, розрахованих на тривалий режим, для короткочасної роботи, визначають у такій послідовності.

За навантажувальною діаграмою робочої машини $M_c = f(t)$ або $P_c = f(t)$ попередньо вибирають двигун за умовою:

$$M_{\text{дв. Макс}} \geq M_{\text{с. макс}} \quad (7.92, \text{ а})$$

або

$$P_{\text{дв. Макс}} \geq P_{\text{с. Макс}}, \quad (7.92, \text{ б})$$

де $M_{\text{дв. макс}}$ і $P_{\text{дв. макс}}$ — відповідно максимальні допустимі значення моменту і потужності двигуна; $M_{\text{с. макс}}$ і $P_{\text{с. макс}}$ — відповідно зведений максимальний момент і максимальна потужність статичного навантаження робочої машини згідно з навантажувальною діаграмою.

Двигун попередньо можна вибрати також за аналогією з іншими подібними машинами.

Користуючись каталожними даними вибраного двигуна, навантажувальною діаграмою робочої машини і зведенням до вала двигуна моментом інерції системи електродвигун — робоча машина, розраховують перехідні процеси у приводі та будують навантажувальну діаграму двигуна $M = f(t)$ та $I = f(t)$.

Оскільки короткочасний режим роботи включає в себе і час пуску, то навантажувальна діаграма $P = f(t)$ не буде характеризувати нагрівання двигуна з достатньою точністю.

Навантажувальну діаграму двигуна можна також одержати експериментально. Для цього попередньо вибраний двигун встановлюють на робочу машину і при номінальному її завантаженні самописними приладами записують залежність $I = f(t)$ або $M = f(t)$.

За одержаною навантажувальною діаграмою двигуна визначають еквівалентні значення струму I_e або моменту M_e .

За рівнянням (7.89) або спрощеним рівнянням (7.90) визначають коефіцієнт механічного перевантаження p_m .

Перевіряють відповідність попередньо вибраного двигуна фактичним умовам роботи на машині:

$$I_{\text{ном}} \geq \frac{I_e}{p_m} \quad (7.93, \text{ а})$$

або

$$M_{\text{ном}} \geq \frac{M_e}{P_m}. \quad (7.93, б)$$

При невиконанні умов (7.93, а) або (7.93, б) вибирають двигун іншої потужності і повторюють його перевірку.

Вибраний двигун при необхідності також перевіряють за умовами пуску.

7.7. Вибір двигунів за потужністю для повторно-короткочасного режиму роботи

Для роботи в повторно-короткочасному режимі виготовляють спеціальні ЕД, які порівняно із звичайними мають збільшені пускові та максимальні моменти, зменшену інерційність роторів та інші особливості. Як відомо, момент інерції тіла обертання пропорційний четвертому ступеню його діаметра і першому ступеню довжини. Тому для зниження втрат енергії при частих пусках і гальмуваннях двигуни краново-металургійних серій і тягові виготовляють з видовженими роторами (якорями) зменшеного діаметра. З метою рівномірнішого перерозподілу втрат між ротором і статором обмотки роторів асинхронних короткозамкнених електродвигунів мають підвищений опір.

Крім загальних даних, на паспортах таких ЕД вказується номінальна відносна тривалість вмикання їх в електромережу $TB_n = 15, 25, 40, 60 \%$.

Номінальні дані двигунів, призначених для повторно-короткочасного режиму, в каталогах наводяться при стандартних тривалостях вмикання. Тривалість циклу не повинна перевищувати 10 хв. Основним режимом S3 сучасних двигунів є режим при $TB = 40 \%$.

Стандартна навантажувальна діаграма ЕД, що працює в повторно-короткочасному режимі, характеризується величиною регулярного навантаження P (рис. 7.11), тривалістю роботи t_p і тривалістю паузи t_o . Навантаження двигуна може бути задане величиною потужності P , моменту M або струму I . Крім того, режим характеризується тривалістю вмикання TB , яка визначається із залежності (7.23).

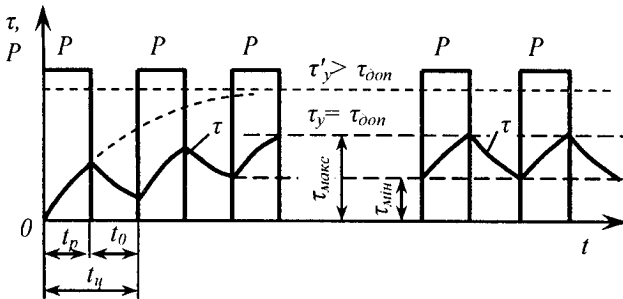


Рис. 7.11. Навантажувальна діаграма і зміна температури ЕД при повторно-короткочасному режимі роботи

Із графіка (рис. 7.11) видно, що при роботі ЕД в повторно-короткочасному режимі зміна температури його обмоток описується відрізками експоненціальних кривих. Після роботи на протязі $t > 4T_n$ процес нагрівання можна вважати квазіусталеним, тобто, перевищення температури в наступних циклах буде змінюватися від максимального значення $\tau_{\max}$ в кінці періоду навантаження до мінімального значення $\tau_{\min}$ в кінці паузи.

Практично повторною температурою будь-якої частини електричної машини при повторно-короткочасному режимі або в переміжному режимі називається температура цієї частини в кінці робочого періоду або в кінці паузи, зміна якої від одного робочого періоду до другого не перевищує 2°C за 1 годину при умові, що навантаження електричної машини за час робочих циклів, а також тривалість вмикання або тривалість навантаження і температура навколишнього середовища залишаються практично незмінними. Потужність двигуна вважається вірно вибраною за умовами нагрівання, якщо $\tau_{\max}$ дорівнює допустимому перевищенню температури $\tau_{\text{дон}}$.

Навантаження ЕД в межах циклу повторно-короткочасного режиму роботи часто не є сталим. В такому випадку реальна діаграма навантаження замінюється еквівалентною зі сталими потужністю, моментом або струмом з відповідними тривалостями роботи і паузи. Для її побудови необхідно знайти еквівалентні значення потужності, (моменту, струму), тривалості роботи, і тривалості паузи. У тому випадку, коли із зміною навантаження змінюється частота обертання і, як наслідок, тепловіддача двигуна, еквівалентну потужність визначають за формулою:

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i \frac{\omega_{ном}}{\omega_i})^2 t_{pi}}{\sum_{i=1}^m \beta_i t_{pi}}}, \quad (7.94)$$

де m — кількість робочих ділянок у циклі.

Еквівалентні значення тривалості роботи $t_{p,e}$ і паузи $t_{0,p}$ визначаються за виразами:

$$t_{p,e} = \sum_{i=1}^m t_{pi}, \quad (7.95)$$

$$t_{0,e} = \sum_{i=1}^n t_{0i}, \quad (7.96)$$

де n — кількість пауз у циклі.

Номинальна потужність спеціального двигуна при фактичній тривалості вмикання, яка дорівнює одному із стандартних значень ($TB_\phi = TB_{cm}$), вибирається за умовою:

$$P_{ном} \geq P_e, \quad (7.97)$$

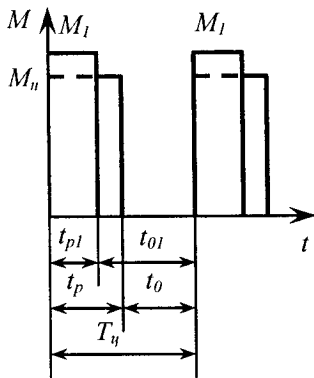


Рис. 7.12. Розрахункові графіки моменту при повторно-короткочасному режимі

де P_e — еквівалентна потужність навантаження, визначена за навантажувальною діаграмою.

Якщо фактична тривалість вмикання відрізняється від стандартної, то потрібен перерахунок допустимої потужності двигуна.

Приймемо, що M_1, t_{p1}, t_{01} (рис. 7.12), відповідають реальній діаграмі навантаження з реальною TB_ϕ , а $M_{ном}, t_p, t_0$ — стандартному $TB_{ст}$.

З рівності середніх втрат потужності знаходимо, що середнє перевищення температури ЕД в нестандартному циклі не буде перевищувати допустиме, якщо середні втрати потужності в двигуні при роботі з фактичним навантаженням ΔP_ϕ не будуть перевищувати середніх втрат при номінальному режимі $\Delta P_{ном}$:

$$\frac{\Delta P_{\text{I}} t_{p1}}{t_{p1} + t_{01}} \leq \frac{\Delta P_{\text{ном}} t_p}{t_p + t_0}, \quad (7.98)$$

або

$$\Delta P_{\phi} TB_{\phi} \leq \Delta P_{\text{ном}} TB_{\text{ном}}. \quad (7.99)$$

Таким чином, умова перевірки потужності двигуна за методом середніх втрат запишеться:

$$\Delta P_{\text{ном}} \geq \Delta P_{\phi} \frac{TB_{\phi}}{TB_{\text{ном}}}. \quad (7.100)$$

Перевірку попередньо вибраного двигуна можна зробити і за методом еквівалентних величин. Втрати потужності ΔP можна виразити через постійні ΔP_c і змінні $\Delta P_{v.\text{ном}} \left(\frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2$ складові. Тоді вираз (7.97) запишеться:

$$\Delta P_c + \Delta P_{v.\text{ном}} \geq \left[\Delta P_c + \Delta P_{v.\text{ном}} \left(\frac{I_{\phi}}{I_{\text{ном}}} \right)^2 \right] \frac{TB_{\phi}}{TB_{\text{ст}}}. \quad (7.101)$$

Після перетворень одержимо умови для перевірки попередньо вибраного двигуна за струмом:

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{\alpha(TB_{\text{ст}} - TB_{\phi}) + TB_{\text{ст}}}}, \quad (7.102)$$

де $I_{\text{ном}}$ — номінальний струм двигуна; I_{ϕ} — фактичний струм навантаження; $\alpha = \Delta P_c / \Delta P_{v.\text{ном}}$ — відношення постійних втрат потужності у двигуні до номінальних змінних.

Згідно з методикою, описаною раніше, можна одержати аналогічні співвідношення між моментами і потужностями:

$$M_{\text{ном}} \geq M_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{\alpha(TB_{\text{ст}} - TB_{\phi}) + TB_{\text{ст}}}}. \quad (7.103)$$

$$P_{ном} \geq P_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{\alpha(TB_{ст} - TB_{\phi}) + TB_{ст}}}. \quad (7.104)$$

Якщо фактична тривалість вмикання незначно відрізняється від стандартної, то величиною $\alpha(TB_{ст} - TB_{\phi})$ можна знехтувати. Тоді формули (7.102)—(7.104) матимуть простіший вигляд:

$$I_{ном} \geq I_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{TB_{ном}}}. \quad (7.105)$$

$$M_{ном} \geq M_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{TB_{ном}}}. \quad (7.106)$$

$$P_{ном} \geq P_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{TB_{ном}}}. \quad (7.107)$$

Виразами (7.102) і (7.103) можна користуватися також для попереднього розрахунку потужності двигуна.

Вибрати двигун за потужністю можна графічним методом (рис. 7.13). Якщо розрахунками встановлено, що еквівалентна потужність навантаження $P_e = 7,5$ кВт при фактичній $TB_{\phi} = 36\%$ (точка А на рис. 7.13), то, як видно з графіка, потрібно вибрати двигун АИРСІ32S4, номінальна потужність якого при стандартній $TB_{ст} = 40\%$ дорівнює 8,5 кВт.

Методика вибору потужності спеціального двигуна для роботи в повторно-короткочасному режимі така. За навантажувальною діаграмою робочої машини, поданою у вигляді $M_c = f(t)$ або $P_c = f(t)$ визначають середній статичний момент $M_{с.ср}$ або статичну потужність $P_{с.ср}$ за робочі періоди циклу та фактичну тривалість вмикання двигуна TB_{ϕ} .

З каталогу попередньо вибирають двигун за умовами (7.41) або (7.42) та $TB_{ст} \geq TB_{\phi}$. Попередньо двигун можна вибрати також за аналогією з іншими робочими машинами.

Користуючись каталожними даними вибраного двигуна, навантажувальною діаграмою робочої машини і зведенням до вала двигуна моментом інерції системи електродвигун–робоча машина, розрахо-

вують перехідні процеси і будують навантажувальну діаграму двигуна $I = f(t)$ або $M = f(t)$.

Оскільки повторно-короткочасний режим характеризується частими пусками і гальмуваннями, при яких частота обертання змінюється в широких межах, тепловіддача двигуна не залишається постійною. Тому перевірка вибраного двигуна за його навантажувальною діаграмою $P = f(t)$ без додаткового її коригування не дає достатньої точності.

Навантажувальну діаграму двигуна можна одержати також експериментально.

За навантажувальною діаграмою двигуна визначають фактичні значення тривалості вмикання TB_{ϕ} , середніх втрат $P_{\text{ср.}\phi}$ або еквівалентні величини ($I_{\text{е.}\phi}$, $M_{\text{е.}\phi}$).

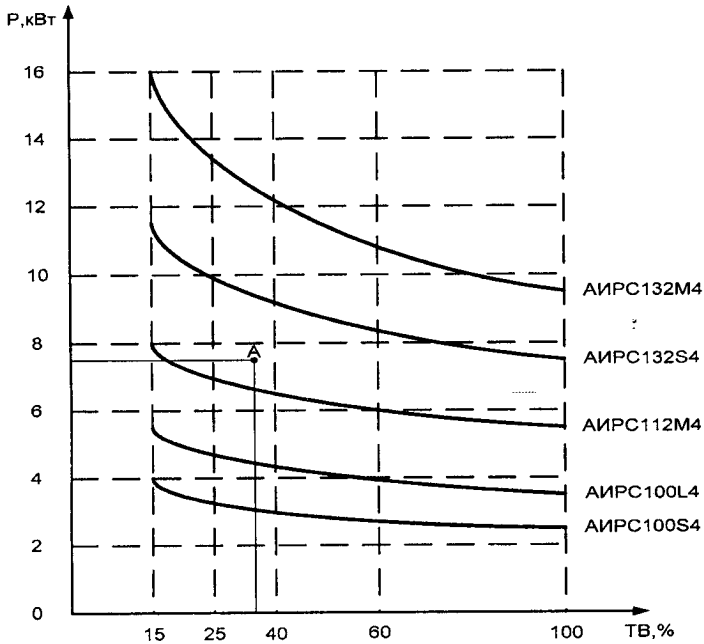


Рис. 7.13. Залежності потужності двигунів серії АИРС від тривалості вмикання

Користуючись залежностями (7.100), (7.102–7.104), перевіряють відповідність вибраного двигуна. При невиконанні вказаних умов

вибирають двигун іншої потужності та перевіряють його за умовами пуску і на перевантажувальну здатність. При невеликому значенні електромеханічної сталої часу системи електродвигун — робоча машина або при слабких коливаннях навантаження навантажувальні діаграми робочої машини і двигуна практично збігаються. В такому випадку потреба у побудові навантажувальної діаграми двигуна відпадає, а двигун вибирають і перевіряють за навантажувальною діаграмою робочої машини з урахуванням передаточних чисел і ККД передач.

При цьому слід впевнитися, що при розрахунках можна користуватися методом еквівалентного моменту або еквівалентної потужності.

У повторно-короткочасному режимі можуть працювати двигуни, призначені для роботи в тривалому режимі. Оскільки в період паузи втрати потужності у двигуні відсутні, то в робочий період навантаження на нього можна збільшити порівняно з тривалим режимом.

Двигун буде повністю використаний за нагрівостійкістю, коли втрати енергії за період циклу у повторно-короткочасному режимі дорівнюють втратам за такий же період у тривалому режимі роботи з номінальним навантаженням:

$$\Delta P_{пк} t_{ц} = \Delta P_{ном} t_{ц}. \quad (7.108)$$

У повторно короткочасному режим втрати енергії у двигуні мають місце лише в робочий період, тобто:

$$\Delta P_{пк} t_{ц} = \left[\Delta P_c + \Delta P_{в.ном} \left(\frac{I_{пк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 \right] t_p, \quad (7.109)$$

де $I_{пк}$ — струм при повторно-короткочасному режимі; $I_{ном.тр}$ — номінальний струм тривалого режиму.

При роботі в усталеному тривалому режимі вся енергія, що втрачається у двигуні, віддається в навколишнє середовище. Тоді праву частину рівняння (7.108) можна записати так:

$$\Delta P_{ном} t_{ц} = \Delta P_{ном} t_p + \Delta P_{ном} \beta_0 t_0 = (\Delta P_c + \Delta P_{в.ном}) (t_p + \beta_0 t_0), \quad (7.110)$$

де β_0 — коефіцієнт погіршення тепловіддачі в період паузи.

Прирівняємо рівняння (7.109) і (7.110):

$$\left[\Delta P_c + \Delta P_{в.ном} \left(\frac{I_{пк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 \right] t_p = (\Delta P_c + \Delta P_{в.ном}) (t_p + \beta_0 t_0). \quad (7.111)$$

Розділивши (7.111) на t_p і замінивши відношення постійних до змінних втрати через α одержимо:

$$\alpha + \left(\frac{I_{нк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 = (\alpha + 1) \left(1 + \beta_0 \frac{t_0}{t_p} \right). \quad (7.112)$$

Щоб знайти залежність струму від тривалості вмикання ТВ, рівняння (7.112) запишемо так:

$$\alpha + \left(\frac{I_{нк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 = (\alpha + 1) \left(1 + \beta_0 \frac{t_0 + t_p - t_p}{t_p} \right), \quad (113)$$

або після перетворень:

$$\alpha + \left(\frac{I_{нк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 = (\alpha + 1) \left[1 + \beta_0 \left(\frac{1}{TB} - 1 \right) \right], \quad (114)$$

звідки

$$I_{ном.тр} = I_{нк} \sqrt{\frac{TB}{TB + \beta_0(1 + \alpha)(1 - TB)}}. \quad (7.115)$$

Значення номінального струму для тривалого режиму (7.115) порівнюють із номінальним струмом вибраного двигуна за умовою:

$$I_{ном.тр} \geq I_{дв.ном}. \quad (7.116)$$

Якщо знехтувати постійними втратами, то для двигунів з незалежним охолодженням ($\beta_0 = 1$) рівняння (7.115) запишеться так:

$$I_{ном.тр} = I_{нк} \sqrt{TB}. \quad (7.117)$$

Користуючись допущеннями при виведенні рівнянь (7.63) і (7.67), одержують залежності для вибору двигуна за моментом або потужністю.

7.7.1. Визначення допустимого числа вмикань за годину асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором

При значній частоті вмикання АД втрати в перехідних процесах викликають інтенсивне нагрівання ЕД. Особливо це важливо для АД

з короткозамкненим ротором, у якого вся енергія втрат цілком виділяється в об'ємі ЕД.

Найважчими з точки зору нагрівання ЕД є режими S5 (повторно-короткочасний режим з частими пусками і електричним гальмуванням) і S7 (переміжний режим з частими реверсами).

Показником, що визначає роботу АД з короткозамкненим ротором в умовах безперервних пусків і гальмувань, є так зване допустиме число вмикань, при якому середнє перевищення температури після значного числа циклів дорівнює допустимому.

Для розрахунку допустимого числа вмикань за годину скористаємося методом середніх втрат як найбільш точним при аналізі теплових процесів в ЕД. Допустимим вважається таке число вмикань ЕД за годину, при якому середнє перевищення температури через час $t > 4T_n$ від початку роботи дорівнює допустимому, тобто ЕД повністю використовується за нагрівостійкістю.

Для визначення допустимого числа вмикань за годину умовимося (рис. 7.14), що тривалість робочого циклу складається із тривалості пуску t_n , роботи при усталеному режимі t_y , гальмування t_z і паузи t_0 , тобто:

$$t_y = t_n + t_y + t_z + t_0,$$

або:

$$t_y = \frac{3600}{h}, \quad (7.118)$$

де h — фактична кількість вмикань за годину.

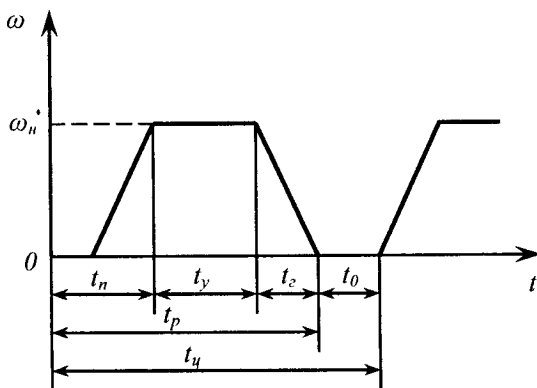


Рис. 7.14. Зміна швидкості обертання двигуна за робочий цикл при повторно-короткочасному режимі роботи

Із виразу (7.118) визначають:

$$t_y = \frac{3600}{h} TB - (t_n + t_z) \quad \text{і} \quad t_0 = \frac{3600}{h} (1 - TB), \quad (7.119)$$

де $\frac{3600}{h} TB$ — тривалість робочого періоду в кожному циклі.

Втрати енергії в АД за цикл складаються з пускових втрат ΔA_n , втрат гальмування ΔA_z і втрат в усталеному режимі роботи при i -тому навантаженні $\Delta A_y = \Delta P_i t_y$. Віддача енергії в навколишнє середовище за час циклу складається з втрат при роботі в усталеному режимі з номінальним навантаженням $\Delta P_{ном} t_y$, під час паузи $\beta_0 \cdot \Delta P_{ном} \cdot t_0$ і за час пуску і гальмування $\Delta P_{ном} \cdot (t_n + t_z) \cdot \left(\frac{1 + \beta_0}{2} \right)$, де $\frac{1 + \beta_0}{2}$ — середнє значення коефіцієнта погіршення тепловіддачі.

Рівняння теплового балансу в усталеному режимі роботи ЕД з гранично допустимою кількістю вмикань за годину матиме такий вигляд:

$$\Delta A_n + \Delta P_i t_y + \Delta A_z = \Delta P_{ном} (t_n + t_z) \left(\frac{1 + \beta_0}{2} \right) + \Delta P_{ном} t_y + \beta_0 \Delta P_{ном} t_0. \quad (7.120)$$

Враховуючи (7.119) і (7.120), одержимо:

$$h_{дон} = \frac{3600 [(\Delta P_{ном} - \Delta P_i) TB + \Delta P_{ном} \beta_0 (1 - TB)]}{\Delta A_n + \Delta A_z - (t_n + t_z) \left[\Delta P_i + \Delta P_{ном} \frac{\beta_0 - 1}{2} \right]}. \quad (7.121)$$

Знехтуємо третім членом суми в знаменнику, що становить (2...4) % від суми перших двох складових та одержимо:

$$h_{дон} \approx 3600 \cdot \frac{\Delta P_{ном} \beta_0 \cdot (1 - TB) + TB \cdot (\Delta P_{ном} - \Delta P_i)}{0,97 \cdot (\Delta A_n + \Delta A_z)}. \quad (7.122)$$

Якщо в усталеному режимі АД працює з номінальним навантаженням, то $\Delta P_{ном} = \Delta P_i$, тоді:

$$h_{\text{доп}} \approx 3600 \cdot \frac{\Delta P_{\text{ном}} \beta_0 (1 - TB)}{0,97 \cdot (\Delta A_n + \Delta A_z)}. \quad (7.123)$$

Наведені вирази показують, що допустима кількість вмикань за годину залежить від навантаження, тривалості вмикання ТВ, коефіцієнта погіршення тепловіддачі β_0 і втрат енергії в перехідних процесах $\Delta A_n + \Delta A_z$. Допустиму кількість вмикань можна збільшити, використовуючи такі можливості:

1) зменшити втрати ΔA_n і ΔA_z , тобто знизити запас кінетичної енергії в системі ЕД-РМ за рахунок вибору ЕД з меншим значенням моменту інерції. Крім того, необхідно застосовувати такий вид гальмування, при якому втрати ЕЕ мінімальні;

2) збільшення тепловіддачі, особливо в період паузи. Якщо використовувати незалежну вентиляцію, то можна довести значення коефіцієнта β_0 до одиниці;

3) збільшити інтенсивність тепловіддачі за рахунок вибору ЕД, ізоляція обмоток якого виконана із особливо теплостійких матеріалів.

Допустиму кількість вмикань АД з короткозамкненим ротором визначають за спрощеною формулою:

$$h_{\text{доп}} = 2250 \frac{(1 - TB)(1 + \alpha)}{K_i^2 t_n}, \quad (7.124)$$

де t_n — тривалість пуску; K_i — кратність пускового струму; TB — відносна тривалість вмикання; α — коефіцієнт втрат потужності.

7.8. Визначення потужності двигуна для регульованого електропривода

В регульованому ЕП потужність ЕД повинна бути такою, щоб навантаження, створюване робочою машиною, при зміні кутової швидкості не перевищувало допустимого за умовами нагрівання. Це досягається вибором відповідного способу регулювання швидкості, при якому виконується дана умова.

Відомо, що швидкість ЕД можна регулювати у двох зонах: перша зона — регулювання з постійним моментом; друга зона — регулювання з постійною потужністю. В першій зоні ДПС регулюють зміною опору кола якоря та зміною напруги, АД — зміною опору

кола ротора, СД — зміною напруги на статорі. Регулювання у другій зоні застосовують для ДПС ослабленням магнітного потоку, АД — зміною числа пар полюсів. Двоступенне регулювання використовують у каскадних схемах.

Розглянемо особливості вибору потужності двигуна при регулюванні в обох зонах. При визначенні потужності двигуна будемо вважати, що на кожній регульовальній характеристиці двигун працює тривалий час і нагрівається до усталеної температури, яка не перевищує допустимої.

1. При навантаженні з $M_c = \text{const}$. При такому характері навантаження в діапазоні зміни кутової швидкості від мінімальної $\omega_{\min}$ до максимальної $\omega_{\max}$ момент навантаження постійний, а потужність навантаження $P_c = M_c \omega$ збільшується при збільшенні швидкості за лінійним законом. Оцінимо два способи регулювання швидкості: при сталому моменті двигуна і при сталій потужності двигуна.

а) Регулювання швидкості зі сталим моментом двигуна найбільш доцільне, коли $M_{\text{ном}} = M_c$. Максимальна потужність у цьому випадку буде при найбільшій кутовій швидкості $\omega_{\max}$ тобто $P_{c, \max} = M_c \omega_{\max}$. Цей спосіб забезпечує регулювання швидкості вниз від номінальної. Тому номінальна швидкість двигуна повинна бути максимальною у заданому діапазоні регулювання, тобто $\omega_{\text{ном}} = \omega_{\max}$. В цьому випадку необхідна розрахункова потужність ЕД буде:

$$P_{\text{роз}} = P_{c, \max} = M_c \omega_{\max} . \quad (7.125)$$

Номінальна потужність ЕД повинна бути рівною або трохи більшою за розрахункову:

$$P_{\text{ном}} \geq P_{\text{роз}} . \quad (7.126)$$

Регулювання швидкості при сталому моменті для даного характеру навантаження є раціональним, оскільки ЕД на всіх швидкостях працює в нормальному тепловому режимі.

б) Спосіб регулювання швидкості при сталій потужності здійснюється регулюванням швидкості вгору від номінальної, тому за номінальну швидкість ЕД повинна бути прийнята мінімальна швидкість в діапазоні, тобто $\omega_{\text{ном}} = \omega_{\min}$. Постільки номінальна потужність ЕД повинна бути рівною або трохи більшою максимальної по-

тужності навантаження $P_c = M_c \omega_{\max}$, то вибраний із каталогу ЕД потужністю $P_{\text{ном}} \geq P_{c.\max}$ повинен мати номінальний момент

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{P_{c.\max}}{\omega_{\min}} = M_c \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = M_c D, \quad (7.127)$$

де $D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ — діапазон регулювання швидкості.

Із (7.127) видно, що номінальний момент ЕД повинен в D разів перевищувати момент навантаження. Двигун використовується на повну потужність тільки при максимальній швидкості. Отже, в більшій частині діапазону регулювання ЕД не повністю використовується за нагріванням. Внаслідок цього завищуються його габаритні розміри і маса, які визначаються номінальним моментом ЕД. Коли $M_c = \text{const}$, а $P_c = \text{var}$, то регулювання в другій зоні неекономічне. Досягти зменшення габаритних розмірів і маси двигуна можна вибором його з більшою номінальною швидкістю та встановленням редуктора.

2. У приводах машин, в яких при регулюванні $P_c = \text{const}$, а $M_c = \text{var}$, можливий той самий вибір способів регулювання із сталим моментом або із сталою потужністю.

а) При роботі із сталим моментом регулювання відбувається вниз від номінальної швидкості; а за номінальну швидкість ЕД приймають максимальну швидкість в даному діапазоні її зміни, тобто $\omega_{\text{ном}} = \omega_{\max}$. Максимальний момент, який повинен розвивати двигун при $P_c = \text{const}$, відповідає мінімальній швидкості:

$$M_{c.\max} = \frac{P_c}{\omega_{\min}} = M_{\text{ном}}. \quad (7.128)$$

Тому номінальна потужність двигуна визначається

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = P_c \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = P_c \cdot D, \quad (7.129)$$

тобто вона повинна в D разів бути більшою за потужність навантаження P_c . Це свідчить про те, що на всіх швидкостях, крім мінімальної, ЕД буде недовантаженим за нагріванням. За тих самих умов

($P_c = \text{const}$) регулювання швидкості при сталій потужності забезпечує регулювання швидкості вгору від номінальної. В цьому випадку за номінальну приймають мінімальну швидкість у заданому діапазоні, тобто $\omega_{\text{ном}} = \omega_{\text{мін}}$, а номінальний момент:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_c}{\omega_{\text{мін}}} = \frac{P_c}{\omega_{\text{ном}}}. \quad (7.130)$$

Номінальна потужність двигуна, який вибирається:

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = P_c \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = P_c, \quad (7.131)$$

тобто вона дорівнює потужності навантаження. Двигун повністю буде завантаженим на всіх швидкостях.

Із викладеного видно, що для того, щоб двигун мав мінімальні габаритні розміри і масу та повністю використовувався за нагріванням, необхідно, щоб спосіб регулювання його швидкості за показником допустимого навантаження відповідав залежності статичного навантаження від швидкості.

Умови охолодження погіршуються при зниженні швидкості. Тому при невеликих швидкостях двигуна допустимі струм і момент повинні бути зменшені, а номінальний момент двигуна — не меншим від розрахункового.

7.9. Приклади

Приклад 1. За даними навантажувальної діаграми робочої машини вибрати за потужністю і перевірити 4-полосний електродвигун серії АІР для тривалого режиму роботи при змінному навантаженні. Момент зрушення робочої машини $M_{c0} = 66 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Рівень напруги на затискачах двигуна в момент пуску $K_{u \text{ пус}} = 0,9U_{\text{ном}}$, рівень напруги при роботі $K_{u \text{ роб.}} = 0,95U_{\text{ном}}$.

7.2. Навантажувальна діаграма робочої машини

Навантаження на валу ЕД, Р, кВт	4,0	7,0	5,0	3,0	4,0	3,0
Тривалість періодів роботи, t, с	15	20	25	10	15	20

Розв'язок

1. За формулою (7.41) визначаємо середню розрахункову потужність на валу:

$$P_{роз.дв} \geq 1,2 \frac{\sum_1^n P_i \cdot t_i}{\sum_1^n t_i} = 1,2 \cdot \frac{(4 \cdot 15 + 7 \cdot 20 + 5 \cdot 25 + 3 \cdot 10 + 4 \cdot 15 + 3 \cdot 20)}{15 + 20 + 25 + 10 + 15 + 20} = 5,4 \text{ кВт.}$$

За умовою $P_{ном} \geq P_{роз.дв}$ попередньо приймаємо АД серії 5АМ112М4 з номінальними даними: $P_{ном} = 5,5$ кВт; $\eta_{ном} = 86\%$; $n_{ном} = 1440 \text{ об/хв}$; $M_n^* = 2,6$; $M_k^* = 2,9$; клас ізоляції F ($\tau_{доп} = 105^\circ\text{C}$); момент інерції ротора $J_{рот} = 0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

2. Перевірка двигун на нагрівання під час роботи методом середніх втрат потужності:

3.1. За формулою $K_{3,i} = P_i/P_{ном}$ визначаємо коефіцієнти завантаження в кожному періоді роботи двигуна.

3.2. За залежностями $\eta = f(K_3)$, що наведені в каталожних даних двигунів серії 5АМ, визначаємо ККД двигуна при i -х завантаженнях.

3.2. За формулою $\Delta P_i = \frac{P_i(1 - \eta_i)}{\eta_i}$ визначаємо втрати потужності

в двигуні при i -му навантаженні.

Результати розрахунків заносимо до табл. 7.3.

7.3. Розрахунок втрат потужності в двигуні 5АМ112М4

P_i , кВт	4,0	7,0	5,0	3,0	4,0	3,0
K_3	0,73	1,27	0,91	0,55	0,73	0,55
η , %	86,4	84,8	86,2	85,7	86,4	85,7
ΔP_i , кВт	0,63	1,25	0,55	0,5	0,63	0,5

3.3. Визначаємо середні втрати потужності в двигуні:

$$\Delta P_{ср} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i \cdot t_i}{n \sum_1^n t_i} = \frac{0,63 \cdot 15 + 1,25 \cdot 20 + 0,55 \cdot 25 + 0,5 \cdot 10 + 0,63 \cdot 15 + 0,5 \cdot 20}{15 + 20 + 25 + 10 + 15 + 20} = 0,69 \text{ кВт}$$

3.4. Номінальні втрати потужності в двигуні:

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном}(1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} = \frac{5,5(1 - 0,86)}{0,86} = 0,9 \text{ кВт.}$$

3.5. Номінальні втрати в двигуні більші за середні, значить, двигун під час роботи перегріватися не буде.

4. Перевірка двигуна на нагрівання під час роботи методом еквівалентної потужності.

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2 \cdot t_i}{\sum_1^n t_i}} = \sqrt{\frac{4^2 \cdot 15 + 7^2 \cdot 20 + 5^2 \cdot 25 + 3^2 \cdot 10 + 4^2 \cdot 15 + 3^2 \cdot 20}{15 + 20 + 25 + 10 + 15 + 20}} = 4,73 \text{ кВт}.$$

Оскільки $P_{\text{дв. ном}} = 5,5 \text{ кВт} > P_e = 4,73 \text{ кВт}$, то двигун під час роботи перегріватися не буде.

5. Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{n_{\text{ном}}} = 9550 \frac{5,5}{1440} = 36,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Перевірка двигуна на можливість пуску робочої машини:

$$M_{n.(u)} = K_u^2 M_{\text{ном}} M_n^* = 0,9^2 \cdot 36,5 \cdot 2,6 = 77 \text{ Н} \cdot \text{м} > M_{c.0} = 66 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де $M_{n.(u)}$ — пусковий момент ЕД при зниженій напрузі живлення.

Умова (7.54) виконується, значить, двигун запуститься.

7. Перевірка двигуна на перевантажувальну здатність:

7.1. Максимальний момент двигуна при зниженій напрузі:

$$M_{\text{макс.(u)}} = K_{\text{роб.}}^2 M_{\text{ном}} M_k^* = 0,95^2 \cdot 36,5 \cdot 2,9 = 95,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7,2 Максимальний момент навантаження:

$$M_{\text{с.макс}} = 9550 \frac{P_{\text{с.макс}} \cdot 10^3}{n_{\text{ном}}} = 9550 \frac{7,0}{1440} = 46,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Висновок: Оскільки $M_{\text{макс.(u)}} = 95,5 \text{ Н} \cdot \text{м} > M_{\text{с.макс}} = 46,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, то перевантажувальна здатність двигуна достатня.

Приклад 2. Вибрати 6-полюсний спеціальний АД для короткочасного режиму роботи, якщо $P_k = 1,6 \text{ кВт}$, $t_k = 12 \text{ хв}$.

Розв'язок

1. З каталогу попередньо вибираємо двигун АИР90L6КР1У3 з такими номінальними даними: $P_{\text{ном}} = 2,2 \text{ кВт}$, $t_{\text{кат}} = 7 \text{ хв}$.

2. Перевірка вибраного двигуна на нагрівання під час роботи:

2.1. Розрахункова потужність двигуна:

$$P_{роз} = P_{\kappa} \sqrt{\frac{t_{\kappa}}{t_{\kappa,кат}}} = 1,6 \sqrt{\frac{12}{7}} = 2,1 \text{ кВт}.$$

Висновок: Оскільки $P_{ном} = 2,2 \text{ кВт} > P_{роз} = 2,1 \text{ кВт}$, то за час короткочасної роботи двигун не перегріватиметься.

Приклад 3. Вибрати шестиполосний АД, призначений для тривалого режиму роботи, для роботи в короткочасному режимі, якщо $P_{\kappa} = 2 \text{ кВт}$, $t_{\kappa} = 10 \text{ хв}$. Сталу часу нагрівання двигуна прийняти 25 хв, відношення постійних втрат потужності до номінальних змінних $\alpha = 0,6$.

Розв'язок.

1. Коефіцієнт термічного перевантаження:

$$p_t = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_n}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{10}{25}}} = 3,03.$$

2. Коефіцієнт механічного перевантаження:

$$p_m = \sqrt{(1 + \alpha)p_t - \alpha} = \sqrt{(1 + 0,6) \cdot 3,03 - 0,6} = 1,9.$$

3. Розрахункова потужність двигуна тривалого режиму роботи:

$$P_{роз} = P_{\kappa} / p_m = 2,0 / 2,06 = 0,97 \text{ кВт}.$$

4. З каталогу вибираємо двигун АИР80В6У3 з такими номінальними даними: $P_{ном} = 1,1 \text{ кВт}$; $n_{ном} = 920 \text{ об/хв}$; $M_{\kappa}^* = 2,2$.

5. Вибраний двигун перевіримо на перевантажувальну здатність.

5.1. Номінальний момент двигуна:

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{n_{ном}} = 9550 \frac{1,1}{920} = 11,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5.2. Максимальний момент двигуна при рівні напруги $U = 0,95 U_{ном}$:

$$M_{макс.(u)} = K_{u,роб}^2 M_{ном} M_{\kappa}^* = 0,95^2 \cdot 11,4 \cdot 2,2 = 22,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5.3. Максимальний момент навантаження:

$$M_{с.макс} = 9550 \frac{P_{с.макс} \cdot 10^3}{n_{ном}} = 9550 \frac{2,0}{920} = 20,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Оскільки $M_{\max.(u)} > M_{с.макс.}$, то перевантажувальна здатність двигуна достатня.

Приклад 4. Розрахувати потужність і вибрати 8-полюсний двигун компресора холодильної машини за графіком навантаження, в якому:

$$P_1 = 10 \text{ кВт}; t_p = 3 \text{ хв}; t_o = 7 \text{ хв}; t_y = 10 \text{ хв}.$$

Розв'язок

1. Фактична тривалість вмикання двигуна:

$$TB = \frac{t_p}{t_p + t_o} = \frac{3}{3 + 7} = 0,3.$$

2. Перерахунок потужності навантаження на стандартну тривалість вмикання $TB = 0,4$:

$$P_{0,4} = P_1 \sqrt{\frac{TB_\phi}{TB_{ном}}} = 10 \cdot \sqrt{\frac{0,3}{0,4}} = 8,66 \text{ кВт}.$$

Вибираємо двигун типу ЧАС160S8УЗ з такими номінальними даними: $P_{ном} = 9,0 \text{ кВт}$; $TB_{ном} = 0,4$; $M_\kappa^* = 2$; $n_{ном} = 678 \text{ об/хв}$.

3. Перевірка двигуна на перевантажувальну здатність.

3.1. Максимальний момент двигуна:

$$M_\kappa = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} M_\kappa^* = 9550 \frac{9 \cdot 2}{678} = 253 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3.2. Максимальний момент, що відповідає потужності P_1 графіка навантаження:

$$M_{\max.граф} = 9550 \frac{10}{678} = 140 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вибраний двигун забезпечить перевантажувальну здатність, оскільки $M_\kappa > M_{\max.граф}$.

Приклад 5. Визначити допустиме число вмикань за годину АД серії АИР90L4 в повторно-короткочасному режимі роботи з номінальним навантаженням. Тривалість циклу t_η складається із: часу пус-

ку $t_n = 5$ с, роботи при усталеній частоті обертання $t_p = 80$ с, гальмування $t_z = 2$ с, паузи $t_o = 13$ с. Технічні дані двигуна: $P_{ном} = 2,2$ кВт; $\eta_{ном} = 81$ %; $n_{ном} = 1400$ об/хв. Приймаємо величину коефіцієнта погіршення охолодження $\beta_o = 0,4$.

Розв'язок.

1. Тривалість циклу:

$$t_{\text{ц}} = t_n + t_p + t_z + t_o = 5 + 80 + 2 + 13 = 100 \text{ с.}$$

2. Фактична тривалість вмикання:

$$TB_{\phi} = \frac{t_n + t_p + t_z}{t_n + t_p + t_z + t_o} = \frac{5 + 80 + 2}{5 + 80 + 2 + 13} = 0,87.$$

3. Втрати потужності у двигуні при номінальному навантаженні:

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} \left(\frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}} \right) = 2,2 \left(\frac{1 - 0,81}{0,81} \right) = 0,52 \text{ кВт.}$$

4. Втрати енергії при пуску двигуна:

$$\Delta A_n = \Delta P_{ном} t_n \left(\frac{1 + \beta_o}{2} \right) = 0,52 \cdot 5 \cdot \frac{1 + 0,4}{2} = 1,82 \text{ кВт} \cdot \text{с.}$$

5. Втрати енергії при гальмуванні двигуна:

$$\Delta A_z = \Delta P_{ном} t_z \left(\frac{1 + \beta_o}{2} \right) = 0,52 \cdot 2 \cdot \frac{1 + 0,4}{2} = 0,73 \text{ кВт} \cdot \text{с.}$$

6. Допустиме число вмикань за годину:

$$h_{дон} = 3600 \frac{\Delta P_{ном} (1 - TB_{\phi}) \beta_o}{\Delta A_n + \Delta A_z} = 3600 \frac{0,52 \cdot (1 - 0,87) \cdot 0,4}{1,82 + 0,73} \approx 38 \text{ 1/год.}$$

7. Фактичне число вмикань за годину:

$$h_{\phi} = 3600 / t_{\text{ц}} = 3600 / 100 = 36 \text{ 1/год.}$$

Висновок: двигун під час роботи не перегріватиметься, оскільки $h_{дон} > h_{\phi}$.

7.10. Питання для самоконтролю

1. Які класи ізоляції сучасних електродвигунів?
2. Яка розрахункова гранична температура охолоджуючого повітря встановлена стандартом?
3. Як визначається допустиме перевищення температури ЕД над температурою охолоджуючого середовища?
4. Які допущення прийнято при виводі рівнянь нагрівання та охолодження ЕД?
5. Які складові входять до рівняння теплового балансу двигуна?
6. Що таке стала часу нагрівання ЕД? Якими способами можна її визначити?
7. Як визначити сталу часу охолодження двигуна?
8. Перерахуйте стандартні режими роботи електродвигунів. Як їх позначають?
9. Якими параметрами характеризується короточасний режим роботи електродвигунів?
10. Якими параметрами характеризується повторно-короточасний режим роботи? Наведіть стандартні значення ТВ.
11. Як вибрати потужність ЕД при тривалому режимі роботи ЕП?
12. За якими показниками перевіряють потужність попередньо вибраного ЕД?
13. Як перевірити попередньо вибраний ЕД методом середніх втрат? методом еквівалентних величин?
14. В яких випадках при перевірці на нагрівання доцільно використовувати метод еквівалентного струму?, еквівалентного моменту?, метод еквівалентної потужності?
15. Який з трьох методів (еквівалентного струму, еквівалентного моменту, еквівалентної потужності) є найбільш універсальним і чому?
16. Як визначити потужність спеціального ЕД для короточасного режиму роботи зі змінним навантаженням?
17. Що таке коефіцієнт термічного перевантаження?, механічного перевантаження? Для чого їх використовують?
18. Як визначити потужність спеціального ЕД для роботи в повторно-короточасному режимі?
19. Які особливості електродвигунів, призначених для повторно-короточасного режиму роботи?
20. Як знайти допустиме число вмикань за годину АД з короткозамкненим ротором при повторно-короточасному режимі роботи?
21. Які особливості вибору потужності двигуна в регульованих електродвигунах?



8. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

8.1. Класифікація електричних апаратів та вимоги до них

Електричні апарати, за допомогою яких виконується замикання та розмикання електричних кіл, називаються комутаційними.

За призначенням і виконуваними функціями апарати поділяють на апарати керування та апарати захисту, а також апарати, які виконують обидві ці функції; обмежуючі апарати, апарати для контролю заданих електричних та неелектричних параметрів, апарати для вимірювання; електричні регулятори.

Якщо в апараті комутація здійснюється шляхом переміщення його контакт-деталей відносно одна одної, то він називається контактним апаратом.

Безконтактним називають електричний апарат, що виконує комутаційну операцію без переміщення і руйнування його деталей (тиристри, транзистори, симістри).

За номінальною напругою електричні апарати поділяють на дві групи: апарати низької напруги (номінальна напруга до 1000 В) та високої напруги (номінальна напруга більше 1000 В).

Крім того, апарати класифікують за родом струму, за ступенем захисту від оточуючого середовища, за захистом від впливу механічних факторів.

Електричні апарати повинні відповідати таким вимогам:

1. В номінальному режимі роботи температура апарата і його деталей не повинні перевищувати допустиму, встановлену нормативними документами.

2. Апарати повинні витримувати струми перевантаження та короткого замикання без пошкоджень.

3. Ізоляція апарата повинна витримувати перенапруги, що можуть виникати при експлуатації, а також мати запас міцності на випадок старіння та внаслідок осадження пилу, бруду та вологи.

4. Контакти апаратів, призначених для вимикання струмів КЗ, повинні бути розраховані на цей режим.

5. Електричні апарати повинні бути надійними в роботі та безпечними для обслуговуючого персоналу.

6. Апарати повинні відповідати екологічним та санітарно-гігієнічним вимогам. При розмиканні електричної дуги не повинно виділятися газів та пилу в кількостях, що шкідливо діють на організм людини. Вібрація та світлові ефекти повинні також бути в допустимих межах.

7. Апарати повинні мати невисокі масові та габаритні показники, невисоку вартість, бути простими за будовою та зручними при монтажі і експлуатації.

8.2. Нормовані параметри електричних апаратів

Стандартами встановлено ряд параметрів електричних апаратів, величини яких нормуються.

1. Номінальна та робоча напруга апарата.

Номінальною напругою називають найбільше значення напруги мережі, для якої апарат призначений.

Номінальною робочою називають напругу мережі, при якій апарат може працювати.

В апаратах, які мають головні кола і кола керування (автоматичні вимикачі, контактори, реле, магнітні пускачі) номінальні напруги головного кола і кола керування можуть бути різними. Так, у автоматичних вимикачів АЕ20М номінальна напруга головного кола 660 В змінного струму, а номінальні напруги розчіплювача мінімальної напруги 127, 220, 380, 660В; незалежного розчіплювача — 24, 36, 127, 220, 380В.

2. Номінальна частота джерела живлення.

В Україні основною частотою мереж змінного струму є 50Гц. Найбільша частина апаратів виготовляється на цю частоту. Крім того є апарати на підвищену частоту 100, 200, 400 Гц. Апарати в експортному варіанті часто виготовляються на частоту 60 Гц. Ряд апаратів (автоматичні вимикачі, кнопкові пости, контактори і т.д.) розраховані на роботу при частоті 50 і 60 Гц.

3. Номінальний струм апарата.

Номінальним струмом апарата є струм, визначений за умовами його нагрівання в основному конструктивному виконанні при роботі в основному номінальному режимі і номінальній напрузі. Стандартом (ГОСТ 6827-76) встановлено ряд номінальних струмів, на які повинно виготовлятися електрообладнання, в тому числі і електричні апарати, який визначається рядом переважаючих чисел R10, одержаним так: $\sqrt[10]{10} = 1.25$. Число 1.25 є множником ряду: 1; 1.25; 1.6; 2.0; 2.5; 3.2; 4; 5; 6.3; 8; 10 і т.д. Номінальні струми деяких апаратів визначаються за рядом R5 із знаменником $\sqrt[5]{10} = 1.6$: 1; 1.6; 2.5; 4; 6.3; 10 і т.д.

4. *Номінальним робочим струмом* називають допустимий струм через апарат в конкретних умовах його роботи, які визначаються ступенем захисту апарата, категорією застосування, режимом роботи, номінальною напругою мережі.

5. Номінальний режим роботи.

Для електричних апаратів встановлено такі номінальні режими роботи (ГОСТ 12434-93): тривалий, переривисто-тривалий, повторно-короткочасний, короткочасний.

Тривалим є режим роботи, при якому температура всіх деталей апарата досягає усталеного значення.

Переривисто-тривалим є режим роботи при номінальному струмі з періодом навантаження без вимикання не більше 8 годин.

Повторно-короткочасним називається режим роботи, при якому періоди роботи з номінальним струмом чергуються з періодами пауз (вимкнення). При цьому в обидва періоди не настає теплового рівноваги апарата. Стандартні значення відносної тривалості вмикання такі: 15; 25; 40 і 60%.

Короткочасним називається режим роботи, при якому періоди роботи з номінальним струмом чергуються з періодами пауз. При цьому в період роботи не настає теплового рівноваги апарата, а в період пауз температура апарата знижується до температури навколишнього середовища. Стандартами встановлено такі тривалості періодів роботи: 5; 10; 15 і 30с та 10; 30; 60 і 90хв.

6. Допустима кількість вмикань за годину.

Зважаючи на велику номенклатуру комутаційних апаратів, стандартами встановлено досить широкий діапазон допустимих частот вмикання за годину: 1; 3; 6; 12; 30; 60; 120; 150; 300; 600; 1200; 1800; 2400; 3600; 6000; 12000; 18000; 24000; 45000; 90000; 180000; 360000.

(Підкреслені значення є переважними). Для контактних комутаційних апаратів допустима кількість не перевищує 3600 за годину.

7. Категорії застосування.

В залежності від умов роботи передбачено такі категорії застосування електричних апаратів (ГОСТ 11206-93)

Рід струму	Категорія застосування	Застосування
Змінний	АС-1	Електричні печі опору, неіндуктивне або слабоіндуктивне навантаження
	АС-2	Пуск і вимикання електродвигунів з фазним ротором, гальмування противмиканням
	АС-3	Прямий пуск електродвигунів з короткозамкненим ротором; вимикання двигунів, що обертаються
	АС-4	Пуск електродвигунів з короткозамкненим ротором; вимикання двигунів із зупиненим ротором або ротором, що повільно обертається; гальмування противмиканням
Змінний	АС-11	Керування електромагнітами змінного струму
	АС-14	Керування слабкими електромагнітними навантаженнями
	АС-15	Керування електромагнітними навантаженнями
	АС-20	Комутація електричних кіл без струму або з незначним струмом
	АС-21	Комутація активних навантажень, в тому числі з помірними перевантаженнями
	АС-22	Комутація змішаних активних та індуктивних навантажень, в тому числі при помірних перевантаженнях
	АС-23	Комутація навантажень двигунів або інших високоіндуктивних навантажень
Змінний і постійний	А	Вимикання електричних кіл в умовах коротких замикань при відсутності селективності за часом відносно послідовно з'єднаних нижчевстановлених апаратів
	В	Вимикання електричних кіл в умовах коротких замикань при наявності селективності за часом відносно послідовно з'єднаних нижчевстановлених апаратів
Постійний	ДС-1	Електричні печі опору, неіндуктивне або малоіндуктивне навантаження
	ДС-2	Пуск електродвигунів з паралельним збудженням і вимикання таких двигунів з якорем, що обертається
Постійний	ДС-3	Пуск електродвигунів з паралельним збудженням, вимикання таких двигунів із зупиненим якорем або якорем, що повільно обертається; гальмування противмиканням

ДС-4	Пуск електродвигунів з послідовним збудженням і вимикання таких двигунів з якорем, що обертається
ДС-5	Пуск електродвигунів з послідовним збудженням, вимикання таких двигунів із зупиненим якорем або якорем, що повільно обертається; гальмування противмиканням
ДС-11	Керування електромагнітами постійного струму
ДС-14	Керування слабкими електромагнітними навантаженнями
ДС-15	Керування електромагнітним навантаженнями
ДС-20	Комутація електричних кіл без навантаження
ДС-21	Комутація активних навантажень, в тому числі з помірними перевантаженнями
ДС-22	Комутація змішаних активних та індуктивних навантажень, у тому числі при помірних перевантаженнях
ДС-23	Комутація високоіндуктивних навантажень

8. Механічна та електрична стійкість проти спрацювань.

Механічна стійкість проти спрацювань визначається кількістю циклів вмикання-вимикання апарата при знеструмленому колі без ремонту і заміни його вузлів та деталей.

Комутаційна стійкість проти спрацювань — це кількість операцій вмикання-вимикання кола з струмом, після якої потрібна заміна контактів.

Гранична механічна стійкість сучасних контакторів досягає 20 млн. циклів, а електрична — 3...5 млн.

9. *Комутаційна здатність* — це гранична величина струму, який може вмикати або вимикати апарат при певній напрузі кола та величині індуктивності навантаження.

Так перемикачі ПКП-25 при $U = 1.1U_n$ та $\cos \varphi = 0.35$ мають комутаційну здатність 10Іном при вмиканні та 8Ін при вимиканні. Гранична вимикаюча здатність автоматичного вимикача ВА51-29-14 з розчіплювачами на 16А — 3кА.

10. *Стійкість проти зовнішніх впливів.* До них відносяться механічні фактори (вібрації, удари) та кліматичні фактори оточуючого середовища.

Механічні фактори нормуються за величинами вібраційних навантажень (діапазон частот, максимальне прискорення та ступінь жорсткості основи, до якої кріпиться апарат).

Під кліматичними факторами розуміють вплив температури, вологості, запиленості, загазованості, сонячної радіації, опадів на

апарати. В типу апарата або його технічній характеристиці обумовлені мікрокліматичні умови, в яких він може працювати: кліматичне виконання (У, УХЛ, Т, О) та категорії розміщення (1,2,3,4,5) (ГОСТ 15150-69), а також захищеність від потрапляння сторонніх предметів та води під оболонку апарата (ГОСТ 14254-96) — IPXX. Причому, чим вищий ступінь захисту апарата, тим у складніших умовах оточуючого середовища він може працювати. Так апарати з ступенем захисту IP54 мають кліматичне виконання і категорію розміщення У1, У2, УХЛ1 тощо.

11. Надійність роботи визначається ймовірністю безвідмовної роботи апарата при певному напруженні до виходу з ладу. Заводи-виготівники в документації вказують гарантійний строк служби апарата при певних обумовлених умовах зберігання, транспортування та експлуатації.

12. Безпека. Електричні апарати повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.007.06-93 «Апарати електричні низької напруги. Вимоги безпеки». Основні вимоги стандарту поширюються на пожежо-, вибухобезпеку та безпечність обслуговування.

8.3. Контакти електричних апаратів

Головним елементом контактного апарата є електричний контакт — це місце переходу струму з однієї струмоведучої деталі в іншу. Деталь, яка здійснює контакт, називають контакт-деталлю. За можливістю переміщення контакт-деталей між собою при заданій дії пристрою контакти електричних кіл поділяють на три групи: розбірні, комутуючі і ковзні.

Розбірними називають контакти, у яких в процесі роботи деталі не переміщуються одна відносно іншої, а залишаються надійно скріпленими. Це — болтові з'єднання, приєднання провідників до затискачів та ін.

Комутуючі контакти в процесі роботи замикають і розмикають коло з струмом або без нього. До них відносять контакти рубильників, вимикачів, перемикачів, автоматичних вимикачів, реле і т.д.

Ковзні контакти є різновидом комутуючих контактів, в яких одна з деталей переміщується (ковзає) по іншій. Наприклад, контакти реостатів, тролей, щіткові контакти електричних колекторних машин.

Як би ретельно не були оброблені поверхні стикання контактів, електричний струм проходить з однієї деталі до іншої тільки в окремих точках, в яких ці поверхні дотикаються, поскільки абсолютно гладкої поверхні не можна одержати ніяким способом її обробки (рис. 8.1, а). Розміри площ контактування s і їх кількість залежать від сили стискання контактів F та опору зминанню матеріалу деталей. Чим більша сила стискання і чим менший опір зминанню матеріалу контактів, тим площа контактування збільшується.

Основним електричним параметром контактів є перехідний опір, який визначають за емпіричною формулою:

$$R_{\text{пер}} = K/F^n, \quad (8.1)$$

де K — величина, що залежить від матеріалу та форми контакту, способу обробки і стану контактуючих поверхонь; F — сила стискання контактів; n — показник степеня, що характеризує кількість точок стикання.

Великий перехідний опір контакту спричиняє до збільшення виділення тепла в ньому, внаслідок чого контакти можуть зварюватися, а інші елементи комутаційного апарата вигорати.

Залежність перехідного опору від контактного натискання згідно з рівнянням (8.1) зображена на рис. 8.1 б. Крива 1 відповідає процесу зростання контактного натискання, крива 2 — зниженню натискання. Різний хід кривих пояснюється наявністю залишкових деформацій окремих горбків, по яких відбувалося стикання. Але кількість і розмір точок контактування при кожному замиканні можуть бути різними, тому значення перехідного опору в залежності від натискання виражається не якою-небудь кривою, а областю, обмеженою двома кривими.

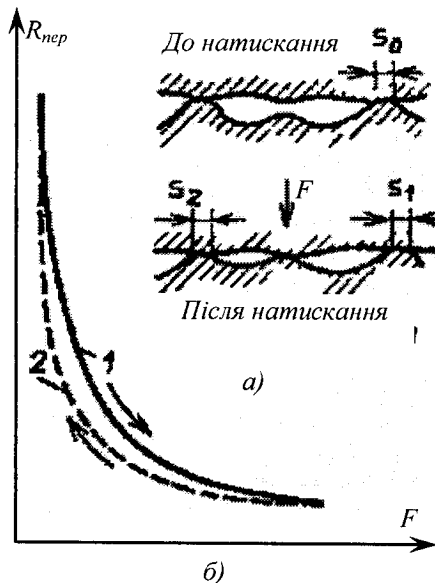


Рис. 8.1. Залежність перехідного опору від контактного натискання

Слід зауважити, що перехідний опір контактів дуже залежить від способу обробки контактуючих поверхонь. Так, шліфування поверхонь збільшує перехідний опір у порівнянні з обробкою напилком, бо при шліфуванні горбки на поверхні стають пологішими і їх зминання утруднюється.

8.3.1. Режими роботи контактів

Розрізняють три режими роботи контактів: вмикання кола, проведення струму у ввімкненому стані і вимикання кола.

При вмиканні кола спостерігаються такі процеси, що негативно впливають на стан контактів: а) вібрація контактів, б) ерозія поверхонь контактів внаслідок виникнення розряду між ними.

Для зменшення вібрації створюють попереднє натискання контактних пружин при розімкнених контактах, зменшують масу рухомих контактів та передбачають противібраційні підкладки під нерухоме осердя електромагніту. Зменшення ерозії контактів досягають забезпеченням достатнього кінцевого натискання та їх чищенням.

В режимі проведення струму у ввімкненому стані спостерігають два випадки: через контакти проходить тривалий номінальний струм і через контакти проходить струм короткого замикання. Для надійної роботи контактів необхідно, щоб при номінальному струмі падіння напруги на перехідному опорі було меншим від падіння напруги на контакті при температурі розм'якшення матеріалу $U_{\text{конт.1}}$:

$$I_n R_n \leq (0,5 \dots 0,8) U_{\text{конт.1}}. \quad (8.2)$$

При проектуванні апаратів умову (8.2) виконують шляхом підбору матеріалу контактів, а в умовах експлуатації — періодичним чищенням контактів з метою зменшення їх перехідного опору R_n .

При коротких замиканнях через контакти проходять струми, в 10...20 разів більші за номінальні. Через малу сталу часу нагрівання температура контактної площадки зростає практично миттєво і може досягнути температури плавлення. Щоб уникнути зварювання контактів, при проектуванні електроприводу необхідно підбирати апарати керування і захисту так, щоб їх допустимі струми короткого замикання були не меншими від розрахункових струмів короткого замикання в точці мережі, де вони будуть експлуатуватися: $I_{\text{к.з.доп.}} \geq I_{\text{к.з.р.}}$. В умовах експлуатації уникнути зварювання контактів можна шляхом підтримання перехідного опору контактів в межах норми.

В процесі розмикання контактів контактне натискання зменшується, перехідний опір зростає, внаслідок чого зростає температура точок стикання. В момент роз'єднання контакти нагріваються до температури плавлення матеріалу і між ними виникає місток з рідкого металу. При подальшому русі контактів місток обривається і виникає дуговий або тліючий розряд, який спричиняє до ерозії контактів. Зменшення ерозії досягають застосуванням дугогасних пристроїв та дугостійких матеріалів контактів.

8.3.2. Матеріали контактів

Надійність роботи комутаційного апарата в значній мірі визначається матеріалом контактів, який повинен відповідати наступним вимогам:

- високі електрична провідність і теплопровідність;
- стійкість проти корозії в повітрі та інших газах;
- стійкість проти утворення плівки з високим питомим опором;
- мала твердість для зменшення необхідної сили натискання;
- висока твердість для зменшення механічних спрацювань при вмиканнях і вимиканнях;
- мала ерозія;
- висока дугостійкість (висока температура плавлення);
- високі значення струму і напруги, при яких запалюється дуга;
- простота обробки та низька вартість.

Для виготовлення контактів використовують мідь, алюміній, срібло, вольфрам, золото, платину, палладій. Проте чисті матеріали не задовольняють повністю всіх вимог до них. Тому для контактів застосовують їх суміші, виготовлені методом порошкової металургії, які називають металокерамічними.

Мідь має такі позитивні властивості: високі електрична і теплопровідність; достатня твердість; досить високі значення струму і напруги, необхідні для створення дуги ($I_0 = 0,43$ А; $U_0 = 12,3$ В); простота технології; низька вартість. Недоліками міді є низька температура плавлення (1083 °С) та високий питомий опір окислів. З міді виготовляють плоскі та круглі шини, контакти апаратів високої напруги, контакторів, автоматичних вимикачів.

При роботі в апаратах у тривалому режимі (більше 8 год.) мідні контакти окислюються, збільшується їх перехідний опір і, як наслідок, контакти перегріваються. Тому при проектуванні таких апара-

тів зменшують електричне навантаження контактів або застосовують контакти з проковзуванням при замиканні, в результаті чого плівка окислу стирається. Іноді апарати з мідними контактами експлуатують у переривчасто-тривалому режимі, тобто після 8 годин роботи апарат вимикають 2 — 3 рази під струмом. При цьому під дією електричної дуги окисна плівка вигорає і перехідний опір контакту знижується.

Срібло є одним із кращих матеріалів для виготовлення контактів. Срібло має високі значення електро- і теплопровідності, малу механічну міцність, що дозволяє працювати при малих контактних натисканнях. Плівка окислу має високу електропровідність і малу механічну міцність. Недоліками срібла є нижчі порівняно з міддю дугостійкість ($I_0=0,4$ А; $U_0=12,0$ В) і температура плавлення (960°C) та висока вартість.

Із срібла виготовлюють контакти реле і контакторів при струмах до 20 А. При більших струмах використовують контакти, що комутують без дуги.

Алюміній характеризується досить високими значеннями електро- і теплопровідності та низькою вартістю. Проте він має низькі значення механічної міцності, дугостійкості та температури плавлення, а окисна плівка на ньому — високий питомий опір і високу механічну міцність. При контакті алюмінію з міддю створюється пара, яка зазнає сильної електрохімічної корозії. У зв'язку з цим при з'єднанні з міддю алюміній покривають тонким шаром міді електродітичним способом або обидва метали покривають сріблом.

Алюміній і його сплави використовують головним чином як матеріал для шин та конструкційних деталей апаратів.

Вольфрам має високу дугостійкість ($I_0=0,9$ А; $U_0=17,0$ В) і температуру плавлення (3380°C), високу твердість, велику стійкість проти ерозії та зварювання. До недоліків вольфраму відносять високий питомий опір, низьку теплопровідність, здатність створювати міцні оксидні та сульфідні плівки, високу вартість.

З вольфраму виготовлюють контакти апаратів з високою частотою вмикань при малих струмах, дугогасні контакти на великі струми. Вольфрам є компонентом металокерамічних сплавів.

Золото, платина та палладій мають високі електричні властивості, проте вони дорогі. Тому їх використовують лише для виготовлення високонадійних контактів реле з невеликим натисканням.

Металокераміка дає можливість одержати контакти з потрібними параметрами. Змішуючи і запікаючи порошки різних металів і їх

окислів у певних пропорціях, одержують високі значення електропровідності, дугостійкості, тугоплавкості. Низькі значення перехідного опору контакту забезпечують срібло або мідь, високу дугостійкість і тугоплавкість — вольфрам, молібден та інші елементи.

В апаратах низької напруги широко застосовується металокераміка на основі срібла КМК-А10М (85% срібла і 15% окису кадмію), КМК-А30 (70% срібла та 30% нікелю), КМК-А36 (80% срібла та 20% нікелю), КМК-А60 (50% вольфраму, 47,5% срібла та 2,5% нікелю) та ін.

Проте матеріали на основі срібла дорогі. Тому досить інтенсивно ведуться пошуки матеріалів з металокераміки на основі міді. Так, науковцями Національного аграрного університету розроблено і успішно випробувано на низьковольтних апаратах контактний матеріал, що містить біля 95% міді та в невеликих кількостях ніобій, хром, цирконій, оксид ітрію і графіт. Контакти з цього матеріалу мають невисокий і достатньо стабільний перехідний опір, підвищену корозійну та електроерозійну стійкість, невелику вартість. Їх строк служби сумірний із строком служби композиційних матеріалів на основі срібла.

8.3.3. Конструкції контактів

Низьковольтні електричні апарати мають контакти врубного, важільного або місткового типу. Контакти рубильників та багатьох типів плавких запобіжників врубні. Головні контакти автоматичних вимикачів, контакторів та деяких типів реле важільні (рис. 8.2, *а*). Магнітні пускачі мають контакти місткового типу (рис. 8.2, *б*). Основними механічними параметрами контактних вузлів є зазори, провали, попереднє і кінцеве натискання, які при експлуатації апаратів повинні бути в межах нормованих значень.

Зазором контакту *ЗК* називають мінімальну відстань між рухомим 2 і нерухомим 1 контактами при вимкненому апараті. Зменшення зазору приводить до скорочення довжини дуги і ускладнення її гасіння, а збільшення — до нестабільної роботи електромагніту через зменшення початкової сили притягування рухомої частини.

Провал *П* — це додаткове переміщення упору 3 контакту після його замикання. Провал характеризує ступінь стискання контактів контактною пружиною 4. Недостатнє стискання призводить до збільшення перехідного опору, а надмірне — до погіршення роботи електромагніту.

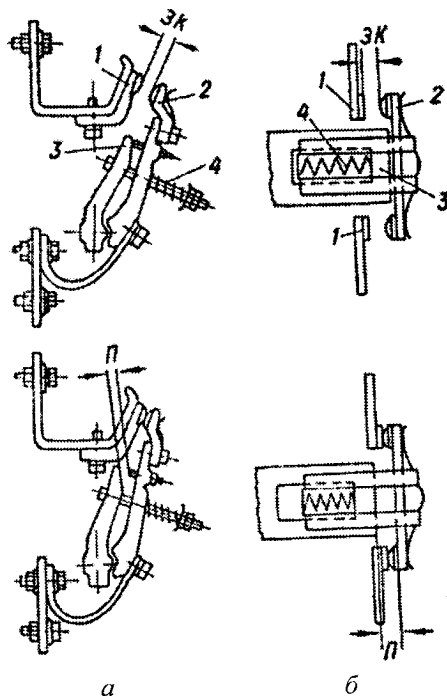


Рис. 8.2. Конструкції контактів:

а) — важільного типу; б) — місткового типу; 1 — нерухомий контакт; 2 — рухомий контакт; 3 — упор рухомого контакту; 4 — контактна пружина; 3К — зазор контактів; П — провал контактів

Початкова сила натискання показує, з якою силою притискається рухомий контакт до свого упору при розімкнених контактах. При недостатньому початковому натисканні збільшується вібрація рухомого контакту під час вмикання і, як наслідок, до ерозії контактних поверхонь.

Кінцеве натискання — це сила, з якою рухомий контакт тисне на нерухомий при замкнених контактах. Як і у випадку ненормованого значення провалу недостатнє кінцеве натискання спричиняє збільшення перехідного опору контакту, а надмірне — до погіршення роботи електромагніту. Але навіть при нормованому значенні провалу кінцеве натискання може відхилятися від норми при невірно підібраних або перегрітих контактних пружинах.

8.3.4. Електрична дуга

Розмикання електричного кола із струмом, як правило, супроводжується електричним розрядом між контактами, що розходяться. Повітряний проміжок між контактами іонізується і стає електропровідним, в ньому виникає дуга. Коли струм в колі спадає до нуля, дуга гасне. Розмикання кола відбувається внаслідок деіонізації повітряного проміжку, тобто перетворення повітря в діелектрик.

Виникнення і горіння дуги на електричних контактах супроводжується такими фізичними явищами: термоелектронна та автоелектронна емісія, термічна іонізація та іонізація поштовхом, рекомбінація та дифузія.

Термоелектронною емісією називають явище випускання електронів з розпеченої поверхні. При розходженні контактів різко зростають перехідний опір контакту та щільність струму в останній площадці контактування. Ця площадка розігрівається і розплавлюється, а при подальшому розходженні контактів розривається. На негативному електроді виникає так звана катодна пляма, яка є основою дуги і джерелом випромінювання електронів в перший момент розходження контактів. Щільність струму термоелектронної емісії невелика і може бути достатньою тільки для виникнення електричної дуги.

Автоелектронна емісія — це явище випускання електронів під дією сильного електричного поля. Після розриву контактів напруга між ними зростає від нуля до напруги мережі. Напруженість поля при цьому досягає значення 100 МВ/см, що достатньо для викидання електронів навіть із холодного катода та початку розвитку дугового розряду.

Іонізація поштовхом відбувається внаслідок зіткнення вільних електронів, що рухаються з достатньою швидкістю, з нейтральною частинкою (атомом чи молекулою). В результаті зіткнення появляється новий позитивний іон і вільний електрон. Останній, в свою чергу, може вибити електрон з іншого атома. Швидкість електрона залежить від різниці потенціалів на довжині його вільного пробігу. *Мінімальна різниця потенціалів на довжині вільного пробігу, під дією якої електрон набуває необхідної швидкості, називається потенціалом іонізації.* Для газів (азот, кисень, водень) потенціал іонізації знаходиться в межах 13...16 В, а для металів приблизно удвічі менший. Потенціал іонізації газової суміші визначається найнижчим із потенціалів іонізації компонентів, що входять до складу суміші. Оскі-

льки в дузі між контактами завжди є пари металів, то потенціал іонізації дугового проміжку не перевищує потенціалу іонізації цих парів.

Термічна іонізація газів виникає під дією високої температури. Температура ствола дуги досягає 6000...25000 К. При такій температурі сильно зростає швидкість руху частинок газу, які при зіткненні між собою руйнуються, створюючи як нейтральні, так і заряджені частинки. Завдяки термічній іонізації в дузі виникає достатня кількість вільних зарядів, які й підтримують дугу після її виникнення.

Одночасно з іонізацією в дузі відбуваються і процеси деіонізації, тобто з'єднання заряджених і створення нейтральних частинок. При виникненні дуги переважають процеси іонізації, при стійкому горінні інтенсивність процесів іонізації та деіонізації однакова, а при згасанні дуги процеси деіонізації превалюють.

Деіонізація відбувається в основному за рахунок рекомбінації та дифузії.

Рекомбінацією називають процес, при якому по-різному заряджені частинки стикаються і створюють нейтральні частинки.

Дифузія заряджених частинок — це процес виносу їх з дугового проміжку в оточуюче середовище, завдяки чому зменшується провідність дуги. Винос заряджених частинок відбувається під дією градієнтів електричного та температурного полів, які направлені від центру до периферії дуги. При обдуванні дуги стисненим повітрям градієнт температурного поля зростає, збільшуючи інтенсивність виносу заряджених частинок.

8.3.5. Умови горіння та гасіння дуги постійного струму

Електричний розряд, що виникає при розмиканні контактів, спричиняє їх зношення і значним чином впливає на надійність і довговічність апарата. Розряд в газі, що оточує контакт, може бути або тліючим, або електричною дугою. Тліючий розряд виникає при вимиканні струму силою менше 0,1 А при напрузі на контактах 250...300 В. Такий розряд відбувається на контактах реле малої потужності, а в апаратах більшої потужності є перехідною фазою до дугового розряду.

Найважливішою характеристикою електричної дуги є вольтамперна характеристика, тобто залежність напруги на дузі від струму $U_d = f(I)$ (рис. 8.3). Напруга U_z , при якій починається дуговий розряд, називається напругою запалювання дуги. При збільшенні струму напруга дуги зменшується, тому що опір дугового проміжку

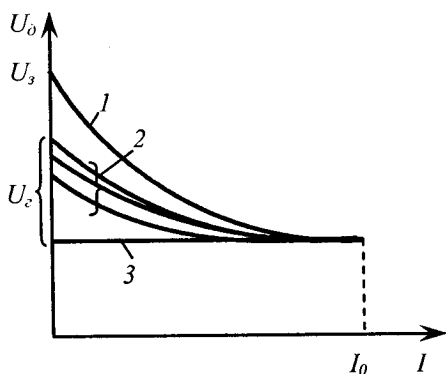


Рис. 8.3. Вольт-амперні характеристики дуги

знижується швидше, ніж зростає струм. При кожному значенні струму в певний момент часу встановлюється рівновага, коли опір дугового проміжку і падіння напруги на ньому незмінні в часі. Такий режим називають статичним, а крива 1, що його характеризує — статичною характеристикою дуги.

Статичну характеристику можна одержати лише при повільній зміні струму. Якщо струм зменшувати до нуля

швидко, то напруга на дузі буде зростати повільніше (ряд кривих 2). Гранично при миттєвому зменшенні струму до нуля одержимо пряму 3. Такий характер вольт-амперних характеристик пояснюється інертністю процесу деіонізації. Для деіонізації необхідний певний час, і тому при швидкому зменшенні струму провідність проміжку залишається попередньою, а падіння напруги на дузі спадає.

Вольт-амперні характеристики дуги, отримані при швидкому зменшенні струму до нуля, називають динамічними. Для кожного дугового проміжку, матеріалу електродів і середовища є тільки одна статична і безліч динамічних вольт-амперних характеристик. Згідно з динамічними характеристиками напруга, при якій дуга згасає, називається напругою гасіння U_c .

Падіння напруги на дузі U_d характеризує дуговий проміжок як провідник струму. Напруги U_3 і U_c характеризують ізоляційні властивості проміжку, тобто величини напруги, які потрібно прикласти до проміжку в конкретному його стані для збудження в ньому електричної дуги.

В дуговому розряді спостерігається три характерні зони: прикатодну l_k , зону стовпа дуги l_{cm} , і прианодну l_a (рис. 8.4). В кожній з цих зон процеси іонізації та деіонізації відбуваються по-різному.

Прикатодна зона займає невеликий простір довжиною не більше 10^{-6} м. Біля катоду виникає позитивний об'ємний заряд, створюваний позитивними іонами. Між цим зарядом і катодом створюється електричне поле напруженістю до 10^7 В/м, в якому рухаються електрони, що вийшли з катоду і створюють електричний струм. Під ді-

єю цього поля електрони набувають швидкості, при якій виникає іонізація поштовхом. Позитивні іони розганяються в прикатодній зоні і бомбардують катод, внаслідок чого температура катода зростає і досягає точки випаровування матеріалу катода. При високій температурі виникає термоелектронна емісія катода, яка є основним фактором підтримання електричного струму в дузі. Падіння напруги у прикатодній зоні досягає 10...20 В.

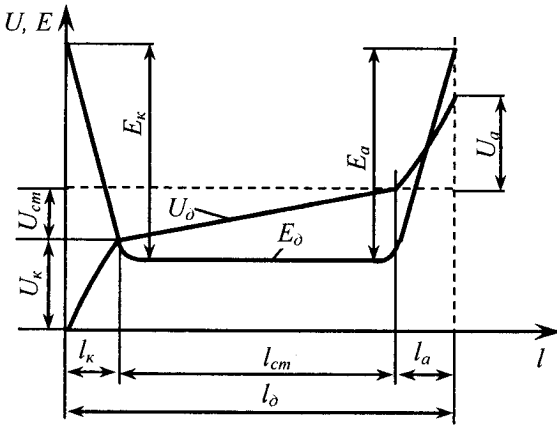


Рис. 8.4. Розподіл напруги та градієнта напруги в стаціонарній дузі постійного струму

В зоні стовпа температура дуги дуже велика і основним джерелом іонів і електронів є термічна іонізація. Кількість зарядів, що pojawiaються в результаті термічної іонізації, можна визначити за рівнянням Саха:

$$\frac{x^2}{1-x^2} 10^5 p = 315,8 T^{2,5} e^{-11600 U_i / T} 10^{-8}, \quad (8.3)$$

де x — ступінь іонізації, що дорівнює відношенню числа іонізованих частинок до повного числа атомів в даному об'ємі; p — абсолютний тиск газу, Па; T — абсолютна температура газу, К; U_i — потенціал іонізації, В.

Якщо температура стовпа дуги стабільна, то, враховуючи, що $x^2 \ll 1$, то

$$x \approx 1/\sqrt{p}. \quad (8.4)$$

Звідси виходить, що з ростом тиску ступінь іонізації зменшується. Це явище широко використовують у плавких запобіжниках і інших електричних апаратах. В них при розмиканні кола створюється підвищений тиск газів, внаслідок чого дуга швидко гасне.

З рівняння (8.3) витікає також висновок, що при зменшенні температури ступінь іонізації різко знижується. На основі цього явища побудовані дугогасні пристрої з вузькою решіткою.

Падіння напруги у стволі дуги U_0 практично прямо пропорційне довжині дуги, а градієнт напруги приблизно постійний. Останній залежить від багатьох факторів і може змінюватися в широких межах, досягаючи значень 10000...20000 В/м.

У прианодній зоні потік електронів із стовпа дуги створює негативний об'ємний заряд. Внаслідок взаємодії цього заряду і потенціалу анода створюється електричне поле, в якому електрони накопичують значну енергію. Енергія, набута електронами, віддається аноду, внаслідок чого останній нагрівається до дуже високої температури. У прианодній зоні створюється прианодне падіння напруги U_a , що дорівнює 5...10 В, і підвищується напруженість електричного поля E_a . Сумарне значення прикатодного і прианодного падіння напруги складає 15...30 В, а градієнт напруги досягає 10^6 ... 10^8 В/м.

Для того, щоб погасити дугу, необхідно, щоб в дуговому проміжку при всіх значеннях струму від початкового до нульового процесу деіонізації переважали процеси іонізації.

Контакти електричних апаратів розривають коло, яке складається з активного R і індуктивного L опорів та дугового проміжку U_0 (рис. 8.5, а). Рівняння рівноваги напруги при незмінній довжині дуги має вигляд:

$$U = U_0 + iR + L \frac{di}{dt}, \quad (8.5)$$

де U — напруга джерела живлення; i — струм; $L \cdot di/dt$ — падіння напруги на індуктивності при зміні струму.

Стійке горіння дуги має місце при $di/dt = 0$, тобто коли струм незмінний. Тоді рівняння (8.5) матиме вигляд:

$$U = U_0 + iR. \quad (8.6)$$

При погасанні дуги струм весь час зменшується, тобто $di/dt < 0$,

а

$$U_0 < U - iR. \quad (8.7)$$

На рис. 8.5, б наведено графічний розв'язок рівняння (8.5), де пряма 1 являє собою напругу джерела струму, пряма 2 — падіння напруги на активному опорі R , крива 3 — вольт-амперну характеристику дуги U_d . Проміжки між графіками зображують відповідно: iR — між прямими 1 і 2; $\pm L \cdot di/dt$ — між 2 і 3; $U - iR$ — між прямою 2 і віссю абсцис.

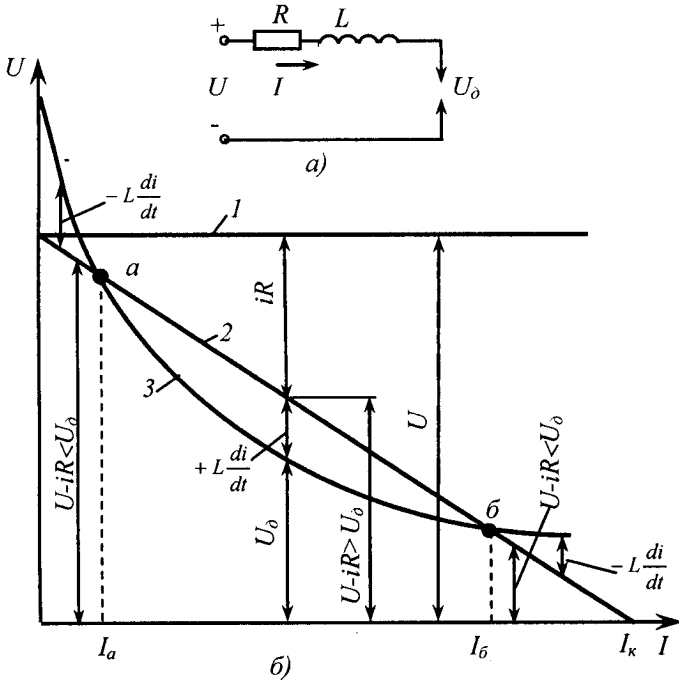


Рис. 8.5. Умови гасіння дуги постійного струму

Умова, що описується рівнянням (8.6), тобто, коли струм незмінний і $L \cdot di/dt = 0$, виконується в точках a і b .

На проміжку між точками a і b величина $U - iR$ більша за напругу U_d , необхідну для підтримання дуги, і дуга горить стійко. Надлишок напруги джерела компенсується ЕРС самоіндукції $+L \cdot di/dt$.

При струмі $I > I_b$ дуга згасає, бо $U - iR < U_d$, а ЕРС самоіндукції стає від'ємною. Згасання дуги спричиняє зменшення струму, і при значенні $I < I_b$ дуга знову запалюється. Тобто, точка b є точкою стійкої рівноваги системи.

Якщо ж струм стане меншим за I_a , то величина $U - iR$ буде меншою за U_0 , і дуга погасне. Подальше зниження струму не приведе до запалювання дуги, тобто в точці a система працює нестійко.

Таким чином, для забезпечення стійкого погасання дуги необхідно створити такі умови, щоб струм дуги зменшився нижче значення I_a . Це можливо або шляхом підняття вольт-амперної характеристики дуги, або збільшення опору кола.

Вольт-амперну характеристику можна підняти шляхом збільшення довжини дуги, збільшення приелектродних падінь напруги, інтенсивного охолодження і підвищення тиску середовища, в якому горить дуга.

Гасіння дуги змінного струму має свої особливості. По-перше, струм у дузі в кожний півперіод переходить через нуль незалежно від ступеня іонізації дугового проміжку, тобто кожний півперіод дуга гасне. З іншого боку, при певних умовах під дією зростаючої напруги у другому півперіоді дуга знову може запалитися. Тому за допомогою дугогасних пристроїв необхідно створити умови, при яких струм не відновився б після проходження через нуль.

Наближено умови гасіння дуги змінного струму можна пояснити так.

При переході струму через нуль створюється безструмова пауза $t_i = 0$, (рис. 8.6, *a*) тривалість якої залежить від індуктивності навантаження. При малоіндуктивному навантаженні ця пауза більша, при великій індуктивності — мала. За час паузи відбувається інтенсивна деіонізація дугового проміжку, яка приводить до зменшення його провідності. Чим більше проміжок деіонізований, тим більша напруга буде потрібна для його повторного пробію і запалювання дуги. Умову гасіння дуги змінного струму можна сформулювати так: якщо зростання опору дугового проміжку, виражене його пробивною напругою U_{np0} , (крива 1 на рис. 8.6, *б*) випереджує зростання напруги U на проміжку (крива 2), то дуга погасне при переході струму через нуль. Якщо ж швидкість зростання опору проміжку буде повільнішим (крива 3), то в момент часу, що відповідає точці O , дуга знову запалиться, в колі з'явиться струм і відповідне йому падіння напруги на дузі (крива 4).

Кривою 5 на рис. 8.6, *б*) зображено графік наростання ізоляційної міцності дугового проміжку $U_{np.0}$ в прикатодній області за час $t < 1$ мкс, яка залежить від теплового режиму міжконтактного проміжку. При дуже розігрітих електродах в апаратах, що комутують великі струми з частими вимиканнями, вона знаходиться в межах

кількох десятків вольт. В апаратах з холодними електродами при нечастих комутаціях міцність проміжку зростає до 150...250 В. Тому апарати, що працюють в режимі з частими комутаціями, обладнують більш потужними дугогасними системами, ніж ті, що працюють у тривалому режимі, або обмежують номінальний робочий струм через них.

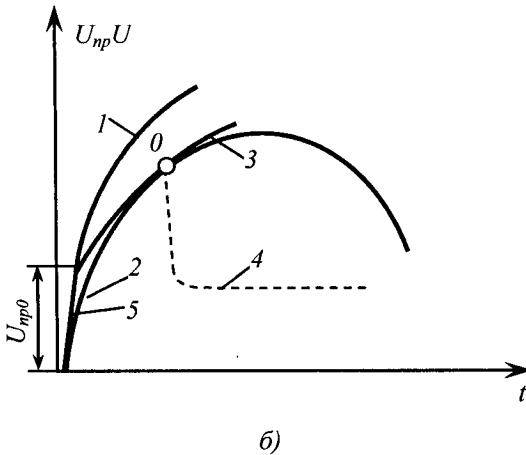
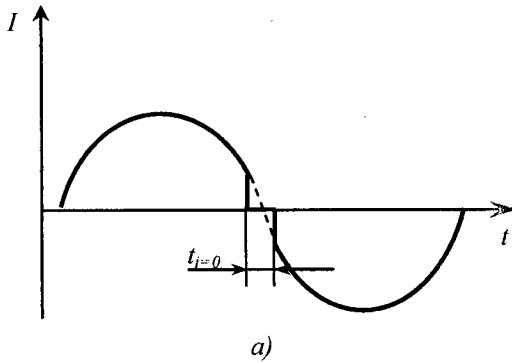


Рис. 8.6. Гасіння дуги змінного струму:
а) перехід струму через нуль; б) умови гасіння

8.3.6. Дугогасні пристрої електричних апаратів

Дугогасні пристрої повинні гасити дугу за малий проміжок часу, при малому зношуванні частин апарату, при допустимому рівні пе-

ренатруг, при мінімальному об'ємі розпечених газів, з мінімальним звуковим і світловим ефектом.

Для гасіння дуги постійного струму в апаратах низької напруги необхідно, щоб вольт-амперна характеристика дуги проходила вище прямої $U - iR$ (рис. 8.5). Оскільки $U_d = E_{cm} \cdot l + u_k + u_a$, то **підняти характеристику можна**: 1) збільшуючи її довжину l (розтягуючи); 2) шляхом дії на її ствол з метою збільшення поздовжнього градієнту напруги E_{cm} ; 3) використовуючи прикатодні падіння напруги u_k і u_a .

Підняття дуги шляхом видовження малоефективне, тому що для гасіння її потрібно дуже розтягти, а значить, значно збільшити розміри апарата.

Збільшення градієнту напруги досягають шляхом інтенсивного охолодження дуги або підняття тиску середовища, в якому вона горить. Охолодити дугу можна шляхом обдування повітрям, або переміщенням її у повітрі, або поміщенням її у вузьку щілину, стінки якої мають високу теплопровідність і дугостійкість.

В сучасних вимикаючих апаратах широко розповсюджені дугогасні камери з вузькою поздовжньою щілиною. Матеріалом камер служить ізоляційний матеріал: кераміка або азбоцемент. У верхній частині камери між точками 1 і 2 є одна (рис. 8.7, а) або кілька (рис. 8.7, б) поздовжніх щілин 3 з плоскопаралельними стінками. Нижня частина 4 камери розширена, щоб полегшити входження дуги в камеру. Іноді щілинам надають звивисту форму (рис. 8.7, в), щоб у камері невеликих розмірів помістити довгу дугу, або щілину роблять з місцевими розширеннями (рис. 8.7, з, д). Найефективнішими є дугогасні камери з місцевими розширеннями поздовжніх щілин і рядом ребер.

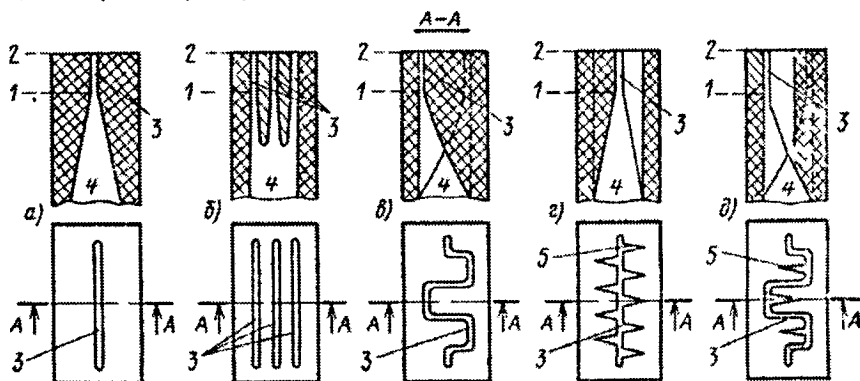


Рис. 8.7. Форми поздовжніх щілин дугогасних камер

Для того, щоб з високою швидкістю перемістити дугу в камеру з вузькою щілиною, застосовують так зване магнітне дуття. Електрична дуга є не що інше, як провідник із струмом. При взаємодії струму дуги з магнітним полем виникає сила, яка переміщує дугу всередині камери, заганняючи її у вузьку щілину. Магнітне поле створюється котушкою 1 (рис. 8.8), що увімкнена послідовно з контактом. Всередині котушки розміщено осердя 3, з'єднане з феромагнітними полюсами у вигляді пластин 4. Котушка ізолювана від осердя ізоляційним циліндром 2. При протіканні струму від затискача 9 через котушку 1, замкнені контакти 6 і гнучку в'язь 8 у котушці 1 створюється магнітне поле, напрямок якого показано хрестиками. Коли контакти 6 розмикаються, між ними спочатку виникає рідкий металевий місток, а потім дуга 7. Під дією магнітного поля котушки виникає сила P , яка переміщує дугу у вузьку щілину дугогасної камери 5.

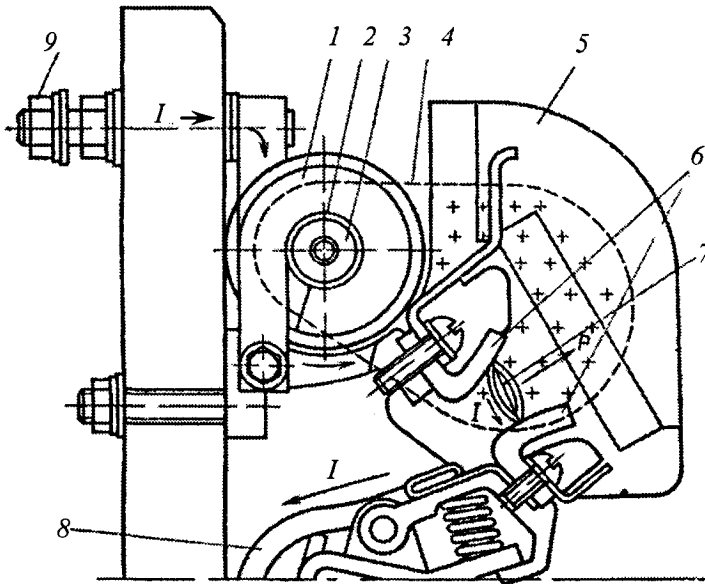


Рис. 8.8. Дугогасний пристрій з послідовною дугогасною котушкою

Дугогасні пристрої з послідовною котушкою є досить ефективними і застосовуються в контакторах з важким режимом роботи при частоті вмикання більше 600 разів за годину. Недоліками таких при-

строїв є не досить надійне гасіння дуги при малих струмах (5...7 А), великі витрати міді на котушку та нагрівання контактів від тепла в дугогасній котушці.

В деяких типах контакторів для створення магнітного поля застосовують постійні магніти. Дугогасні пристрої з постійними магнітами мають високу надійність, добре гасять дугу при різних значеннях струму. В них відсутні витрати енергії на створення магнітного потоку, різко скорочуються витрати міді на контактор, відсутнє нагрівання контактів від котушки, як це має місце в пристроях з послідовною котушкою.

Дуже поширеними в силових низьковольтних апаратах постійного та змінного струму є дугогасні пристрої з дугогасною решіткою. В апаратах постійного струму для гасіння дуги використовуються приелектродні падіння напруги, в апаратах змінного струму — прикатодна електрична міцність дугового проміжку. Для цього над контактами 1 і 2 (рис. 8.9 *а, б*) встановлюють нерухомі ізольовані між собою металеві пластини 5, які створюють дугогасну решітку. В апаратах постійного і змінного струму частотою 50 Гц встановлюють феромагнітні пластини, які з метою зменшення корозії покривають міддю або цинком. Під дією струму дуги в пластинах створюється електромагнітне поле. Електромагнітні сили, що виникають від взаємодії поля із струмом дуги, втягують дугу в решітку. Щоб дуга не створювала рідких містків між пластинами, останні розміщують на відстані не менше 2 мм одну від іншої. Електрична дуга 3, яка виникає при розмиканні контактів, заганяється в решітку, де розбивається на ряд послідовно увімкнених коротких дуг 4.

Існує два типи решіток. В решітці, зображеній на рис. 8.9, *а*), дуга, що запалюється на контактах, переходить на роги і, рухаючись вгору під дією магнітного поля, всіма своїми точками проникає в решітку. Для забезпечення одночасного входження дуги у всі проміжки між пластинами потрібне зовнішнє магнітне поле.

В решітці іншого типу (рис. 8.9, *б*) дуга, що виникає на контактах, послідовно входить в проміжки між пластинами решітки у міру віддалення рухомого контакту від нерухомого. Напруга на дузі зростає поступово за законом, близьким до лінійного. Тривалість горіння дуги обернено пропорційна швидкості розходження контактів і кількості пластин на одиницю довжини.

В апаратах постійного струму напруга на дугогасній решітці створюється сумою приелектродних падінь напруги U_e та сумою падінь напруги на стовпах коротких дуг U_{cm} :

$$U_{\partial,p} = \sum U_e + \sum U_{cm} = \sum (u_k + u_a)(m-1) + \sum E_{cm} l_0(m-1), \quad (8.8)$$

де $U_e = u_k + u_a$; B ; m — число пластин; E_{cm} — градієнт напруги на стовпі дуги, В/см; l_0 — зазор між пластинами, см.

Для відкритої дуги такої ж довжини $U_{\partial,e} = U_e + E_{\partial} l_0$.

Таким чином, напруга на дузі в решітці:

$$U_{\partial,p} = U_{\partial,e} + U_e m, \quad (8.9)$$

тобто, при незмінній довжині статична вольт-амперна характеристика дуги в дугогасній решітці (крива 2 на рис. 8.9) зображується такою ж за формою кривою, як і характеристика відкритої дуги (крива 1), але піднята вгору на суму приелектродних падінь напруги. При великій кількості пластин величиною $U_{\partial,e}$ можна знехтувати. Тоді, аналізуючи рівняння (8.9), можна зробити висновок, що для того, щоб дуга погасла, кількість пластин у решітці повинна бути $m > U/U_e$, де U — напруга джерела живлення.

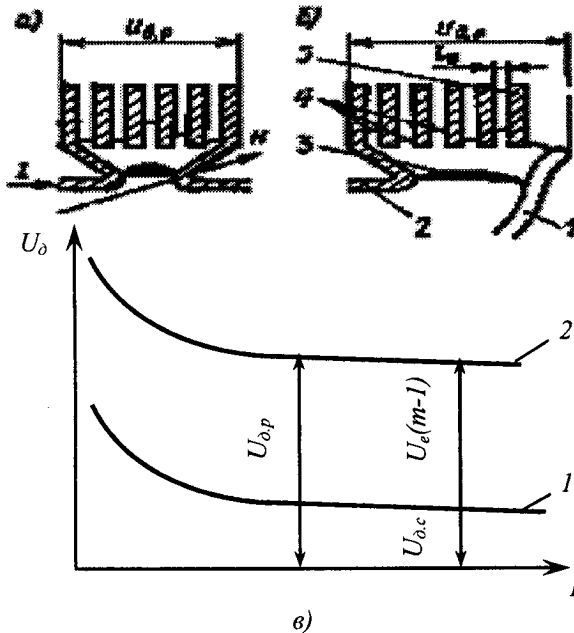


Рис. 8.9. Дугогасний пристрій з дугогасною решіткою:

а), б) — види дугогасних решіток;

в) — статичні вольт-амперні характеристики дуги

При постійному струмі біля кожної пластини решітки виникає падіння напруги величиною 20...25 В. Тобто, дугогасні решітки в апаратах постійного струму напругою 400 В повинні мати не менше 20 пластин.

При гасінні дуги змінного струму в дугогасній решітці основними є процеси у прикатодній зоні, електрична міцність якої в момент проходження струму через нуль практично миттєво зростає до $U_{пр.0} = 150...200$ В. Тому в решітці, виконаній за схемою рис.8.9, а), дуга погасає в той півперіод, в який вона входить в решітку. За схемою рис. 8.9, б) дуга за один півперіод може не ввійти в необхідну для згасання кількість проміжків, оскільки її довжина залежить від швидкості розходження контактів. І все ж дугогасні решітки для змінного струму мають значно менше пластин і діють в 7...8 разів ефективніше, ніж при постійному струмі. Цим пояснюється широке їх застосування на змінному струмі і обмежене — на постійному. Дугогасними решітками обладнують автоматичні вимикачі і більшість типів контакторів.

8.3.7. Електромагніти електричних апаратів

В більшості контактних електричних апаратів з дистанційним керуванням приводом контактів є електромагніт. За родом струму електромагніти бувають постійного та змінного струму, за характером руху якоря — поворотні та прямоходові.

Для магнітопроводів електромагнітів застосовують матеріали з високою магнітною проникністю, високою індукцією насичення та низькою коерцитивною силою (малою шириною петлі гістерезису). Крім того, вони повинні бути дешевими, технологічними при обробці і мати стабільні магнітні характеристики. Магнітопроводи електромагнітів постійного струму виготовляють із суцільного шматка сталі, а змінного — з метою зменшення втрат на вихрові струми та гістерезис набирають із ізольованих одна від одної пластин електро-технічної сталі.

Після знеструмлення обмотки електромагніта в магнітній системі існує залишковий магнітний потік, який може спричинити залипання якоря. Для усунення залипання в магнітному колі за допомогою немагнітних прокладок створюють спеціальний зазор.

При спрацюванні апарата електромагніт створює тягову силу, яка долає сили механічної протидії. До останніх відносять сили ви-

микаючих та контактних пружин, вагу рухомої системи та сили тертя в підшипниках і шарнірах між рухомими деталями. Залежність сумарної механічної сили опору $F_{\text{м}}$, що протидіє силі електромагніту $F_{\text{в}}$, від ходу його якоря δ називають механічною характеристикою апарату (рис. 8. 10). Протидіючі сили пружин та ваги завжди направлені в один бік незалежно від напрямку переміщення якоря, а сили тертя завжди направлені проти рушійної сили електромагніту, тобто при зміні напрямку руху якоря вони змінюють свій знак. Тому механічні характеристики апарата при вмиканні (рис. 8. 10, а) та вимиканні (рис. 8. 10, б) відрізняються одна від одної. На початку вмикання (точка δ_1) діють сили P_1 ваги рухомої системи, вимикаючої пружини та сили тертя. При русі якоря від δ_2 до δ_1 сила P_2 зростає за рахунок додаткового стиснення вимикаючої пружини. В точці δ_2 відбувається стикання контактів і сила P_3 стрибком зростає за рахунок початкового натискання контактів. При подальшому стисненні контактних пружин від δ_2 до 0 сила P_4 зростає плавно.

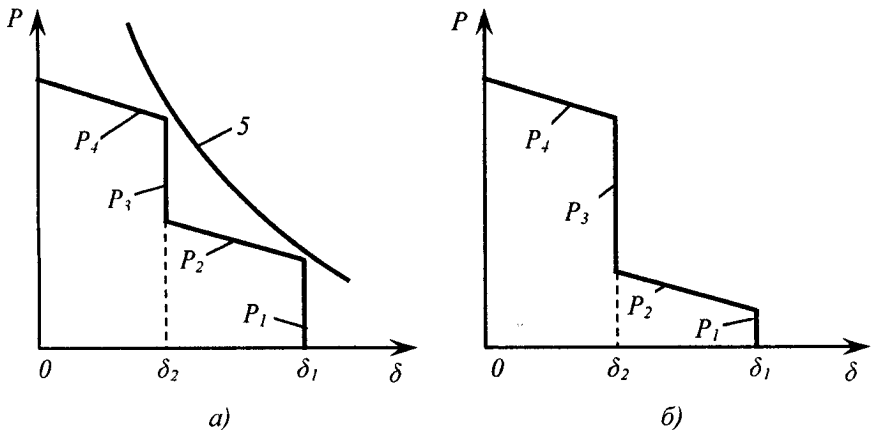


Рис. 8.10. Механічні характеристики контактора:

а) при вмиканні; б) при вимиканні; P_1 — сили від ваги рухомої системи, тертя і сила вимикаючої пружини; P_2 — сила від додаткового стиснення вимикаючої пружини; P_3 — сила початкового натискання контактів; P_4 — сила додаткового стиснення контактних пружин; 5 — механічна характеристика тягового електромагніту

При вимиканні апарату сили тертя не змінюють свого знаку, і тому сила P_1 стає меншою, а P_3 — більшою.

Тягова характеристика електромагніту (крива 5) — це залежність сили притягання електромагніту від величини робочого зазору δ при незмінному значенні струму в його обмотці. При вмиканні апарата рух якоря почнеться тоді, коли електромагнітна сила притягування при $\delta = \delta_1$ стане більшою протидіючої P_1 . Для чіткого і надійного вмикання апарата тягова характеристика повинна лежати вище механічної і відповідати їй.

В електромагнітах постійного струму тягове зусилля зростає із зменшенням зазору δ . В електромагнітах же змінного струму магнітний потік змінюється за синусоїдальним законом (рис. 8.11, а):

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t. \quad (8.10)$$

Сила притягування електромагніту змінного струму:

$$P = \frac{\Phi_m^2 \sin^2 \omega t}{2\mu_0 s_\delta}, \quad (8.11)$$

де μ_0 — магнітна проникність повітря; s_δ — переріз повітряного зазору.

Позначимо

$$\frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 s_\delta} = P_m, \quad (8.12)$$

тоді

$$P = P_m \sin^2 \omega t = \frac{P_m}{2} (1 - \cos 2\omega t), \quad (8.13)$$

тобто значення сили притягування електромагніту $P_{ем}$ пульсує з подвійною частотою мережі, не змінюючи при цьому свого знаку (рис. 8.11).

При відривному зусиллі механічної протидії $P_{відр.}$ двічі за період в точці А (рис. 8.11, б) якір буде відпадати, а в точці Б — знову притягуватися, тобто буде вібрувати з подвійною частотою. Вібрація супроводжується сильним гудінням і спричиняє спрацювання магнітної системи.

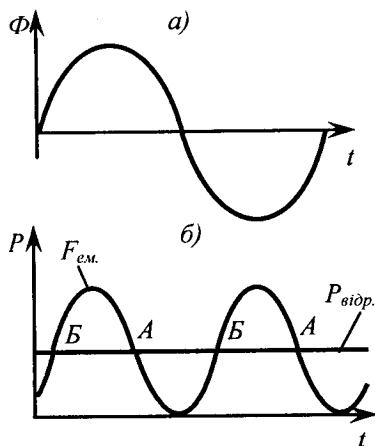


Рис. 8.11. Криві зміни магнітного потоку (а) і сили притягування електромагніту змінного струму (б) без короткозамкненого витка

Для усунення вібрації електромагніти змінного струму обладнують короткозамкненими витками (рис. 8.12, а) з провідникових матеріалів (мідь, латунь), які охоплюють частину полюса електромагніту (70...80%). Загальний потік електромагніту Φ поділяється на дві частини: потік Φ_1 проходить через неохоплену витком частину полюсу, друга частина Φ_2 — через виток. Потік Φ_2 індукуює у витку ЕРС $e_{к.з.}$, від якої створюється струм $i_{к.з.}$, зсунутий по відношенню до $e_{к.з.}$ на кут γ_0 (рис. 8.12, б). Оскільки індуктивність короткозамкненого витка незначна, то кут γ_0 малий і ним можна знехтувати. Струм $i_{к.з.}$ збуджує магнітний потік, який з частиною основного потоку створює потік Φ_2 , зсунутий у часі на кут ϕ по відношенню до потоку Φ_1 (рис. 8.12, б і в). Потоки Φ_1 і Φ_2 створюють пульсуючі і зсунені між собою в часі електромагнітні сили F_1 і F_2 (рис. 8.12, г). Результуюча сила $F_{ем}$ пульсує значно менше, а мінімальне значення її стає більшим за силу механічної протидії $F_{відр.}$, завдяки чому вібрація усувається.

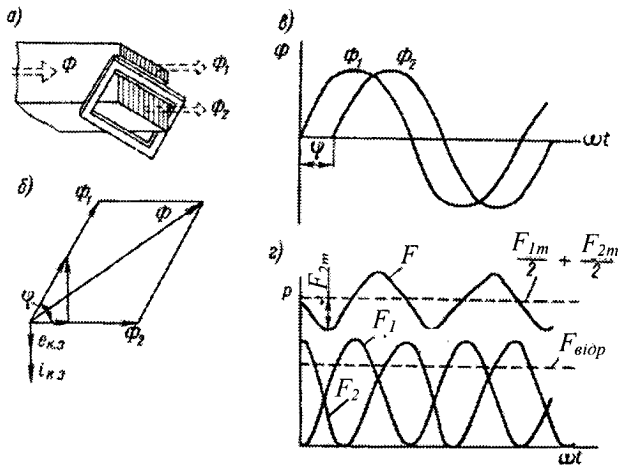


Рис. 8.12. Принцип роботи короткозамкненого витка в електромагнітах змінного струму

В електромагнітах постійного струму струм в обмотці залежить тільки від активного опору самої обмотки і не змінюється при зміні робочого зазору електромагніту.

Величина змінного струму в обмотці в основному визначається індуктивним опором, оскільки активний опір обмотки, як пра-

вило, значно менший реактивного. Індуктивний опір визначається з виразу:

$$X = \frac{\omega w^2 \mu_0 s_\delta}{2\delta}, \quad (8.14)$$

де ω — частота струму в обмотці; w — число витків обмотки; μ_0 — магнітна проникність повітря; s_δ — переріз зазору; δ — величина робочого зазору.

З (8.14) витікає, що із збільшенням зазору між рухомим і нерухомим осердям електромагніту індуктивний опір зменшується, а при незмінній напрузі струм, споживаний обмоткою, зростає. Тому з метою запобігання перегріванню обмотки при експлуатації електромагнітних апаратів необхідно тримати в чистоті контактуючі поверхні магнітопроводів і не допускати затирання рухомих частин апаратів.

8.4. Апарати керування

8.4.1 Апарати ручного керування

Рубильники призначені для ручної комутації електричних кіл номінальною напругою до 660 В змінного і до 440 В постійного струму. Перевага рубильників над іншими апаратами в тому, що вони дешеві і створюють видимий розрив електричного кола. В електроприводі рубильники найчастіше використовують як ввідні апарати розподільчих та низьковольтних комплектних пристроїв.

За конструкцією рубильники поділяються на одно-, дво- і триполюсні; з приводом центральною або боковою рукояткою через вал, центральною рукояткою через систему важелів; з дугогасними пристроями і без них; з переднім або заднім приєднанням проводів; з одинарним або подвійним розривом кола.

Промисловість виготовляє також блоки запобіжник-вимикач, які крім комутації електричних кіл здійснюють захист від струмів перевантаження і коротких замикань.

За ступенем захисту рубильники бувають відкритими (IP00), захищеними (IP32) і закритими (IP54).

Величина номінального струму рубильника залежить не тільки від його габариту, а й від виконання за захищеністю. Так, номінальний струм рубильника Р31 у відкритому виконанні 100 А, а у захищеному і закритому — 80 А.

Комутаційна здатність рубильників залежить від роду струму, величини напруги і конструкції апарата. Рубильники з центральною рукояткою і приводом через вал дозволяється застосовувати тільки для вимикання електричних кіл без струму. При наявності струму можна вимикати рубильники з бічною рукояткою або з приводом через систему важелів. При цьому для рубильників без дугогасних простоїв відношення струму, що вимикається, до номінального струму апарата повинне бути не більшим 0,2 при напрузі 220 В постійного струму і не більшим 0,3 при напрузі 380 В змінного струму. У мережах з напругою 440 В постійного і 500 або 660 В змінного струму такі рубильники можна використовувати лише для вимикання знеструмлених кіл.

Рубильниками, що мають дугогасні камери, можна вимикати номінальний струм при 220 В постійного і 380 В змінного струму. В мережах напругою 440 В постійного і 660 В змінного струму такими апаратами дозволяється вимикати струм навантаження, що не перевищує 0,5 номінального.

Вибір рубильників здійснюється за номінальною напругою, номінальним струмом, допустимим комутованим струмом, конструктивним виконанням і ступенем захисту.

Пакетні вимикачі і перемикачі серії ПВ і ПП призначені для нечастих (до 30 за годину) комутацій електричних кіл напругою до 220 В постійного струму або до 380 В змінного струму. Апарати використовуються як ввідні в низьковольтних комплектних пристроях, як комутуючі в колах автоматики та для керування асинхронними електродвигунами. Номінальний струм пакетних вимикачів і перемикачів залежить від їх габаритів і напруги електричних кіл, які вони комутують. У колах постійного і змінного струму напругою 220 В — від 10 до 400 А; у колах змінного струму напругою 380 В — від 6,3 до 250 А.

Інтенсивне гасіння дуги в апараті забезпечується високою швидкістю рухомого контакту, подвійним розривом кола і наявністю фібрових дугогасних щічок. Дуга змінного струму гаситься при першому переході струму через нуль. При вимиканні кола постійного струму дуга діє на фіброві пластинки, які виділяють газ. Завдяки цьому всередині пакета підвищується тиск, і дуга швидко гасне.

Пакетні вимикачі і перемикачі виготовляються з різними ступенями захищеності від впливу оточуючого середовища: IP00, IP56, IP67.

За струмом апарати вибираються так:

$$I_{в.ном} \geq I_{роб.}, \quad (8.15)$$

де $I_{в.ном}$ — номінальний струм вимикача, А; $I_{роб.}$ — найбільший робочий струм навантаження, А.

При керуванні асинхронними двигунами найбільшим робочим струмом є пусковий струм, тому вимикач або перемикач для них вибирається за умовою:

$$I_{в.ном} \geq I_{пуск}, \quad (8.16)$$

де $I_{в.ном}$ — номінальний струм вимикача, А; $I_{пуск}$ — пусковий струм асинхронного двигуна, А.

Крім того, пакетні вимикачі і перемикачі вибирають за кількістю полюсів, кількістю напрямків і ступенем захисту від дії оточуючого середовища.

Перевага пакетних апаратів над рубильниками полягає в їх невеликих габаритах. Суттєвими недоліками є мала стійкість проти спрацювання (не більше 20 тисяч перемикачів) і невисока надійність приводного механізму.

Пакетно-кулачкові вимикачі і перемикачі типів ПКВ, ПКП, ПКУ, ПВП та інші мають більш досконалу конструкцію, завдяки чому їх стійкість проти електричного спрацювання досягає 200-400 тисяч циклів вмикання-вимикання, а стійкість проти механічного спрацювання — від 1 до 6 млн. циклів. Їх застосовують як комутаційні апарати в електроустановках змінного струму напругою до 380 В, для перемикачів кіл керування і автоматики, а також для керування асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором.

Перемикач складається з одного або кількох комутуючих пакетів, механізму фіксації і рукоятки, складених на квадратному валу. Комутуючі пакети і механізм фіксації стягнені шпильками. Вал від поздовжніх переміщень утримується упорною шайбою.

При повороті рукоятки перемикача повертається квадратний вал, а разом з ним і кулачки комутуючих пакетів, що спричиняє розмикання і замикання контактів. Потрібна діаграма комутаційних положень реалізується кулачками з різним профілем. Механізм фіксації забезпечує високу швидкість руху контактів при перемикачній і чітко фіксує вал через кожних 45° повороту рукоятки.

Пакетно-кулачкові вимикачі і перемикачі вибираються за робочим струмом керованого кола за умовою:

$$I_{п.ном} \geq I_{роб.}, \quad (8.17)$$

де $I_{п.ном}$ — номінальний струм перемикача, А.

Крім того, вибирають номер діаграми комутаційних положень, категорію застосування, конструктивне виконання і ступінь захищеності апарата від впливу навколишнього середовища. Якщо перемикач вибирається для керування асинхронним короткозамкненим електродвигуном, то його номінальний струм повинен бути не меншим номінального струму двигуна:

$$I_{п.ном} \geq I_{дв.ном}. \quad (8.18)$$

Ручні пускачі типу ПНВ (пускач натискний вібростійкий) призначені для ручного керування трифазними, а пускачі ПНВС — однофазними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором малої потужності при напрузі до 500 В змінного струму частотою 50 Гц.

Пускач складається з прямоходової контактної системи місткового типу і кнопкового привода із заскочкою, яка фіксує положення «ввімкнено» і «вимкнено». Рухомі частини контактів змонтовані на пластмасовій рейці, а нерухомі — на пластмасовій основі. За ступенем захисту від дії навколишнього середовища пускачі бувають відкритими (IP00), захищеними у пластмасовій оболонці (IP20) і захищеними у металевій оболонці (IP40). Відмінність пускачів типу ПНВ від ПНВС полягає в тому, що в останніх середній полюс, призначений для комутування пускової обмотки однофазного асинхронного електродвигуна, у положенні «ввімкнено» не фіксується.

Найбільша потужність електродвигунів, керованих пускачем ПНВ при напрузі 380 В — 4,5 кВт, а пускачем ПНВС — 0,6 кВт.

Новою розробкою є триполюсний кнопковий вимикач з блокуванням серії ВКИ, призначений для ручного керування одно- та трифазними споживачами електроенергії потужністю від 0,6 до 3,7 кВт номінальною напругою 230/400 В.

Командоапарати призначені для комутації електричних кіл керування, сигналізації і вимірювання. До них належать кнопки і кнопкові пости, універсальні перемикачі, пакетно-кулачкові перемикачі, командоконтролери, шляхові вимикачі і перемикачі.

Кнопки керування та кнопкові пости призначені для комутації електричних кіл керування з напругою змінного струму до 500 В і постійного струму до 220 В. Їх використовують для ручного дистанційного керування.

нційного керування електромагнітними апаратами — реле, контакторами, електромагнітними пускачами тощо. Найпоширенішими є кнопки серії КЕ, КМЕ і кнопкові пости серії ПКЕ.

Кнопка складається з однієї або кількох пар нерухомих контактів, рухомих контактів місткового типу, що приводяться в рух підпружиненим штовхачем. Штовхачі виготовляють у різних виконаннях за формою і кольором, з фіксацією контактів і без неї, з підсвічуванням і без підсвічування тощо. Для підсвічування використовують мініатюрні лампи розжарювання або світлодіоди. Контакти і штовхачі змонтовані на пластмасовій основі. Для підвищення надійності контакти часто виготовляють із срібла. Кнопки виконують із замикаючими і розмикаючими контактами у різних комбінаціях. Найчастіше кнопки вбудовуються у комплектні пристрої керування електроустановками.

Кнопкові пости можуть мати один і більше кнопкових елементів, змонтованих у пластмасовому корпусі з пластмасовим кожухом або без нього. Залежно від експлуатаційного призначення пости можуть бути вбудовані в нішу, панель або змонтовані на будь-якій рівній поверхні. За ступенем захисту від дії навколишнього середовища кнопкові пости бувають захищеними, пиленеводонепроникними, вибухозахищеними.

Номінальна робоча сила струму кнопок і кнопкових постів залежить від комутованої напруги і роду струму. Так, для кнопок серії КЕ при напрузі 220 В змінного струму вона становить 5 А, а при постійному струмі напругою 220 В сила струму вмикання і вимикання дорівнює 0,3 А.

Кнопки і кнопкові пости вибирають за напругою, струмом, кількістю і видом контактів, конструктивним виконанням та ступенем захисту від дії навколишнього середовища.

Універсальні перемикачі серії УП5000 призначені для комутації кіл керування напругою до 500 В змінного струму частотою 50 Гц і до 220 В постійного струму. Перемикачі використовуються для перемикавання багатьох електричних кіл за складними схемами комутації. Допустимий тривалий струм навантаження замкнених контактів становить 16 А.

Командоконтролери призначені для перемикавання кіл керування у складних схемах автоматизованого електропривода при великій частоті комутацій і суворому чергуванні операцій. Привод командоконтролерів ручний, ножний або від електродвигуна. В останньому випадку їх називають програмними реле.

За конструктивним виконанням командоконтролери бувають барабанні, кулачкові і плоскі. Найширше застосування мають кулачкові командоконтролери, які поділяються на нерегульовані і регульовані.

У нерегульованих командоконтролерів момент розмикання і замикання контактів залежить від профілю кулачка і може бути змінений лише заміною кулачка або поворотом його на валу апарата.

У регульованого контролера момент замикання і розмикання контактів при грубому регулюванні можна змінювати перестановкою кулачків у отворах диска, а при точному — зміщувати їх на певний кут вздовж овальних отворів.

8.4.2. Шляхові вимикачі і перемикачі

Шляхові вимикачі і перемикачі призначені для перемикання в колах керування залежно від просторового положення робочого органу машини або керованого чи захищеного механізму. Якщо такі апарати використовуються для перемикання електричних кіл при крайніх положеннях контрольованих механізмів, то їх називають кінцевими вимикачами.

За принципом дії шляхові вимикачі поділяються на контактні і безконтактні. Контактні вимикачі складаються з групи контактів у різних комбінаціях і привода, змонтованих у металевому корпусі. Залежно від виду привода вимикачі поділяються на натискні (кнопкові), важільні, шпindelельні й обертові.

У натискних шляхових вимикачах упор контрольованого робочого органу діє на підпружинений шток кнопкового елемента і перемикання контактів відбувається із швидкістю переміщення робочого органу.

У важільних вимикачах упор діє на важіль, який обертається. Завдяки наявності пружин замикання і розмикання контактів відбувається з високою швидкістю, яка не залежить від швидкості руху упора.

У шпindelельних шляхових вимикачах контакти перемикаються при переміщенні гайки по гвинту, який через передачу з'єднаний з валом контрольованого механізму.

Перемикання контактів у обертових шляхових вимикачах здійснюється кулачковими шайбами, які приводяться в рух від контрольованого механізму, що обертається.

У контактних шляхових вимикачах перемикання контактів відбувається внаслідок механічної дії контрольованого робочого органу на привод вимикача, що обумовлює недостатню точність їх роботи, складність настройки і порівняно невисоку надійність й довговічність. Значно кращі ці показники у шляхових вимикачів з герметичними магнітокерованими контактами — герконами, на основі яких розроблена серія вимикачів ВСГ. Основними вузлами вимикачів цієї серії є геркон 1 (рис. 8.13, а), постійний магніт 2 і пластинка 3 з магнітом'якої сталі, жорстко з'єднана з контрольованим робочим органом. При переміщенні робочого органу пластинка входить у вузьку щілину між герконом і постійним магнітом і замикає на себе магнітний потік, внаслідок чого геркон перемикається.

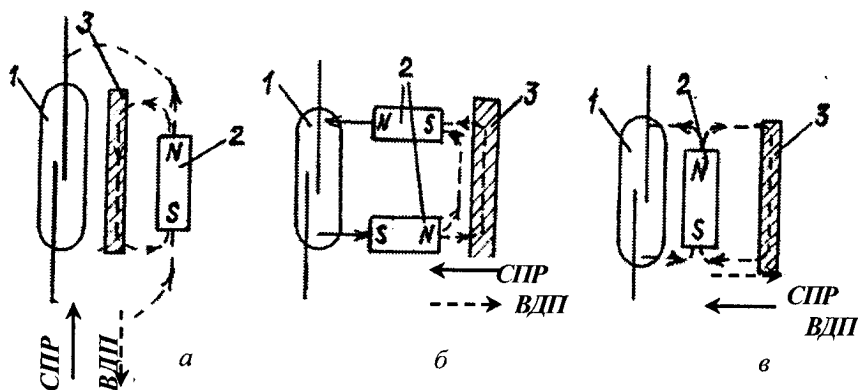


Рис. 8.13. Схеми керування герконовими шляховими вимикачами

Можливі й інші варіанти побудови герконових шляхових вимикачів (рис. 8.13 б, в). Допустима частота перемикань вимикачів з герконами досягає 6000 за годину, стійкість проти комутаційних спрацювань — 10^6 — 10^8 перемикань.

Більш швидкодіючими і довговічними є безконтактні шляхові вимикачі, в яких робочий орган діє не на контакти, а на безконтактні датчики. За принципом дії датчики можуть бути індуктивними, індукційними, магнітотуляційними, оптичними та ін.

Широко поширені безконтактні шляхові вимикачі генераторного типу БВК-24, КВД-3/24 і ДЗ.

Безконтактний шляховий вимикач КВД-3/24 змонтований в ударостійкому корпусі з полістиролу, герметизованому епоксидним

компаундом. В корпусі є щілина шириною 3 мм для введення алюмінієвої пластинки. Електрична схема вимикача складається з автогенератора і двокаскадного підсилювача на транзисторах (рис. 8.14). Вимикач підключають до джерела постійного струму напругою 24 В. Якщо алюмінієва пластинка знаходиться поза щілиною датчика, то в момент вмикання транзистор $VT1$ відкривається і через обмотку $L1$ проходить струм. Завдяки трансформаторному зв'язку в обмотці $L2$ наводиться ЕРС, від дії якої заряджається конденсатор $C1$, приєднаний до бази транзистора $VT1$. При досягненні певної напруги на конденсаторі $C1$ транзистор закривається. Потім процес повторюється, тобто виникає автогенераторний коливний режим. Завдяки трансформаторному зв'язку з обмоткою $L1$ в обмотці $L3$ наводиться ЕРС, під дією якої через діод $VD1$ проходить струм, що створює від'ємне зміщення на базі транзистора $VT2$. Транзистор $VT2$ відкривається, а $VT3$ — закривається.

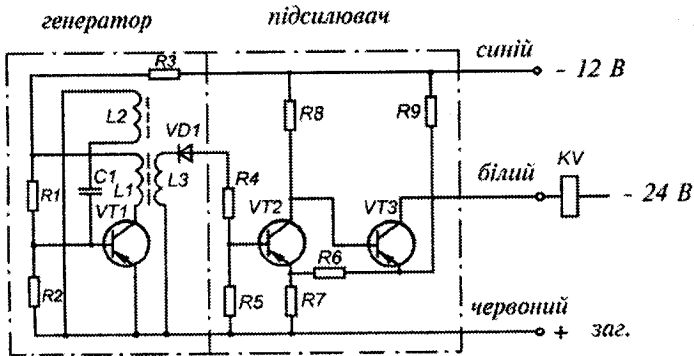


Рис. 8.14. Схема безконтактного шляхового вимикача КВД-3/24

Коли в щілину між базовою $L2$ і колекторною $L3$ обмотками генератора введена алюмінієва пластинка, зменшується коефіцієнт зворотного зв'язку, і генерація зривається. Транзистор $VT2$ закривається, а вихідний транзистор $VT3$ відкривається, пропускаючи струм на котушку реле KV .

Якщо до виходу безконтактних шляхових вимикачів приєднати логічні елементи, підсилювач або коло керування тиристорами, то вся схема керування електроприводом може бути безконтактною.

8.4.3. Контакттори

Контактором називається двопозиційний електричний апарат, призначений для частих вмикань і вимикань силових електричних кіл напругою до 1000 В при нормальних режимах роботи.

Залежно від привода контактів контактори поділяються на електромагнітні, гідравлічні і пневматичні. Найпоширенішими є електромагнітні контактори.

За родом комутованого струму контактори бувають постійного струму, змінного струму, а також постійного і змінного струму.

Електромагнітні контактори, призначені для роботи в колах постійного струму, мають привод від електромагнітів постійного струму. Контактні системи контакторів змінного струму приводяться від електромагнітів постійного або змінного струму.

За кількістю головних кіл контактори можуть бути одно-, дво-, три-, чотири- і п'ятиполюсними.

Основними технічними даними контакторів є номінальна напруга, номінальний струм головних і допоміжних контактів, граничний струм вмикання і вимикання, механічна і комутаційна стійкість проти спрацювання, допустима кількість вмикань за годину, власний час вмикання і вимикання.

Номінальним струмом контакторів вважають найбільший струм, який можна пропускати через замкнені головні контакти протягом 8 год. без комутацій. При цьому температура різних частин апарата не повинна перевищувати допустимої. Граничний номінальний струм більшості контакторів дорівнює 630 А. Окремі серії виготовляються на струм до 3000 А.

У технічних характеристиках вказують також номінальний робочий струм, тобто допустимий струм через замкнені головні контакти в конкретних умовах роботи апарата.

Умови роботи контакторів за характером навантаження та величиною комутованого струму надзвичайно різноманітні. Залежно від умов роботи стандартами передбачено такі категорії застосування контакторів у колах змінного і постійного струму: АС-1, АС-2, АС-3, АС-4, АС-11, АС-20, АС-22, АС-23, ДС-1, ДС-2, ДС-3, ДС-4, ДС-5, ДС-11, ДС-22 (див. розд. 8.2).

Передбачено також роботу контакторів у таких режимах: переривчасто-тривалому, тривалому, повторно-короткочасному і короткочасному.

Крім того, розрізняють режими нормальних комутацій і нечастих комутацій. Останні можуть виникати не часто, наприклад, при

коротких замиканнях. Допустимі значення комутованих струмів в режимі нечастих комутацій значно перевищують допустимі струми в режимах нормальних комутацій.

У сучасних електроприводах частота комутацій досягає 3600 за годину. У зв'язку з цим контактори повинні бути стійкими проти спрацювання. Стійкість електричних апаратів проти спрацювання поділяють на електричну (комутаційну) і механічну.

Механічна стійкість проти спрацювання визначається кількістю циклів вмикання-вимикання апарата при знеструмленому головному колі без ремонту і заміни його вузлів і деталей.

Механічна стійкість сучасних контакторів досягає 20 млн. циклів. **Комутаційна стійкість** проти спрацювання — це кількість операцій вмикання-вимикання кола із струмом, після якої потрібна заміна контактів. Гранична комутаційна стійкість сучасних електромагнітних контакторів 3–5 млн. операцій.

Власний час вмикання контактора — це проміжок часу від моменту подачі напруги на котушку електромагніта до замикання магнітопровода. Через велику індуктивність котушок власний час вмикання контакторів з електромагнітами постійного струму досягає 0,2–0,35 с. Контактори з електромагнітами змінного струму спрацьовують значно швидше — за 0,03–0,05 с.

Власний час вимикання — це час від моменту розмикання кола котушки електромагніта до моменту розмикання контактів апарата. У контакторів з електромагнітами постійного струму цей час дорівнює 0,06–0,23 с. Апарати з електромагнітами змінного струму вимикаються за 0,02–0,03 с.

Контактори складаються з таких основних вузлів: системи головних контактів, дугогасного пристрою, електромагніта і системи допоміжних контактів. Контактори поставляються без внутрішнього монтажу і оболонки. При подачі напруги на котушку електромагніта контактора його ярів притягується до нерухомого осердя і приводить в рух траверсу з рухомими контактами. Внаслідок цього замикаючі контакти замикаються, а розмикаючі — розмикаються. При знеструмленні котушки ярів відпадає під дією пружини або власної ваги. Дугогасний пристрій забезпечує швидке гасіння дуги, чим досягається мале зношення контактів.

Контактори постійного струму в більшості випадків виготовляються однополюсними. Але в окремих серіях на струми до 160 А є апарати з кількома як замикаючими, так і розмикаючими головними контактами. Як правило, головні контакти важільного типу. Дугога-

сні системи ґрунтуються на принципі гасіння дуги поперечним магнітним полем в дуогасних камерах.

Однополюсний контактор постійного струму КПВ-600 (рис. 8.15) має нерухомий контакт 17, жорстко закріплений на скобі 15. Рухомий контакт 19 у вигляді товстої мідної пластини з'єднаний з якорем електромагніта 4 і закріплений так, що може повертатися відносно точки опори 20. Завдяки цьому при вмиканні і вимиканні контакт 19 перекочується і ковзає по поверхні нерухомого контакту 17, руйнуючи оксидну плівку на контактуючих поверхнях. Контактне натискання створюється пружиною 22. З ввідною клемою 8 рухомий контакт з'єднаний гнучкою в'яззю 9.

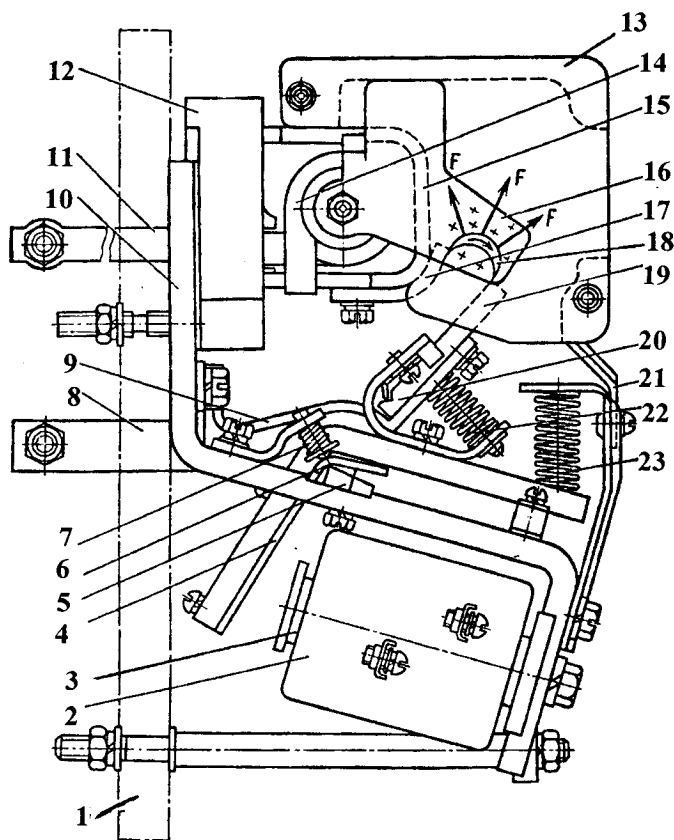


Рис. 8.15. Контактор постійного струму КПВ-600.

Привод контактора здійснюється електромагнітом поворотного типу, який складається з котушки 2, закріпленої на нерухомому осерді 3, і якоря 4. Якір 4 обертається на призмі 5, що забезпечує високу стійкість електромагніта проти механічного спрацювання. При спрацюванні зазор між скобою якоря 6 і призмою 5 автоматично вибирається під дією пружини 7. Повернення якоря у вихідне положення після вимикання електромагніта здійснюється пружиною 23. Контактор виконано так, що якір електромагніту 4 урівноважений відносно осі обертання рухомим контактом 19, деталями його кріплення і плечем якоря, що сприймає дію зворотної пружини 23.

Система дугогасіння виконана на принципі електромагнітного дуття і складається з послідовної котушки 14, полюсів 16 і дугогасної камери 13 з вузькою щілиною. Один кінець дугогасної котушки приєднаний до скоби 15, другий кінець у пластмасовій основі 12 з'єднаний з виводом 11. Для зменшення оплавлення контактів дугою при струмах більше 50 А контактор обладнаний дугогасним контактом-рогом 21. При розмиканні контактів дуга 18 під дією магнітного поля котушки 14 швидко перекидається на скобу 15 і на захисний ріг 21 рухомого контакту. Гасіння дуги відбувається за рахунок її видовження і інтенсивного охолодження у вузькій щілині дугогасної камери 13.

Контактор обладнується допоміжними контактами місткового типу (на рисунку не показані), які приводяться в дію тим же електромагнітом, що і головні контакти. Допоміжні контакти призначені для комутації кіл керування, блокування, сигналізації та ін.

Вузли і деталі контактора змонтовані на міцній сталій скобі 10, яка при монтажу апарата закріплюється шпильками на ізоляційній основі 1.

Конструктивні деталі контактора (скоба 10, вузли електромагніта та ін.) можуть знаходитися під напругою, тому дотикання до них небезпечно для життя.

При проходженні номінального струму контактор повинен знаходитися в увімкненому стані не більше 8 год. (переривчастотривалий режим роботи). За цей час на контактуючих поверхнях створюється окисна плівка з високим електричним опором, що спричиняє до збільшення падіння напруги на контактах та їх нагрівання. Для зачищення контактів від окислів міді контактор потрібно кілька разів увімкнути і вимкнути. У контакторах, призначених для тривалого режиму роботи, на робочу поверхню контактів напаяють срібні пластинки. Такі апарати можуть працювати з номінальним

струмом у ввімкненому стані досить тривалий час, не потребуючи періодичного зачищення контактів.

Контактори змінного струму виготовляються дво-, три-, чотири- і п'ятиполюсними на струми від 100 до 1000 А. Найпоширеніші триполюсні контактори, які використовують для керування трифазними споживачами електричного струму.

Системи головних контактів контакторів змінного струму бувають як важільного типу з одинарним розриванням кола, так і місткового типу з подвійним розривом. Завдяки подвійному розриву кола контактами місткового типу зменшуються розміри дугогасних пристроїв і контактора в цілому.

У контакторів важкого режиму роботи застосовують електромагніти поворотного типу, у контакторах нормального режиму — прямоходові.

Магнітопроводи складаються з нерухомого і рухомого осердь, мають Ш- або П-подібну форму і набираються з окремих ізольованих одна від однієї пластин товщиною 0,35; 0,5; 1 мм. Для гасіння дуги використовують деіонні решітки або камери з вузькими щілинами та послідовні дугогасні котушки.

Контактор типу КТ-6000 призначений для вмикання і вимикання приймачів електричної енергії з номінальною напругою до 380 В. Контактори виготовляються на номінальні струми від 80 до 630 А. Конструкція контактора блочна. Блоки електромагніта 4 (рис. 8.16), головних 11 і допоміжних 16 контактів змонтовані на сталій рейці 5. Обертовий момент від електромагніта до рухомих контактів передається через ізольований вал 6, який обертається в підшипниках 7.

Головні контакти пальцевого типу. Нерухомий контакт 12 жорстко закріплений на скобі 17, яка в свою чергу кріпиться на ізоляційній монтажній колодці 14. Рухомий контакт 1 закріплений на контактотримачі 18, який приводиться в рух валом 6 через важіль 3. Необхідне контактне натискання забезпечується пружиною 2. З виводним затискачем 13 контактотримач з'єднаний гнучкою в'яззю 15.

Дугогасна система складається з послідовної котушки 8 з осердям 9, полюсних пластин 10 і дугогасної камери 11 з вузькою щілиною.

Електромагніт привода контактора складається з нерухомого осердя 19, рухомого осердя (якоря) 4 і котушки 20. Для амортизації удару якоря по нерухомому осердю при вмиканні апарата між нерухомим осердям і основою вставлена пружина 21. В полюси нерухомого осердя вмонтовані короткозамкнені витки, завдяки яким усувається вібрація якоря при живленні котушки змінним струмом. Для

зменшення опору магнітному потокові контактні поверхні магнітопровода шліфуються.

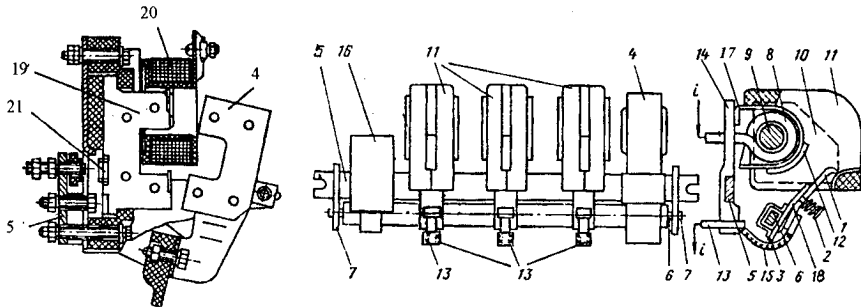


Рис. 8.16. Контактор серії KT-6000

Особливістю електромагнітів змінного струму є те, що індуктивний опір котушки зменшується при збільшенні зазору між якорем і нерухомим осердям. Це призводить до того, що струм, споживаний котушкою при розімкненому магнітопроводі, у 10-15 разів перевищує струм, споживаний у замкненому стані. При цьому котушка інтенсивно нагрівається. Тому недопустимо подавати струм на котушку при відпущеному і загальмованому якорі. З цієї причини не можна перевищувати допустиму частоту вмикань контактора.

Контакти допоміжного кола 16 місткового типу виконуються з двома розмикаючими і двома замикаючими контактами або з трьома замикаючими і трьома розмикаючими контактами. Номінальний струм контактів у тривалому режимі 10 А.

Електромагніти контакторів змінного струму, що живляться постійним струмом, мають спеціальну котушку з додатковим резистором. При вимкненому контакторі резистор шунтується розмикаючим допоміжним контактом, завдяки чому забезпечується форсування контактора при спрацюванні.

Контактори серії МК застосовуються в силових електричних колах і колах керування постійного струму напругою до 440 В і змінного струму напругою до 660 В. Контактори виготовляються на номінальні сили струму 40-160 А з різними комбінаціями головних контактів, наприклад, з двома замикаючими, з одним замикаючим і одним розмикаючим, з трьома замикаючими тощо. Таким чином, контактори серії МК можуть використовуватися і для керування трифазними асинхронними електродвигунами. Контактор має також чотири кола замикаючих або розмикаючих допоміжних контактів.

Привод контактора здійснюється від електромагніту постійного струму поворотного типу з котушками напругою від 24 до 220 В.

Містковий тип головних контактів з двома розривами сприяє гасінню дуги змінного струму. Для гасіння дуги постійного струму кожний полюс контактора обладнаний системою магнітного гасіння з котушкою струму.

З метою підвищення стійкості проти комутаційних спрацювань контактори серії МК, призначені для важкого режиму роботи АС-4 з частотою вмикань за годину 1200 і більше, комплектуються напівпровідниковою приставкою (рис. 8.17.) Основними елементами приставки є тиристори $VS1$ і $VS2$, з'єднані за зустрічно-паралельною схемою і увімкнені паралельно головному контактів $ГК$. Керування тиристорами здійснюється через розділюючі діоди $VD2$ і $VD3$. Якщо контакт розривається в момент, коли струм навантаження проходить у напрямку, показаному стрілкою, то напруга, яка виникає між містком рухомого головного контакту і верхнім нерухомим головним контактом, через діод $VD2$ відкриває тиристор $VS1$, по якому починає проходити струм головного кола. Після проходження струму через нуль тиристор закривається і процес вимикання закінчується. При зворотному напрямку струму аналогічно працюють діод $VD3$ і тиристор $VS2$. Діоди $VD1$ і $VD4$ захищають керуючі переходи тиристорів від підвищення напруги. Ланцюжок RC полегшує умови відновлення напруги і знижує рівень перенапруг на тиристорах.

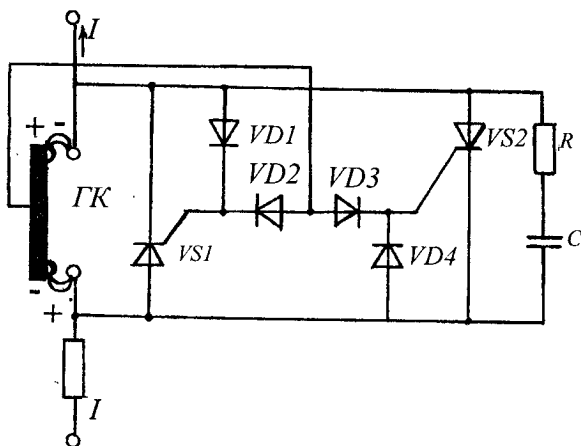


Рис. 8.17. Схема напівпровідникової приставки до контактора серії МК

Використання напівпровідникових приставок дозволило довести стійкість проти комутаційних спрацювань контакторів з номінальним струмом 63 А до 5 млн. циклів, а при номінальному струмі 100 А — до 3 млн. циклів.

Контактори вибирають за родом струму і напругою головного кола і кола керування (при змінному струмі і за частотою), кількістю та видом головних і допоміжних контактів, номінальним струмом головних контактів, способом приєднань провідників, кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Найскладніше вибирати контактори за силою струму головних контактів. Для цього повинні бути відомі робочий струм споживача, режим роботи контактора, частота вмикань за годину, категорія застосування, величини комутованих струмів при вмиканні і вимиканні та рівень напруги комутованого кола. Номінальний струм контактора повинен бути не меншим номінального струму споживача ($I_{к.ном} \geq I_{сп.роб}$). При керуванні електродвигунами за робочий струм приймають номінальний струм двигуна ($I_{к.ном} \geq I_{дв.ном}$).

Величини комутованих струмів при вмиканні і вимиканні споживача не повинні перевищувати допустимих значень для контактора при відповідній категорії застосування. Наприклад, при використанні контактора КТ6000 для прямого пуску асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором і вимикання при його обертанні (категорія застосування АС-3) пусковий струм двигуна повинен бути не більшим за шестикратний номінальний робочий струм контактора, а струм вимикання двигуна не повинен перевищувати номінальний робочий струм контактора ($I_{дв.вим.} \leq I_{к.ном.роб.}$).

Якщо контактор вибирається для роботи в повторно-короткочасному режимі, то фактичне число вмикань його за годину не повинно перевищувати допустимого ($z_{ф.} \leq z_{дон.}$).

8.4.4. Електромагнітні пускачі

Електромагнітним пускачем називається комутаційний апарат, призначений для вмикання і вимикання трифазних асинхронних електродвигунів при напрузі до 660 В змінного струму частотою 50, 60 Гц. Пускачі виготовляються на номінальні струми головних контактів від 6,3 до 200 А.

Головним апаратом пускача є електромагнітний контактор. Пускач, призначений для нереверсивного керування двигуном, має один контактор, для реверсивного — два, а для пуску двигуна з перемиканням обмоток статора із зірки на трикутник — три. Крім того, в пускач можуть бути вмонтовані теплове реле або пристрій позисторного захисту, які призначені для захисту двигуна від перевантажень недопустимої тривалості, кнопки «Пуск» і «Стоп», а також сигнальні лампи. За ступенем захисту від дії навколишнього середовища пускачі виконуються відкритими (IP00), захищеними (IP40) і пиловодозахищеними (IP54).

Контактори сучасних пускачів, наприклад, серії ПМЛ, мають прямоходову систему головних і допоміжних контактів місткового типу. Оскільки пусковий струм асинхронних електродвигунів може бути в 7,5 рази більше за номінальний, то для забезпечення достатньої стійкості проти комутаційних спрацювань вібрація контактів повинна бути якнайменшою. Цього досягають зменшенням маси рухомих частин контактора.

Для приводу контактів використовуються прямоходові електромагніти з котушками, розрахованими на змінний або постійний струм різної напруги. Головні і допоміжні контакти мають накладки із срібла або металокераміки.

У контакторів з номінальним струмом більше 10 А біля кожного розриву головних контактів розміщені дугогасні решітки, а до 10 А — дугогасні вузькі щілини. На основі контактора передбачені напрямні для вмонтування додаткових пристроїв: контактних приставок типу ПКЛ або ПКБ, кнопки «Пуск» і сигнальної лампи або пневмоприставки типу ПВЛ. У крайні стержні осердя магнітопровода вмонтовані короткозамкнені витки, на середньому стержні розміщена котушка.

В контактній приставці може бути встановлено до чотирьох допоміжних контактів у різних комбінаціях. Привод контактної приставки ПКЛ або пневмоприставки витримки часу ПВЛ також здійснюється електромагнітом контактора через траверсу. Теплове реле серії РТЛ приєднується безпосередньо до вихідних клем головних контактів.

Контактори пускачів серії ПМЛ на струми 80-200 А мають прямоходову магнітну систему П-подібного типу. Контактна система контакторів розміщена збоку від магнітної системи. Передача зусилля від електромагніту до контактної траверси здійснюється важелем. На кожному контакторі встановлено по два уніфікованих

вузли з допоміжними контактами у різних комбінаціях. Теплові реле кріпляться до контактора перемичкою.

Пускачі із ступенем захисту IP54 вмонтовані в оболонку з ущільненням.

Реверсивні пускачі мають два контактори, якорі 1 і 3 (рис. 8.18) яких з'єднані між собою важелем 2 механічного блокування. Коли верхній контактор увімкнений, його якорь 1 притягується і через важіль 2 утримує якорь 3 нижнього контактора у вимкненому стані. Завдяки цьому поява напруги на котушці нижнього контактора не спричиняє до його спрацювання. Але оскільки магнітопровід розімкнений, то котушка споживає струм, у 9—12 разів більший за номінальний. Для запобігання перегоранню котушки у схемах керування реверсивними пускачами передбачається і електричне блокування допоміжними розмикаючими контактами.

Електромагнітні пускачі серії ПМА виготовляють на номінальні струми від 40 до 160 А. Їх контактори мають також прямоходову магнітну систему і контакти місткового типу. Пускачі можуть комплектуватися тепловими реле серії РТТ, призначеними для захисту двигунів від перевантажень недопустимої тривалості та при обриві однієї із фаз, або апаратами позисторного захисту типу АЗП чи УВТЗ-1М.

Апарати позисторного захисту спрацьовують при недопустимому перевищенні температури обмоток статора. Пускачі, вмонтовані в оболонку із ступенем захисту IP40 або IP54, можуть бути обладнані кнопками «Пуск» і «Стоп» та сигнальними лампами.

Основними технічними даними пускачів є номінальна напруга, номінальний струм головних і допоміжних контактів, механічна і комутаційна стійкість проти спрацювання, допустима кількість вмикань за годину.

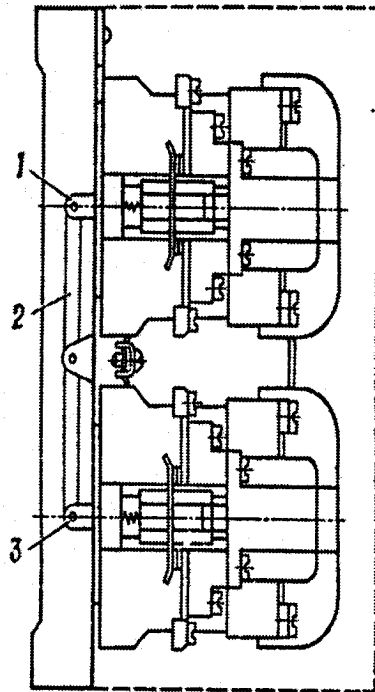


Рис. 8.18. Реверсивний пускач

Слід розрізняти номінальні і номінальні робочі напруги і струми пускачів.

Номінальною напругою пускача вважають напругу мережі, для якої пускач призначений. Номінальною робочою називають напругу мережі, при якій пускач може працювати. Так, номінальна напруга пускачів серії ПМЛ і ПМА становить 380 В. Пускачі ж можуть працювати у мережах з напругою 500 і 660 В. При цьому номінальні струми повинні бути зменшені.

Номінальним струмом пускачів є струм, який визначений за умовами нагрівання пускача в основному конструктивному виконанні при роботі в основному номінальному режимі і номінальній напрузі.

Номінальним робочим струмом називають допустимий струм через головні контакти пускача в конкретних умовах його роботи, які визначаються ступенем захисту апарата, категорією застосування, режимом роботи, номінальною напругою мережі.

Стійкість пускачів проти механічних спрацювань досить висока і становить 5–16 млн циклів при допустимій частоті вмикання 3600 або 2400 за годину.

За стійкістю проти комутаційних спрацювань пускачі поділяються на три виконання: А, Б, В. Пускачі у виконанні А залежно від номінального струму у категорії застосування АС-3 допускають від 2,5 до 4 млн циклів вмикання-вимикання, виконання Б — 1–1,25 млн циклів, а виконання В — 0,3–0,5 млн циклів. У категорії застосування АС-4 стійкість апаратів значно нижча: 0,05–0,4 млн циклів.

Електромагнітні пускачі вибирають за такими параметрами:

1) за номінальною напругою пускача, яка повинна бути не нижчого номінальної напруги мережі: $U_{н.ном.} \geq U_{м.}$;

2) за номінальним робочим струмом — так, щоб номінальний робочий струм пускача був не меншим номінального струму керованого двигуна: $I_{н.ном.р.} \geq I_{дв.ном.}$;

3) за призначенням — реверсивний, неревверсивний, для пуску електродвигунів з перемиканням обмоток із зірки на трикутник, з апаратом захисту (теплове реле, позисторний захист) чи без нього;

4) за ступенем захисту від дії навколишнього середовища і наявністю кнопок «Пуск» і «Стоп» та сигнальних ламп;

5) за кількістю і видом контактів допоміжного кола;

6) за кліматичним виконанням і категорією розміщення;

7) за родом струму і напругою втягувальної котушки пускача. При цьому номінальна напруга котушки повинна дорівнювати напрузі кола керування пускачем: $U_{\text{кот.ном.}} = U_{\text{кер.}}$.

8) за стійкістю контактів головного кола проти комутаційних спрацювань залежно від частоти вмикань пускача, категорії застосування і необхідного строку його служби (6-10 років). Так, при застосуванні апаратів в категорії АС-3 і частоті вмикань за добу більше 400 приймаються пускачі виконання А, при частоті вмикань від 120 до 400 циклів за добу — виконання Б і при частоті вмикань менше 120 циклів за добу — виконання В.

При виборі пускачів для роботи у повторно-короткочасному режимі допустима частота вмикань апарата за годину відповідно до категорії застосування повинна бути не меншою за фактичну: $Z_{\text{доп.}} \geq Z_{\text{ф.}}$.

Вибраний пускач потрібно перевірити за умовами комутації, щоб пусковий струм двигуна не перевищував шестикратного робочого струму пускача: $6I_{\text{п.ном.р.}} \geq I_{\text{дв.пуск.}}$.

8.4.5. Електричні реле

Реле — це електричний апарат, в якому при плавній зміні вхідного (керуючого) параметра до певної наперед заданої величини відбувається стрибкоподібна зміна вихідного (керованого) параметра. Хоча один з цих параметрів повинен бути електричним.

Характеристикою керування реле є залежність вихідного параметра Y від вхідного X (рис. 8.19). При безперервному зростанні параметра X до деякого значення $X_{\text{спр.}}$, при якому реле спрацьовує, відбувається стрибкоподібна зміна вихідного параметра Y від нуля (для контактних реле) або від мінімального значення $Y_{\text{мін.}}$ (для безконтактних реле) до значення $Y = Y_{\text{макс.}}$. При подальшому зростанні параметра X значення Y не змінюється. Коли вхідний параметр X зменшується до значення $X = X_{\text{відн.}}$, при якому реле відпускає, параметр Y стрибкоподібно зменшується до нуля або до значення $Y = Y_{\text{мін.}}$. Такий характер переривчастої функції називається релейним керуванням.

В електроприводах реле використовуються для виконання функцій керування та захисту. Окрема група реле, які називають проміжними, призначена для передачі команд з одного електричного кола в інші, розмноження сигналів та їх підсилення.

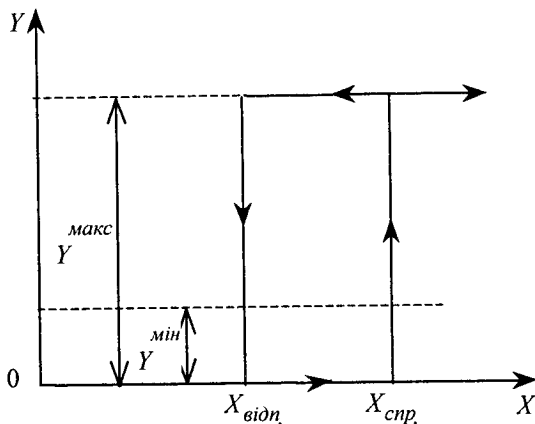


Рис. 8.19. Характеристика керування реле

До реле, що працюють в системах керування і захисту електроприводів, ставиться ряд специфічних вимог. Вони повинні бути стійкими до ударів та вібрацій, захищеними від дії факторів оточуючого середовища (високої вологості, запиленості і загазованості повітря), мати високу надійність. Оскільки частота вмикань сучасних електроприводів досягає 3600 за годину, то реле керування повинні мати високу стійкість проти механічних і електричних спрацювань. Реле захисту повинні також забезпечувати тривалий час стабільності параметрів настройки.

Найчастіше реле класифікують за такими ознаками:

- за родом вхідної величини — реле струму, напруги, температури, частоти, тиску, швидкості і т. д.;
- за родом струму керування — постійного і змінного струму;
- за величиною напруги кола керування;
- за коефіцієнтом повернення реле струму і напруги — з нормованим коефіцієнтом повернення; з ненормованим коефіцієнтом повернення;
- за кількістю і видом контактів;
- за категорією застосування;
- за способом приєднання провідників — з переднім приєднанням; із заднім приєднанням;
- за конструктивним виконанням — відкриті, пилоблизкозахищені, герметичні, з герметизованими контактами, герконові;
- за принципом дії — контактні і безконтактні.

Реле звичайно мають три функціональні елементи: сприймаючий, проміжний і виконавчий. Реле часу, крім того, мають четвертий елемент, який створює витримку часу між моментом подачі керуючого сигналу на сприймаючий елемент і моментом спрацювання виконавчого елемента.

Сприймаючий елемент сприймає вхідний (керуючий) параметр (струм, напругу, тиск, температуру тощо) і перетворює його у фізичну величину, необхідну для роботи реле. В реле з рухомими частинами сприймаючий елемент є рушійним органом. В контактних реле вхідна величина перетворюється сприймаючим елементом, як правило, в механічну силу.

Проміжний елемент (у контактних реле — пружина) порівнює значення перетвореної вхідної величини із заданим значенням і при перевищенні керуючим параметром заданого значення передає первинну дію на виконавчий елемент.

Виконавчий елемент стрибкоподібно змінює вихідний параметр. В контактних реле виконавчим елементом є рухома контактна система. Виконавчі елементи безконтактних реле різко змінюють свій опір, ємність або індуктивність.

Основними характеристиками реле є:

- значення величини спрацювання $X_{спр.}$;
- значення величини відпускання $X_{відп.}$;
- коефіцієнт повернення K_n — відношення величини відпускання до величини спрацювання:

$$K_n = \frac{X_{відп.}}{X_{спр.}}. \quad (8.19)$$

Коефіцієнт повернення реле завжди менший одиниці і знаходиться в межах від 0,2 до 0,99. Він залежить від характеру і співвідношення тягової і механічної характеристик реле.

- *робоче значення вхідної величини X_p* — максимальне значення цієї величини, під дією якої сприймаючий елемент може знаходитися тривало, не руйнуючись (не перегріваючись вище допустимої температури);
- *потужність спрацювання $P_{спр.}$* — потужність, яку реле споживає при спрацюванні;
- *потужність керування P_k* — електрична потужність вихідного кола, яку виконавчий елемент реле може пропускати тривало. Для контактних реле ще і та потужність, яку контакти можуть вмикати і вимикати при даній напрузі.

- коефіцієнт підсилення K_{nc} — відношення потужності керування до потужності спрацювання:

$$K_{nc} = \frac{P_k}{P_{спр.}}; \quad (8.20)$$

- допустима частота спрацювання — кількість спрацювань за одиницю часу. За цим параметром реле поділяють на три основні групи: а) з малою частотою спрацювання за хвилину; б) з середньою частотою спрацювання — від одного разу за хвилину до десяти разів за секунду; в) з великою частотою спрацювання — більше десяти разів за секунду (вібраційні реле);
- час спрацювання — проміжок часу між моментом появи сигналу $X \geq X_{спр.}$ до моменту появи сигналу $Y_{макс}$ у керованому колі;
- час відпускання — проміжок часу від моменту зняття сигналу із сприймаючого елемента до моменту припинення дії виконавчого органа на кероване коло;
- строк служби — календарна тривалість експлуатації реле від її початку до настання граничного стану;
- стійкість проти спрацювання — властивість реле протистояти спрацюванню, яка оцінюється кількістю комутаційних циклів.

В електроприводах найчастіше застосовують реле струму, реле напруги, проміжні реле і реле часу.

Реле струму і напруги. Обмотки реле струму вмикаються послідовно із споживачами електроенергії, тому розраховані на струми в одиниці і десятки ампер. При більших значеннях робочих струмів реле вмикають через трансформатори струму. Для регулювання струму спрацювання реле мають спеціальні регулюючі пристрої.

В електроприводах реле струму використовують як реле максимального струму, реле мінімального струму та реле контролю робочого струму.

Реле максимального струму використовують як захисні реле електродвигунів. Їх обмотки вмикають в головні кола двигунів, а розмикаючі контакти — в кола керування (рис. 8.20). За цією схемою реле $KA1...KA3$ вимикають двигун M при перевантаженнях струмом без витримки часу. Реле $KA4$ вимикає контактор KM через реле часу KT при затяжних пусках ($t_{в.р.ч.} < t_{пуску}$) або при короткочасних пікових перевантаженнях. При цьому струм уставки реле $KA4$ вибирається за умовою:

$$I_{уст.} \leq 0,75 I_{пуск}, \quad (8.21)$$

де $I_{пуск}$ — пусковий струм двигуна.

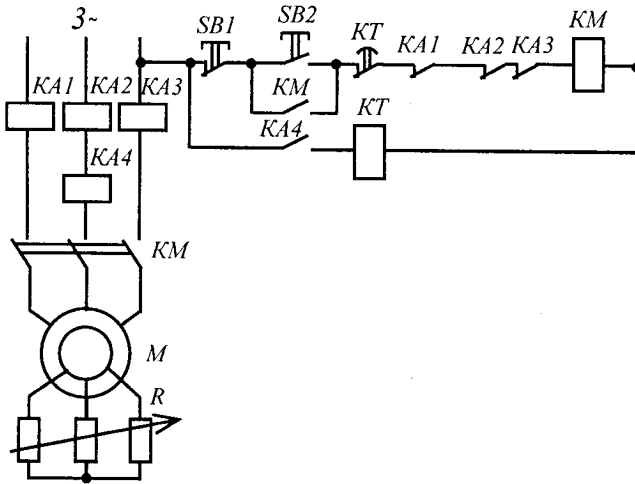


Рис. 8.20. Схема максимального струмового захисту з реле часу

Струм повернення реле $I_{пов.} = 1,3 I_{дов.ном.}$

Уставка реле $КА1...КА3$ вибирається за умовою:

$$I_{уст.} \geq (1,3 \div 1,5) I_{пуск}. \quad (8.22)$$

Реле мінімального струму використовують для захисту трифазних електродвигунів від обриву фази (рис. 8.21). Замикаючі контакти реле $КА1, КА2, КА3$ вмикаються послідовно з допоміжним контактом контактора $КМ$.

В цьому випадку струм уставки реле повинен дорівнювати номінальному струму двигуна:

$$I_{у.р.} = I_{дов.ном.} \quad (8.23)$$

Коефіцієнт повернення реле повинен бути якнайменшим, щоб при малих навантаженнях двигун не вимикався.

Реле контролю робочого струму використовують як пускові у схемах керування пуском у функції струму асинхронних двигунів з фазним ротором, двигунів постійного струму або синхронних двигунів. При цьому реле настроюють так, щоб струм їх спрацювання

був меншим пускового струму двигуна, а струм відпускання дорівнював струмові перемикання:

$$I_{сп.р.} = (0,7 \div 0,8) I_{дв.пуск}, \quad (8.24)$$

$$I_{відп.р.} = I_{перемик.}$$

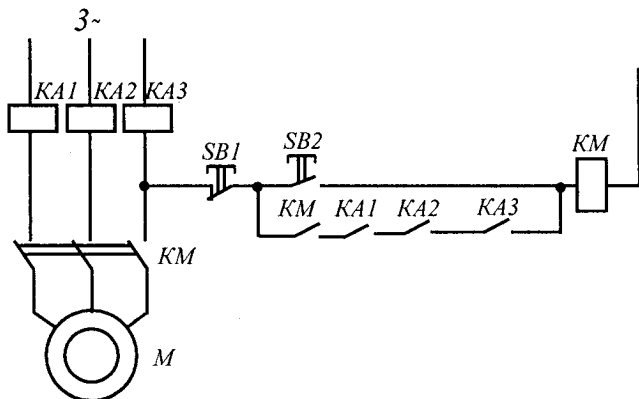


Рис. 8.21. Схема захисту двигуна від обриву фази

Реле напруги використовуються для контролю напруги та як проміжні реле.

Якщо потрібно контролювати зниження напруги, використовують реле напруги. При цьому контакти реле вимикають установку при зниженні напруги мережі нижче допустимої.

При короткому замиканні в мережі напруга на двигунах знижується. Якщо коротке замикання триває $0,03 \div 0,05$ с, то як правило контактори і магнітні пускачі не встигають вимкнути електродвигуни, а частота їх обертання практично не змінюється. При більш тривалих зниженнях напруги нижче $0,7U_n$ двигуни можуть бути вимкнені пусковими апаратами. Якщо таке зниження напруги недопустиме, в коло керування вмикають реле напруги, яке регулюють на напругу відпускання, вищу за $0,7U_n$. Схема вмикання така (рис. 8.22). При положенні перемикача SA «0» одержує живлення обмотка реле KV, яке замикає свій контакт. Двигун вмикається переводом перемикача в положення «1». При зниженні напруги мережі відпускає реле KV і двигун вимикається. Повторний запуск можливий після повернення перемикача SA спочатку в нульове положення, а потім в положення «1».

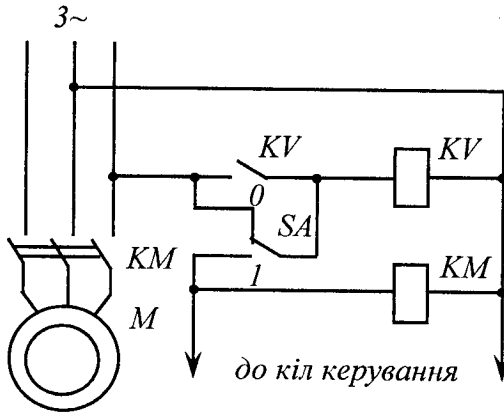


Рис. 8.22. Схема керування двигуном з використанням проміжного реле

Якщо потрібно контролювати наявність напруги, то реле напруги настраюють так, щоб вони спрацьовували при напрузі, близькій до номінальної, а відпускали при низькій напрузі. Тобто, коефіцієнт повернення таких реле $K_{пов} = 0,2...0,4$.

Контакти реле напруги повинні витримувати пускові струми обмоток пускачів і контакторів, які знаходяться в межах $(7 \div 12) I_{роб}$.

Для захисту установок від небезпечного підвищення напруги використовують реле максимальної напруги. Їх напруга спрацювання повинна бути більшою номінальної напруги захищуваної установки: $U_{спр.р.} > U_{ном.}$. В коло керування вмикається розмикаючий контакт реле.

Для захисту електроприводів від порушення параметрів мережі живлення застосовують реле контролю трифазної напруги. Наприклад, реле ЕЛ-23 контролює величини мінімальної і максимальної напруги, асиметрію фаз, послідовність фаз, обрив фаз. Настроювана витримка часу дозволяє ігнорувати короточасні стрибки напруги мережі.

Проміжні реле використовуються як підсилювачі первинних сигналів або для розмноження кіл керування. Існують реле з однією, двома (вмикаючою і утримуючою) або трьома (вмикаючою, утримуючою та вимикаючою) обмотками, без затримки часу спрацювання та з затримкою часу спрацювання або відпускання.

Наприклад, для підсилення сигналу від електроконтактного манометра ЕКМ, струм вихідного контакту якого не перевищує 50 мА, можна використати реле РЭП-20 з допустимим струмом контактів 6 А.

Проміжні реле вибираються за родом струму, напругою і струмом обмотки, напругою і струмом контактів, наявністю затримки часу, кількістю і видом контактів, способом монтажу, способом приєднання провідників, ступенем захисту від дії оточуючого середовища.

Реле часу. В системах захисту і автоматики часто потрібна витримка часу між спрацюванням двох або кількох апаратів, або створення певної часової послідовності операцій. Для створення таких витримок існують реле часу.

Загальні вимоги до реле:

а) стабільність витримки часу при коливаннях напруги, частоти струму, температури навколишнього середовища тощо;

б) мала споживана потужність, маса і габарити.

У схемах керування електроприводом при великій частоті вмикання реле часу повинні мати високу стійкість проти спрацювання $(5 \div 10) \cdot 10^6$ спрацювань. Розкид часу спрацювання їх може досягати 10%. Тривалість витримок часу знаходиться в межах $0,25 \div 10$ с.

Для автоматизації технологічних процесів потрібні реле з великою витримкою часу — від кількох хвилин до кількох годин. У цьому випадку використовують моторні або напівпровідникові реле.

В реле часу з електромагнітним управлінням при відпусканні, наприклад, типу РЭВ-800, витримка часу створюється за рахунок уповільнення спадання магнітного потоку в магнітопроводі після вимикання котушки. Для цього: 1) магнітопровід виконано з низьким опором магнітному потоку; 2) на одне з осердь магнітопроводу одягнена короткозамкнена обмотка у вигляді мідної або алюмінієвої гільзи. Реле спрацьовує без витримки часу. Після вимикання котушки спадаючий магнітний потік індукуює в гільзі ЕРС самоіндукції, яка підтримує потік магнітопроводу. Витримка часу реле плавно регулюється натягом зворотної пружини. Грубе регулювання витримки часу здійснюється зміною товщини немагнітної прокладки між якорем і осердям магнітопроводу.

Тривалість витримок часу електромагнітних реле знаходиться в межах $0,3 \div 10$ с, допустима кількість вмикань досягає 600 за годину. Набір контактів $1z + 1$ р або $2z + 2$ р. Контакти можуть комутувати постійний струм при вмиканні 5 А при напрузі 220 В і вимикати струм 0,2 А при індуктивному та 0,5 А при активному навантаженнях.

В пневматичних реле типу РВП при спрацюванні або відпусканні електромагніта під дією пружини колодка, зв'язана з гумовою діафрагмою, опускається і натискає на мікрореле. Діафрагма вмонтована в пневматичний уповільнювач. Швидкість руху діафрагми з

колодкою визначається перерізом отвору, через який засмоктується повітря у верхню порожнину уповільнювача. Витримка часу регулюється голкою, яка змінює переріз цього отвору. Межі регулювання витримки часу $0,4 \div 180$ с. Контактна система мікроперемикача допускає тривалий струм 3 А і струм вимикання 0,21 А при напрузі 380 В змінного струму. Реле РВП може обладнуватися також і мікрорелем, контакти якого перемикаються без витримки часу.

В моторних реле часу типу ВС-10 синхронний електродвигун через електромагнітну муфту і уповільнюючий редуктор приводить в обертання диски з кулачками. Кулачки дисків через проміжні кулачки перемикають вихідні контакти. Витримка часу перемикання контактів регулюється зміною початкового положення дисків. Після вимкнення реле диски в попереднє положення повертаються зворотною пружиною. Діапазон витримок часу $1 \text{ с} \div 26 \text{ хв}$. Точність роботи ± 5 с. Кількість дисків (незалежних груп контактів) — від 3 до 6. Вихідні контакти допускають тривалий струм 10 А і можуть вимикати навантаження змінного струму 800 В·А при напрузі 220В. Допустимі коливання напруги $(0,9 \div 1,12) U_{\text{ном.}}$, стійкість проти спрацювань — не менше 1000 циклів.

Двопрограмне добове реле часу 2РВМ має диск з двома рядами отворів, що приводиться в рух годинниковим механізмом. Частота обертання диска — 1 оберт за добу. Отвори зовнішнього ряду розміщені через 15 хв. один від одного, внутрішнього — через 20 хв. Ряди отворів оцифровані в годинах доби. При налагодженні реле в отвори вкручуються спеціальні штифти, які діють на вихідні контакти. Перший за ходом штифт замикає вихідний контакт, а другий — розмикає. Таким чином, за допомогою реле 2РВМ можна автоматично керувати циклічними технологічними процесами. Наприклад, щоденно вмикати транспортер яйцезбору у пташнику об 11-й годині і вимикати його о 12 год. 20 хв. Для автоматичного підзаведення пружини годинникового механізму реле має синхронний двигун, який керується контактом кінцевого вимикача.

Напівпровідникові реле часу створюють витримки від долі секунди до кількох діб. Витримки часу в цих реле створюються шляхом заряджання конденсатора через резистор або шляхом підрахунку лічильником заданої кількості імпульсів, які видаються генератором імпульсів. Вихідним елементом в напівпровідникових реле часу служить електромагнітне реле. Наприклад, мікропроцесорне реле часу (програмний таймер) з добовим або тижневим циклом РВЦ-03 може виконувати такі функції: керування споживачами за заданою

програмою з незалежним розподілом уставок по каналах; збереження пам'яті програм при вимиканні реле від мережі живлення; багатократне повторення запрограмованого режиму за добовим або тижневим циклом поточного часу; індикація поточного часу при наявності напруги живлення.

Реле часу вибирають за родом струму і величиною напруги на вході, необхідним діапазоном регулювання витримок часу, конструктивним виконанням, комутаційною здатністю вихідних елементів.

Герконові реле. Найменш надійним вузлом електромагнітних реле є контактна система. Електрична дуга або іскра, що виникають при розмиканні і замиканні контактів, швидко їх руйнують. Цьому також сприяють окислювальні процеси та покриття контактних поверхонь шаром пилу, вологи і бруду. Суттєвим недоліком електромагнітних реле є і наявність тертьових вузлів, спрацювання яких знижує їх роботоздатність. Іншим недоліком електромагнітних реле є їх інерційність, обумовлена значною масою рухомих частин.

Вказані недоліки обумовили створення реле з герметичними магнітно-керованими контактами.

Найпростіше герконове реле з замикаючим контактом показано на рис. 8.23. Контактні осердя 1 і 2 виготовлюються з пермалою — феромагнітного матеріалу з високою магнітною проникністю — і вварюються в скляний герметичний балон 3. Балон заповнюється інертним газом — азотом або азотом з невеликою добавкою (до 3%) водню. Тиск газу всередині балона $(0,4 \div 0,6) \cdot 10^5$ Па.

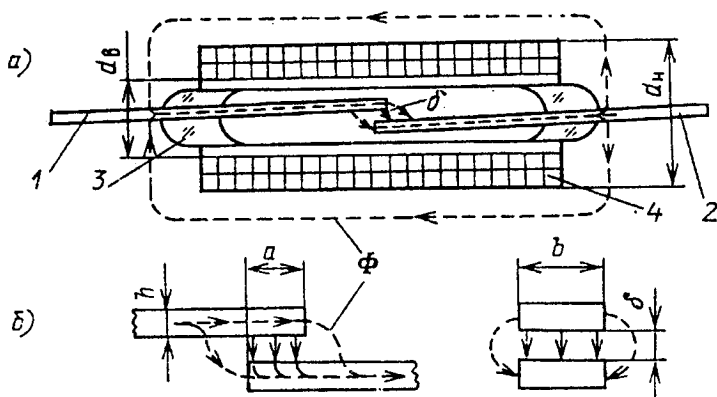


Рис. 8.23. Герконове реле

Інертне середовище запобігає окисленню контактних осердь. Балон поміщується в обмотку керування 4. При подачі струму в обмотку магнітний потік Φ проходить по контактних осердях, через робочий зазор δ між ними і замикається по повітрю навкруг обмотки. Потік Φ , проходячи через робочий зазор, створює тягову електромагнітну силу, яка, долаючи пружність контактних осердь, з'єднує їх між собою. Для зменшення опору перехідного контакту поверхні дотику покриваються тонким шаром ($2\div 50$ мкм) золота, радію, паладію, ренію, срібла та ін.

При вимиканні обмотки магнітний потік спадає і контакти розмикаються. Таким чином, в герконових реле відсутні тертьові деталі, а контактні осердя одночасно виконують функції магнітопровода, струмопровода і пружини.

Розроблено велику кількість конструктивних виконань герконових реле: з замикаючим, розмикаючим або перемикаючим контактом, багатоланцюгові реле; реле з керуванням постійним магнітом; реле з пам'яттю; силові герметичні контакти (герсикони).

Основними параметрами, за якими вибираються геркони, є: максимальні комутовані потужність, струм і напруга, максимальна магніторушійна сила (МРС) спрацювання та мінімальна МРС відпускання.

8.4.6. Напівпровідникові електричні апарати

Інтенсивний розвиток силової напівпровідникової техніки обумовив нові зміни в галузі електроапаратобудування. З'явилась можливість створення комутаційних та захисних апаратів з швидкодією та комутаційним ресурсом, недоступним для традиційних електромеханічних апаратів.

Принцип дії напівпровідникових електричних апаратів (НПЕА) оснований на використанні ключових характеристик силових напівпровідникових приладів. На їх основі розроблені контактори, пускачі, перемикачі, вимикачі навантаження високої та низької напруги, апарати пристроїв автоматичного вмикання резерву (АВР), комбіновані апарати, регулятори потужності та напруги і т. д.

У порівнянні з традиційними контактними апаратами напівпровідникові апарати мають ряд суттєвих переваг:

1. Напівпровідникові апарати є статичними апаратами. В них відсутні рухомі частини. Тому комутація в них бездугова, у зв'язку з

чим відсутні такі небажані явища як механічне спрацювання контактів та інших рухомих частин, вібрація, обгоряння і зварювання контактів, підвищений шум при комутаціях і викид розжарених газів.

2. Малий час спрацювання. Якщо контактні апарати спрацьовують за десяті, мінімум — соті долі секунди, то максимальний час вмикання напівпровідникового апарата на перевищує 50 мкс. Час вимикання НПЕА без застосування схем вимушеної комутації не більше тривалості півперіоду струму, а з блоками вимушеної комутації апарати вимикаються за час $0,5 \div 2$ мс. Можливості НПЕА за допустимою частотою спрацювань (десятки та сотні тисяч разів за годину) є практично необмеженими, оскільки вони набагато перевищують потребу в цьому.

3. НПЕА є багатофункціональними. Без зміни структури силової частини вони можуть суміщати в собі функції комутування, швидкодіючого захисту кіл, регулювання напруги та струму, формування імпульсів напруги та струму з заданими параметрами.

4. Висока готовність до роботи.

5. Стабільність характеристик при експлуатації в різних кліматичних умовах та при дії механічних факторів.

6. Можливість використання в мережах різних напруг при заміні напівпровідників на інший тип, або при зміні класу за напругою.

7. Висока надійність.

Але напівпровідникові прилади, як основа НПЕА, мають ряд суттєвих недоліків, які знижують їх ефективність або й не дозволяють застосовувати в тих чи інших виробках:

1. Нездатність витримувати значні навантаження струмом. Більшість тиристорів допускає $3 \div 4$ кратні перевантаження на протязі одного півперіоду при частоті 50 Гц при відсутності попереднього навантаження. Контактні апарати витримують $7 \div 10$ кратне перевантаження на протязі кількох секунд.

2. НПЕА дуже чутливі до перенапруг та швидкості наростання напруги. Тому при їх розробці передбачають захист напівпровідників від комутаційних і зовнішніх перенапруг.

3. Великі втрати енергії і, як наслідок, виділення в апараті великої кількості тепла. Тому для захисту напівпровідникових структур від перегрівання та розсіювання тепла використовують охолоджувачі, примусове повітряне або водяне охолодження.

4. Відсутність гальванічної розв'язки електричного кола, у зв'язку з чим послідовно з НПЕА необхідно встановлювати контактний апарат.

5. Високі малогабаритні показники і висока вартість НПЕА.

НПЕА класифікують за призначенням, родом струму, номінальною напругою, конструктивними особливостями та за принципом дії.

За принципом дії НПЕА поділяють на:

1. Апарати з природною комутацією. Ці апарати використовуються в колах змінного струму і вимикаються за рахунок зміни полярності напруги джерела живлення. Для повного їх вимкнення досить зняти керуючі сигнали з керуючих електродів. До таких апаратів відносяться: контактори, пускачі, вимикачі навантаження, перемикачі.

2. Апарати з штучною (примусовою) комутацією. Для їх вимикання використовують допоміжні елементи, які знижують анодний струм напівпровідника до нуля. В групу таких апаратів входять всі апарати постійного струму та захисні напівпровідникові апарати змінного струму (вимикачі високої та низької напруги, апарати автоматичного вмикавання резерву).

3. Комбіновані апарати. Комбіновані електричні апарати складаються з контактного апарата (контактор, автоматичний вимикач тощо), паралельно до головних контактів якого підключено напівпровідниковий елемент (тиристор). Процес вимикання комбінованого апарата протікає в два етапи. На протязі першого етапу при розмиканні контактів струм переходить в напівпровідниковий апарат. В другому етапі струм переривається напівпровідниковою структурою з використанням, як правило, природної комутації. В таких апаратах дуга горить дуже короткий час, завдяки чому різко підвищується стійкість контактного апарата проти комутаційних спрацювань та його швидкодія.

4. Апарати з фазовим керуванням. До них відносяться апарати змінного струму з природною або штучною комутацією, що додатково виконують функцію регулювання вихідної потужності. Режим регулювання забезпечується системою керування, яка здійснює затримку вмикання тиристора на заданий кут по відношенню до нуля струму.

В силових колах НПЕА найчастіше використовують силові тиристри.

Структура умовного позначення тиристорів:

$$\begin{array}{c} \text{I} \text{ X } \text{X} \text{ — } \text{X} \text{ X } \text{X} \text{ X } \text{X} \text{ X} \\ \text{1} \text{ 2 } \text{3} \text{ 4 } \text{5 } \text{6 } \text{7 } \text{8 } \text{9} \end{array}$$

1 — тиристор;

2 — група тиристорів (Ч — високочастотний; Л — лавинний; С симетричний і т.д.);

- 3 — номер конструктивного виконання;
- 4 — граничний струм, А (10,25,160 і т.д.);
- 5 — клас за повторюваною напругою (в сотнях вольттах);
- 6 — клас за критичним наростанням напруги $(dU/dt)_{кр}$;
- 7 — група за часом вимкнення;
- 8 — група за критичним наростанням струму $(di/dt)_{кр}$;
- 9 — пряме падіння напруги, В.

Наприклад, тиристор Т100-9312 має такі параметри: граничний струм 100 А; максимальна повторювана напруга 900 В; критична швидкість наростання напруги 100 В/мкс; час вимикання 250 мкс; критична швидкість наростання струму 40 А/мкс.

Способи керування тиристорами. Відомі три основні способи керування тиристорами в колах змінного струму: амплітудний, фазовий, фазо-імпульсний.

При амплітудному керуванні сигнал керування формується напругою мережі. При закритому тиристорі $VS2$ (рис. 8.24, а) та замкненому контакті реле KV напруга мережі прикладається до керуючого переходу тиристора. Останній відкривається, коли струм через керуючий перехід досягне значення струму відкривання. Відкритим тиристор $VS2$ залишається до кінця півперіоду, коли струм навантаження знизиться до нуля. В протилежний півперіод аналогічно відкривається тиристор $VS1$. Діаграма, що пояснює принцип амплітудного керування, зображена на рис. 8.24, б. Спосіб амплітудного керування застосовують у тиристорних пусках.

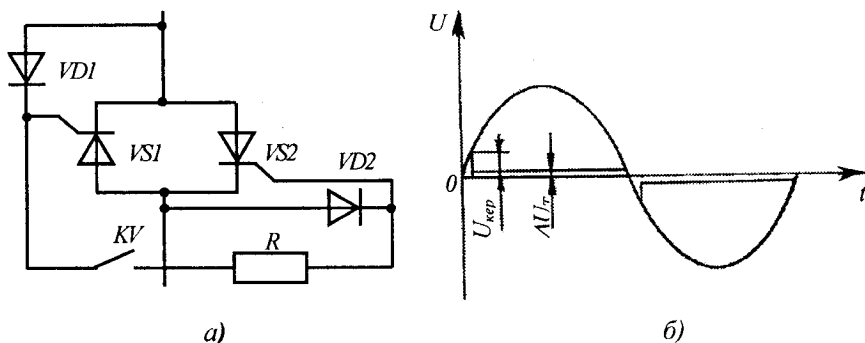


Рис. 8.24. Однофазний тиристорний вимикач з амплітудним керуванням: а) схема принципіальна; б) діаграма керування: $U_{кр}$ — напруга, при якій відкривається тиристор; ΔU_t — падіння напруги на відкритому тиристорі

Спосіб фазного регулювання застосовується дуже рідко, тому тут не розглядається.

При фазо-імпульсному керуванні на керуючі електроди періодично з певною швидкістю подаються керуючі імпульси, які формуються спеціальним генератором (рис. 8.25, а).

В апаратах, що виконують тільки функції комутування моменти початку подачі імпульсів повинні бути синхронізовані з моментами переходу через нуль струму навантаження або напруги джерела живлення. Якщо апарат виконує і регулювання потужності (фазове керування), то система керування повинна здійснювати зсув керуючих імпульсів відносно нуля струму на заданий кут α (рис. 8.25, б).

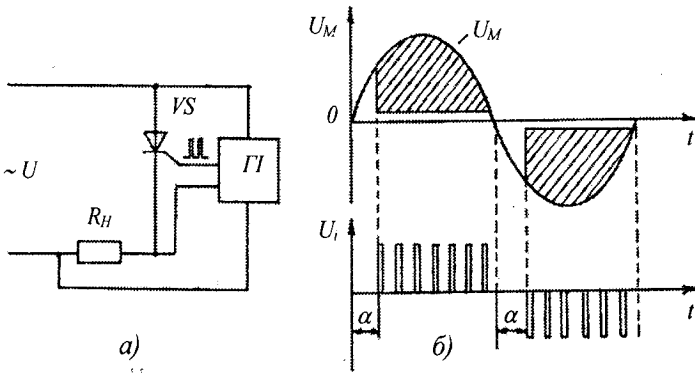


Рис. 8.25. Фазо-імпульсне керування тиристором:
 а — схема; б — діаграма напруги; R_H — опір навантаження;
 ГІ — генератор імпульсів; U_M — напруга мережі;
 U_i — напруга керування; α — кут керування

Тиристорні пускачі. На основі тиристорних блоків розроблено ряд схем тиристорних пускачів, які відрізняються між собою функціональними та конструктивними особливостями. На рис. 8.26 зображена принципіальна схема пускача, який складається з силового блока А1, блока живлення А2, блока захисту А3 та блока керування А4. Пускач може виконувати такі функції: вмикання та вимикання двигуна, нульова блокування, захист від коротких замикань, перевантажень і обриву фази.

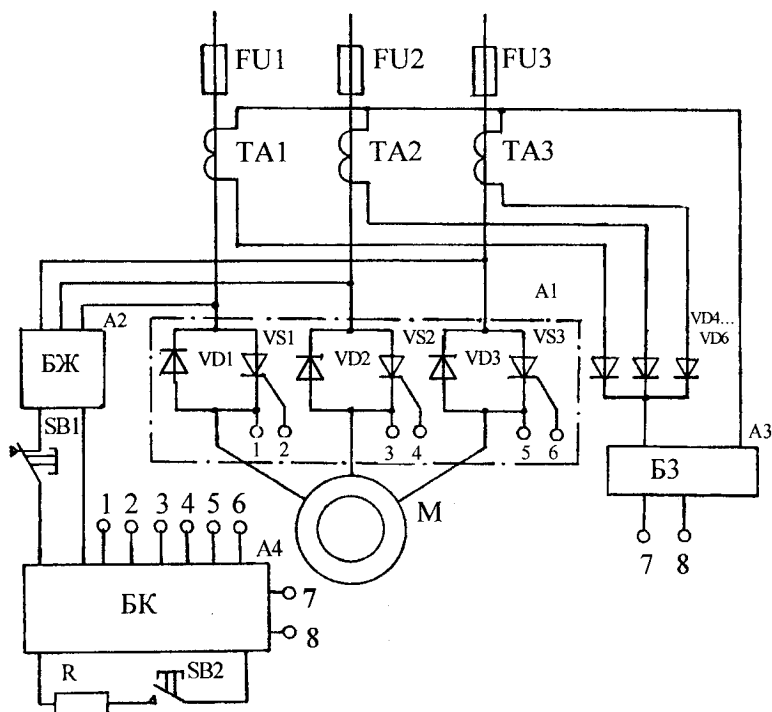


Рис. 8.26. Схема тиристорного пускача

Силовий блок *A1* має по три силових тиристори *VS1 ... VS3* і діоди *VD1 ... VD3*, які включені зустрічно паралельно в кожну фазу. Тиристири та діоди розраховані на пусковий струм керованого двигуна *M*. При подачі сигналів на керуючі кола тиристорів (клєми 1-2, 3-4, 5-6) тиристири відкриваються та вмикають двигун в електричну мережу. У зворотній півперіод тиристири закриті, а струм проходить через діоди *VD1 ... VD3*. Якщо сигнали керування знімаються, то після пропускання прямого півперіоду струму тиристири закриваються, а зворотна півхвиля пропускається діодами. Лише після цього двигун вимикається з мережі. Якщо діоди *VD1 ... VD3* замінити тиристорами, то двигун буде вимикатися після пропускання тиристорами першого півперіоду струму. Сигнали керування формуються блокінг-генератором, розміщеним в блоці керування *A4*, та подаються на тиристири після натискання кнопки *SB2* («Пуск»). Після переривання струму на блок керування кнопкою *SB1* тиристири за-

криваються. При знятті напруги живлення і повторній її подачі блок *A4* не формує сигналів керування, здійснюючи таким чином нульову блокування. При перевантаженні двигуна струмом сигнал перевантаження знімається з вторинних обмоток трансформаторів струму *TA1* ... *TA3* і подається в блок захисту *A3*, який шунтує коло живлення блокінг-генератора. Останній перестає генерувати сигнали керування і двигун вимикається.

При обриві однієї з фаз живлення у вихідній напрузі джерела живлення *A2* появляється пауза, під час якої струм через блокінг-генератор припиняється, внаслідок чого силові тиристори закриваються, вимикаючи двигун з мережі.

Захист двигуна та силового блока пускача від коротких замикань здійснюється швидкодіючими запобіжниками *FU1* ... *FU3*.

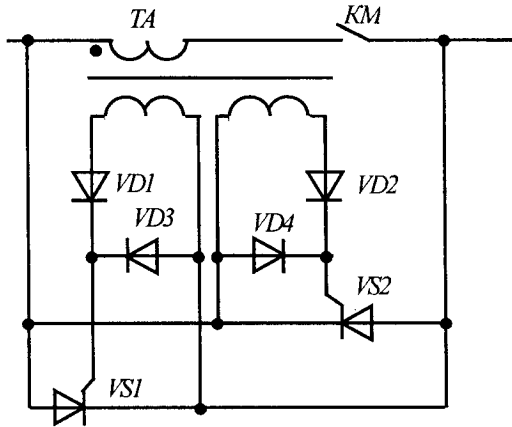


Рис. 8.27. Схема комбінованого контактора

Комбінований контактор складається з контактного апарата (контактора типу КТП64, КТП65 або ін.) та напівпровідникового блока (рис. 8.27). Напівпровідниковий блок, зібраний на тиристорах *VS1* і *VS2*, приєднаний паралельно колу, складеному з контактора *KM* і первинної обмотки трансформатора струму *TA*. Дві вторинні обмотки *TA* через діоди *VD1* і *VD2*, які узгоджують полярність анодної та керуючої напруг, замкнені на керуючі кола тиристорів. При замкненому контакті *KM* по колу *KM-TA* протікає струм, який наводить у вторинних обмотках *TA* напругу. Під її дією в керуючих колах тиристорів протікає струм керування. Але через низький опір

ланки *КМ-ТА* падіння напруги на ній не перевищує 1 В і тиристори не відкриваються. При розмиканні контакту *КМ* виникає електрична дуга, на якій зростає напруга. Під дією останньої відкривається відповідний тиристор *VS1* або *VS2*. Падіння напруги на дузі зменшується і вона швидко гасне. У зворотній півперіод дуга може не загорітися, якщо контакти розійшлися на значну відстань. Якщо ж дуга загориться, то відкриється другий тиристор і дуга швидко погасне.

Така схема має ряд переваг:

- стійкість контактів *КМ* проти спрацювання підвищується в 20 — 50 разів;
- оскільки тиристори вмикаються короткочасно (не більше 10 мс), то можна взяти тиристори з невеликим граничним струмом, використавши їх імпульсну переважувальну здатність (до 8...10 разів);
- за короткий час тепло виділяється тільки в напівпровідниковій структурі, тому немає необхідності охолодження тиристорів.

8.4.7. Приклади вибору апаратів керування

Приклад 1. Вибрати триполюсний рубильник з боковою незнімною рукояткою для комутації силових електричних кіл напругою 380 В змінного струму частотою 50 Гц з тривалим робочим струмом 90 А, без дугогасильних камер і допоміжних контактів, із ступенем захисту IP32.

Умови вибору: а) за напругою: $U_{руб. ном.} \geq U_{мер.};$

б) за струмом: $I_{руб. ном.} \geq I_{роб. тр.};$

в) за конструктивним виконанням;

г) за ступенем захисту від дії оточуючого середовища;

д) за кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Вибираємо рубильник P11-313432У3 з номінальною напругою 660 В і номінальним струмом 100 А.

Приклад 2. Вибрати контактор для нереверсивного керування трифазним асинхронним електродвигуном АИР315S6У3 з номінальною напругою 380 В змінного струму, потужністю 110 кВт, номінальним струмом 195 А і кратністю пускового струму 6,0. Режим роботи контактора — тривалий. Контактор повинен мати один замыкаючий допоміжний контакт, передне приєднання проводів, втягувальну котушку напругою 220 В змінного струму. Контактор екс-

платується в помірному кліматі, монтується в ящику із ступенем захисту від дії оточуючого середовища IP54.

Умови вибору:

а) за напругою: $U_{\text{кон. ном.}} \geq U_{\text{мер.}}$;

б) за струмом: $I_{\text{кон. ном.}} \geq I_{\text{дв. ном.}}$;

в) за родом струму і напругою кола керування: $U_{\text{кот. ном.}} = U_{\text{к. кер.}}$

г) за конструктивним виконанням;

д) за кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Вибираємо триполюсний контактор КМ15-35С530100У3 з номінальною напругою змінного струму 380 В частоти 50 Гц, номінальним струмом 250 А в категорії застосування АС3, з двома замикаючими і двома розмикаючими допоміжними контактами, втягувальною котушкою напругою 220 В змінного струму, із ступенем захисту IP00. Номінальний робочий струм контактора, поміщеного в оболонку із ступенем захисту IP54, $I_{\text{роб. ном.}} = 200$ А, що не менше $I_{\text{дв. ном.}} = 195$ А.

Перевірка контактора на пусковий струм. Умова перевірки: $6I_{\text{кон. ном.}} \geq I_{\text{дв. пуск.}}$; $6 \cdot 200 = 1200$ А $> 6 \cdot 195 = 1170$ А. Умова виконується.

Приклад 3. Вибрати електромагнітний пускач з тепловим реле для реверсивного керування і захисту трифазного асинхронного двигуна АИР112М2У3 з номінальною напругою 380 В змінного струму частотою 50 Гц, номінальним струмом 15,1 А, кратністю пускового струму 7,5. Режим роботи пускача — тривалий. Необхідна кількість допоміжних контактів — 2 замикаючих і 1 розмикаючий. Напруга кола керування — 380 В змінного струму. Частота вмикань пускача — не більше 30 разів за добу. Пускач експлуатується в умовах помірного клімату, монтується в ящику із ступенем захисту IP54.

Умови вибору:

а) за напругою: $U_{\text{пус. ном.}} \geq U_{\text{мер.}}$;

б) за струмом: $I_{\text{пус. ном. роб.}} \geq I_{\text{дв. ном.}}$;

в) за родом струму і напругою кола керування: $U_{\text{кот. ном.}} = U_{\text{к. кер.}}$

г) за конструктивним виконанням;

д) за кліматичним виконанням і категорією розміщення;

е) за стійкістю проти комутаційних спрацювань.

Вибираємо електромагнітний пускач ПМЛ2600О4В з номінальною напругою 380 В частотою 50 Гц, номінальним робочим струмом 22 А, ступенем захисту від дії оточуючого середовища IP00, з одним замикаючим допоміжним контактом, стійкістю проти комутаційних спрацювань 300 тис. циклів, кліматичним виконанням і ка-

тегорією розміщення О4, втягувальною котушкою напругою 380 В змінного струму. Для розмноження допоміжних контактів приймаємо контактну приставку ПКТ1104 з одним замикаючим і одним розмикаючим контактами. Для захисту двигуна від струмів перевантаження вибираємо теплове реле РТЛ-102104 з номінальним струмом реле 25 А і діапазоном регулювання струму не спрацювання 13 — 19 А.

Перевірка пускача за умовами комутації: $6I_{н.ном. р.} \geq I_{об.л.}; 622 = 132 \text{ А} > 7,5 \cdot 15,1 = 113,25 \text{ А}$. Умова виконується.

8.4.8. Питання для самоперевірки

1. Що таке номінальна та робоча напруга електричного апарата?
2. Яка різниця між номінальним і номінальним робочим струмом апарата?
3. В яких номінальних режимах можуть працювати електричні апарати?
4. Які категорії застосування передбачено для електричних апаратів?
5. Які апарати відносяться до апаратів ручного керування?
6. За якими параметрами і ознаками вибирають рубильники?, пакетні вимикачі?, пакетно-кулачкові вимикачі і перемикачі?
7. Для чого використовують кнопки і кнопкові пости і як їх вибирають?
8. Які переваги безконтактних шляхових перемикачів перед контактними?
9. Розкажіть призначення, будову і принцип дії контактора, електромагнітного пускача.
10. З якою метою використовують напівпровідникові приставки до контакторів і як вони працюють?
11. За якими параметрами і ознаками вибирають контактори?, електромагнітні пускачі?
12. Які апарати називають електричними реле?
13. Для чого використовують реле струму?, реле напруги?, проміжні реле?
14. За якими параметрами і ознаками вибирають проміжні реле?
15. Розкажіть будову і принцип дії реле часу моторних, пневматичних, електромагнітних, електронних.
16. За якими параметрами і ознаками вибирають реле часу?
17. Які переваги герконових реле перед електромагнітними?
18. Які переваги і недоліки напівпровідникових електричних апаратів порівняно з контактними?
19. Розкажіть принцип фазо-імпульсного керування тиристорами.

8.5. Апарати захисту електроприводів від аварійних і анормальних режимів

Електроприводи повинні бути надійно захищені від анормальних і аварійних режимів роботи. Електродвигуни змінного струму повинні мати захист від однофазних і багатофазних коротких замикань, струмів перевантаження, роботи на двох фазах та мінімальної напруги. Синхронні двигуни, крім того, повинні бути захищені від асинхронного режиму.

Електродвигуни постійного струму треба захищати від коротких замикань. При потребі передбачають захист від перевантажень і надмірного перевищення швидкості обертання.

Системи керування електроприводів повинні бути захищені від коротких замикань.

Захист від струмів короткого замикання здійснюють за допомогою плавких запобіжників і автоматичних вимикачів. Ці апарати повинні вимикати пошкоджену ділянку мережі миттєво або з мінімальною витримкою часу.

Захист двигунів від перевантажень передбачають при можливих перевантаженнях робочих машин, а також тоді, коли при важких умовах пуску або самозапуску необхідно обмежити тривалість пуску при зниженій напрузі. Двигуни, які працюють у короткочасному або повторно-короткочасному режимі, від перевантажень не захищають.

Для захисту від перевантажень використовують теплові і температурні реле, автоматичні вимикачі з тепловими розчіплювачами, електронні пристрої струмового і температурного захисту.

Захист від надмірного зниження напруги або від самозапуску після зникнення напруги повинен бути: для всіх електродвигунів робочих машин, самозапуск яких після зупинки недопустимий за умовами технологічного процесу або за умовами безпеки; для електродвигунів постійного струму, які не допускають безпосереднього вмикання в мережу.

Такий захист здійснюють за допомогою реле напруги, автоматичних вимикачів з розчіплювачами мінімальної напруги, а також увімкненими за спеціальною схемою електромагнітними пускачами і контакторами.

Електроустановки сільськогосподарських об'єктів, в тому числі електроприводи, повинні бути обладнані пристроями захисного вмикання, які призначені для захисту людей і тварин від ураження

електричним струмом та запобігання виникненню пожеж при порушенні ізоляції.

8.5.1. Плавкі запобіжники

Плавкі запобіжники призначені для захисту електроустановок від струмів короткого замикання і перевантажень. Завдяки простоті конструкції і обслуговування, малим розмірам, здатності вимикати великі струми і невисокій вартості плавкі запобіжники мають дуже широке застосування. Запобіжники виготовляють на струми від міліампер до тисяч ампер і на напруги від кількох десятків вольт до сотень кіловольт. Цим обумовлюється і велика різноманітність їх конструкцій.

Запобіжники складаються з основи, плавкої вставки і контактів приєднання. В свою чергу плавка вставка складається з корпуса, виводів, плавкого елемента і дугогасного середовища. Запобіжники деяких серій комплектуються покажчиками спрацювання і контактами допоміжного кола.

Найважливішою характеристикою плавкого запобіжника є часо-струмова захисна характеристика, тобто залежність часу перегорання плавкого елемента від струму (рис. 8.28). Для забезпечення надійного захисту від перевантажень і коротких замикань потрібно, щоб захисна характеристика запобіжника 1 (рис. 8.29) проходила небагато нижче часо-струмової характеристики захищуваного об'єкта 2. Але в такому випадку запобіжник буде вимикати

коло при короткочасних перевищеннях струмом, наприклад, при пуску асинхронних короткозамкнених електродвигунів. Тому характеристики запобіжників 3 розраховують так, щоб вони перетинали криву 2. При цьому у зоні малих перевантажень *A* запобіжник не спрацює, а перегорить у зоні *B* при великих перевантаженнях. З цієї причини плавкі запобіжники непридатні для захисту електродвигунів від перевантажень.

Основною частиною запобіжника є плавкий елемент. Його конструкція і характеристики повинні відповідати таким вимогам: невеликий опір, невисока температура плавлення, збереження незмінності характеристик при тривалому нагріванні робочим струмом, якнайменший час перегорання при коротких замиканнях, невисока вартість.

Для виготовлення плавких елементів використовують мідь, срібло, цинк, свинець.

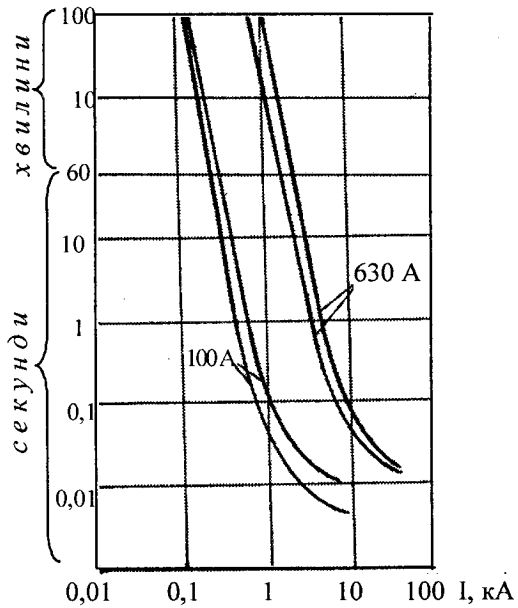


Рис. 8.28. Захисна характеристика запобіжників серії ПН2

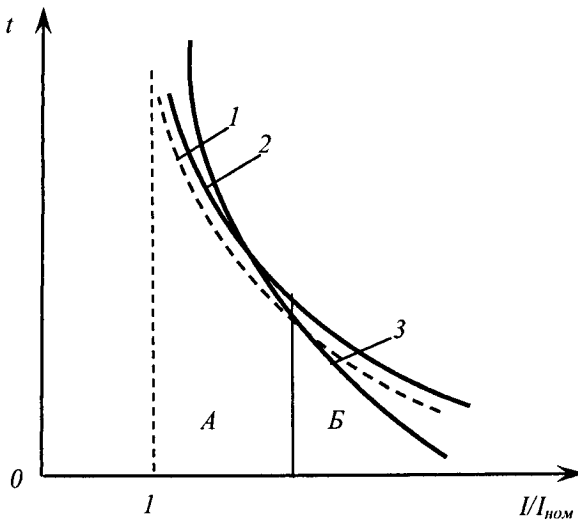


Рис. 8.29. Узгодження захисних характеристик запобіжника і захищуваного об'єкта

Найнижчу температуру плавлення має свинець (327 °C). Але його питомий опір у 12 разів вищий за питомий опір міді, тому свинцевий плавкий елемент при одному і тому ж номінальному струмі має значно більший переріз, ніж мідний. При перегорянні свинцевого елемента виділяється значна кількість парів металу, що утруднює гащення дуги і знижує граничний струм, який може вимикати запобіжник.

Свинець і цинк на повітрі утворюють окисну плівку, яка захищає плавкий елемент від корозії, завдяки чому він працює досить стабільно тривалий час.

Недоліками міді як матеріалу для плавких елементів є висока температура плавлення (1083°C) і невисока стабільність захисної характеристики. Останнє пояснюється тим, що при тривалому нагріванні мідний елемент окислюється і зменшується в перерізі. Це з часом приводить до перегорання запобіжника при струмі, що не перевищує номінального. Завдяки низькому питомому опору плавкі елементи з міді і срібла мають широке застосування.

Для зниження температури плавлення плавких елементів із міді і срібла використовують металургійний ефект, який полягає в тому, що на тонкий мідний або срібний дріт (діаметром менше 1 мм) наноситься кулька з олова. При нагріванні плавкого елемента спочатку плавиться олово (температура плавлення олова 232 °C) і розчиняє частину металу, на якому воно нанесене. Відбувається місцеве збільшення опору плавкого елемента і зростання втрат потужності в цій точці. Елемент перегоряє в тому місці, де була напаяна кулька. При цьому температура всього елемента нижча, ніж температура плавлення металу, з якого він виконаний.

Для прискорення спрацювання при коротких замиканнях у деяких запобіжниках, наприклад серії ПР2, використовують плавкі вставки з вирізами на кількох ділянках. Завдяки підвищеному опору на цих ділянках виділяється більше теплоти, ніж на широких. При проходженні номінального струму за рахунок високої теплопровідності матеріалу температура плавкого елемента вирівнюється і практично однакова за вузьких і широких ділянках. При коротких замиканнях процес нагрівання протікає так швидко, що теплота від вузьких ділянок не встигає передатися широким. Вузькі ділянки розплавлюються, розділяючи плавкий елемент на окремі частини, між якими загоряються кілька послідовних дуг.

Для збільшення поверхні охолодження плавких елементів, розрахованих на великий струм, їх виконують із кількох паралельних дрітків або пластин. Це дозволяє при одному і тому ж номінальному

струмі зменшити загальний переріз елемента, краще використати об'єм наповнювача і, як наслідок, полегшити гасіння дуги.

Після розплавлення плавкого елемента виникає електрична дуга, яку потрібно погасити в найкоротший час. У низьковольтних запобіжників гасіння дуги прискорюється за рахунок високого тиску, який виникає у закритому корпусі без наповнювача при появі дуги або за рахунок інтенсивного охолодження її наповнювачем і високого тиску, викликаного дугою у вузьких каналах наповнювача — у запобіжників з наповнювачем.

Швидке перегорання плавкого елемента у сукупності з інтенсивним дугогасінням сприяє обмеженню струму короткого замикання, який, як відомо, наростає в часі. Плавкий елемент перегоряє раніше, ніж струм короткого замикання досягне усталеного значення (рис. 8.30). При цьому зменшуються електродинамічні навантаження у самому запобіжнику і полегшуються наслідки короткого замикання у пошкоджену місці захищеної мережі.

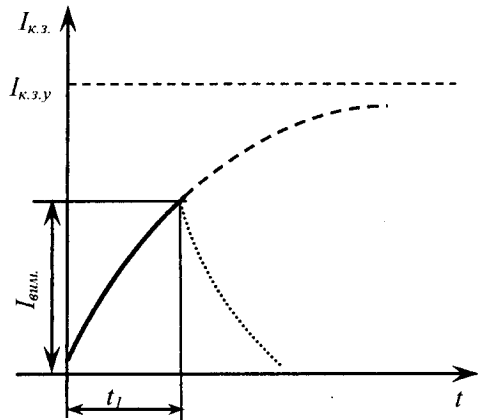


Рис. 8.30. Вимикання постійного струму запобіжником з струмообмеженням

Сучасні засоби дугогасіння дозволяють погасити дугу за тисячні частки секунди. Але оскільки площа перерізу плавкого елемента збільшується з ростом його номінального струму, то внаслідок цього зростає час його плавлення і знижується ефект струмообмеження. Тому при конструюванні запобіжників, особливо швидкодіючих, велику увагу приділяють забезпеченню відведення теплоти від плавкого елемента при нормальній його роботі, завдяки чому можна зменшити переріз плавкого елемента.

Основними параметрами плавких запобіжників є номінальна напруга, номінальний струм основи, номінальний струм плавкої вставки і граничний струм вимикання.

Номінальний струмом основи називається найбільше із значень номінальних струмів плавких вставок, призначених для установлення в даній основі.

Струм, на який розрахована плавка вставка для тривалої роботи, називається номінальним струмом плавкої вставки.

Граничним струмом вимикання запобіжника називають найбільший струм короткого замикання, який запобіжник може вимкнути без будь-яких пошкоджень і деформацій, які б перешкождали його нормальній експлуатації після заміни плавкої вставки.

Швидкодіючі запобіжники для захисту напівпровідникових приладів. Характерною особливістю напівпровідникових приладів (діодів, тиристорів та ін.) є мала теплова інерція, внаслідок чого вони дуже швидко прогриваються при перевантаженнях струмом. Час спрацювання звичайних запобіжників занадто великий, щоб запобігти руйнуванню напівпровідникової структури. Тому розроблені спеціальні серії швидкодіючих плавких запобіжників. Особливості їх конструкції полягають у тому, що для досягнення ефекту струмообмеження плавкий елемент виконується із срібла, має перешийки з мінімальним перерізом та інтенсивне охолодження. Щоб збільшити площу охолодження, плавкий елемент штампують із стрічки товщиною 0,05–0,2 мм. Плавкі елементи, розраховані на великі струми, складаються з кількох паралельних стрічок. Для інтенсифікації охолодження плавкого елемента корпус плавкої вставки заповнюють кварцовим піском під великим тиском або просочують рідким склом. У запобіжників типу ПБФ плавкий елемент затиснений між пластинками корунду, який має у 7 разів вищу теплопровідність, ніж кварцовий пісок.

При потребі плавкі запобіжники обладнуються покажчиками спрацювання і допоміжним контактом. Останній може вмикатися у коло керування для вимкнення напівпровідникового апарата після спрацювання запобіжника.

Для зручності узгодження характеристик запобіжника і напівпровідникового приладу введено поняття повний інтеграл струму або інтеграл Джоуля $W = \int i^2 dt$, де t — час проходження струму через прилад. За цим параметром проводиться вибір запобіжників для захисту напівпровідникових приладів.

Плавкі запобіжники, призначені для захисту електродвигунів, повинні бути вибрані так, щоб надійно спрацьовували при коротких замиканнях у захищуваних ділянках електроприводів і не вимикали електродвигунів при проходженні нормальних робочих струмів, у тому числі пускових.

Номінальна напруга запобіжника $U_{зп.ном}$ повинна бути не меншою номінальної напруги мережі:

$$U_{\text{т.ном.}} \geq U_{\text{мер.л.}} \quad (8.25)$$

Номинальний струм основи $U_{\text{ос.ном.}}$ повинен бути не меншим номінального струму плавкої вставки $I_{\text{вс.ном.}}$, а останній — не меншим розрахункового струму $I_{\text{вс.роз.}}$, тобто:

$$I_{\text{ос.ном.}} \geq I_{\text{вс.ном.}}; I_{\text{вс.ном.}} \geq I_{\text{вс.роз.}} \quad (8.26)$$

Розрахунковий струм плавкої вставки запобіжника, А, призначеного для захисту одного двигуна, визначають з виразу:

$$I_{\text{вс.роз.}} = \frac{I_{\text{дв.ном.}} \cdot K_i}{\alpha}, \quad (8.27)$$

де $I_{\text{дв.ном.}}$ — номінальний струм двигуна, А; K_i — кратність пускового струму двигуна; α — коефіцієнт, який залежить від умов пуску двигуна. При легких нечастих пусках (тривалість пуску не більше 10 с) $\alpha = 2,5$; при важких умовах пуску $\alpha = 2 - 1,6$.

Розрахунковий струм плавких вставок запобіжників, призначених для захисту групи електродвигунів, визначається для найважчої ситуації, коли запускається двигун з найбільшим пусковим струмом при працюючих решті двигунів:

$$I_{\text{вс.роз.}} = K_0 \sum_1^{n-1} I_{\text{дв.ном.}} \cdot K_3 + \frac{I_{\text{дв.ном.1}} \cdot K_{i1}}{\alpha_1}, \quad (8.28)$$

де K_0 — коефіцієнт одночасності роботи всіх двигунів групи; $\sum_1^{n-1} I_{\text{дв.ном.}}$ — сумарний струм групи одночасно працюючих двигунів, А; K_3 — коефіцієнт завантаження кожного двигуна групи; $I_{\text{дв.ном.1}}$ і K_{i1} — відповідно номінальний струм, А, і кратність пускового струму двигуна групи, який має найбільший пусковий струм; α_1 — коефіцієнт, який враховує умови пуску двигуна з найбільшим пусковим струмом.

Вибрані запобіжники потрібно перевіряти за умовами короткого замикання з двох причин. Якщо кратність струму короткого замикання по відношенню до номінального струму плавкої вставки не перевищує 3, то час вимикання запобіжника може бути занадто великим, що недопустимо з точки зору безпеки обслуговуючого персоналу та нагрівання проводів. З іншого боку, занадто великий струм короткого замикання, який перевищує граничний струм вимикання запобіжника, може призвести до його руйнування. Таким

чином, умови перевірки запобіжника при короткому замиканні записуються:

$$\frac{I_{к.з}}{I_{вс.ном.}} \geq 3; I_{к.з} \leq I_{зн.зр.} \quad (8.29)$$

Вибір плавких запобіжників для захисту напівпровідникових приладів здійснюється за повним інтегралом струму, що вимикається $W_{зн.} = \int i^2 dt$. Надійний захист забезпечується, якщо повний інтеграл струму запобіжника $W_{зн.}$ менший на 20–50 % повного інтеграла струму захищуваного напівпровідникового приладу $W_{нр.}$:

$$W_{зн.} = \frac{W_{нр.}}{1,2 \dots 1,5} \quad (8.30)$$

8.5.2. Електротеплові реле

Електротеплові реле застосовуються для захисту електродвигунів від перевантажень. Принцип дії реле полягає в деформації біметалевого елемента при нагріванні його струмом навантаження двигуна. Деформація елемента передається на механізм розчеплення, який залежно від конструкції реле розмикає або перемикає контакт.

Біметалевий елемент складається з двох пластин з різним коефіцієнтом лінійного розширення, скріплених між собою методом зварювання або гарячої прокатки. Для цього найчастіше використовують інвар і хромонікелеву сталь.

За способом нагрівання біметалевого елемента реле бувають з прямим, непрямим і комбінованим нагріванням. При прямому нагріванні струм навантаження проходить безпосередньо по біметалевому елементу. Реле з непрямим нагріванням мають спеціальний нагрівний елемент, виконаний із матеріалу з підвищеним питомим опором, який розміщений поряд з біметалевим елементом. У реле з комбінованим нагріванням струм проходить через нагрівний і біметалевий елементи, з'єднані між собою паралельно або послідовно.

Конструктивно теплові реле виконують одно-, дво- і триполюсними. Через низьку чутливість до обриву фази одно- і двополюсні реле для захисту трифазних електродвигунів використовуються рідко.

За способом монтажу реле мають виконання для встановлення на металевих та ізоляційних панелях, рейках комплектних пристроїв, а також для кріплення безпосередньо до магнітних пускачів.

Контактна група складається з нерухомих контактів 12 і 19 і рухомого контакту 11, який обертається навколо осі 14.

Механізм розчеплення включає в себе важелі 6 і 8, заскочку 20 і пружини 13 і 21. Для регулювання сили струму неспрацювання реле передбачені гвинт 17 і ексцентрик 18. Повернення контактів у вихідне положення здійснюється за допомогою кнопки 16.

Реле працює так. Струм навантаження нагріває нагрівні елементи 1, від яких тепло передається біметалевим елементам 3. Останні вигинаються у напрямку, показаному стрілками, і лівими упорами 5 планок 4 діють на важіль 6. Важіль 6 разом з важелем 8 обертають на осі 14 до упирання гвинта 17 у ексцентрик 18, після чого навколо вісі 7 починає обертатися важіль 6. Останній своїм нижнім кінцем повертає заскочку 20, яка звільняє рухомий контакт 11. Під дією пружини 13 контакт 11 повертається і перемикає контакти 12 і 19. У вихідне положення контакти повертаються вручну при натисканні на кнопку 16 після охолодження і вирівнювання біметалевих елементів 3.

Настроювання на заданий номінальний струм неспрацювання в межах 0,85–1,15 номінального струму реле здійснюється повертанням ексцентрика 18 по шкалі з ціною поділки 3 %. Гвинтом 17 реле наструюється на спеціальному стенді.

Термокомпенсатор 15 — це біметалева пластинка, яка є частиною важеля 8. При збільшенні температури навколишнього середовища біметалеві елементи 3 вигинаються вправо. В той же бік вигинається і пластинка 15, зберігаючи таким чином постійний зазор між важелем 6 і заскочкою 20.

При обриві однієї фази струм навантаження протікає тільки через два нагрівних елементи і спричиняє вигинання двох біметалевих елементів, які через планки 4 повертають важіль 6 навколо осі 7.

Третій біметалевий елемент залишається нерухомим, гальмуючи рух з'єднаної з ним планки. При цьому верхній кінець 9 важеля 8 упирається в правий упор 10 нерухомої планки, запобігаючи його повертання на осі 14. Важіль 6 повертає заскочку 20 при меншому вигині біметалевих елементів 3, внаслідок чого зменшується час спрацювання реле.

Номінальними величинами теплових реле є номінальний струм реле і номінальний струм його неспрацювання.

Номінальним струмом реле називається найбільше значення струму неспрацювання даного типу реле. Номінальним струмом неспрацювання теплового реле називається струм неспрацювання,

вказаний для даного положення регулятора уставки. Наприклад, реле типу РТЛ-1014 має номінальний струм 25 А, а номінальний струм неспрацювання регулятором установки можна плавно установити в межах від 7 до 10 А.

Основною характеристикою теплового реле є захисна часострумова характеристика (рис. 8.32), тобто залежність часу спрацювання

реле від кратності струму неспрацювання $t = f\left(\frac{I}{I_{\text{ном.нс.}}}\right)$.

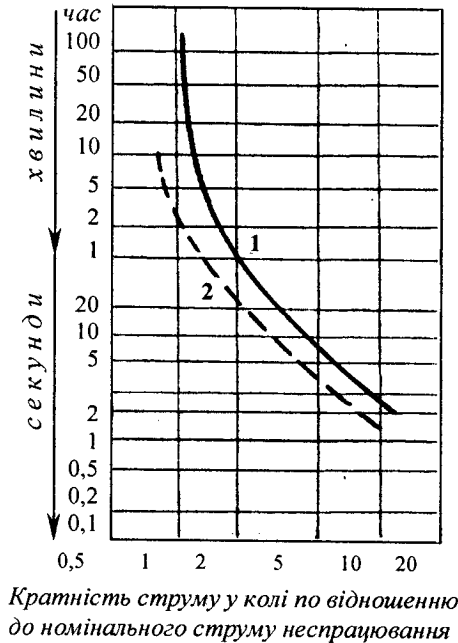


Рис.8.32. Часострумові характеристики теплового реле серії РТЛ:

1 — при триполюсній роботі; 2 — при двополюсній роботі

Захисні характеристики реле розраховують так, щоб вони не спрацьовували при струмі навантаження, який дорівнює номінальному струмові уставки і спрацьовували за 20 хв при струмі $1,2 I_{\text{уст.ном.}}$.

Теплові реле вибирають за умовою, щоб номінальний струм двигуна дорівнював номінальному струмові неспрацювання реле:

$$I_{\text{дов.ном.}} = I_{\text{нс.ном.}} \quad (8.31)$$

Крім того, реле вибирають за способом монтажу та за родом і кількістю контактів допоміжного кола.

Слід пам'ятати, що нагрівні елементи теплового реле — це ділянки електричного кола з підвищеним опором і в разі короткого замикання інтенсивно нагріваються. Тому теплові реле потребують захисту від коротких замикань.

8.5.3. Автоматичні вимикачі

Автоматичні вимикачі (автомати) призначені для автоматичного вимикання електричних кіл при аномальних і аварійних режимах: коротких замиканнях, перевантаженнях, надмірному зниженні напруги і т.д., а також для нечастих вмикань і вимикань вручну номінальних струмів навантаження.

Автоматичний вимикач складається з корпусу, головних і допоміжних контактів, дугогасної системи, привода, механізму вільного розчеплення і елементів захисту — розчіплювачів.

Автоматичні вимикачі загальнопромислового і побутового призначення мають максимально-струмовий захист, відрегульований на заводі на певний струм спрацювання. Для захисту обслуговуючого персоналу від дотикання до струмоведучих частин вони обладнані пластмасовим корпусом із кришкою. Ці апарати, вмонтовані у розподільчі і комплектні пристрої, називаються установочними.

Головні контакти автоматичних вимикачів, як правило, виконуються з металокерамічними або срібними накладками. У апаратів з номінальним струмом до 200 А встановлюють одну пару контактів. Автомати з номінальними струмами понад 200 А мають двоступінчасті контакти з перекачуванням або дві пари контактів: основні і дугогасні. Основні контакти облицьовують срібними або металокерамічними накладками, дугогасні — дуготривкою металокерамікою.

Приводи автоматичних вимикачів бувають ручними і електро-механічними. У апаратів з номінальним струмом до 200 А приводи ручні. При струмах до 1000 А використовують електромагнітні приводи, а у автоматів на 1500 А і більше — електродвигуни.

Зусилля від привода до рухомих контактів автомата передається через спеціальний механізм вільного розчеплення, призначений для передачі руху від привода до контактів; утримання контактів у замкненому стані; звільнення контактів при вимиканні апарата; на-

дання контактам швидкості, необхідної для успішного гасіння дуги; фіксації контактів у вимкненому стані; підготовки вимикача до наступного вмикання. В установочних і універсальних автоматах використовуються механізми, які працюють на принципі зламуваного важеля.

Автоматичне вимикання автоматів здійснюється під дією розчіплювачів. Залежно від виду параметра електричного кола, на який вони реагують, бувають максимальні розчіплювачі струму, мінімальні розчіплювачі напруги, незалежні розчіплювачі напруги та ін.

Максимальні розчіплювачі струму поділяються на електромагнітні і теплові.

Електромагнітний розчіплювач складається з котушки, яка вмикається послідовно в коло навантаження, магнітопровода, осердя з бойком і пружини. В нормальному режимі магнітний потік, створюваний котушкою, недостатній для втягування осердя. При протіканні струму короткого замикання магнітний потік і втягувальна сила зростають, осердя пересилює протидію пружини і діє на механізм вільного розчеплення, який звільняє рухомі контакти автомата. Для створення витримок часу між електромагнітним розчіплювачем і механізмом вільного розчеплення ставлять пристрої затримки: годинникові механізми, гідравлічні або пневматичні уповільнювачі. Але найчастіше вимикачі обладнуються розчіплювачами миттєвої дії, які спрацьовують на протязі 0,01 с. Уставка струму спрацювання електромагнітних розчіплювачів миттєвої дії (струм відсічки) у кілька разів перевищує номінальний струм розчіплювачів.

За Європейським стандартом EN 60898 захисна характеристика електромагнітного розчіплювача автоматичного вимикача має відповідати таким вимогам (при умовній температурі +30°C)

Тип захисної характеристики	Кратність струму спрацювання	Сфера застосування вимикача
1	2	3
Z	$(2,4 \dots 3,6) I_{\text{ном}}$	Електроустановки зі значною протяжністю електропроводки (малі струми короткого замикання), а також для захисту напівпровідникових пристроїв
B	$(3 \dots 5) I_{\text{ном}}$	Електроустановки, що не мають значних пускових струмів, зокрема електропроводки жилих будинків

1	2	3
C	$(5 \dots 10) I_{\text{ном}}$	Електроустановки з «ударними» навантаженнями, що перевищують струм нормального режиму до 5 разів (багатополюсні асинхронні електродвигуни, освітлювальні установки з газорозрядними лампами)
D	$(10 \dots 20) I_{\text{ном}}$	Електроустановки зі значними пусковими струмами (трансформатори, двополюсні асинхронні електродвигуни тощо)

Для захисту від струмів перевантаження автоматичні вимикачі споряджуються тепловими розчіплювачами, які створюють зворотно-залежну від струму навантаження витримку часу. Вимірювальним елементом теплового розчіплювача є біметалева пластинка, яка прямо або через спеціальний нагрівний елемент нагрівається струмом навантаження. При збільшенні струму навантаження збільшується прогин біметалевої пластинки, вільний кінець якої діє на механізм вільного розчеплення. Згідно з стандартом EN60898 теплові розчіплювачі автоматичних вимикачів при температурі $+30^{\circ}$ не повинні спрацьовувати на протязі 1 год. при струмі $1,13 I_{\text{ном}}$; повинні спрацьовувати при струмі $1,45 I_{\text{ном}}$ за час не більше 1 год., а при струмі $2,55 I_{\text{ном}}$ — за час 1 ... 60 с.

Якщо у вимикачі встановлено електромагнітні і теплові розчіплювачі, їх називають комбінованим розчіплювачем максимального струму, приклад захисної характеристики якого наведено на рис. 8.33.

Розчіплювачі мінімальної напруги призначені для вимикання автоматів при недопустимому зниженні напруги. Котушка розчіплювача вмикається через замикаючий допоміжний контакт автомата на напругу мережі. Допоміжний контакт замикається раніше головних і вмикає котушку розчіплювача в мережу. Якір електромагніта розчіплювача притягується, готуючи автомат до вмикання. При зниженні напруги нижче мінімально допустимого значення під дією пружини електромагніт розчіплювача розмикається і автомат спрацьовує.

Для дистанційного вимикання в автоматичних вимикачах вбудовують незалежні розчіплювачі, котушки яких виконують для живлення постійним або змінним струмом різного рівня напруги. Котушки розраховані на короточасний режим роботи. Для дистанційного вимикання можна використати також і розчіплювач мінімальної напруги, увімкнувши послідовно з його обмоткою розмикаючий контакт кнопки.

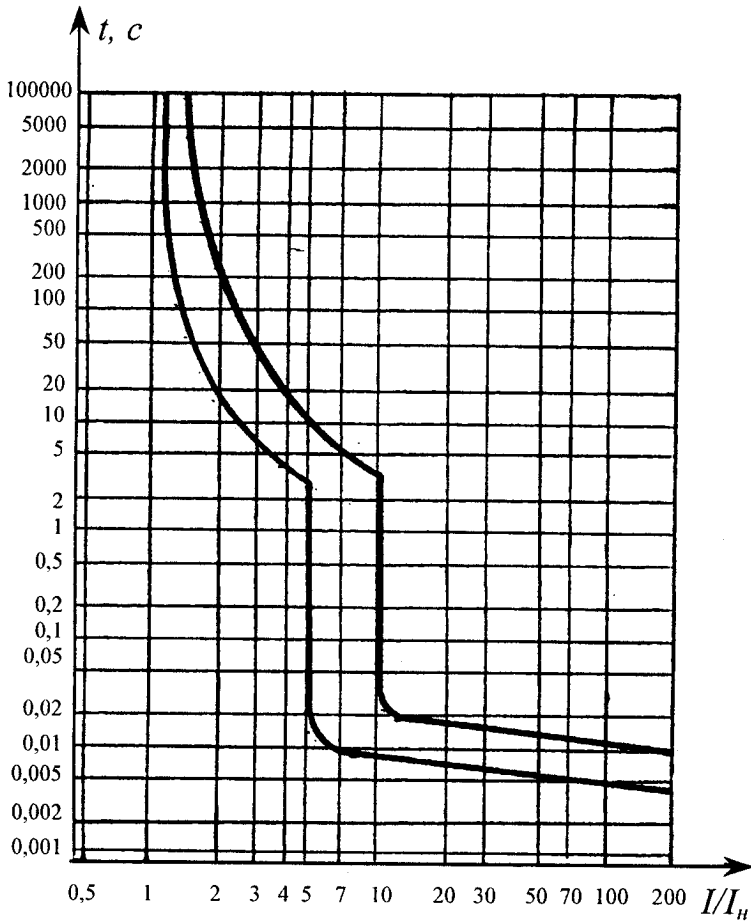


Рис. 8.33. Захисна характеристика автоматичного вимикача С60 а, крива С

На рис. 8.34 зображена електромеханічна схема автоматичного вимикача. Струмоведауча частина головного кола складається з основних 3 і дугогасних 1 контактів. Електричний зв'язок рухомого контакту з нерухомими струмоведаучими частинами забезпечує гнучка в'язь 4. Для гасіння дуги передбачена камера 2. Вмикання і вимикання апарата вручну здійснюється рукояткою 11. Для дистанційного вмикання використовують електромагніт 12.

Механізм вільного розчеплення складається з двох важелів 13 і 15, скріплених між собою віссю O_3 . При вимкненому апараті вісь O_3 знаходиться нижче лінії, яка з'єднує осі O_2 і O_4 . Для вмикання автомата рукоятку 11 повертають за годинниковою стрілкою або вмикають електромагніт 12.

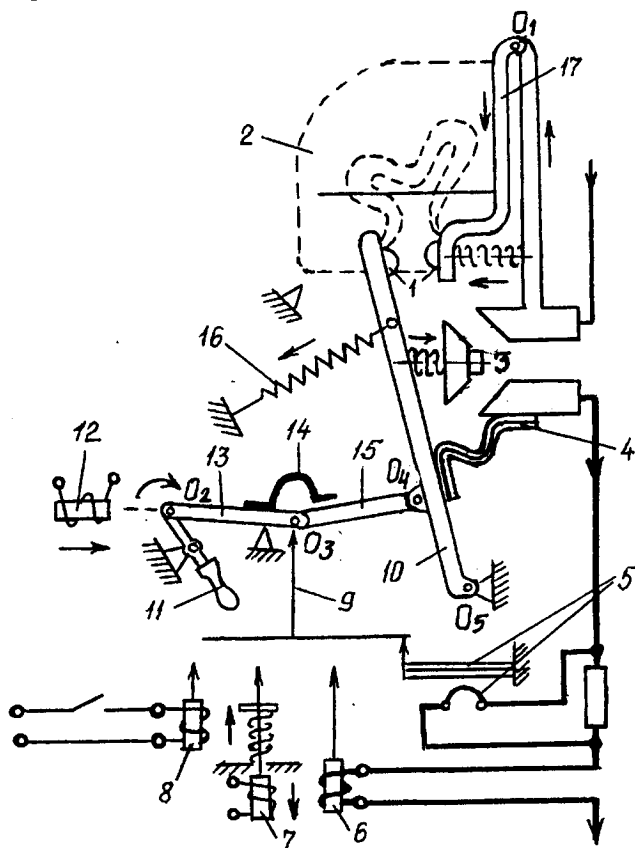


Рис. 8.34. Електромеханічна схема автоматичного вимикача:

1 — дугогасні контакти; 2 — дугогасна камера; 3 — основні контакти; 4 — гнучка в'язь; 5 — тепловий розчіплювач; 6 — електромагнітний розчіплювач; 7 — розчіплювач мінімальної напруги; 8 — незалежний розчіплювач; 9 — штовхач; 10 — траверса; 11 — рукоятка; 12 — електромагніт приводу; 13 і 15 — важелі; 14 — упор; 16 — зворотна пружина; 17 — провідник.

Оскільки упор 14 не дозволяє важелям 13 і 15 скластися навколо осі O_3 , то вони працюють як один жорсткий важіль і повертають рухомий контакт на осі O_5 , розтягуючи пружину 16 і замикаючи контакти 1 і 3.

Вимикання апарата відбувається при повертанні рукоятки 11 привода проти годинникової стрілки або при спрацюванні одного із розчіплювачів: теплового 5, максимального електромагнітного 6, мінімальної напруги 7 або незалежного 8. Розчіплювачі діють на штовхач механізму 9, який зламає складений важіль 13 і 15.

Рукоятка 11 і траверса рухомого контакту 10 роз'єднуються і під дією пружини 16 контакти розмикаються з необхідною швидкістю. Для повторного вмикання апарата після автоматичного спрацювання потрібно рукоятку 11 повернути проти годинникової стрілки для складання важелів 13 і 15 у попереднє положення, щоб вісь O_3 знову стала нижче лінії $O_2 - O_4$.

Головними параметрами автоматичних вимикачів є номінальна напруга і номінальний струм апарата, номінальний струм максимальних розчіплювачів струму, кратність струму спрацювання електромагнітних розчіплювачів, номінальна напруга розчіплювача мінімальної напруги, рід струму і номінальна напруга незалежного розчіплювача, граничний струм вимикання, власний і повний час вимикання.

Автоматичні вимикачі для захисту електродвигунів вибирають так, щоб вони задовольняли вимогам двигунів і умовам експлуатації. Номінальна напруга автомата $U_{a,ном.}$ повинна бути не меншою напруги мережі $U_{м,ном.}$, в якій він буде працювати:

$$U_{a,ном.} \geq U_{м,ном.}, \quad (8.32)$$

а номінальний струм головного кола вимикача $I_{a,ном.}$ та номінальний струм його теплових і електромагнітних розчіплювачів $I_{р,ном.}$ повинні бути не меншими від номінального струму двигуна $I_{дв,ном.}$:

$$I_{a,ном.} \geq I_{дв,ном.}; \quad I_{р,ном.} \geq I_{дв,ном.}, \quad (8.33)$$

При захисті групи електродвигунів номінальний струм розчіплювачів автомата повинен бути не меншим суми номінальних струмів двигунів:

$$I_{р,ном.} \geq \sum_1^n I_{дв,ном.}. \quad (8.34)$$

Крім того, автоматичний вимикач вибирається за конструктивними ознаками, за ступенем захисту від впливу навколишнього середовища та за стійкістю проти комутаційних спрацювань.

Вибраний апарат перевіряють на неспрацювання при пуску асинхронних електродвигунів:

а) при захисті одного двигуна:

$$I_{у.емр.} = K_{відс.} \cdot I_{р.ном} \geq K_3 \cdot K_{р.р.} \cdot K_{р.п.с.} \cdot K_i \cdot I_{дв.ном.}, \quad (8.35)$$

б) при захисті групи двигунів перевірка виконується для найважчих умов, коли запускається двигун з найбільшим пусковим струмом, а решта двигунів групи працює з номінальним навантаженням:

$$I_{у.емр.} = K_{відс.} \cdot I_{р.ном} \geq K_3 \cdot K_{р.р.} \cdot \left(\sum_1^{n-1} I_{дв.ном.} + K_{р.п.с.} \cdot K_{i.нб.} \cdot I_{дв.ном.нб.} \right), \quad (8.36)$$

де $I_{у.емр.}$ — уставка струму неспрацювання електромагнітного розчіплювача, А; $K_{відс.}$ — кратність відсічки автоматичного вимикача; $I_{р.ном.}$ — номінальний струм електромагнітного розчіплювача, А; K_3 — коефіцієнт запасу, який приймають рівним 1,1; $K_{р.р.}$ — коефіцієнт, що враховує розкид струмів спрацювання електромагнітних розчіплювачів (визначається з технічної характеристики автомата); $K_{р.п.с.}$ — коефіцієнт розкиду пускового струму двигуна; K_i — кратність пускового струму двигуна; $I_{дв.ном.}$ — номінальний струм двигуна, А; $\sum_1^{n-1} I_{дв.ном.}$ — сума номінальних струмів електродвигунів без струму двигуна, у якого пусковий струм найбільший, А; $K_{i.нб.}$ і $I_{дв.ном.нб.}$ — відповідно номінальний струм і кратність пускового струму двигуна групи, який має найбільший пусковий струм.

8.5.4. Пристрої температурного захисту

Апарати теплового захисту електродвигунів (теплові реле, автоматичні вимикачі), контролюючи струм, споживаний двигуном, непрямым способом реагують на перегрівання його обмоток. Більш ефективно працюють пристрої температурного захисту, які складаються з датчиків температури — позисторів, вмонтованих у лобові частини електродвигунів, і електронних пристроїв, які перетворюють аналоговий сигнал датчиків у релейний вихідний сигнал.

Принцип дії температурного захисту полягає в тому, що при перегріванні обмоток позистори різко змінюють свій опір і апарат захисту, до якого вони підключені, спрацьовує, вимикаючи двигун з мережі.

Промисловість виготовлює дві модифікації пристроїв температурного захисту — УВТЗ-1М і АЗП, які широко використовуються в електроприводах. Серйозним недоліком їх є те, що через теплову інерцію позисторів вони не забезпечують надійного захисту двигунів із загальмованим ротором та тих, що не запускаються на двох фазах.

Захист двигунів від перегрівання, в тому числі при обриві фази та загальмованих здійснює пристрій УВТЗ-5 (рис. 8.35). Він складається з блока живлення, блока температурного захисту, складеного на транзисторах $VT1$ — $VT5$, і схеми контролю напруги нульової послідовності — штучної «зірки» з трьох резисторів $R1$, $R2$, $R3$. Трансформатор TV призначений для розв'язування фаз живлення і штучної «зірки». Блок живлення складається з ланки $C1$ — $R4$, випрямляча і стабілітронів. Затискачі A , B , C , приєднуються до мережі живлення, затискачі 3–4 — до позисторів. Контакт реле KV вмикається в коло котушки магнітного пускача.

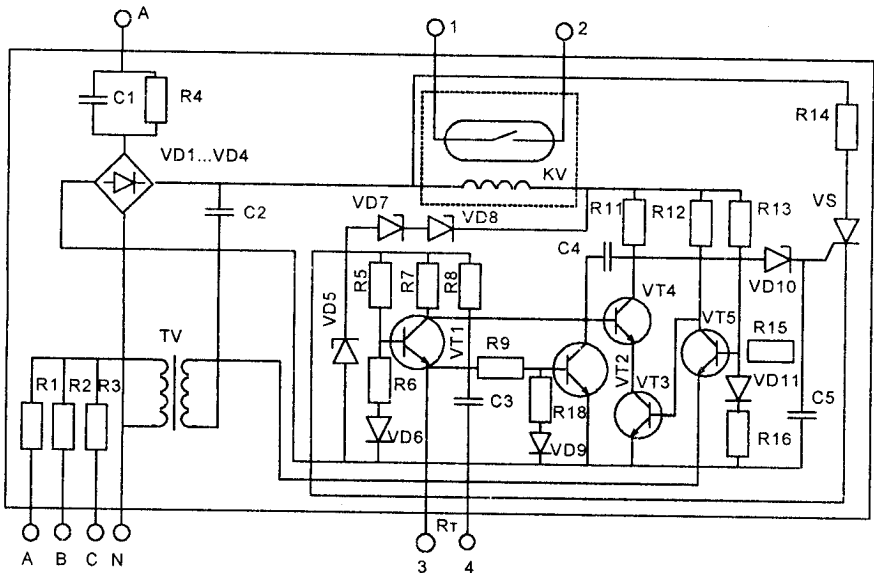


Рис. 8.35. Схема пристрою УВТЗ-5

Пристрій працює так. Коли температура обмоток не перевищує допустимого значення і при симетричній системі напруги живлення струм від блока живлення проходить через обмотку герконового реле KV , яке замикає контакт. При цьому транзистори $VT1$, $VT2$, $VT5$ і

тиристор закриті, а транзистори $VT3$ і $VT4$ відкриті. При збільшенні температури обмоток двигуна вище допустимого значення опір одного або кількох позисторів різко підвищується. Транзистор $VT2$ відкривається, а $VT4$ закривається і розшунтовує коло керування тиристора VS . Тиристор відкривається і шунтує обмотку герконового реле KV . Контакт герконового реле розмикається, розриваючи коло живлення котушки магнітного пускача, який вимикає двигун з мережі.

При обриві однієї із фаз живлення на первинній обмотці трансформатора TV з'являється напруга нульової послідовності. При цьому транзистор $VT5$ відкривається, а $VT4$ закривається. Тиристор відкривається і шунтує котушку реле KV .

Схемою УВТЗ-5 передбачений самоконтроль захисту, який полягає у вимиканні пристрою при неполадках у колі позисторів. При короткому замиканні в колі приєднання позисторів транзистор $VT1$ відкривається і подає сигнал на закриття транзистора $VT4$ і відкриття тиристора VS . Якщо коло приєднання позисторів розривається, то схема працює аналогічно випадку перевищення температури двигуна. Обрив нульового проводу приводить до знеструмлення пристрою та його вимикання.

В серії асинхронних електродвигунів розроблена спеціалізована модифікація двигунів АИР ... ЭБС з вбудованим в обмотку датчиком температури RK (рис. 8.36) і прибудованим електронним блоком температурного захисту BK .

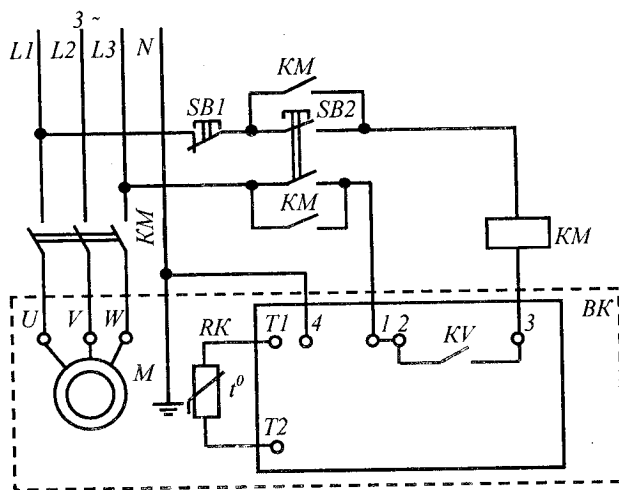


Рис. 8.36. Схема керування електродвигуном з блоком температурного захисту

Контакт вихідного реле KV блоку вмикається в коло котушки магнітного пускача KM . При перегріванні обмотки контакт KV розмикається і пускач KM вимикає двигун з мережі.

Повторний запуск можливий після охолодження двигуна і натискання кнопки $SB2$ («Пуск»). Електронний блок температурного захисту складений на печатній платі і кріпиться у ввідному пристрої електродвигуна.

8.5.5. Пристрої захисного вимикання

Пристрої захисного вимикання (ПЗВ) призначені для вимикання електричного кола в мережах напругою 380/220 або 127/220 В при виникненні витоку струму на землю. Струм витоку на землю може появитися при порушенні ізоляції електроустановки або доторканні людини до струмоведучих частин, які знаходяться під напругою. ПЗВ встановлюються з метою захисту людей від ураження електричним струмом та запобігання виникненню пожеж при порушенні ізоляції електроустановки.

Згідно з діючими «Правилами будови електроустановок» установка ПЗВ обов'язкова в житлових будинках, дитячих дошкільних закладах, медичних закладах, басейнах, будівельних майданчиках, сільськогосподарських об'єктах, в мережах живлення переносних електроприймачів та інших об'єктах.

Функціонально ПЗВ — це швидкодіючий захисний вимикач, який реагує на диференціальний струм у провідниках, що підводять електроенергію до захищуваної електроустановки.

Датчиком диференціального струму є диференціальний трансформатор 5 (рис. 8.37), через вікно магнітопровода якого пропущені два або чотири провідники. Вторинна обмотка трансформатора замкнена на пусковий орган 9, який виконується на чутливих електромагнітних реле прямої дії або електронних компонентах. Виконавчий механізм складається з групи силових контактів 1, механізму вимикання 8 і важеля ручного приводу 2. Для контролю роботоздатності пристрою передбачено коло, яке складається з резистора 4 і кнопки «Тест» 3. ПЗВ виготовляється у двополюсному та чотирьопольовому виконанні.

В нормальному режимі при відсутності струму витоку I_d в силовому колі по провідниках, що проходять через вікно магнітопровода трансформатора 5 протікає робочий струм споживача 10. Рівні

струми у провідниках створюють в магнітопроводі рівні за величиною, але векторно зустрічно направлені магнітні потоки. Результуючий магнітний потік дорівнює нулю, струм у вторинній обмотці трансформатора також рівний нулю і пристрій 9 не спрацює.

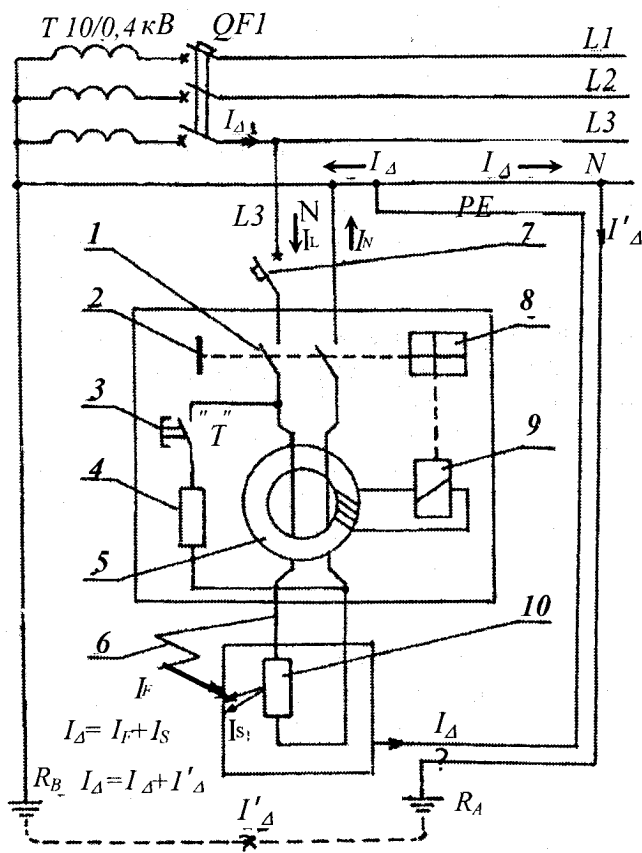


Рис. 8.37. Принципіальна схема підключення ПЗВ:

1 — контакти; 2 — важіль ручного вмикавання; 3 — контрольна кнопка «Тест»; 4 — резистор; 5 — диференційний трансформатор струму; 6 — пошкодження; 7 — захисний автоматичний вимикач; 8 — механізм вмикавання; 9 — вимикальне реле; 10 — споживач; I_{Δ} — диференційний струм; I_F — струм пошкодження; I_S — струм витоку через ізоляцію; R_B — контур заземлення трансформаторної підстанції; R_A — контур повторного заземлення нульового проводу мережі; L_1, L_2, L_3 — фазні провідники; N — нульовий робочий провідник; PE — нульовий захисний провідник

В житлових будинках застосовуються ПЗВ, які спрацьовують при струмах витoku 10 і 30 мА (безпечним для людини є струм 30 мА). Час спрацювання — кілька мілісекунд. Така висока чутливість ПЗВ забезпечується вимикальним реле, робота якого базується на принципі суперпозиції (накладання) двох магнітних полів: поля постійного магніту і змінного магнітного поля котушки, яка живиться від вторинної обмотки трансформатора струму 5.

Коли ПЗВ увімкнено, якір 4 реле (рис. 8.38) притягнуто до ярма 7 котушки 5 внаслідок дії магнітного поля постійного магніту 3. Протидіюча сила розтягувальної пружини 1 спрямована на відтягування якоря. При наявності струму витoku на землю у котушці 5 протікає змінний струм, під дією якого у ярмі реле 7 появляється змінний магнітний потік. Відбувається накладання потоку постійного магніту і змінного потоку котушки. У певний момент негативного напівперіоду змінного потоку сила пружини 1 виявляється більшою за силу, створену сумарним магнітним потоком, що спричинить миттєве відпадання якоря, і як наслідок — розмикання контактів ПЗВ.

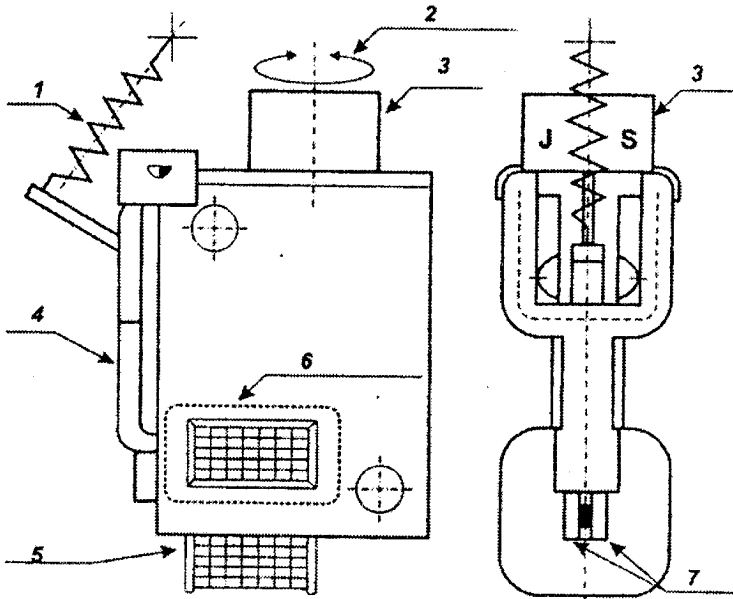


Рис. 8.38. Вимикальне реле з постійним магнітом:

1 — пружина; 2 — настроювання чутливості; 3 — постійний магніт; 4 — якір; 5 — котушка збудження; 6 — магнітний потік котушки; 7 — ярмо котушки

При доторканні людини до відкритих струмоведучих частин або пробой ізоляції на заземлений корпус електроспоживача по фазному провіднику через ПЗВ крім струму навантаження I_L проходить додатковий струм витоку I_d . Нерівність струмів в первинних обмотках ($I_L + I_d$ у фазному провіднику та $I_N = I_L$ в нульовому робочому провіднику) створює небаланс магнітних потоків і, як наслідок, виникнення у вторинній обмотці трансформатора струму керування. Якщо цей струм перевищує значення уставки порогового елемента пускового органу 9, останній спрацює і через механізм вимикання 8 спричиняє розмикання головних контактів 1.

Для періодичного контролю роботоздатності ПЗВ при замкнених головних контактах 1 натискають на кнопку «Тест», створюючи штучне коло для диференціального струму. Спрацювання ПЗВ свідчить про його справність.

Повторне вмикання проводиться вручну за допомогою важеля керування 2 (рис 8.37).

ПЗВ класифікують за різними ознаками.

За призначенням:

- пристрої без розчіплювачів максимального струму;
- пристрої з розчіплювачами максимального струму.

За способами керування:

- ПЗВ, функціонально не залежні від напруги;
- ПЗВ, функціонально залежні від напруги.
- ПЗВ, функціонально залежні від напруги, в свою чергу поділяються на:
 - ПЗВ, які автоматично розмикають головні контакти після зникнення напруги з витримкою часу або без неї. При відновленні напруги одні моделі цих пристроїв автоматично повторно замикають контакти свого головного кола, інші залишаються у вимкненому стані.
 - ПЗВ, які не розмикають головні контакти після зникнення напруги. Такі пристрої в одному варіанті після зникнення напруги не розмикають свої контакти, але здатні розімкнути силове коло при виникненні диференціального струму. В іншому варіанті при відсутності напруги пристрої не можуть вимкнути головне коло при появі диференціального струму.

За способом установки:

- ПЗВ для стаціонарної установки при нерухомій електропроводці;
- ПЗВ переносного типу і шнурового приєднання.

За кількістю полюсів:

- двополюсні з двома захищеними полюсами;
- чотириполюсні з чотирма захищеними полюсами.

За умовами регулювання вимикаючого диференціального струму:

- з одним або кількома фіксованими значеннями вимикаючого диференціального струму.

За умовами функціонування при наявності складової постійного струму:

- типу АС, що реагують тільки на синусоїдальний змінний струм;
- типу А, що реагують як на синусоїдальний, так і на пульсуючий постійний диференціальний струм.

За наявністю затримки часу:

- ПЗВ загального призначення, без витримки часу;
- ПЗВ типу S — з витримкою часу.

За ступенем захисту від дії зовнішнього середовища — ПЗВ відкритого і захищеного (в оболонці) виконання.**За ступенем монтажу — ПЗВ поверхневого, утопленого та панельно-щитового монтажу.****За характером розчіплювача максимального струму:** типів В, С і D з струмами відсічок відповідно (3–5) $I_{розч.н.}$, (5–10) $I_{розч.н.}$ і (10–20) $I_{розч.н.}$.

Для захисту конкретної електроустановки ПЗВ вибирають так, щоб його номінальна напруга $U_{п.н}$ і номінальний струм $I_{п.н}$ були відповідно не меншими від напруги електромережі $U_{мер.н}$ і максимального тривалого робочого струму $I_{тр.р}$ електроустановки, тобто виконувалися умови: $U_{п.н} \geq U_{мер.н}$, $I_{п.н} \geq I_{тр.р}$. Номінальний вимикаючий диференціальний струм пристрою вибирається із ряду $I_{\Delta n} = 6, 10, 30, 100, 300$ і 500 мА у відповідності із вимогами стандартів безпеки до влаштування електроустановки. Конструктивне виконання пристрою визначається за ознаками, наведеними в класифікації ПЗВ.

8.5.6. Пристрої захисту з електронними блоками

В останні десятиріччя широкого розповсюдження набули пристрої захисту, в яких як датчики аномальних режимів використано трансформатори струму, увімкнені за різними схемами. Первинні обмотки таких трансформаторів вмикаються в коло статора електродвигуна, а вторинні через пристрої узгодження підключаються до елект-

ронного блока. Останній перетворює аналоговий сигнал (напругу) вторинної обмотки в релейний і підсилює його. Вихідним пристроєм електронного блока, як правило, служить електромагнітне реле.

На рис. 8.39 зображена схема блока захисту від струмів перевантаження електродвигунів водонасосних установок. Датчиками струму в ній є трансформатори струму $T1$, $T2$ і $T3$. Напруга з вторинних обмоток, пропорційна струму статора двигуна, випрямляється діодними містками $UZ1$, $UZ2$ і $UZ3$, згладжується конденсатором $C1$ і через потенціометр $R1$ та резистор $R2$ прикладається до затвора транзистора $VT1$. Якщо струм навантаження електродвигуна M не перевищує струму уставки вузла захисту, транзистор $VT1$ закритий і реле KV продовжує працювати, тримаючи замкненим контакт в колі котушки пускача KM . Коли струм навантаження двигуна перевищує струм уставки, напруга на затворі $VT1$ зростає і з витримкою часу, яка визначається параметрами кола $R2-C2$, транзистор $VT1$ відкривається, а реле KV вимикає пускач KM . Витримка часу необхідна для того, щоб уникнути помилкового спрацювання захисту при пуску двигуна та короткочасному його перевантаженні. Після вимикання пускача KM конденсатор $C2$ розряджається через частину резистора $R1$ і діод $VD1$. Блок захисту спрацьовує як при симетричних, так і несиметричних перевантаженнях двигуна, оскільки всі випрямлячі $UZ1$, $UZ2$ і $UZ3$ з'єднані паралельно між собою. Це дає змогу успішно вимикати двигун і при обриві фази.

Оригінальною розробкою є багатофункціональний захисний пристрій ФУЗ-М, який захищає двигун від неповнофазних режимів і яких-завгодно перевантажень, в тому числі при загальмованому роторі. ФУЗ-М моментально спрацьовує при обриві фази, а при симетричних перевантаженнях — з витримкою часу, залежно від величини перевантаження: 30–50 с при 50%-ному перевантаженні і 8–12 с — при загальмованому роторі.

Пристрій складається з двох фазообертових трансформаторів $TA1$ і $TA2$ (рис. 8.40), фазочутливого кільцевого детектора на діодах $VD1$ – $VD4$ та резисторах $R1$ – $R4$ і електронної схеми захисту від перевантажень.

Пристрій ФУЗ-М працює так. Фазообертові трансформатори $TA1$ і $TA2$ з трифазного струму навантаження формують дві напруги $U1$, $U2$. При роботі двигуна на всіх трьох фазах кут зсуву між напругами $U1$ та $U2$ близький до 90° . Якщо обривається одна з фаз, кут зсуву стає 0° або 180° , внаслідок чого спрацьовують фазочутливий кільцевий детектор та реле KV . Останнє своїм розмикаючим контактом

розмикає коло котушки пускача двигуна. Захист від обриву фази працює миттєво.

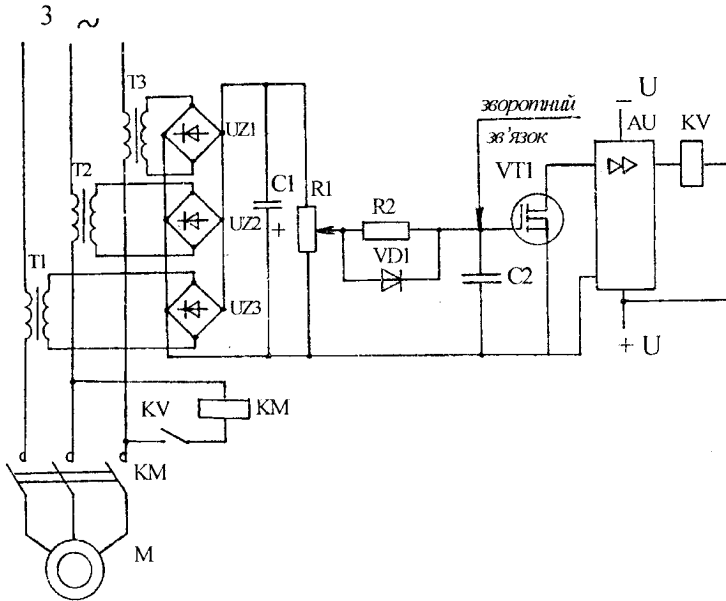


Рис. 8.39. Схема блока захисту електродвигуна від струмів перевантаження

Схема контролю перевантаження складається з регульованого тиристорного випрямляча ($VS1$, $R5$, $R6$, $R7$), зарядно-розрядного кола ($R8$, $R9$), накопичувального конденсатора $C1$, порогового елемента — тиристора $VS2$ із стабілітроном $VD5$, режимних резисторів $R10 \dots R12$ і шунтуючого тиристора $VS3$. Сигнал перевантаження U_2 знімається з вторинної обмотки трансформатора $TA2$ (точки 1 і 2).

При завантаженні двигуна не вище номінального напруга на конденсаторі $C1$ відсутня, оскільки закритий тиристор $VS1$. При перевантаженнях напруга U_2 зростає, тиристор $VS1$ відкривається і конденсатор $C1$ заряджається через резистор $R8$, створюючи витримку часу перед відкриванням тиристора $VS2$. Якщо перевантаження тривале, напруга на конденсаторі досягає напруги пробою стабілітрона $VD5$, тиристор $VS2$ відкривається і відкриває тиристор $VS3$. Останній шунтує баластний резистор $R4$ кільцевого детектора, внаслідок чого детектор розбалансовується і спрацьовує реле KV . Вели-

чина струму перевантаження, при якій спрацьовує захист, регулюється резистором $R6$.

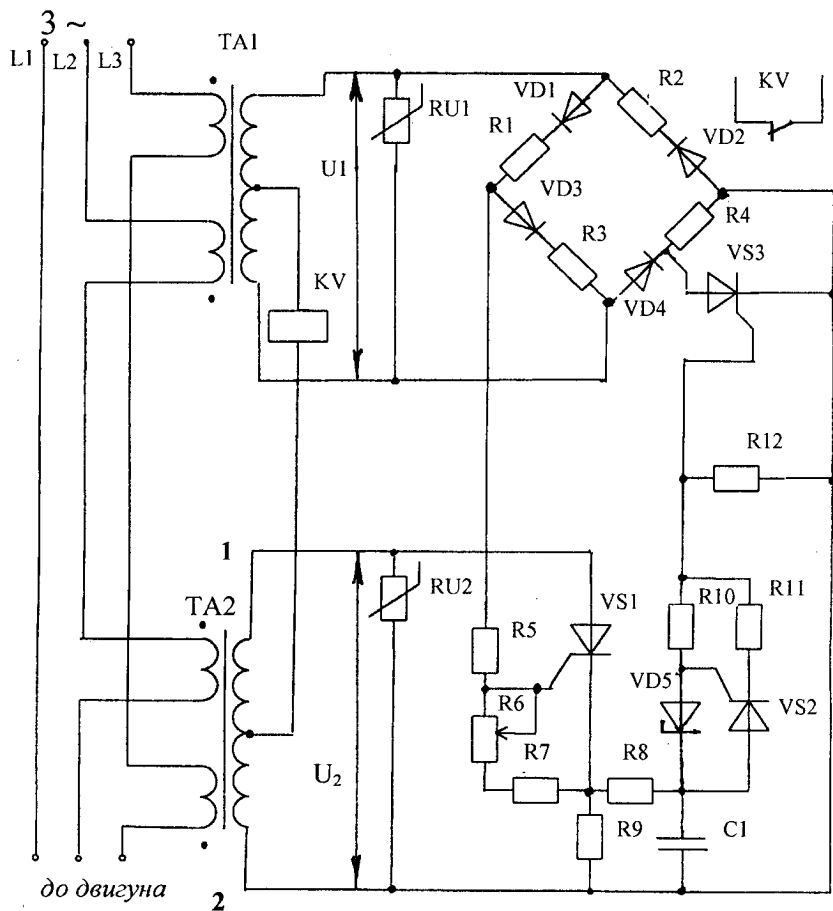


Рис. 8.40. Схема пристрою ФУЗ-М

Після короткочасного перевантаження конденсатор розряджається через резистори $R8$ і $R9$. При загальмованому роторі, коли напруга U_2 різко зростає, конденсатор $C1$ заряджається швидше і через 8 ... 12 с захист спрацьовує.

Варистори $RU1$ і $RU2$ захищають електронну схему від перенапруг, які можуть виникати у вторинних обмотках трансформаторів

ТА1 і ТА2 при коротких замиканнях у головному колі після пристрою захисту.

З розвитком мікропроцесорної техніки все ширше застосовуються універсальні багатофункціональні пристрої захисту електродвигунів. Їх основою є мікропроцесорний блок, до якого підключається мережа живлення, обмотка статора електродвигуна, датчики струму, температури та ін. Таким чином пристрій контролює якість напруги мережі живлення, опір ізоляції електродвигуна, струми статора і температуру двигуна. При відхиленні контрольованих параметрів від встановлених меж пристрій видає команду на вимикання двигуна або забороняє його вмикання.

Так, універсальний блок захисту УБЗ-301 здійснює повний захист асинхронних електродвигунів шляхом вимикання їх з мережі або блокування пуску в наступних випадках:

- при неякісній напрузі мережі (недопустимі стрибки напруги, обрив фази, порушення чергування фаз, перекіс фаз);
- при симетричних і несиметричних перевантаженнях двигуна струмом;
- при несиметрії фазних струмів, викликаних пошкодженням ізоляції обмотки двигуна або кабелю;
- при зникненні моменту статичних опорів на валу двигуна;
- при недопустимо низькому опорі ізоляції обмотки на корпус;
- при замиканні на «землю» обмотки статора під час роботи;
- при перегріванні двигуна.

Оскільки пристрої захисту з електронними блоками, в тому числі мікропроцесорними, одержують інформацію про рівень контрольованих параметрів мережі живлення і двигуна через відповідні датчики, то діапазон потужностей захищуваних двигунів одним пристроєм досить широкий. Тому вибір таких пристроїв або їх модифікацій проводять за кількістю необхідних видів захисту; кількістю датчиків, які можна приєднати до пристрою; видом і кількістю вихідних сигналів; наявністю інших функцій, наприклад, можливістю підключення до мережі передачі інформації, наявністю самотестування та ін. При цьому необхідно обов'язково враховувати, що чим ширші функціональні можливості пристрою, тим більша його вартість.

8.5.7. Приклади вибору апаратів захисту

Приклад 1. Вибрати плавкий запобіжник з розмикаючим контактом допоміжного кола для захисту від коротких замикань магістралі, що живить чотири асинхронних двигуни з короткозамкненим

ротором серії АИР з номінальними струмами 10,7 А; 21,1 А; 6,7 А; і 42,5 А і кратностями пускових струмів відповідно 7,5; 7,5; 7,0; 7,0. Двигуни працюють одночасно. Коефіцієнт завантаження двигунів 1.

Умови вибору:

- а) за напругою : $U_{\text{зн. ном.}} \geq U_{\text{мер.}}$;
- б) за струмом основи: $I_{\text{ос. ном.}} \geq I_{\text{вс. ном.}}$;
- в) за струмом плавкої вставки: $I_{\text{вс. ном.}} \geq I_{\text{вс. роз.}}$;
- г) розрахунковий струм плавкої вставки:

$$I_{\text{вс. роз.}} = K_0 \sum_1^{n-1} I_{\text{дв. ном.}} \cdot K_z + \frac{I_{\text{дв. ном. 1}} \cdot K_{\text{fl}}}{\alpha_1};$$

- г) за конструктивним виконанням;
 - д) за кліматичним виконанням і категорією розміщення.
- Визначаємо розрахунковий струм плавкої вставки:

$$I_{\text{вс. роз.}} = 1 \cdot \sum_1^3 (10,7 + 21,1 + 6,7) \cdot 1 + \frac{42,5 \cdot 7}{2,5} = 157,5 \text{ А.}$$

Вибираємо запобіжник ПН22-250-13У3 з номінальними струмами основи 250 А і плавкої вставки 160 А.

Приклад 2. Вибрати автоматичний вимикач для захисту магістралі, що живить три асинхронних двигуни з короткозамкненим ротором серії АИР з номінальними струмами 14,8 А, 11,4 А і 4,2 А ($\sum I_{\text{дв. ном.}} = 30,4 \text{ А}$) та кратностями пускового струму відповідно 7,5; 7,0 та 6,0. Вимикач повинен мати комбінований розчіплювач максимального струму і 1 замикаючий допоміжний контакт. Місце встановлення вимикача — щит керування зі ступенем захисту IP54.

Умови вибору:

- а) за напругою : $U_{\text{всм. ном.}} \geq U_{\text{мер.}}$;
- б) за струмом вимикача: $I_{\text{всм. ном.}} \geq \sum I_{\text{ос. ном.}}$;
- в) за струмом розчіплювачів: $I_{\text{роз. ном.}} \geq \sum I_{\text{дв. ном.}}$;
- г) вибирається кратність відсічки $K_{\text{відс.}}$;
- г) за конструктивним виконанням;
- д) за кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Вибираємо триполюсний автоматичний вимикач з тепловими і електромагнітними розчіплювачами, з вільними (додатковими) контактами, ручним приводом у стаціонарному виконанні, без допоміжних механізмів, без регулювання струму неспрацювання теплових розчіплювачів, ступенем захисту IP00, кліматичне виконання УХЛ, категорія розміщення -3 типу ВА51-29-341110000УХЛ3. Номінальна напруга вимикача 660 В змінного струму частотою 50 Гц, номіналь-

ний струм вимикача 63 А, номінальний струм розчіплювачів 31,5 А, кратність відсічки 7.

Перевірка вимикача на неспрацювання при пуску двигуна з найбільшим пусковим струмом (формула 8.36):

$$7 \cdot 31,5 = 220 \text{ А} > 1,1 \cdot 1,25(11,4 + 4,2 + 0,9 \cdot 7,5 \cdot 14,8) = 159 \text{ А.}$$

Висновок: вимикач не спрацює при пуску двигуна.

8.5.8. Питання для самоконтролю

1. Від яких аварійних режимів потрібно захищати електроприводи?
2. Якими апаратами захищають електроустановки від струмів короткого замикання?
3. Якими апаратами захищають електродвигуни від струмів перевантаження?
4. Що таке захисна характеристика плавкого запобіжника і як вона виглядає?
5. Розкажіть будову і принцип дії плавких запобіжників.
6. Які особливості будови та вибору швидкодіючих запобіжників для захисту напівпровідникових приладів?
7. За якими умовами вибирають плавкі запобіжники при захисті одного електродвигуна?, групи електродвигунів?
8. Призначення, будова, принцип дії і правила вибору теплових реле?
9. Для чого в теплових реле встановлюють термокомпенсатори?
10. Який вигляд має захисна характеристика теплового реле?
11. Якими розчіплювачами комплектують автоматичні вимикачі?, при яких аварійних режимах вони спрацювують?
12. Що таке струм відсічки автоматичного вимикача?
13. Який вигляд має захисна характеристика автоматичного вимикача з комбінованим розчіплювачем максимального струму?
14. За якими параметрами і ознаками вибирають автоматичні вимикачі?, як їх перевіряють?
15. В чому полягає принцип дії температурного захисту?
16. Для чого призначені і як працюють пристрої захисного вимикання?
17. В яких електроустановках обов'язкове встановлення ПЗВ?
18. За якими ознаками класифікують ПЗВ?
19. Як вибрати ПЗВ для захисту конкретної електроустановки?
20. На якому принципі побудовані і працюють пристрої захисту з електронними блоками?
21. Що використовують в якості датчиків аномальних режимів у пристроях захисту з електронними блоками?
22. Від яких аварійних режимів захищає і як працює захисний пристрій ФУЗ-М?



9. СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

9.1. Функції систем автоматичного керування електроприводом

Керування — це сукупність дій на керуючі пристрої для забезпечення пуску, підтримання режиму роботи електропривода у відповідності з вимогами технологічного процесу і його зупинки. Залежно від участі в цих діях людини (оператора) розрізняють не автоматичне (ручне), автоматизоване та автоматичне керування.

Неавтоматичним (ручним) називають керування, при якому оператор приймає безпосередню участь у всіх операціях по керуванню приводом (наприклад, комутація електричних кіл за допомогою апаратів ручного керування). Використання цих апаратів пов'язане з додатковими затратами часу на керування, що знижує продуктивність механізму, особливо при частих пусках або при регулюванні швидкості. Крім того, застосування апаратів ручного керування виключає можливість дистанційного керування. В деяких потужних електроприводах ручне керування вимагає значних зусиль від людини для перемикання апаратів.

Автоматизованим називають керування, при якому оператор бере лише участь у створенні початкових імпульсів на вмикання, вимикання та зміну режиму роботи обладнання, а всі інші операції з керування здійснюються автоматично.

Автоматичним вважають таке керування, при якому основні операції здійснюються без участі оператора. Автоматичне керування електроприводами дає можливість підвищити продуктивність робочих машин, підвищити якість продукції, зменшити питомі витрати енергії на виробництво продукції, підвищити продуктивність праці та поліпшити умови роботи обслуговуючого персоналу, забезпечити

оптимальний режим роботи обладнання. В системах автоматичного керування електроприводами використовуються: рележно-контактні апарати, серед яких основними є реле, контактори, шляхові перемикачі тощо; підсилювачі, перетворювальні пристрої і датчики — електромашинні, електромагнітні, напівпровідникові тощо; безконтактні логічні елементи, мікропроцесори та мікро-ЕОМ.

Під системою автоматичного керування електроприводом розуміють сукупність механічних, електромеханічних, напівпровідникових та інших елементів, за допомогою яких здійснюється керування. Системи автоматичного керування бувають розімкненими і замкненими.

Розімкненою називають таку систему автоматичного керування, при якій із зміною збурюючої дії (наприклад, навантаження на валу двигуна) змінюється раніше заданий режим роботи електропривода і не відновлюється без втручання оператора.

Замкненою називають таку систему автоматичного керування, при якій із зміною збурюючої дії заданий режим роботи електропривода не змінюється. Заданий режим підтримується керуючими діями системи керування, що створюються засобами зворотного зв'язку.

У сільськогосподарському виробництві використовуються в основному розімкнені системи автоматичного керування.

Підтримання струму в колі статора і ротора або якоря двигуна, моменту, швидкості обертання в заданих межах здійснюється відповідними перемиканнями електричних кіл, зміною опору пускових і гальмівних резисторів, регулюванням напруги мережі живлення. В деяких випадках робоча машина з електроприводом є частиною замкненої системи автоматичного регулювання вихідної величини об'єкта керування (температури, вологості, тиску, рівня тощо). Відповідно розрізняють такі принципи автоматичного керування.

Керування у функції часу полягає в тому, що перемикання електричних кіл, зміна опору пускових і гальмівних резисторів або напруги здійснюється в певні, наперед задані проміжки часу. В схемах керування застосовують реле часу, які здійснюють вмикання відповідного контактора.

Прикладом автоматичного керування електроприводом у функції часу є керування пуском трифазного асинхронного двигуна з перемиканням обмоток із «зірки» на «трикутник». Двигун спочатку вмикається в мережу з обмотками, з'єднаними «зіркою», а через певний час за командою реле часу система керування перемикає обмотки на «трикутник». При цьому система не контролює ні величини пускового струму, ні швидкості ротора на момент перемикання.

Керування у функції струму здійснюється за допомогою реле мінімального струму, які вмикають контактори при зниженні струму двигуна до заданого значення.

Керування у функції швидкості здійснюється за допомогою реле швидкості, або реле, які реагують на зміну інших величин, які перебувають в прямій залежності від швидкості — ЕРС у двигунів постійного струму або частоти струму ротора у асинхронних двигунів. Для вимірювання ЕРС реле напруги приєднують до затисків якоря, а реле частоти струму вмикають у коло ротора.

Керування електроприводом у функції шляху полягає у тому, що при досягненні приводним механізмом заданого положення шляховий вимикач перемикається, внаслідок чого приводний механізм або зупиняється, або реверсується.

Керування у функції регульованого параметра полягає в тому, що датчики (один або декілька) системи автоматичного керування вимірюють заданий параметр і видають сигнал на зміну режиму роботи привода. Наприклад, в системі автоматичного керування вентиляційною установкою у функції температури датчик вимірює температуру повітря у тваринницькому приміщенні і при відхиленні її від заданого значення регулятор подає команди на зміну швидкості обертання двигунів вентиляторів.

Вказані принципи керування є лише окремими функціями, які повинна виконувати система керування.

Будь-яка система автоматичного керування (САК) електроприводом виконує кілька функцій, які залежать від прийнятого технологічного процесу та вибраної системи електропривода. При цьому технологічний процес приймається за основу при виборі САК.

У сільському господарстві системи автоматичного керування електроприводом найчастіше виконують такі функції.

1. Пуск електродвигуна та його зупинку. Цю функцію виконують всі без винятку САК з тією різницею, що це може бути прямий пуск, перемиканням обмоток статора із «зірки» на «трикутник», із введенням опорів в коло ротора чи статора, пуск при зниженій напрузі, пуск у два ступені.

2. Регулювання швидкості електропривода зміною підведеної напруги, перемиканням числа пар полюсів, введенням опору в коло ротора, зміною частоти струму тощо.

3. Реверсування з витримкою часу або без неї, з електричним гальмуванням або без нього.

4. Електричне гальмування електропривода: противмиканням, динамічне, рекуперативне.

5. Захист електроприводів та приводних механізмів від коротких замикань, перевантажень та інших аномальних режимів.

6. Сигналізація стану системи окремими сигнальними лампами або мнемосхемами технологічного процесу.

7. Здійснення відповідної послідовності пуску та зупинки електропривода та блокувань: пуск і зупинка електроприводів поточкових ліній, блокування неправильних дій оператора.

8. Автоматичне підтримання швидкості або її зміна за відповідним законом.

9. Стабілізація контрольованого параметра на заданому рівні.

10. Синхронізація руху окремих елементів механізму чи агрегату.

11. Слідкування за сигналами, які подаються на вхід системи від датчиків, та їх відпрацювання.

Чим більше функцій виконує САК, тим ширше зона її застосування. Одночасно зростає складність схеми керування.

Наприклад, система автоматичного керування скреперною установкою УС-12 згідно з наведеним переліком виконує функції 1, 3, 5, 6, 7; а схема керування вентиляційною установкою «Климат-4М» виконує функції 1, 2, 5, 6, 7, 8, 11, тобто має більше можливостей для автоматизації.

9.2. Правила виконання електричних схем

Залежно від основного призначення розрізняють схеми структурні, функціональні, принципіальні, з'єднань, підключень, загальні, розміщення та об'єднані. В електроприводах найчастіше використовують схеми структурні, функціональні, принципіальні та з'єднань.

Структурні схеми визначають основні функціональні частини електропривода, їх зв'язок між собою та призначення. Ці схеми передують розробці інших схем і використовуються для загального ознайомлення з електроприводом. Функціональні частини електропривода зображують у вигляді прямокутників, з'єднаних лініями зв'язку із стрілками, які показують напрям ходу процесу. Назву елементів вказують всередині прямокутників. В регульованих електроприводах для їх аналізу і синтезу всередині прямокутників записують передаточні функції елементів.

Функціональні схеми пояснюють процеси, які протікають в окремих функціональних елементах електропривода або установки в цілому. Використовуються ці схеми для вивчення принципу роботи, а також при налагодженні, контролі та ремонті. Функціональні елементи електропривода на цих схемах зображують у вигляді умовних графічних позначень або прямокутників. Вони повинні мати найменування, позначення або тип. Зв'язки між елементами та напрям передавання дії вказують стрілками.

При проектуванні електроприводів використовують також функціональні схеми робочих машин та агрегатів, на яких зображують технологічні зв'язки між окремими робочими органами або машинами, що необхідно для розробки електричної схеми керування електроприводом.

Принципіальними називають схеми керування, які визначають повний склад елементів електроустановок і зв'язки між ними і дають уявлення про принцип роботи установки. Використовуються ці схеми для вивчення принципу дії установки, а також при ремонті, налагодженні та контролі.

Принципіальні схеми креслять без дотримання масштабу, як правило, рознесеним способом, коли елементи одного пристрою можуть бути розміщені в різних колах схеми відповідно до їх електричних з'єднань. Фактичне розміщення окремих частин електроустановки не враховують або враховують наближено. Всі елементи схеми зображують у вигляді умовних графічних позначень згідно з вимогами Єдиної системи конструкторської документації. Складні пристрої, які мають свою внутрішню схему (регулятори, перетворювачі напруги, частоти струму, програмні пристрої тощо), дозволяється зображувати у вигляді прямокутника з зовнішніми колами. Елементи зображують у вимкненому стані.

При рознесеному способі зображення умовні позначення елементів або їх складових частин, які входять до одного кола, зображують послідовно один за одним на одній прямій, а окремі кола — одне під одним. Лінії зв'язку між ними повинні бути найкоротшими і мати мінімальну кількість перетинів.

Кожний елемент принципіальної електричної схеми повинен мати буквено-цифрове умовне позначення, яке складається з латинських букв і цифр однакової висоти (наприклад, автоматичний вимикач *QF1*; електромагнітний пускач *KM1*, *KM2*, *KM3*; теплові реле *KK1*, *KK2*, *KK3* тощо). Позиційні позначення на схемі проставляють поряд з умовним графічним позначенням з правого боку або над ним.

На принципіальних електричних схемах допускається зображувати механічні зв'язки між елементами пунктирними або подвійними лініями.

Принципіальні схеми керування електроприводами складаються з силових (головних) кіл (ліва частина) та кіл керування (права частина). До силових кіл відносять кола якоря, статора і ротора електродвигунів та силові кола перетворювачів електричної енергії. В колах керування знаходяться котушки контакторів і реле, допоміжні контакти контакторів і апаратів захисту, кнопки керування, пристрої сигналізації.

Для зручності читання схеми та розробки за нею схеми з'єднань ділянки кіл принципіальної електричної схеми маркують. Маркування здійснюють від вводу джерела живлення, де вказують напругу мережі постійного струму або напругу і частоту струму мережі змінного струму. Вхідні ділянки силового кола трифазного змінного струму маркують $L1, L2, L3, N$; однофазного змінного струму — $L1, N; L2, N; L3, N$; постійного струму — $L+, L-$.

Ділянки електричного кола, розділені контактами апаратів, котушками реле, контакторів, обмотками машин, резисторами та іншими елементами повинні мати різне маркування ($L1.1, L2.1, L3.1; L1.2, L2.1, L3.1$ і т.д.), а ділянки кола, що проходять через рознімні, розбірні або нерозбірні контактні з'єднання — однакове маркування.

Послідовність маркування повинна бути у напрямку від джерела живлення до споживача, а ділянки кола, що розгалужуються, маркують зверху вниз у напрямку зліва направо. Маркування проставляють біля кінців або в середині ділянки кола при вертикальному зображенні кола — зліва, при горизонтальному — над ним. Кола керування, захисту та сигналізації маркують послідовними арабськими цифрами зліва-направо, зверху-вниз.

Дані про елементи схеми повинні бути записані в таблиці переліку елементів, яка розміщується над основним надписом графічної частини або на окремому аркуші. Елементи схеми записують у алфавітному порядку їхніх умовних позначень.

Приклад виконання принципіальної електричної схеми керування електроприводом показаний на рис. 9.1.

Схемою з'єднань називають схему, на якій показані з'єднання всіх складових частин електроустановки, а також проводи, кабелі і жгути, якими здійснюються ці з'єднання, а також місця їх приєднання і вводу.

Схема з'єднань складається на основі принципіальної електричної схеми і повинна бути узгоджена з нею.

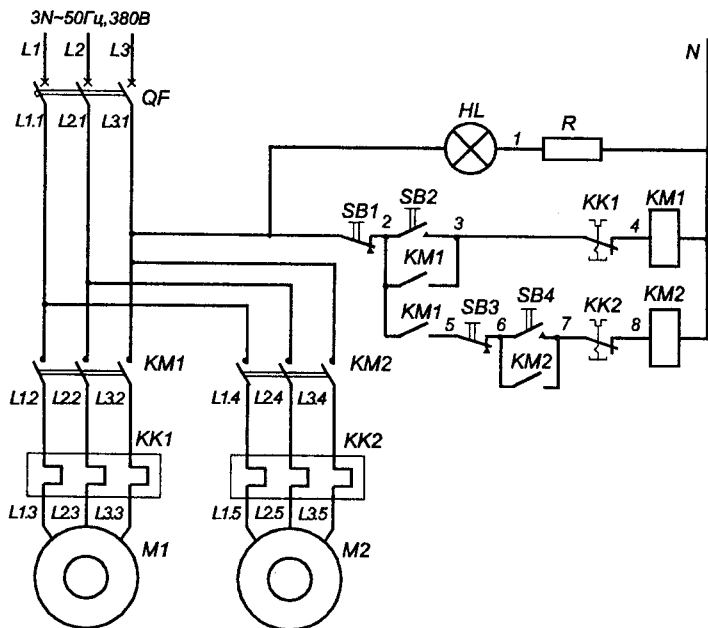


Рис. 9.1. Принципіальна електрична схема керування гноєприбиральним транспортером ТСН-3Б

Апарати і прилади на схемі з'єднань зображують у вигляді прямокутників або фігур, що зовнішніми обрисами нагадують відповідний апарат, а їх елементи — у вигляді умовних графічних позначень чи прямокутників. Розміщення пристроїв повинно відповідати дійсному розміщенню їх у шафі керування. Масштаби не витримуються. Біля графічних позначень треба вказувати позиційні позначення елементів відповідно до принципіальної схеми.

Проводи, що ідуть в одному напрямку, допускається зливати в одну лінію, а при підході до апарата кожний провід треба зображати окремою лінією. Місце приєднання до апарата позначають кружечком з номером.

Номери проводів проставляють біля обох кінців їх зображень. Допускається біля обох кінців ліній вказувати адресу з'єднань.

Приклад виконання схеми з'єднань показаний на рис. 9.2.

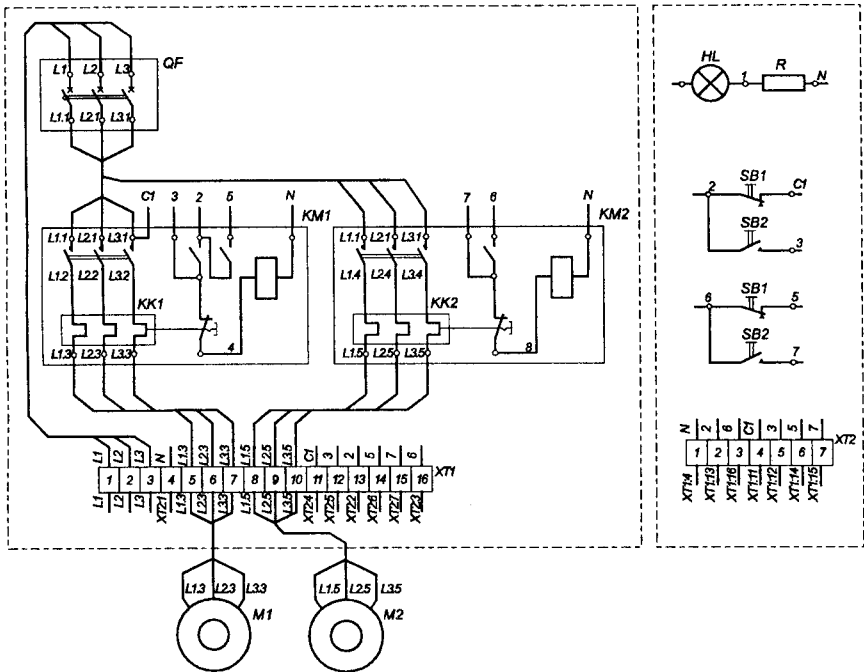


Рис. 9.2. Схема з'єднання станції керування гноєприбиральним транспортом ШАП 5901Ж-03А

9.3. Типові вузли і блоківки у схемах керування електроприводами

Типові вузли схем керування електроприводами показані на рис. 9.3. При короткочасному вмиканні двигуна (поштовхом) натискають на кнопку *SB1*, при цьому спрацьовує пускач *KM* (рис. 9.3 а). При перевантаженні спрацьовує теплове реле *KK*, контакт якого розмикається у колі котушки пускача *KM* (рис. 9.3 б). Світлову сигналізацію про вмикання пускача, подачу напруги на схему, та вмикання двигуна забезпечують схеми, показані відповідно на рис. 9.3 в, 9.3 г, 9.3 д.

Для запобігання виходу з ладу електрообладнання та підвищення надійності його роботи застосовують різні види захисту та захисні блокування.

Захист від коротких замикань (максимальний струмовий захист) забезпечується: в силових колах плавкими запобіжниками (рис. 9.4 а, б) та автоматичними вимикачами з електромагнітними розчіплювачами (рис. 9.4 в, г), в колах керування — максимально-струмовим захистом силового кола (при потужності двигуна до 10 кВт) або власними плавкими запобіжниками чи автоматичними вимикачами.

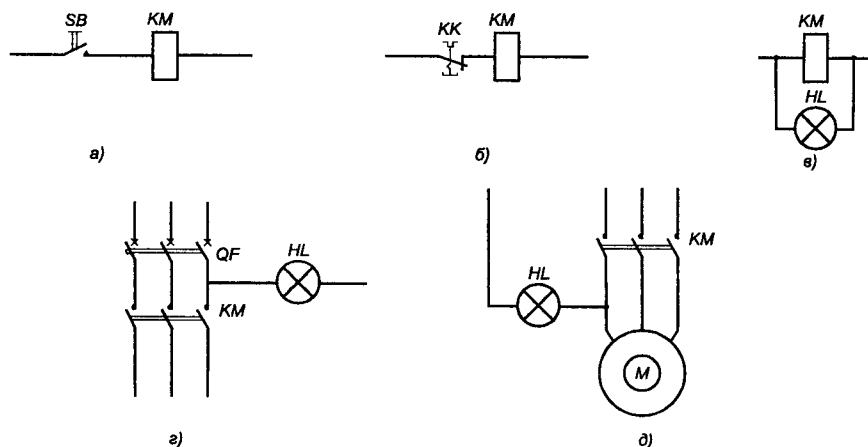


Рис. 9.3. Типові схеми керування електродвигунами: а) поштовх; б) електромагнітний пускач з тепловим реле; в) сигнал «Пускач увімкнено»; г) світлова сигналізація про подачу напруги на схему; д) сигнал «Двигун увімкнено»

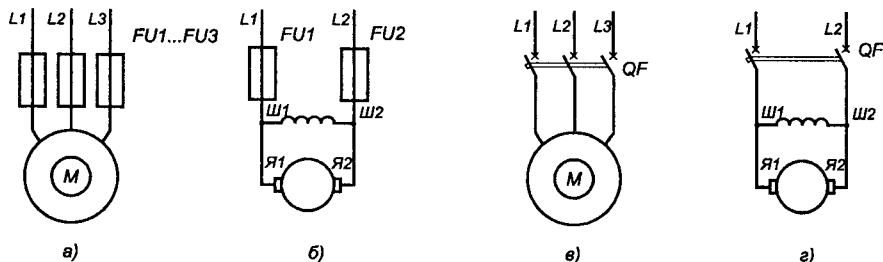


Рис. 9.4. Вузли схем захисту електродвигунів від коротких замикань: а), б) — плавкими запобіжниками; в), г) — автоматичними вимикачами

Захист двигунів від перевантажень забезпечується при тривалому режимі роботи — тепловими реле або тепловими розчіплювача-

ми автоматичних вимикачів (рис. 9.5 а), при повторно-коротко-часному режимі роботи — за допомогою максимальних струмових реле KA (рис. 9.5 б). Реле часу вводять у схему для запобігання вимикання двигуна реле струму KA при пуску. На час пуску контакт реле часу KT шунтує розмикаючі контакти $KA1$, $KA2$, $KA3$.

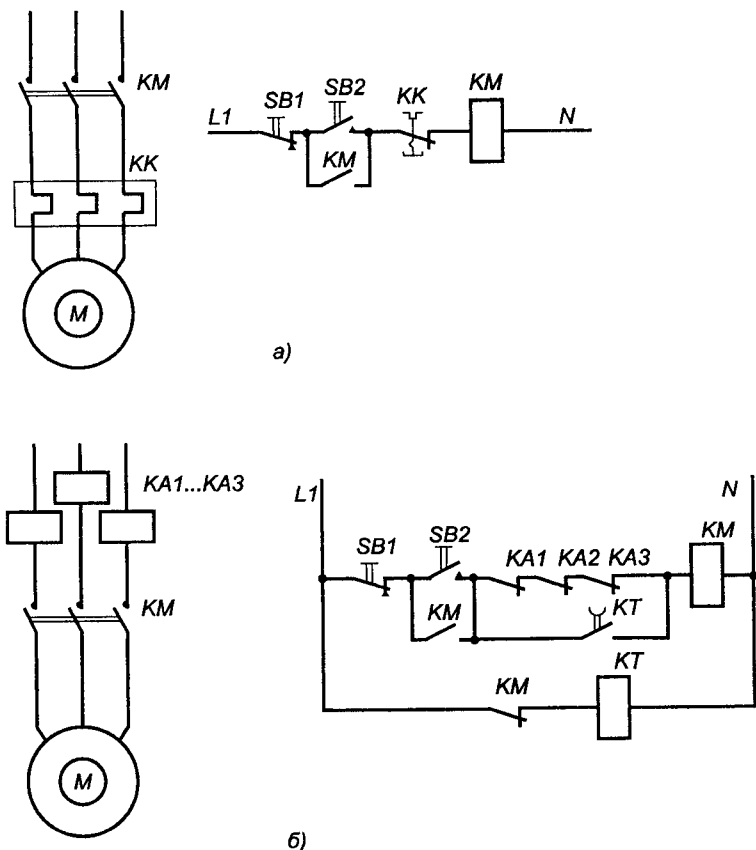


Рис. 9.5. Вузли схем захисту електродвигунів від перевантажень:
а) — тепловими реле; б) — реле струму

Захист від обриву поля, тобто при обриві кола збудження двигуна постійного струму і синхронного двигуна, здійснюється реле мінімального струму (рис. 9.6). Котушка реле KA вмикається послідовно із обмоткою збудження, і реле замикає свій контакт при струмі,

близькому до номінального. При зникненні або недопустимому зниженні струму збудження двигуна контакт реле струму $КА$ в колі котушки пускача $КМ$ розмикається, внаслідок чого вимикається двигун.

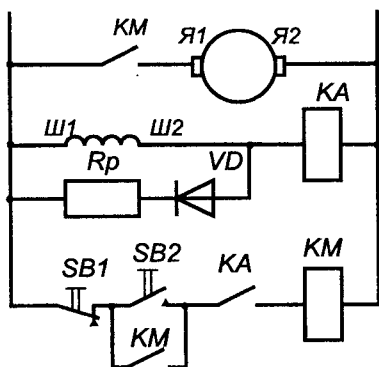


Рис. 9.6. Вузли схем захисту електродвигуна постійного струму від обриву і перенапруги на обмотці збудження

Захист від перенапруги на обмотці збудження двигуна постійного струму після її вимкнення здійснюється розрядним опором R_p , який приймається: при напрузі 220 В (6...8) $R_{озд}$, при напрузі 110 В (3...5) $R_{озд}$. Для запобігання втрат енергії в розрядному опорі при роботі двигуна у коло R_p вмикається діод VD (рис. 9.6).

Захисні електричні блокування підвищують надійність роботи електроприводів, запобігають хибним і аварійним увімкненням апаратів, пристроїв і робочих машин. В схемах автоматичного керування електроприводами найчастіше застосовують блокування, що забезпечують задану послідовність вмикання і вимкання кількох двигунів, не допускають одночасного вмикання контакторів або інших апаратів, запобігають мимовільному пуску двигунів (нульова блокування), нещасним випадкам і аваріям, які можуть виникнути внаслідок неправильних дій обслуговуючого персоналу.

Для забезпечення заданої послідовності вмикання електродвигунів $M1$ і $M2$ (рис. 9.1) послідовно з котушкою електромагнітного контактора $КМ2$, який забезпечує керування електродвигуном $M2$, вмикають допоміжний замикаючий контакт контактора $КМ1$, призначеного для керування двигуном $M1$ (рис. 9.7 а). При цьому вмикання двигуна $M2$ буде можливим лише після замикання допоміжного контакту контактора $КМ1$, тобто після вмикання двигуна $M1$.

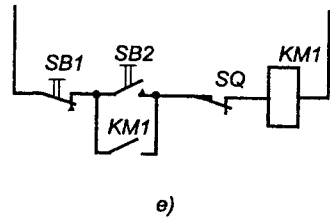
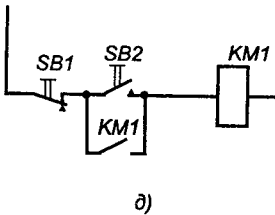
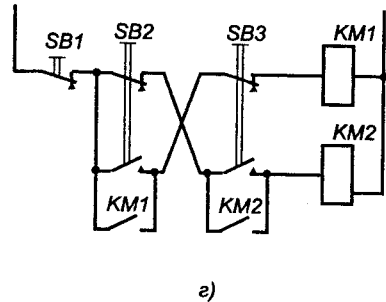
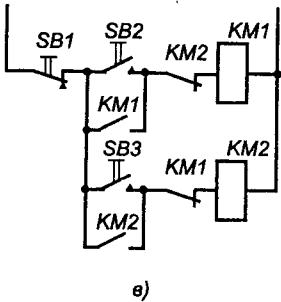
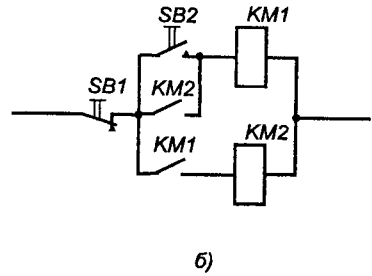
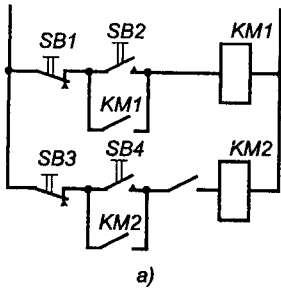


Рис. 9.7. Блокувальні зв'язки у схемах керування електроприводами:
 а) — пуск у заданій послідовності; б) — одночасний пуск; в), г) — одночасна робота двигунів неможлива; д) — мимовільний пуск двигуна неможливий; е) — обмеження руху робочої машини

Для забезпечення одночасного вмикання двигунів $M1$ і $M2$ допоміжний замикаючий контакт контактора $KM1$, призначеного для керування двигуном $M1$, вмикають послідовно з котушкою контактора $KM2$, призначеного для керування двигуном $M2$, а допоміжний замикаючий контакт контактора $KM2$ — паралельно кнопці «Пуск» $SB2$ (рис. 9.7 б). При натисканні на кнопку $SB2$ спрацьовує контактор $KM1$ і своїми головними контактами вмикає двигун $M1$ в мере-

жу, а допоміжним замикаючим контактом подає живлення на котушку контактора *KM2*. Контактор *KM2* спрацьовує і вмикає двигун *KM2*. Якщо контактор *KM2* з певних причин не спрацює, при відпусканні кнопки *SB2* зупиниться і двигун *M1*. Одночасне вимикання двох двигунів здійснюється кнопкою «Стоп» *SB1*.

Щоб не допустити одночасного вмикання контакторів *KM1* і *KM2* (рис. 9.7, в), необхідно послідовно з котушкою контактора *KM1* увімкнути допоміжний розмикаючий контакт контактора *KM2*, а послідовно з котушкою контактора *KM2* увімкнути допоміжний розмикаючий контакт контактора *KM1*. При цьому, якщо один з контакторів спрацює, розмикається його допоміжний контакт у колі котушки другого контактора і вмикання другого контактора стає неможливим. Таку блокування здійснюють також за допомогою здвоєних кнопок (рис. 9.7, г), що мають розмикаючий і замикаючий контакти. При натисканні на кнопку *SB2* її замикаючий контакт замикає коло котушки контактора *KM1*, а розмикаючий — розмикає коло котушки контактора *KM2*. Якщо ж натиснути на кнопку *SB3*, то, навпаки, замкнеться коло котушки контактора *KM2* і розімкнеться коло котушки контактора *KM1*. При одночасному натисканні на обидві кнопки розмикаються кола котушок обох контакторів, і вони вимикаються. Одночасна робота двох контакторів неможлива.

Для забезпечення нульової блокування, тобто захисту від мимовільного вмикання електродвигуна при появі зниклої напруги, замикаючий допоміжний контакт контактора вмикають паралельно кнопці «Пуск» (рис. 9.7 д). При нормальній напрузі мережі натисканням на кнопку «Пуск» *SB2* спрацьовує контактор *KM1*, який головними контактами вмикає двигун, а допоміжним шунтує кнопку «Пуск». Після цього кнопка *SB2* повертається у вихідне положення, а живлення котушки контактора відбувається через його допоміжний контакт. При значному зниженні або зникненні напруги контактор повертається у вихідне положення, вимикаючи головними контактами двигун, і розмикає допоміжний контакт, увімкнений паралельно кнопці «Пуск». Після відновлення напруги запустити двигун можна лише натиснувши на кнопку «Пуск» *SB2*.

Обмеження переміщення робочого органу або машини в цілому у просторі здійснюється за допомогою кінцевого вимикача *SQ*, увімкненого у коло котушки контактора *KM1* (рис. 9.7 е). При спрацюванні кінцевого вимикача *SQ* розмикається коло котушки контактора *KM*, який вмикає двигун.

9.4. Типові схеми автоматизованого керування двигунами змінного струму

Асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором невеликої потужності (до 5,5 кВт), як правило, запускаються безпосереднім вмиканням в електричну мережу на номінальну напругу (прямий пуск).

Схема нереверсивного керування електродвигуном з нульовою блокуванням за допомогою електромагнітного пускача наведена на рис. 9.8. При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» замикається коло котушки пускача *KM*, пускач спрацьовує і головними контактами вмикає двигун у мережу. Замикаючий допоміжний контакт шунтує кнопку *SB2*, і при її відпусканні котушка пускача залишиться увімкненою через цей контакт. Вимикання двигуна відбувається при натисканні на кнопку *SB1* «Стоп» або при спрацюванні теплового реле *KK*. В обох випадках розмикається коло живлення котушки пускача *KM*, він повертається у вихідне положення і вимикає двигун з мережі. Захист силових кіл від коротких замикань здійснює автоматичний вимикач *QF1*, кіл керування — *QF2*.

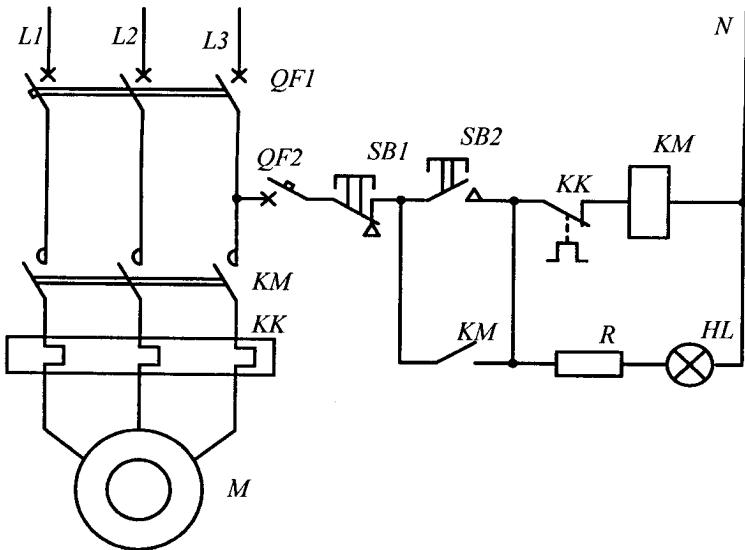


Рис. 9.8. Схема нереверсивного керування асинхронним електродвигуном

При необхідності керування двигуном з кількох місць всі замикаючі контакти командних апаратів потрібно увімкнути паралельно, а розмикаючі — послідовно.

Для реверсивного керування асинхронним двигуном необхідно два нереверсивні пускачі або один спеціальний реверсивний, що має два контактори. Реверсивне керування здійснюється за схемою, зображеною на рис. 9.9.

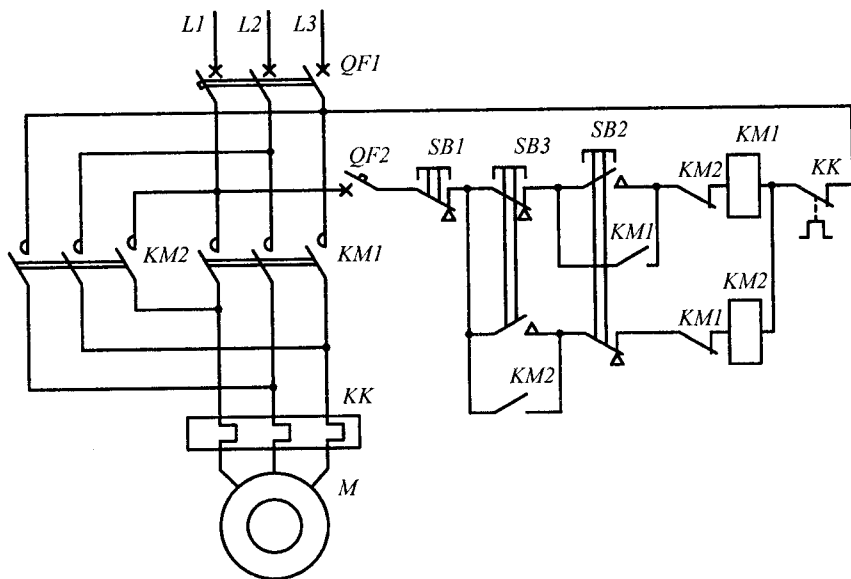


Рис. 9.9. Схема реверсивного керування асинхронним електродвигуном

Для пуску двигуна «Вперед» натискають на кнопку *SB2*. При цьому спрацьовує контактор *KM1*. Зупинку двигуна здійснюють натисканням на кнопку *SB1* «Стоп». Для пуску «Назад» натискають на кнопку *SB3*, яка вмикає контактор *KM2*. Схема передбачає можливість реверсування двигуна «з ходу». У цьому випадку, коли двигун, наприклад, обертається «Назад», натискають на кнопку *SB2*. При цьому вимикається контактор *KM2* і вмикається контактор *KM1*. Двигун гальмується гальмуванням противмиканням, а потім починає обертатися в заданому напрямку.

Схемою реверсивного керування обов'язково передбачають блокування, що виключають одночасне вмикання обох контакторів *KM1* і *KM2* (для запобігання короткому замиканню на головних контактах). Для цього керування контакторами здійснюється кнопками *SB2* і *SB3*, що мають як замикаючі, так і розмикаючі контакти (рис. 9.9). За відсутності механічної блокування в коло живлення котушок пускачів вмикають «чужі» розмикаючі допоміжні контакти. Коли спрацює один контактор, то своїм розмикаючим допоміжним контактом він розірве коло живлення котушки другого контактора.

Якщо необхідно здійснити автоматичне реверсування механізмів у функції шляху, то в схему, зображену на рис. 9.9, вмикають контакти кінцевих перемикачів *SQ1* і *SQ2* (рис. 9.10). Для пуску двигуна «Вперед» натискають кнопку *SB2*. Контактор *KM1* вмикає двигун, і механізм рухається до місця встановлення кінцевого вимикача *SQ1*. При підході механізму до нього розмикаючий контакт *SQ1.1* розмикає коло котушки *KM1*, а замикаючий контакт *SQ1.2* замикається у колі котушки *KM2*. Контактор *KM1* вимикається, і вмикається контактор *KM2*. Двигун реверсується, і механізм починає рухатися у зворотному напрямку до місця встановлення кінцевого перемикача *SQ2*. При цьому контакти *SQ1* повертаються у вихідний стан і готують коло керування до повторного реверсу. При підході механізму до іншого крайнього положення аналогічно перемикаються контакти перемикача *SQ2*.

Трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором мають великі кратності пускового струму. При пуску порівняно потужних двигунів ($P_H \geq 11$ кВт) обмежують пусковий струм вмиканням у коло статора опору (активного чи реактивного) або зменшенням підведеної до статора напруги.

Індуктивні опори (пускові реактори) застосовують для порівняно потужних двигунів ($P_H = 75 - 100$ кВт), для таких же двигунів застосовують пускові автотрансформатори. Для двигунів меншої потужності використовують активні опори.

Схема обмеження пускового струму і моменту з симетричними опорами в колі статора зображена на рис. 9.11. Керування двигуном здійснюється двома електромагнітними пускачами *KM1* і *KM2*. Пускач *KM1* вмикає статор у мережу через пускові опори *R1*, *R2* і *R3*. Пускач *KM2* вмикає статор безпосередньо в мережу. Тривалість пуску з опорами в колі статора контролюється електромагнітним реле часу *KT1*.

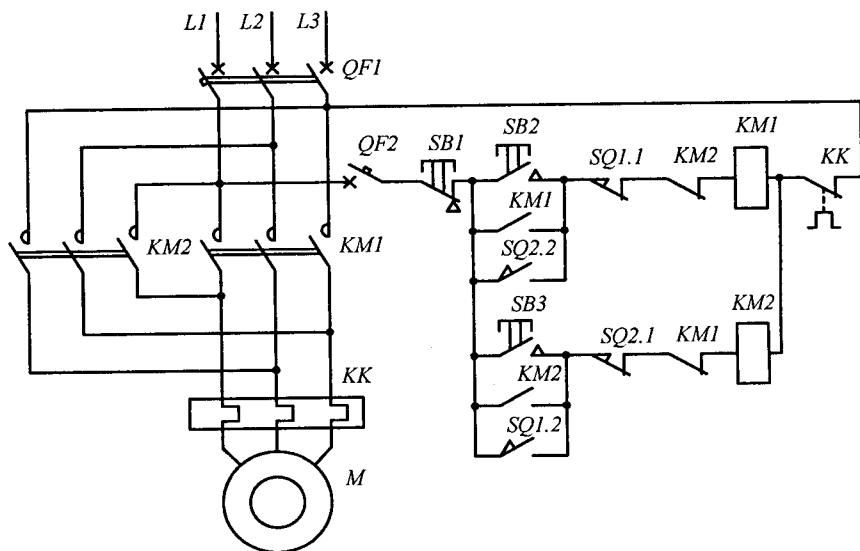


Рис. 9.10. Схема керування асинхронним електродвигуном у функції шляху

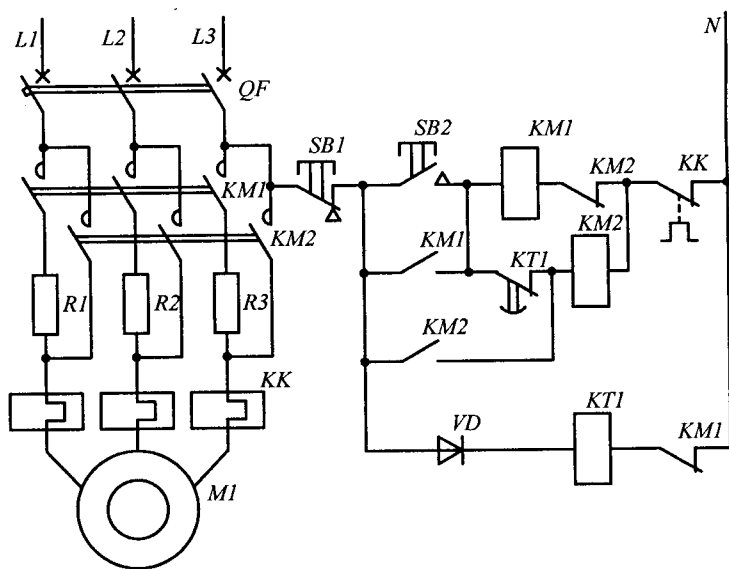


Рис. 9.11. Схема керування трифазним асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором з обмеженням пускового струму і моменту активними опорами

При вмиканні автоматичного вимикача QF спрацьовує реле $KT1$ і розмикає свій контакт у колі котушки пускача $KM2$. Схема підготовлена до пуску. Для пуску двигуна натискають на кнопку $SB2$ «Пуск». При цьому спрацьовує пускач $KM1$ і вмикає двигун у мережу через пускові опори. Одночасно його розмикаючий допоміжний контакт розмикає коло котушки реле часу $KT1$. З витримкою часу якір реле відпадає, його розмикаючий контакт вмикає котушку пускача $KM2$, який головними контактами вмикає двигун $M2$ безпосередньо в мережу, а допоміжними контактами вмикає пускач $KM1$. Для зупинки двигуна натискають кнопку $SB1$ «Стоп».

З метою обмеження пускового струму широко застосовується перемикання обмоток статора при пуску з «зірки» на «трикутник». Керування пуском двигуна найчастіше здійснюється у функції часу із застосуванням різних реле часу (рис. 9.12).

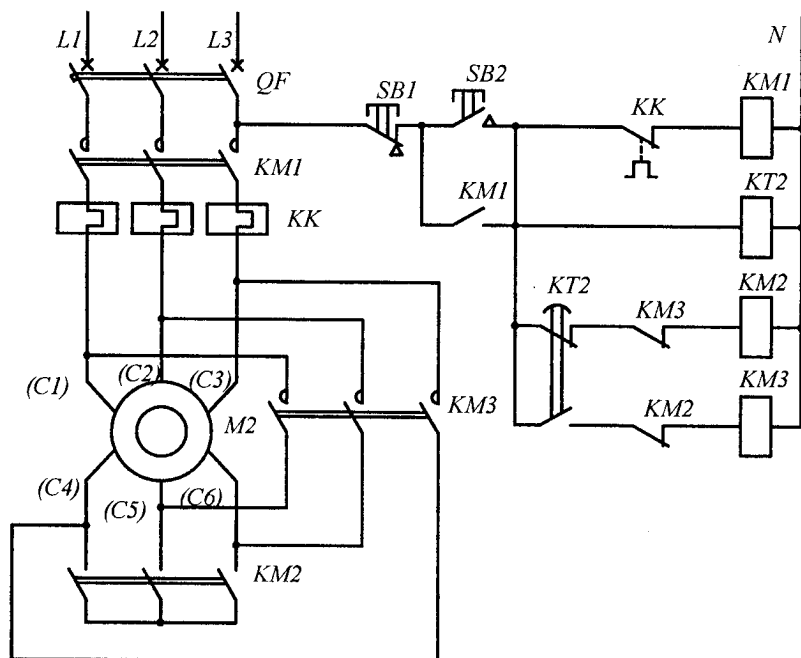


Рис. 9.12. Схема керування трифазним асинхронним електродвигуном з перемиканням обмотки статора із «зірки» на «трикутник» при пуску

Пускач *КМ1* — лінійний, має теплове реле *КК* для захисту двигуна від перевантажень. Пускач *КМ2* з'єднує обмотки двигуна «зіркою», пускач *КМ3* — «трикутником». Пускачі *КМ2* і *КМ3* взаємно заблоковані розмикаючими контактами.

Пневматичне реле часу *КТ2* створює витримку часу при подачі напруги на його котушку. Для пуску двигуна натискають на кнопку *SB2* «Пуск». При цьому отримують живлення котушки контакторів *КМ1*, *КМ2* і реле часу *КТ2*. Контактори *КМ1* і *КМ2* спрацьовують і вмикають у мережу обмотки статора двигуна, з'єднані «зіркою». Через задану витримку часу реле часу *КТ2* розмикаючим контактом розмикає коло котушки контактора *КМ2*, а замикаючим замикає коло котушки контактора *КМ3*. Контактор *КМ2* вимикається, а контактор *КМ3* вмикається, з'єднуючи обмотки статора в «трикутник». Вимикають двигун натисканням на кнопку *SB1* «Стоп».

При пуску потужних асинхронних двигунів з фазним ротором для обмеження пускового струму застосовують пускові опори, які вмикають у коло ротора. При пуску двигуна їх необхідно поступово виводити по мірі розгону двигуна. Процес пуску може відбуватися у функції часу, струму або частоти струму в роторі.

Схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу показана на рис. 9.13. При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» одержують живлення котушки контактора *КМ1* і реле часу *КТ1*. Контактор головними контактами вмикає обмотку статора двигуна в мережу, а допоміжним замикаючим контактом шунтує кнопку *SB2*. Двигун розганяється при увімкнених у коло ротора пускових резисторах *R1...R6*. Через заданий проміжок часу реле *КТ1* своїм замикаючим контактом подає напругу на котушки контактора *КМ2* і реле часу *КТ2*. Контактор *КМ2* замикає головні контакти і закорочує перший ступінь пускового реостата *R1...R3*. Двигун продовжується розганятися при зменшеному опорі кола ротора. Через задану витримку часу реле часу *КТ2* замикає свій контакт у колі котушки контактора *КМ3*, який спрацьовує і головними контактами закорочує другий ступінь пускового реостата *R4...R6*. Далі двигун розганяється на природній характеристиці при закороченому пусковому реостаті.

Схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції струму показана на рис. 9.14. При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» спрацьовує лінійний контактор *КМ1* і блокувальне реле *КВ*. Контактор головними контактами вмикає обмотку статора двигуна в мережу, а допоміжним замикаючим контактом шунтує

кнопку *SB2*. При пуску двигуна через обмотку ротора проходить великий пусковий струм, тому реле струму *KA1* і *KA2*, котушки яких увімкнені у це коло, спрацьовують і розмикають свої контакти у колі котушок контакторів *KM2* і *KM3*. Блокувальне реле *KV* створює витримку часу, достатню для спрацювання реле струму *KA1* і *KA2*. Тому контактори *KM2* і *KM3* не спрацьовують, і двигун розганяється при увімкненому у коло ротора пусковому реостаті *R1...R6*. При зростанні кутової швидкості двигуна струм падає, і при певних значеннях струму реле *KA1* і *KA2* по черзі повертаються у вихідне положення, подаючи своїми розмикаючими контактами напругу на котушки контакторів *KM2* і *KM3*. При цьому спочатку спрацьовує контактор *KM2* і своїми головними контактами закорочує перший ступінь *R1...R3*, а потім, через деякий час, спрацьовує контактор *KM3* і закорочує другий ступінь *R4...R6* пускового реостата.

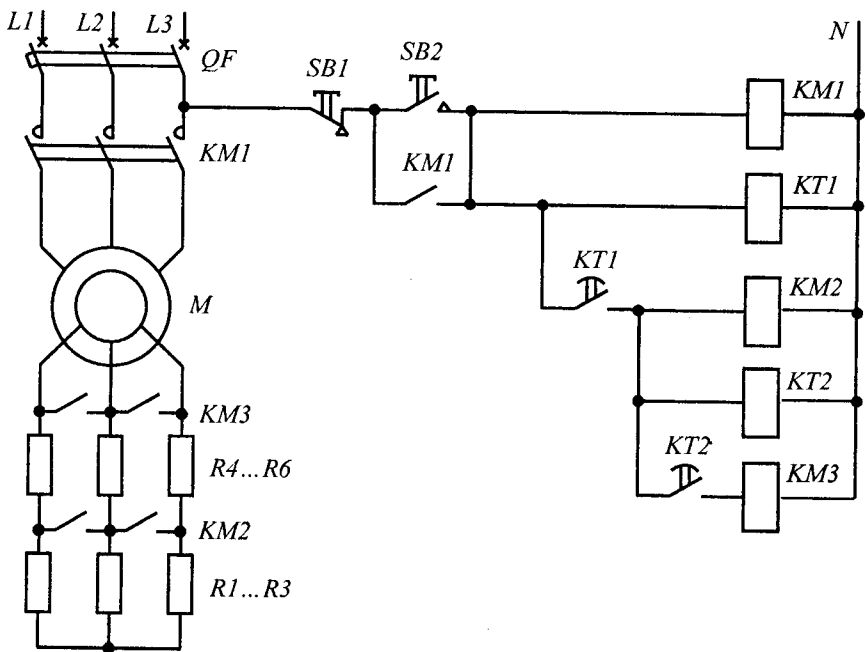


Рис. 9.13. Принципіальна електрична схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу

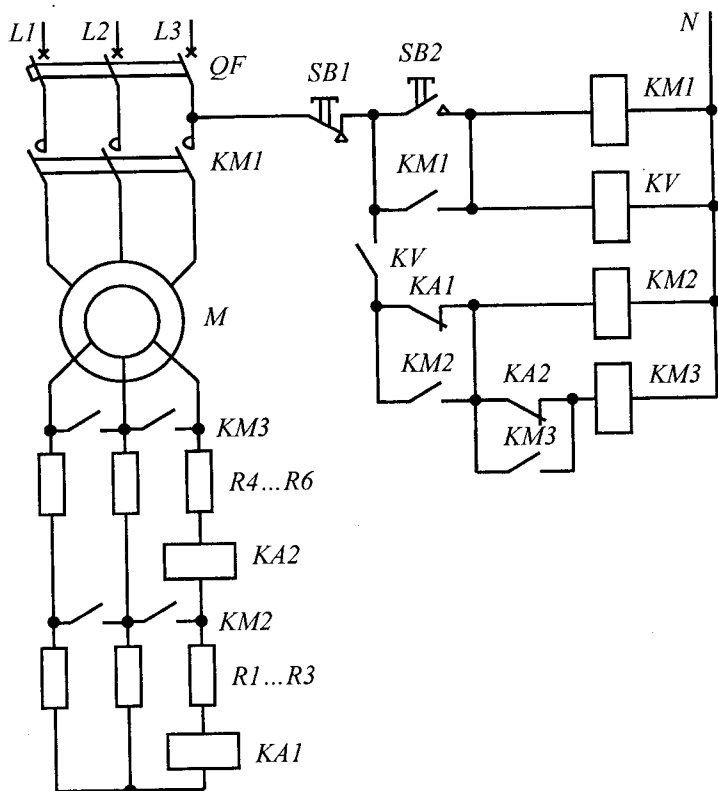


Рис. 9.14. Принципіальна електрична схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції струму

Схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції частоти струму показана на рис. 9.15. При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» спрацьовує лінійний контактор *KM1*, який вмикає обмотку статора двигуна в мережу. На початку пуску двигуна частота струму ротора висока, тому реле частоти струму *KF* не спрацьовує, і двигун розганяється при введених пускових опорах *R1...R3*. При певному значенні кутової швидкості реле *KF* спрацьовує і своїм замикаючим контактом подає напругу на котушку контактора *KM2*. Контактор *KM2* головними контактами закорочує пускові опори *R1...R3*.

Автоматичне керування багатошвидкісними двигунами забезпечує безступінчастий та ступінчастий пуск двигуна. Безступінчастий

пуск двигуна здійснюється безпосереднім вмиканням на задану швидкість за допомогою контакторів, які керуються кнопками керування. При ступінчастому пуску вмикання на другу, третю або четверту швидкість здійснюється через контрольовану реле часу затримку на першій швидкості.

У схемах керування багатошвидкісними електродвигунами для захисту кіл від коротких замикань використовують автоматичні вимикачі, для захисту від перевантажень — теплові реле. Оскільки номінальні потужності та номінальні струми двигуна при різних частотах обертання різні, тому в схемах керування багатошвидкісними двигунами для кожної швидкості встановлюються свої теплові реле. Для запобігання одночасному вмиканню апаратів, призначених для різних частот обертання, в схемах передбачена взаємна електрична блокування пускачів їх допоміжними контактами.

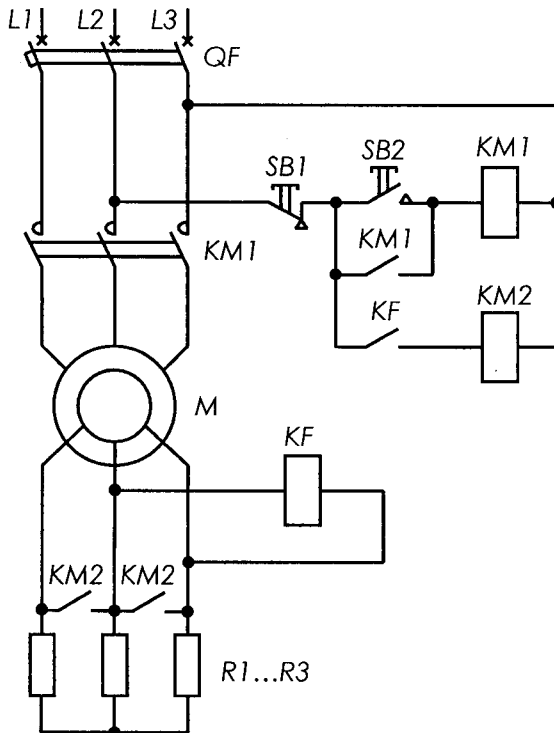


Рис. 9.15. Принципіальна електрична схема керування пуском асинхронного двигуна з фазним ротором у функції частоти струму ротора

Для керування двигунами використовують контактори або електромагнітні пускачі. Схема безступінчастого керування двошвидкісним двигуном показана на рис. 9.16. При пуску двигуна на нижчу швидкість натискають на кнопку *SB2*. При цьому отримує живлення котушка контактора *KM1*. Пускач *KM1* головними контактами вмикає двигун на першу швидкість (з'єднання обмоток у «зірку»), замикаючи допоміжним контактом шунтує кнопку *SB1* і розмикає контакт у колі котушки контактора *KM2*. Для вимикання двигуна натискають на кнопку *SB1* «Стоп». Пуск на вищу швидкість здійснюється натисканням кнопки *SB3*. При цьому спрацьовує контактор *KM2*, який з'єднує обмотки статора у «подвійну зірку». Захист силових кіл від коротких замикань здійснює автоматичний вимикач *QF1*, кіл керування — *QF2*. При перевантаженні спрацьовують теплові реле *KK1* або *KK2*, які вимикають двигун.

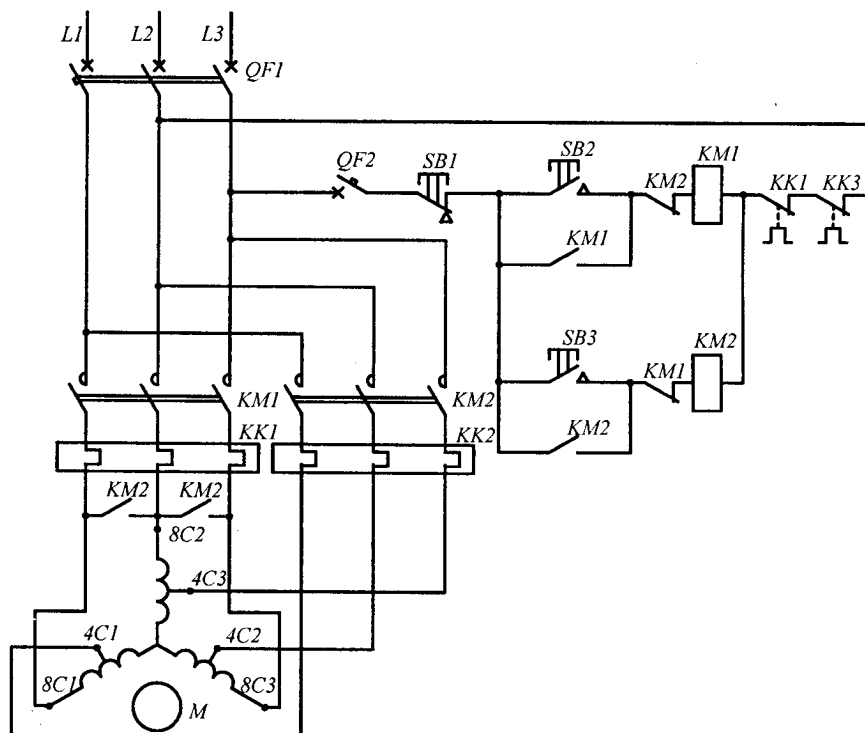


Рис. 9.16. Схема керування двошвидкісним електродвигуном

Схемою безступінчастого пуску тришвидкісного електродвигуна (рис. 9.17) передбачено пряме вмикання на першу, другу або третю швидкість; перемикання з першої на другу, з першої на третю, з другої на третю та з другої на першу швидкості; нульову та електричну блоківку, захист від коротких замикань автоматичними вимикачами $QF1$ та $QF2$ і від перевантажень тепловими реле $KK1$, $KK2$, $KK3$.

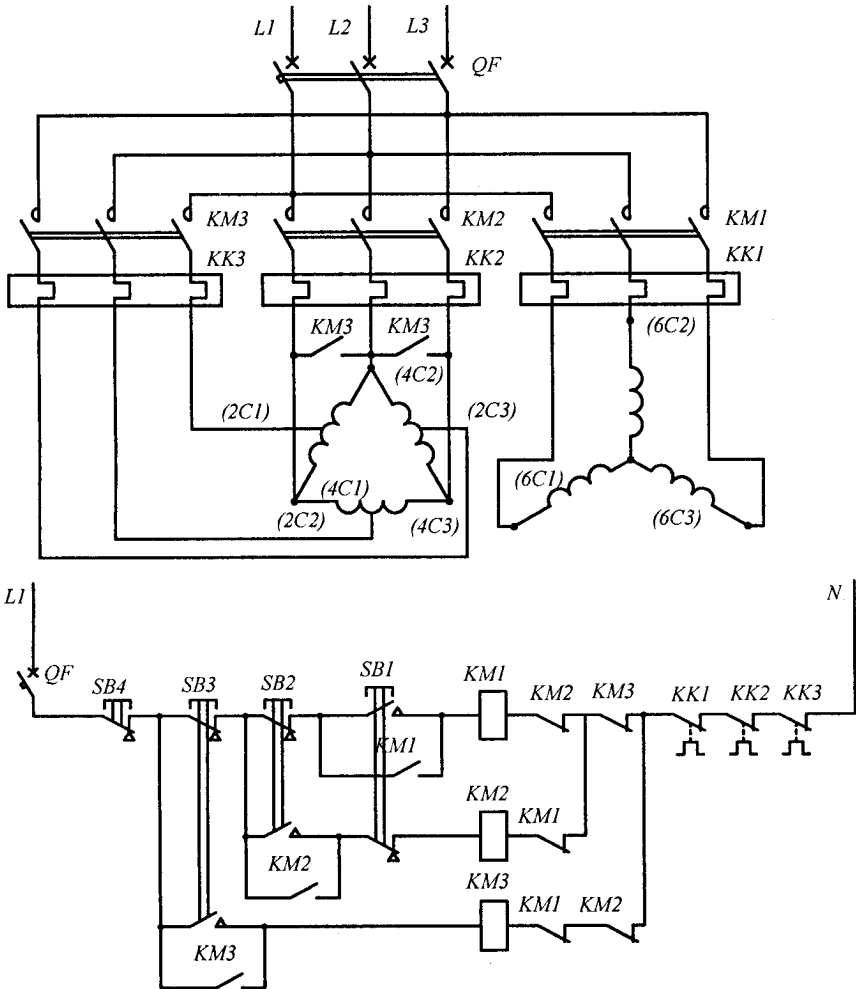


Рис. 9.17. Схема безступінчастого керування трифазним асинхронним електродвигуном

Для запуску двигуна на яку-небудь швидкість натискають кнопку *SB1* або *SB2*, або *SB3*. Спрацьовує відповідний контактор *KM1*, *KM2* або *KM3*, який головними контактами вмикає двигун у мережу, замикаючим контактом шунтує контакт кнопки, а розмикаючі контакти розмикають кола «чужих» котушок. Двигун зупиняють натисканням на кнопку *SB4* «Стоп».

Для перемикання з нижчої швидкості на вищу натискають відповідну кнопку *SB2* або *SB3*, розмикаючий контакт якої знеструмлює котушку працюючого пускача, а замикаючий замикається в колі котушки *KM2* або *KM3*. Після вимикання працюючого пускача *KM1* спрацьовує пускач *KM2* або *KM3* і двигун вмикається на потрібну швидкість. Аналогічно перемикається двигун з другої на першу швидкість.

Пуск однофазних двигунів найчастіше здійснюють у функції струму. Схема керування (рис. 9.18) передбачає автоматичне вмикання і вимикання пускової обмотки двигуна за допомогою пускового реле *KA* та захист від перевантажень тепловим реле *KK*.

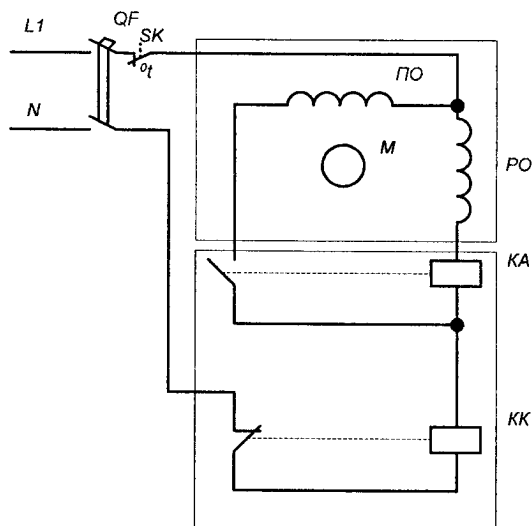


Рис. 9.18. Принципіальна схема керування однофазним двигуном

При вмиканні двигуна, наприклад, температурним реле *SK*, через робочу обмотку *PO* двигуна *M* проходить пусковий струм, спрацьовує пускове реле *KA*, замикаючим контактом якого вмикається пус-

кова обмотка *ПО*. Двигун запускається. Коли струм в робочій обмотці знизиться до номінального значення, реле *КА* розмикає контакт і пускова обмотка вимикається. При перевантаженні двигуна теплове реле *КК* вимикає робочу обмотку. Після охолодження біметалевої пластинки контакт *КК* автоматично замикається.

Для синхронних двигунів застосовують асинхронний пуск прямим способом або при зниженій напрузі через резистори, реактори чи трансформатори з наступним перемиканням при підсинхронній швидкості на повну напругу.

Особливістю пуску синхронного двигуна є керування подачею в його обмотку збудження постійного струму від збудника — тиристорного перетворювача або генератора постійного струму.

Застосовують прямий пуск при постійно увімкненому збуднику (при моменті статичних опорів $M_c \leq 0,4 M_n$) або при вмиканні збудника при підсинхронній швидкості (при $M_c > 0,4 M_n$). Якщо пуск двигуна здійснюють при зниженій напрузі, то розрізняють «легкий» пуск, при якому збудження подається до вмикання статора на повну напругу (при невеликому M_c), та «важкий» пуск, при якому подача збудження здійснюється при повній напрузі на статорі (при значному M_c). Реакторний та трансформаторний пуск здійснюють для двигунів високої напруги (понад 1000 В), а пуск з резисторами — для двигунів низької напруги потужністю до 400 Вт.

При легкому пуску з наглухо під'єднаним збудником контактор вмикає обмотку статора у мережу. Коли збільшується кутова швидкість, зростає струм збудження двигуна, який при підсинхронній швидкості стає достатнім для втягування двигуна у синхронізм.

При важких умовах пуску обмотка збудження під'єднується до збудника контактором із заціпкою при підсинхронній швидкості. До цього вона або замикається на розрядний опір, або з'єднується із збудником через послідовний опір.

Керування подачею збудження найчастіше здійснюють у функції струму статора (рис. 9.19).

Реле струму *КА* отримує живлення від трансформатора струму *ТА*, увімкненого у коло статора. При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» спрацьовує контактор *КМ1* і реле струму *КА*. Реле *КА* замикає контакт у колі проміжного реле *КВ1* і розмикає контакт у колі котушки контактора *КМ2*. Реле *КВ1* спрацьовує і готує до вмикання коло котушки контактора *КМ2*. Коли ротор досягне підсинхронної швидкості, струм статора знизиться, реле *КА* відпустить свій якір і увімкне контактор *КМ2*. Його контакт закорочує розрядний опір R_p ,

і котушку реле струму KA . Струм в обмотці збудження $O3M$ зростає і двигун втягується в синхронізм.

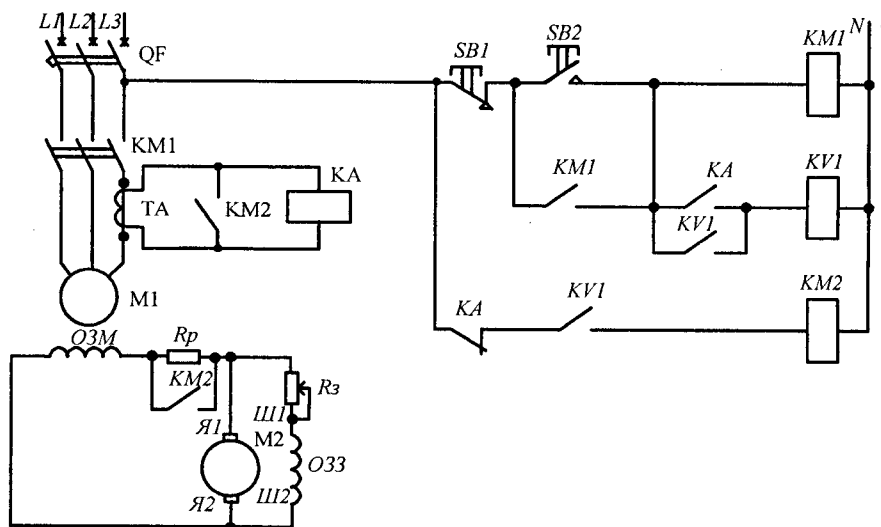


Рис. 9.19. Вузол схеми керування подачею збудження синхронного двигуна

Для гальмування противмиканням необхідно під час обертання ротора змінити послідовність фаз живлення на статорі двигуна. При цьому зміниться напрямок обертального моменту двигуна і він загальмовуватиметься. При швидкості ротора, близькій до нуля, необхідно вимкнути статор із мережі за допомогою реле контролю швидкості, інакше двигун почне обертатися у зворотному напрямку.

Пуск і автоматичне керування гальмуванням противмиканням асинхронного двигуна здійснюється за схемою (рис. 9.20), в якій використовуються два контактори — лінійний $KM1$ і гальмівний $KM2$, проміжне реле KV , реле контролю швидкості BR , кнопки $SB2$ «Пуск» і $SB1$ «Стоп».

Для пуску двигуна натискають на кнопку $SB2$ «Пуск». При цьому спрацьовує лінійний контактор $KM1$ і вмикає двигун у мережу. Один замикаючий допоміжний контакт контактора $KM1$ шунтує кнопку «Пуск», а інший готує коло котушки реле KV . При досягненні валом двигуна деякої швидкості контакт реле BR замикається, і реле KV спрацьовує. При цьому один його замикаючий контакт шу-

нтує контакт $KM1$ у колі котушки реле KV , а інший також замикається і готує коло живлення котушки гальмівного контактора $KM2$. При роботі двигуна котушка контактора $KM2$ не може одержати живлення, тому що розмикаючий контакт $KM1$ у колі котушки $KM2$ розімкнений.

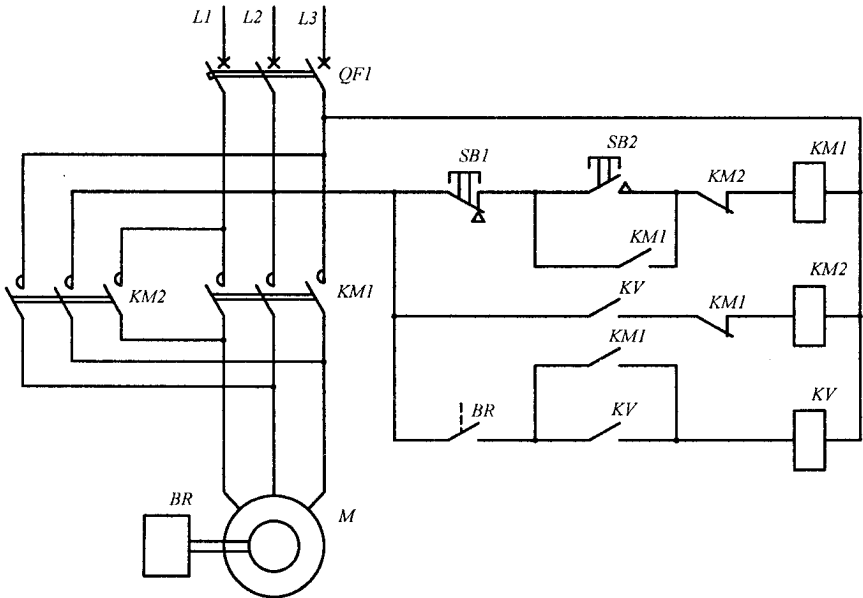


Рис. 9.20. Схема керування асинхронним електродвигуном з автоматичним гальмуванням притивмиканням

При натисканні на кнопку $SB1$ «Стоп» контактор $KM1$ вимикається, його розмикаючий допоміжний контакт у колі котушки контактора $KM2$ замикається, контактор $KM2$ спрацьовує і вмикає двигун у мережу зі зворотним чергуванням фаз. Двигун загальмовується, і при швидкості ротора, близькій до нуля, реле KV розмикає свій контакт, реле KV знеструмлюється і вимикає контактор $KM2$. На цьому гальмування завершується. Схемою передбачені також нульова блокування та електрична блокування від одночасного вмикання контакторів $KM1$ та $KM2$.

Гальмування притивмиканням виходить різким, що для деяких приводів недопустимо. При динамічному гальмуванні зі збудженням статора постійним струмом гальмівний момент нарощується

плавно, максимальний гальмівний момент має місце при низькій швидкості (3 — 30 % номінальної).

Для здійснення динамічного гальмування асинхронного двигуна потрібно двигун вимкнути з мережі змінного струму і подати на статор знижену напругу постійного струму ($U < 0,1 U_H$). Добрі гальмівні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором одержують при подачі в обмотку статора постійного струму, який у 3 — 4 рази перевищує струм холостого ходу двигуна. Постійний струм подають від наявної мережі постійного струму без витримки часу після вимикання двигуна або від випрямляча з витримкою часу, достатньою для затухання магнітного потоку статора. Після закінчення гальмування живлення обмотки статора постійним струмом повинно бути вимкненим.

Пуск і динамічне гальмування асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором здійснюється за схемою, зображеною на рис. 9.21. У ній використовуються два контактори — лінійний *KM1* і гальмівний *KM2*. Керування двигуном здійснює перемикач *SA*, а нульову блокування — реле *KV*. Для автоматичного керування процесом гальмування використовуються два електромагнітних реле часу *KT1* і *KT2*. Постійний струм на статор подається від випрямляча *UZ*, що живиться від знижувального трансформатора *TV*.

Для пуску двигуна подають напругу на схему і ставлять перемикач *SA* в нульове положення. При цьому одержує живлення котушка реле *KV*, реле спрацьовує, один його замикаючий контакт шунтує контакти перемикача *SA*, а другий — вмикає трансформатор *TV*. Розмикаючий допоміжний контакт *KM1* у колі котушки контактора *KM2* розмикається, а замикаючий у колі котушки реле *KT1* замикається, реле *KT1* спрацьовує і своїм замикаючим контактом вмикає реле *KT2*. Реле *KT1* і *KT2* своїми контактами готують коло котушки контактора *KM2* до гальмування. У такому стані схема знаходиться при роботі двигуна.

Для зупинки двигуна перемикач *SA* потрібно повернути в нульове положення. При цьому розмикається коло котушки контактора *KM1*, і статор двигуна вимикається з мережі. Також розмикається коло живлення котушки реле *KT1*. Розмикаючий контакт *KM1* у колі котушки контактора *KM2* замикається. Залишившись без живлення, реле *KT1* з витримкою 1 — 1,5 с (достатньою для затухання магнітного потоку двигуна) відпускає свій якір, і через його замкнений розмикаючий контакт подається живлення на котушку контактора *KM2*. Контактор *KM2* спрацьовує і подає постійний струм від випрямляча на статора двигуна. Ротор двигуна швидко загальмовується.

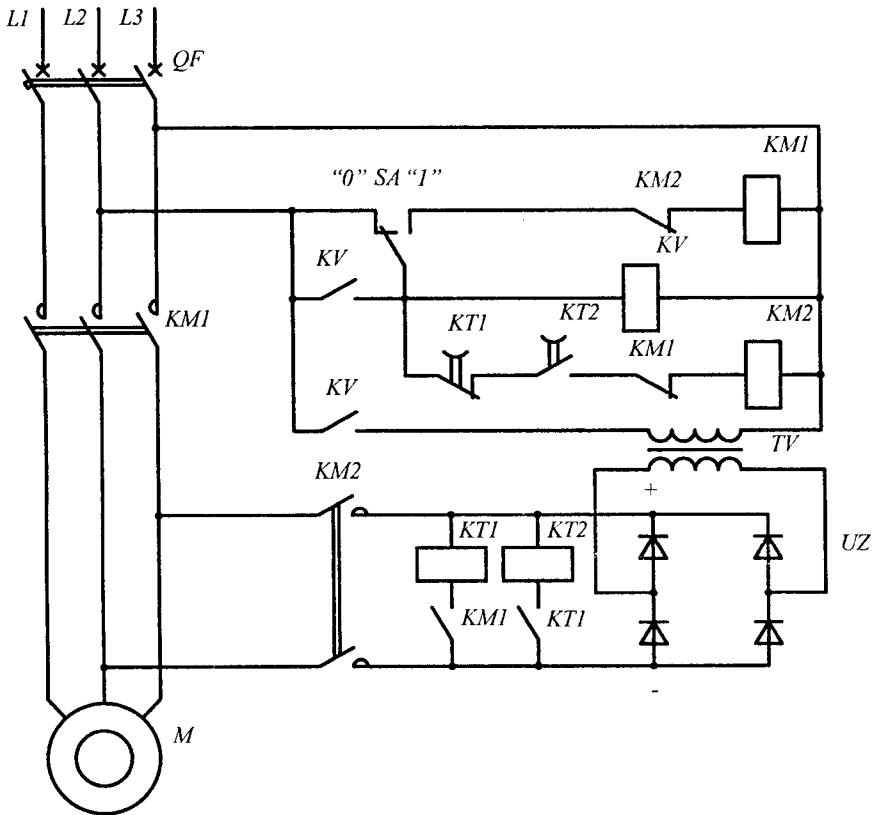


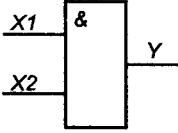
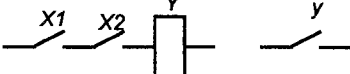
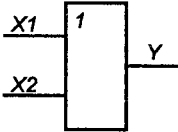
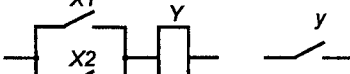
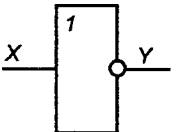
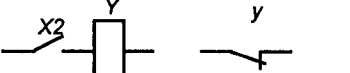
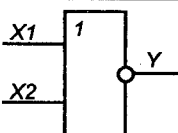
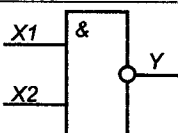
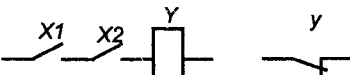
Рис. 9.21. Схема пуску та динамічного гальмування трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

Одночасно з цим реле $KT1$ своїм замикаючим контактом, що розмикається, знеструмлює котушку реле $KT2$. Якір відпадає з витримкою, достатньою для повного гальмування двигуна (2 — 3 с). При цьому замикаючий контакт реле $KT2$ розмикається і контактор $KM2$ вимикається, припиняючи живлення статора двигуна постійним струмом.

Для підвищення надійності роботи схеми автоматичного керування виконують на безконтактних логічних елементах. Найпростіші з них виконують логічні функції «І», «АБО», «НІ». Багатофункціональні елементи виконують функції «І-НІ», «АБО-НІ». Логічну функцію «Пам'ять» виконує тригер. Основні логічні елементи та їх релейно-контактні еквіваленти наведені в табл. 9.1.

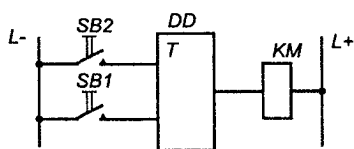
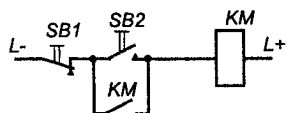
Таблиця 9.1

ПОЗНАЧЕННЯ НАЙПРОСТІШИХ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

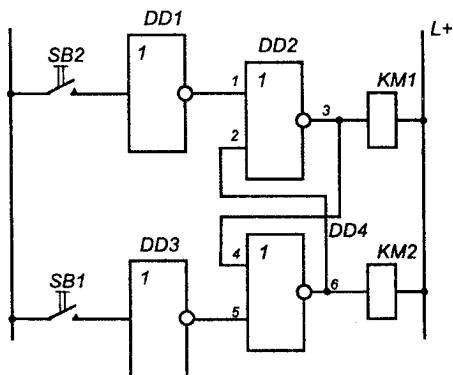
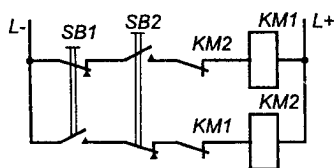
Логічна функція	Умове позначення	Релейно-контактний еквівалент
I		
АБО		
НІ		
АБО-НІ		
I-НІ		

Схеми керування з контактними апаратами можна замінити на схеми керування з безконтактними. На рис. 9.22 зображені типові вузли схем з безконтактними логічними елементами, які використовуються в складніших схемах автоматичного керування.

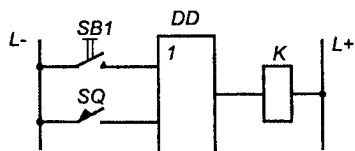
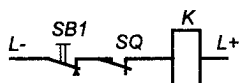
Схема нереверсивного керування двигуном (рис. 9.22, а) реалізується за допомогою тригера. При натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» на виході тригера *DD* з'являється сигнал «1», який зберігається і після відпускання кнопки. При натисканні на кнопку *SB1* «Стоп» тригер перемикається, на його виході з'являється сигнал «0», який зберігається і після відпускання кнопки.



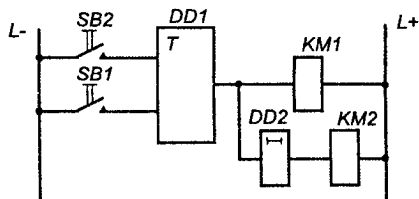
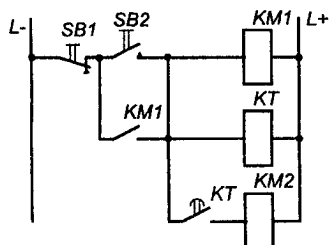
a)



б)



в)



г)

Рис. 9.22. Вузли схем з логічними елементами

За схемами на рис. 9.22, б) здійснюють вмикання контакторів *KM1* і *KM2* після натискання на відповідну кнопку *SB2* «Вперед» або *SB1* «Назад» і блокування, яка запобігає одночасному вмиканню обох контакторів. В схемі з логічними елементами: якщо натиснута кнопка *SB2* «Вперед» і увімкнений контактор *KM1*, то при натисканні на кнопку *SB1* «Назад» і появи на вході 5 елемента DD4 сигналу «0», на виході цього елемента залишається сигнал «0», бо на вхід 4 поданий сигнал «1» з виходу DD2.

За схемами на рис. 9.22, в) реле *K* вимикається після натискання на кнопку *SB1* «Стоп» або при спрацюванні кінцевого вимикача *SQ*. При цьому на входах логічного елемента DD з'являється сигнал «1», і реле *K* вимикається.

За схемами на рис. 9.22, г) при натисканні на кнопку *SB2* «Пуск» спрацьовує контактор *KM1*, а з витримкою часу — контактор *KM2*. В схемі з логічними елементами при натисканні на кнопку *SB2* на виході тригера *DD1* з'являється сигнал «1», який поступає на котушку контактора *KM1* і через елемент затримки часу DD2 — на котушку контактора *KM2*.

Розглянуті схеми реалізуються на інтегральних мікросхемах або безконтактних логічних елементах, які мають підсилювачі, узгоджувальні елементи, функціональні блоки, елементи затримки часу тощо.

9.5. Типові схеми керування двигунами постійного струму

Схеми пуску двигунів постійного струму передбачають прямий пуск двигунів невеликої потужності (до 0,75 кВт), реостатний пуск або від перетворювачів напруги. При реостатному пуску двигуна необхідно ступінчасто виводити пускові опори, увімкнені в коло якоря, яке може здійснюватися у функції часу, ЕРС або струму (рис. 9.23).

Схема автоматичного пуску двигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу показана на рис. 9.24. При вмиканні автоматичного вимикача *QF* отримує живлення обмотка збудження двигуна. Натисканням на кнопку *SB2* «Пуск» одержують живлення котушки контактора *KM1* і реле часу *KT1*. Контактор головними контактами вмикає обмотку якоря двигуна в мережу, а допоміжним замикаючим контактом шунтує кнопку *SB2*. Двигун розганяється при увімкнених у коло якоря пускових резисторах *R1* і *R2*. Через заданий проміжок часу реле *KT1* своїм замикаючим

контактом подає напругу на котушки контактора $KM2$ і реле часу $KT2$. Контактор $KM2$ спрацьовує і головним контактом закорочує пусковий опір $R1$. Двигун продовжується розганятися при зменшеному опорі кола якоря. По закінченні витримки часу реле часу $KT2$ замикає свій контакт у колі котушки контактора $KM3$, який спрацьовує і своїм контактом закорочує пусковий опір $R2$. Далі двигун розганяється на природній характеристиці при закороченому пусковому реостаті.

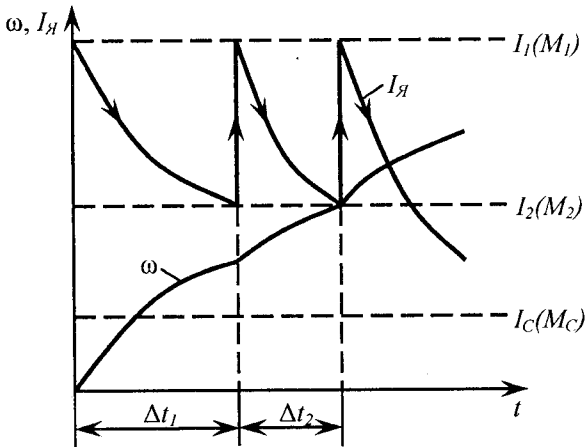


Рис. 9.23. Зміна струму і кутової швидкості в часі при пуску двигуна

Схема автоматичного пуску двигуна постійного струму паралельного збудження у функції ЕРС показана на рис. 9.25. При вмиканні автоматичного вимикача QF отримує живлення обмотка збудження двигуна. Натисканням на кнопку $SB2$ «Пуск» спрацьовує лінійний контактор $KM1$, який своїми головними контактами вмикає обмотку якоря двигуна в мережу при введених опорах $R1$ і $R2$. В момент пуску двигуна напруга на котушках реле напруги $KV1$ і $KV2$ мала, тому вони не спрацьовують. Із збільшенням швидкості двигуна зростає ЕРС якоря. При певному її значенні спрацьовує реле $KV1$ і контактор $KM2$, який закорочує пусковий опір $R1$. При подальшому зростанні кутової швидкості спрацьовує реле $KV2$ і контактор $KM3$, який закорочує пусковий опір $R2$, і двигун переходить на природну механічну характеристику. Реле $KV1$ і $KV2$ налагоджують на різні напруги спрацювання, які визначаються сумою ЕРС двигуна і спаду напруги на обмотці якоря.

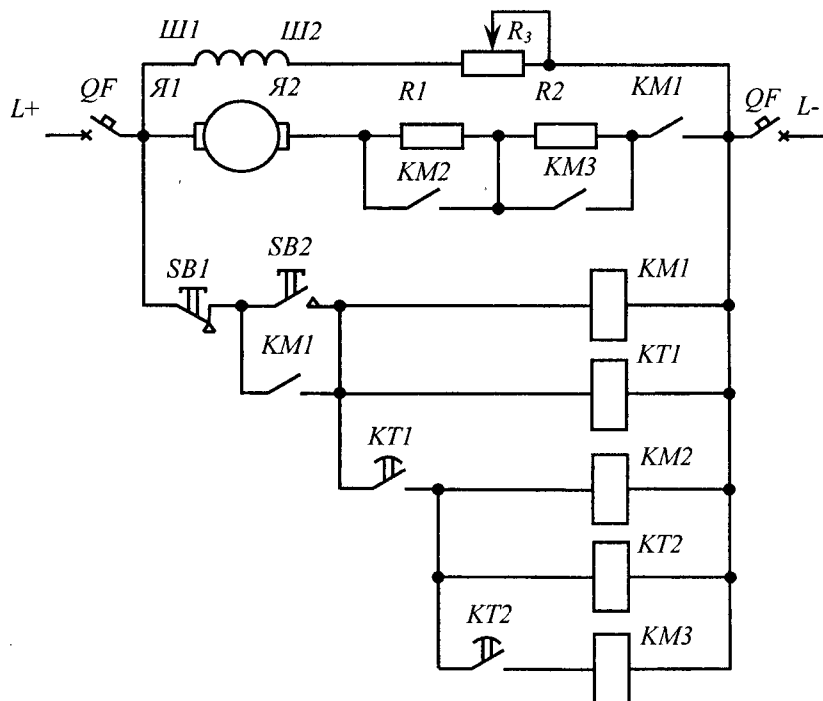


Рис. 9.24. Принципіальна електрична схема керування пуском двигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу

Схема керування пуском двигуна постійного струму паралельного збудження у функції струму показана на рис. 9.26. При вмиканні автоматичного вимикача QF отримує живлення обмотка збудження двигуна. При натисканні на кнопку $SB2$ «Пуск» спрацьовує контактор $KM1$ і блокувальне реле KV . Контактор головним контактом вмикає обмотку якоря двигуна в мережу, а допоміжним замикаючим контактом шунтує кнопку $SB2$. При пуску двигуна через обмотку якоря проходить великий пусковий струм, тому реле струму $KA1$ і $KA2$, котушки яких увімкнені у це коло, спрацьовують і розмикають свої контакти у колі котушок контакторів $KM2$ і $KM3$. Блокувальне реле KV створює витримку часу, достатню для спрацювання реле струму $KA1$ і $KA2$. Тому контактори $KM2$ і $KM3$ не спрацьовують, і двигун розганяється при увімкнених у коло якоря пускових опорах $R1$ і $R2$. При зростанні кутової швидкості двигуна струм падає, і при певних його значеннях реле $KA1$ і $KA2$ по черзі

повертаються у вихідне положення, вмикаючи своїми розмикаючими контактами котушки контакторів $KM2$ і $KM3$. При цьому спочатку спрацьовує контактор $KM2$ і своїми контактами закорочує опір $R1$, а потім, через деякий час, спрацьовує контактор $KM3$ і закорочує опір $R2$ пускового реостата.

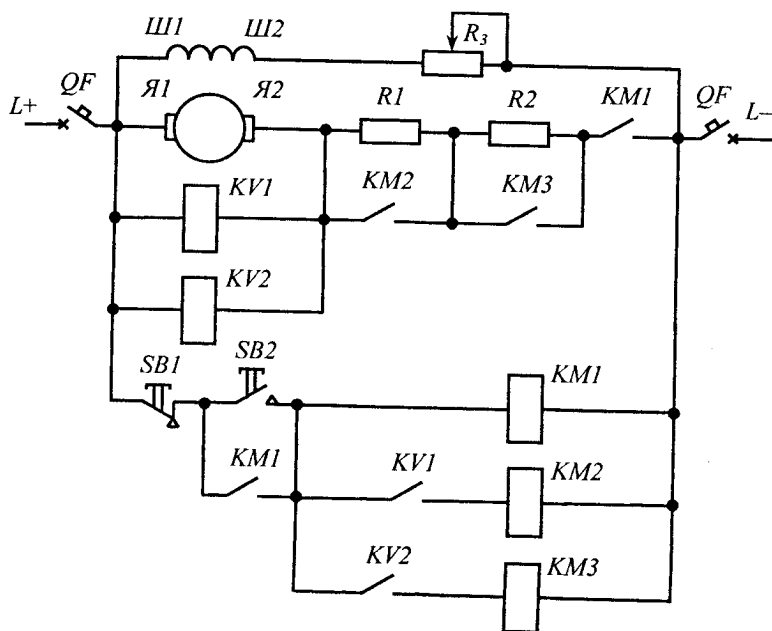


Рис. 9.25. Принципіальна електрична схема керування пуском двигуна постійного струму паралельного збудження у функції ЕРС

Гальмування двигунів постійного струму також може відбуватися у функції часу, ЕРС, струму.

Схема динамічного гальмування двигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу показана на рис. 9.27. Схема керування пуском двигуна не показана. Коли двигун працює при усталеній швидкості, увімкнені контактор $KM1$, реле часу KT , і замкнений його контакт у колі котушки контактора $KM2$, але котушка контактора $KM2$ знеструмлена розмикаючим контактом контактора $KM1$. При натисканні на кнопку $SB1$ «Стоп» вимикається контактор $KM1$, який вимикає обмотку якоря з мережі. Його замикаючий допоміжний контакт розмикає коло котушки реле часу KT , яке починає

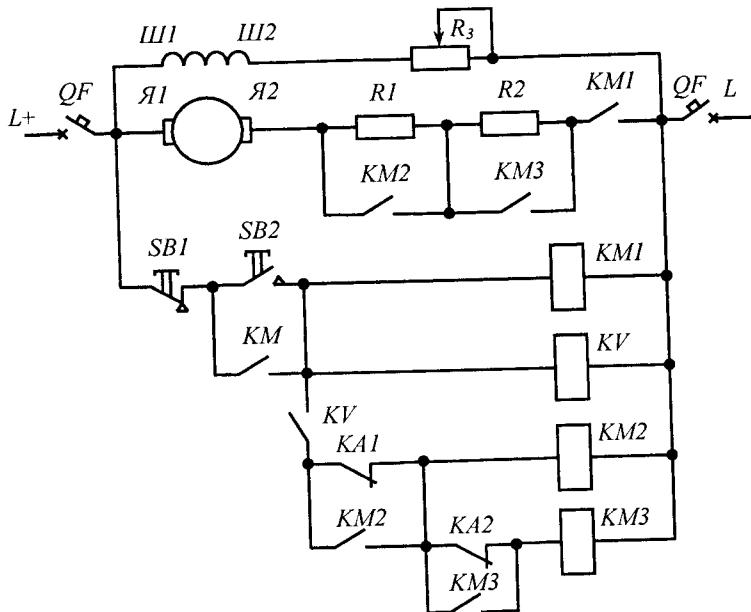


Рис. 9.26. Принципіальна електрична схема керування пуском двигуна постійного струму паралельного збудження у функції струму

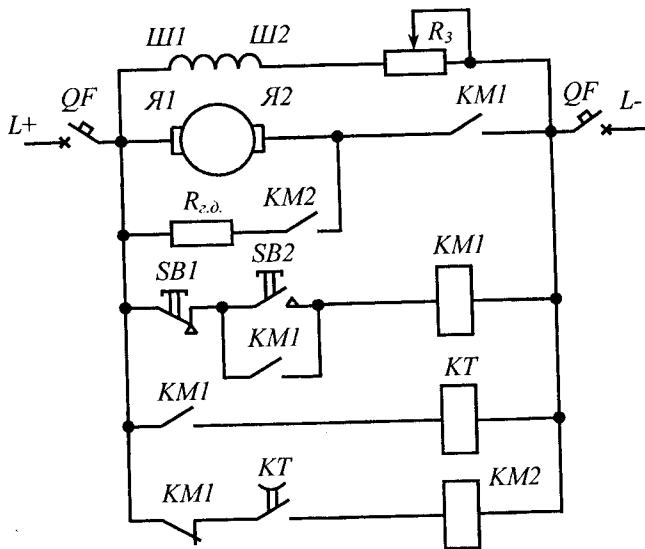


Рис. 9.27. Принципіальна електрична схема динамічним гальмуванням двигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу

відлік часу гальмування. Розмикаючий допоміжний контакт $KM1$ повертається у вихідне положення, спрацьовує контактор $KM2$ і своїм контактом замикає обмотку якоря на гальмівний опір $R_{г.д.}$. Двигун загальмовується динамічним гальмуванням. Після закінчення витримки часу реле KT вимикає контактор $KM2$.

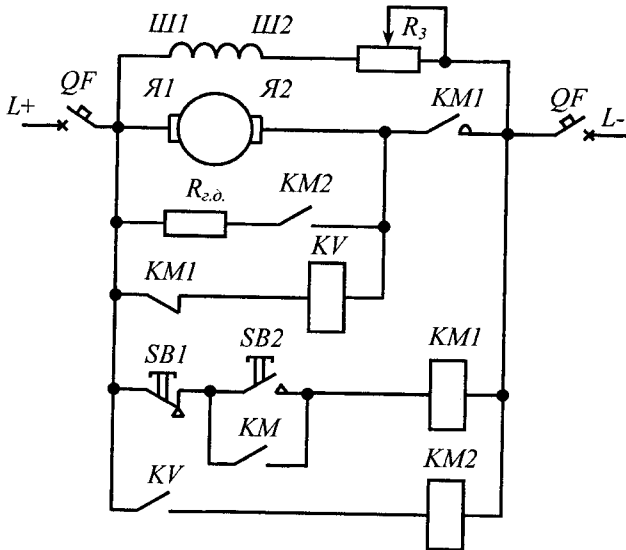


Рис. 9.28. Принципіальна електрична схема динамічного гальмування двигуна постійного струму паралельного збудження у функції ЕРС

На схемі динамічного гальмування двигуна постійного струму паралельного збудження у функції ЕРС (рис. 9.28) пуск двигуна не показаний.

При натисканні на кнопку $SB1$ «Стоп» вимикається контактор $KM1$, який вимикає обмотку якоря з мережі. Розмикаючий контакт контактора $KM1$ повертається у вихідне положення і вмикає реле напруги KV , яке контролює ЕРС двигуна. Контакт KV вмикає контактор $KM2$, і відбувається динамічне гальмування двигуна. Коли швидкість двигуна стане малою, реле KV відпускає свій якор і вимикає контактор $KM2$. Застосовуване реле KV повинно мати невеликий коефіцієнт повернення ($K_{пов} = 0,1 - 0,15$).

9.6. Типові структури замкнених систем автоматичного керування електроприводами

Застосування зворотних зв'язків у системі перетворювач — двигун (П — Д) дає можливість отримати не лише жорсткі механічні характеристики двигуна, а і забезпечити бажану якість перехідних процесів при пуску, гальмуванні та реверсуванні двигунів.

Найчастіше в системах П — Д до процесів пуску і гальмування ставлять вимоги отримання мінімального часу перехідного процесу. Дана вимога забезпечується тоді, коли момент двигуна підтримується на більшій частині перехідного процесу приблизно постійним, близьким до максимального, а на початку та у кінці перехідного процесу зростання і спадання моменту відбувається плавно, але досить швидко.

Для цього в системах П — Д застосовуються: від'ємний зворотний зв'язок по струму з відсічкою при неперервному від'ємному зворотному зв'язку по швидкості; від'ємний зворотний зв'язок по струму з відсічкою і швидкості (напрузі перетворювача) з відсічкою; гнучкими зворотними зв'язками; задатчиками інтенсивності.

Найчастіше застосовують задатчик інтенсивності (рис. 9.29), напруга на виході якого змінюється у часі за лінійним законом. При цьому за лінійним законом змінюється швидкість ідеального холостого ходу двигуна, а його механічна характеристика представлена на рис. 3.20.

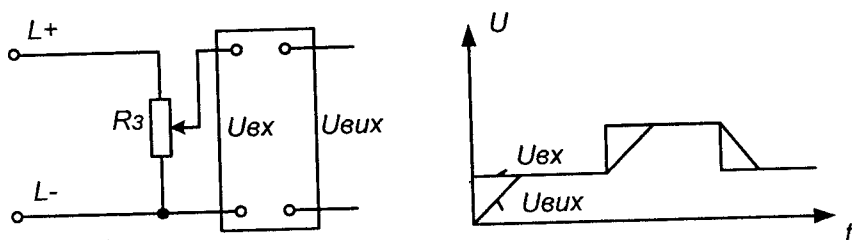


Рис. 9.29. Задатчик інтенсивності

На рис. 9.30 наведена схема системи ТПН — Д з підлеглим регулюванням та послідовною корекцією. Обмотка якоря двигуна отримує живлення від реверсивного тиристорного перетворювача ТП. За допомогою тахогенератора ТГ здійснюється від'ємний зворотний

зв'язок по швидкості. Задаючий сигнал системи $U_{з.риш}$, який поступає від безконтактного командоконтролера БКК, порівнюється із сигналом зворотного зв'язку по швидкості $U_{з.шв}$. Результуючий сигнал подається на вхід П-регулятора швидкості РШ, на виході якого формується сигнал, пропорційний вхідному.

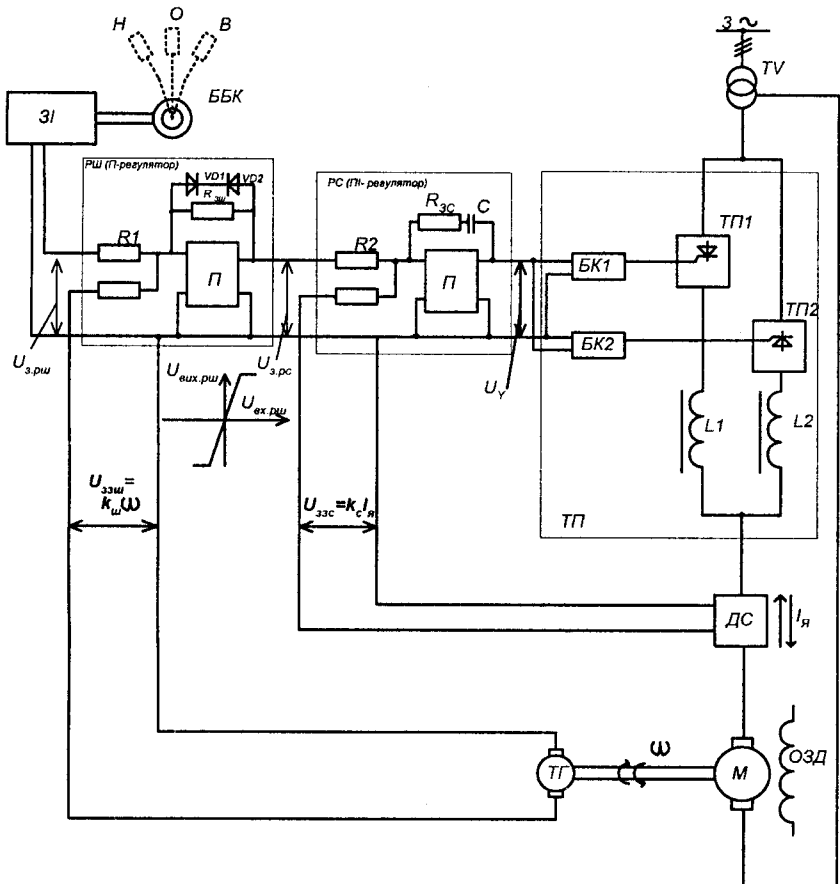


Рис. 9.30. Принципіальна схема системи ТПН-Д з підлеглим регулюванням

В схемі також сформований внутрішній замкнений контур регулювання струму якоря двигуна. Для цього сигнал $U_{з.с}$, пропорційний струму якоря, від датчика струму подається на вхід ПІ-регулятора

струму РС, де порівнюється із вихідним сигналом регулятора швидкості, який є задаючим сигналом для регулятора струму. На виході регулятора струму формується сигнал керування тиристорним перетворювачем. Для обмеження струму якоря регулятор струму РС виконується з «насиченням», тобто з відповідним обмеженням його вихідного сигналу.

Для пуску двигуна командоконтролер БКК із нейтрального положення переводять у положення «Вперед». Оскільки при пуску двигуна величина сигналу розбалансу велика, то регулятор швидкості входить у зону насичення. Контур регулювання швидкості зачинається, а вступає в дію контур регулювання струму. Двигун розганяється при практично постійному струмі якоря. По мірі розгону двигуна зростає сигнал від тахогенератора. При швидкості, близькій до заданої, регулятор швидкості виходить із зони «насичення» і вступає в дію зворотний зв'язок по швидкості. Двигун переходить працювати в усталений режим роботи при постійній швидкості і струмі, які відповідають моменту статичних опорів на валу двигуна на M_c .

Для реверсування двигуна командоконтролер ставлять у положення «Назад». При цьому змінюється полярність задаючого сигналу, і регулятор швидкості входить у зону «насичення». Перетворювач почне працювати в інверторному режимі, а струм якоря, змінивши напрям, стане гальмівним і завдяки регулятору струму буде підтримуватися на рівні стопоріння $I_{\text{ст}}$. Відбувається рекуперативне гальмування двигуна і подальший його розгін в іншу сторону. При установці командоконтролера в нульове положення відбувається рекуперативне гальмування двигуна до його зупинки.

В усталеному режимі роботи сигнал на вході регулятора струму відсутній, а на його виході існує (він накопичений при розгоні двигуна за рахунок інтегруючої дії регулятора) і забезпечує ЕРС перетворювача, необхідну для роботи двигуна з усталеною швидкістю при струмі навантаження I_c .

Рівняння механічної характеристики двигуна на ділянці роботи регулятора швидкості знаходять із умови:

$$U_{\text{зс}} = k_c I_{\text{Я}} = U_{\text{зрс}} = (U_{\text{зрш}} - k_{\text{ш}} \omega_{\text{ш}}) k_{\text{рш}}, \quad (9.1)$$

де k_c — коефіцієнт зворотного зв'язку по струму; $k_{\text{ш}}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості; $k_{\text{рш}}$ — коефіцієнт передачі регулятора швидкості.

Тоді

$$\omega = \frac{U_{зри}}{k_{ш}} - I_{я} \frac{k_c}{k_{ш} k_{при}}. \quad (9.2)$$

Жорсткість механічної характеристики на даній ділянці визначається співвідношенням параметрів k_c , $k_{ш}$, $k_{при}$ і може бути достатньо високою. На ділянці роботи регулятора струму, як зазначалося раніше, $I_{я} = I_{яст}$. Механічна характеристика електродвигуна показана на рис. 9.31.

Регулятор струму значно компенсує електромагнітну сталу часу, а регулятор швидкості — електромеханічну.

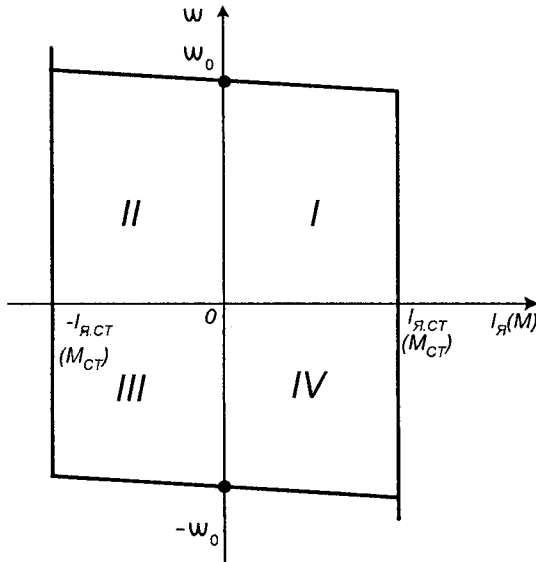


Рис. 9.31. Статичні характеристики в системі ТПН-Д з підлеглим регулюванням

Для обмеження струму якоря зону «насичення» регулятора швидкості формують шляхом шунтування кола зворотного зв'язку стабілітронами (рис. 9.30). У більшості систем з підпорядкованим регулюванням також застосовують задатчик інтенсивності $3I$, який вмикається між командоконтролером і входом регулятора швидкості. Він забезпечує лінійну у часі зміну задаючого сигналу регулятора швидкості.

В замкнених системах керування електроприводами все частіше застосовуються мікроконтролери та мікро-ЕОМ. Мікро-ЕОМ виконує функції регулятора координат електропривода, керуючи тиристорними перетворювачами напруги у колі якоря і збудження, забезпечує захист двигуна при аварійних режимах, контроль і індикацію стану запобіжників і блокіровок у колах електропривода.

Функціональна схема типового електропривода з мікропроцесорною системою керування показана на рис. 9.32. Силова частина привода складається із реверсивного тиристорного перетворювача $VS1...VS4$ та тиристорного збудника $T3$, від якого отримує живлення обмотка збудження.

Напруги з шунтів $ШН1$ і $ШН2$ у колі якоря та збудження, тахогенератора $ТГ$ і задатчика швидкості перетворюються в частоту слідування прямокутних імпульсів $ПНЧ$. За допомогою оптронної пари здійснюється гальванічна розв'язка. Обробка сигналів з перетворювачів $ПНЧ$ здійснюється у лічильнику імпульсів $ЛІ$. Для синхронізації процесів вимірювань і обчислень система обладнана датчиком синхронізації $ДС$. Блок керування тиристорами $БКТ$ через підсилювач потужності $ПП$ забезпечує відкривання відповідного тиристора.

Пристрій введення сигналів $ВВ$ забезпечує введення 64 біт інформації групами з восьми сигналів із захисних апаратів (запобіжників FU , реле мінімальної напруги $РМН$, реле зниженого тиску оливи у підшипниках двигуна $РТМ$, реле підвищеної температури підшипників двигуна $РТП$), із сигнальних контактів комутаційних апаратів (автоматичних вимикачів силової мережі змінного струму $QF1$, у колі захисту від перенапруги $QF2$, у силовому колі тиристорного збудника $QF3$, контакторів у колі якоря $КМП$ та динамічного гальмування $КМГ$), із блокувальних апаратів (реле $ЕРС$ $РЕ$, кінцевих вимикачів $SQ1$, $SQ2$, обмежуючих переміщення робочого органу, та $SQ3$, який фіксує початкове положення робочого органу).

Пристрій виведення даних $ВД$ видає дискретні сигнали для керування блокіровками електропривода та цифрового сигналу в послідовному коді до ЕОМ верхнього рівня або в систему керування іншими агрегатами технологічної лінії: $P0$ — дозвіл на вмикання контактора у колі якоря, $P1$ — дозвіл вмикання контактора динамічного гальмування, $P2$ — сигнал «Несправність», $P3$ — сигнал «Аварія», які передаються до схеми зовнішньої сигналізації, $P4$ — сигнал вимикання автоматичних вимикачів $QF1$ і $QF3$.

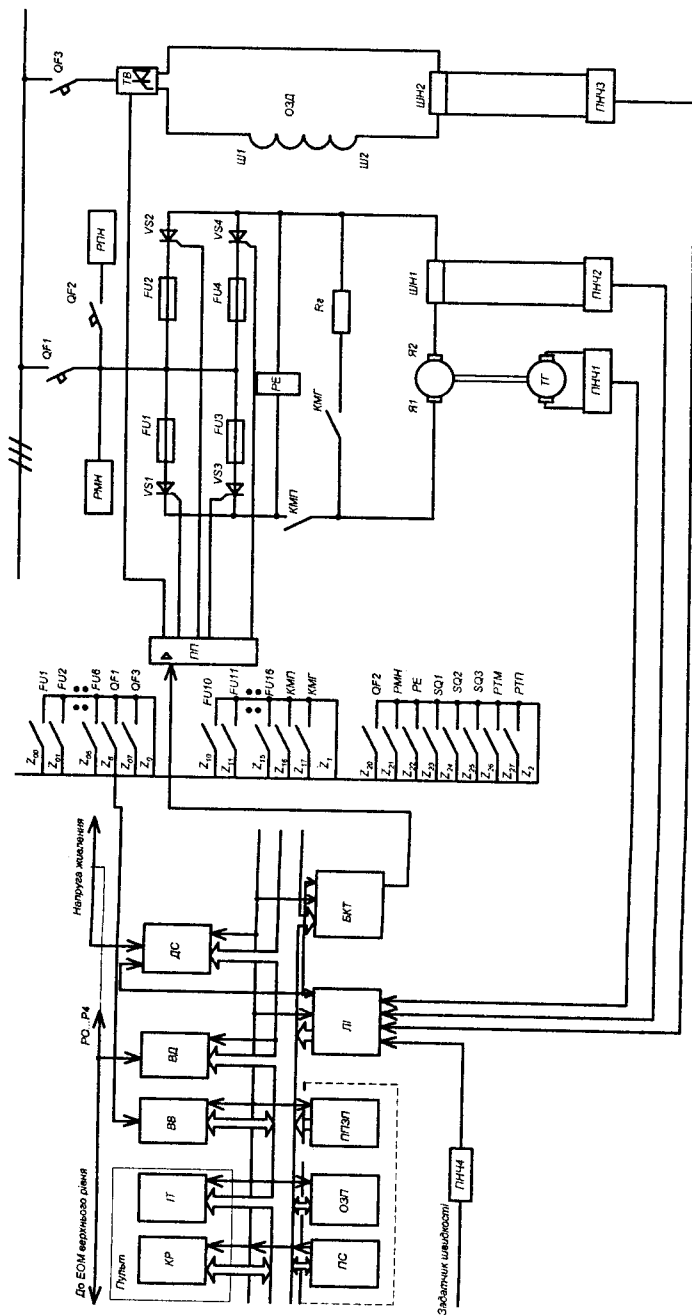


Рис. 9.32. Структурна схема мікропроцесорної системи ТЕП

Пульт керування складається із клавішного регістру *КР* та індикаційного табло *ІТ*, на якому висвічується вміст оперативного запам'ятовуючого пристрою *ОЗП*.

Передбачено можливість перепрограмування постійно запам'ятовуючого пристрою *ППЗП* при непрацюючому приводі.

9.7. Програмне керування електроприводами

Програмним називають керування електроприводом, при якому забезпечується зміна регульованої величини в часі за заздалегідь відомим законом (програмою).

Програму роботу привода задають положенням контролерів, перемикачів, блокувальними зв'язками, шляховими і кінцевими вимикачами, програмними реле часу, реле тиску, температури тощо, а в складніших випадках — моделлю або кресленням деталі, що обробляється, магнітною стрічкою, програмним забезпеченням керуючої ЕОМ.

Розрізняють системи програмного керування з жорсткою незмінною програмою, жорсткою змінною програмою та із зворотними зв'язками. В системах керування з жорсткою незмінною програмою необхідна послідовність подачі командних сигналів досягається відповідною побудовою електричної схеми керування електроприводом. В системах з жорсткою змінною програмою передбачаються спеціальні пристрої для зміни програми, наприклад, реле часу. При цьому основна електрична схема керування залишається незмінною.

Програмне керування із зворотними зв'язками реалізується слідкуючим електроприводом. В таких електроприводах програма розміщення робочого органу машини задається за допомогою різноманітних копіїв, обриси яких точно відповідають траєкторії руху робочого органу. Слідкуючий електропривод при цьому забезпечує відтворення робочим органом машини заданої траєкторії руху.

В сучасних системах програмного керування електроприводами широко застосовуються багатоканальні таймери, які дають можливість запрограмувати декілька часових програм керування виробничим механізмом для кожного каналу. Число каналів керування залежно від моделі таймера — від трьох до восьми, циклічність повторення програм — доба або тиждень.

Багатоканальний таймер складається із виконавчого та індикаційно-програмного блоків. Виконавчий блок — з електронного при-

строю, пристрою індикації, блока живлення, вихідних реле, елементів резервного живлення, роз'ємів для вмикання в мережу та об'єктів керування.

Електронний пристрій виконаний на базі мікросхеми і призначений для видачі керуючих сигналів на обмотки реле в задані моменти часу. Програмування мікросхеми та індикація її стану здійснюються за допомогою індикаційно-програмного блока.

Принцип роботи багатоканального таймера такий. У заданий момент часу на виході мікросхеми з'являється послідовний код, що відповідає номеру каналу, який вмикається. Цей сигнал проходить через елемент «І-НІ» і поступає в регістр, який перетворює послідовний код в паралельний. Даний код переписується в регістр, активним рівнем якого є напруга негативної полярності, що вмикає каскади, виконані на транзисторах. Ці каскади під'єднуються до одного із контактів обмотки реле, а на інший контакт подається напруга через перемикач, який може здійснювати вимикання виконавчого механізму.

9.8. Питання для самоконтролю

1. Які принципи автоматичного регулювання застосовуються у електроприводах?
2. Які функції виконують схеми керування електроприводами?
3. Перелічіть основні правила виконання принципіальних електричних схем і схем електричних з'єднань.
4. Які блокування застосовуються у схемах керування електроприводами?
5. Поясніть роботу типових схем керування електродвигунами постійного і змінного струму.
6. Які принципи побудови замкнених систем автоматичного керування електроприводами?
7. Поясніть принцип роботи електропривода з мікропроцесорною системою керування.
8. Які принципи побудови електроприводів з програмним керуванням?



10. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

10.1. Загальна методика вибору електроприводу

Для вибору та перевірки електропривода необхідно мати такі вихідні дані: технологічну і кінематичну схему; механічну та навантажувальну характеристику робочої машини; динамічний момент інерції та статичний момент механізму при пуску (момент зрушення); режим роботи; послідовність операцій керування електроприводом та вимоги до автоматизації; аксіальне та радіальне навантаження на виступаючий кінець вала двигуна; умови оточуючого середовища та умови експлуатації електропривода. При наявності цих даних вибір електропривода проводиться поетапно.

Електродвигун вибирають за родом струму, напругою, режимом роботи, електричною модифікацією, конструктивним виконанням і способом монтажу, ступенем захисту персоналу від доторкання до струмоведучих частин та від потрапляння всередину корпусу твердих сторонніх предметів і вологи, кліматичним виконанням і категорією розміщення, частотою обертання, потужністю.

За родом струму електроприводи вибирають відповідно до роду струму електричної мережі, від якої вони будуть отримувати живлення, та вимог робочої машини до механічної характеристики двигуна. В залежності від джерела електроенергії електроприводи можуть живитися постійним струмом (від акумуляторів та автономних генераторів), пульсуючим (від випрямлячів та перетворювачів) та змінним (від електричної мережі змінного струму). Двигуни постійного струму застосовуються тоді, коли робоча машина потребує плавного і в широких межах регулювання кутової швидкості. При ступінчастому регулюванні або незначному діапазоні регулювання застосовують асинхронні двигуни. Живлення електроприводів постійним та пульсуючим струмами в сільському господарстві застосо-

ується рідко (електрокари, електронавантажувачі, живильники комів). Основним для галузі є асинхронний двигун змінного струму.

За напругою електроприводи вибирають таким чином, щоб номінальні напруги електродвигуна та апаратів захисту і керування відповідали напрузі електромережі, в яку вони будуть вмикатися. Асинхронні двигуни серії АИР потужністю 0,025-0,37 кВт виготовляються на напруги 220 та 380 В; від 0,37 до 11 кВт — на 220, 380 та 660 В при з'єднанні обмоток статора в «зірку» або «трикутник» з трьома вивідними кінцями, або шістьма кінцями за вимогою замовника; більше 11 кВт — на напругу 380/660 В шістьма вивідними кінцями. За окремих умов двигуни виготовляють на інші напруги, передбачені стандартом 40 (36), 1120 В, а також 3, 6 та 10 кВ.

Основне виконання двигунів передбачає частоту мережі 50 Гц, для експортних поставок можливе виконання на частоту 60 Гц. Двигуни спеціальних серій можуть виготовлятися на частоти 100, 200, 400 Гц (електропривод стригальних машинок, сепараторів, центрифуг тощо).

За режимом роботи двигун вибирають відповідно до режиму роботи робочої машини, для приводу якої він призначений. В окремих випадках для короткочасного та повторно-короткочасного режиму роботи можна вибирати двигун, призначений для тривалого режиму роботи.

За електричною модифікацією асинхронний двигун вибирають залежно від моменту зрушення робочої машини, характеру навантаження двигуна і величини махових мас системи «електродвигун — робоча машина», потреби у регулюванні кутової швидкості тощо. Електрична модифікація двигунів — це деякі відмінності в робочих властивостях, які найчастіше проявляються в механічних характеристиках. Основними електричними модифікаціями двигунів є такі: двигуни з підвищеним ковзанням, підвищеним пусковим моментом, з фазним ротором, багатошвидкісні, однофазні, для короткочасного режиму роботи.

До двигунів з підвищеним ковзанням відносяться двигуни серії АИРС, які мають величину критичного ковзання до 30% (двигуни основного виконання — 10-12%). Рекомендуються ці двигуни для приводу машин з частими пусками, пульсуючим навантаженням (поршневі насоси, компресори), для машин, які працюють в повторно-короткочасному режимі (підйомники, кузнечно-пресові машини, металообробні верстати, живильники-дозатори тощо), а також для машин з великим моментом інерції. Номінальні дані цих двигунів

(потужність, струм) визначені для повторно-короткочасного режиму (S3) з тривалістю вмикання (ТВ) 40%. Для інших ТВ допустима потужність приводиться на паспортній табличці та в довідковій літературі. В тривалому режимі (S1) ці двигуни можуть працювати при потужності не більше 80% від номінальної.

Двигуни з підвищеним ковзанням допускають регулювання швидкості обертання шляхом зміни підведеної напруги при вентиляторному навантаженні. З цією метою створена спеціалізована серія асинхронним двигунів АИРП, які використовуються для приводу осьових вентиляторів.

Асинхронні двигуни з підвищеним пусковим моментом АИРР рекомендуються для приводу механізмів з важкими умовами пуску, таких як шнеки, центрифуги, сепаратори, дробарки, вібратори, поршневі компресори, а також транспортери, які запускаються з частковим або повним навантаженням. Пусковий момент цих двигунів в 2-2,5 рази більший номінального, при цьому вони мають більш жорстку механічну характеристику.

Асинхронні двигуни з фазним ротором АИРФ відрізняються від двигунів основного виконання як конструктивно, так і за своїми робочими характеристиками. Хоча ці двигуни мають складнішу конструкцію та вищу вартість, їх перевагами є можливість зниження пускового струму, регулювання частоти обертання та використання цієї машини як генератора. Випускаються двигуни на потужності від 2,2 до 250 кВт з трьома ступенями захисту: АИРФ — IP44, IP54; АИРНФ — IP23. В сільському господарстві двигуни з фазним ротором використовують для приводу пилорам, млинів, потужних компресорів, стендів для обкатування та випробування двигунів внутрішнього згоряння.

Багатошвидкісні двигуни призначені для приводу механізмів, які потребують ступінчатого регулювання швидкості. Двошвидкісні двигуни застосовують для приводу сепараторів, подрібнювачів кормів, осьових вентиляторів типу ВОБ-5, тришвидкісні — для приводу відцентрових вентиляторів в системах «Клімат».

Однофазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором застосовуються там, де немає трифазної мережі, наприклад, у будівництві, сільському господарстві та в побуті. Виготовляються ці двигуни в чотирьох основних виконаннях: з пусковим резистором (Е), з пусковим конденсатором (У), з робочим конденсатором (Т), з пусковим та робочим конденсатором (УТ). Кращі показники за пусковим та критичним моментом мають двигуни виконання УТ. Вигото-

вляються однофазні двигуни на потужності від 0,016 до 1,5 кВт з числом полюсів 2 або 4.

Вибраний однофазний двигун треба обов'язково перевірити за умовами пуску та на перевантажувальну здатність, оскільки двигун має механічну характеристику, яка значно відрізняється від характеристики трифазного двигуна.

Двигуни для короткочасного режиму роботи (S2) призначені для приводу робочих машин, які працюють в короткочасному режимі роботи. Двигуни створено на базі двигунів загального використання, тому тривалості допустимої роботи не збігаються зі стандартними тривалостями роботи режиму S2. Якщо двигун короткочасного режиму має потужність на одну ступінь вищу порівняно з двигуном основного виконання, то в його позначенні зазначено КР1, а якщо потужність більша на два ступеня — КР2. Двигуни короткочасного режиму мають також виконання, призначене для тривалого режиму роботи, а при перевантаженні — короткочасного режиму. Ці двигуни мають в позначенні індекс КР3 і використовуються при змінному навантаженні.

До електричних модифікацій двигунів іноді відносять двигуни з вбудованим температурним захистом та вбудованим електромагнітним гальмом, які мають конструктивні відмінності, але за робочими характеристиками практично не відрізняються від двигунів основного виконання.

За конструктивним виконанням і способом монтажу електродвигунів вибирають залежно від конструктивних особливостей робочої машини і передавального пристрою та їх розташування на місці встановлення.

Класифікація конструктивних виконань двигунів за способом монтажу наведена в ГОСТ 2479-79. Структура умовного позначення містить дві букви (ІМ) та чотири цифри.

Перша цифра визначає конструктивне виконання: 1 — двигуни на лапах з підшипниковими щитами; 2 — двигуни на лапах, з підшипниковими щитами та з фланцем на підшипниковому щиті; 3 — двигуни без лап, з підшипниковими щитами, з фланцем на одному щиті; 4 — двигуни без підшипникових щитів.

Цифри 6–9 до двигунів основного виконання не застосовуються. Спеціальні серії двигунів можуть мати цифри 7 — двигуни з двома стояковими підшипниками (обкатувально-гальмівний стенд), 9 — машини спеціальної групи (заглибні електродвигуни, двигуни серій 4АПА, АИРП для приводу осьових вентиляторів, двигуни для ручних електричних машин тощо).

Друга та третя цифри означають спосіб монтажу, вказують на положення двигуна в просторі: горизонтально лапами вниз, вертикально валом вгору або вниз, на стінці, на стелі тощо. Цифри 08 в деяких виконаннях означають, що двигун може працювати при будь-якому положенні вала в просторі (IM1081).

Четверта цифра означає виконання виступаючого кінця вала двигуна: 0 — без вихідного кінця вала; 1 — з одним циліндричним; 2 — з двома циліндричними; 3 — з одним конічним; 4 — з двома конічними. Виконання валів з позначенням цифрами 5-9 в асинхронних двигунах основного виконання не існує. Основним виконанням валів у двигунів серії АІР загального призначення є 1 — з одним циліндричним кінцем.

За ступенем захисту персоналу від доторкання до струмоведучих або рухомих частин, що знаходяться всередині корпусу двигуна, і від потрапляння всередину корпусу твердих сторонніх предметів і вологи двигуни вибирають відповідно до характеристики оточуючого середовища, в якому буде працювати двигун. Електродвигуни основного виконання виготовляються зі ступенями захисту: IP23 (захищене виконання) — характеризує захист від випадкового дотику пальців до струмоведучих частин, що знаходяться під оболонкою та захист від проникнення твердих тіл діаметром більше 12,5 мм (перша цифра 2), захист від крапель води або дощу, який падає під кутом до 60° від вертикалі (друга цифра 3); IP44 (закрите виконання) — захист від проникнення під оболонку твердих тіл діаметром більше 1 мм, захист від бризок води будь-якого напрямку; IP54 (закрите виконання) — захист від пилу, який не може проникнути під оболонку в шкідливих кількостях; IP55 — крім того, захист від струменів води будь-якого напрямку.

За кліматичним виконанням і категорією розміщення двигун вибирають відповідно до кліматичних умов району, в якому він буде експлуатуватися, та характеристики місця його розташування.

Кліматичне виконання електрообладнання позначають буквами: У — для районів з помірним кліматом; ХЛ — холодним кліматом; ТВ — тропічним вологим; ТС — тропічним сухим; Т — як з сухим, так із тропічним вологим кліматом, О — загальнокліматичне виконання.

Категорія розміщення електрообладнання позначається цифрою: 1 — для роботи на відкритому повітрі; 2 — для роботи у приміщеннях з порівняно вільним доступом зовнішнього повітря, де коливання температури і вологості повітря мало відрізняються від коливань

на відкритому повітрі; 3 — для роботи у приміщеннях з природною вентиляцією без штучного мікроклімату; 4 — для роботи у приміщеннях із штучним мікрокліматом; 5 — для роботи у приміщеннях з підвищеною вологістю.

За кліматичним виконанням та категорією розміщення електро-двигуни основного виконання мають такі позначення:

УЗ — для роботи в нормальному середовищі: температура оточуючого середовища від -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$, відносна вологість повітря не більше 98%, запиленість повітря до 2 мг/м^3 (IP23) та до 10 мг/м^3 (IP44), оточуюче середовище вибухобезпечне, без струмопровідного пилу, висота над рівнем моря до 1000 м;

У2 — вологоморозостійке виконання (для роботи під навісом): температура від -45°C до $+40^{\circ}\text{C}$, відносна вологість до 100%, двигун має подвійне просочування ізоляції, кращу герметизацію з боку ввідного пристрою та вала;

У1 — виконання двигуна, призначеного для роботи на відкритому повітрі з додатковим впливом атмосферних опадів, сонячної радіації, пилу та інших факторів при різких змінах температури повітря.

Для приміщень з підвищеною вологістю (теплиці, приміщення для переробки молока тощо) рекомендується застосовувати двигуни виконання У5.

Випускаються також спеціалізовані виконання двигунів за захистом від впливу зовнішнього середовища. До них відносяться двигуни:

- хімістійкого виконання (позначення X1, X2), які допускають наявність в оточуючому середовищі хімічно активного пару хлору до $0,001 \text{ г/м}^3$, аміаку — до $0,02 \text{ г/м}^3$, сірнистого ангідриду — до $0,02 \text{ г/м}^3$;

- пилозахищеного виконання (позначення УПУЗ), призначені для експлуатації в приміщеннях, де можливе утворення вибухонебезпечних сумішей, а запиленість приміщень може досягати 100 г/м^3 (комбікормові заводи, деревообробні цехи, млини, елеватори, зерносховища);

- сільськогосподарського виконання (позначення СУ1, СУ2), призначені для роботи на відкритому повітрі та в приміщеннях з відносною вологістю до 100% при температурі $+25^{\circ}\text{C}$, допускають наявність аміаку до $0,03 \text{ г/м}^3$, сірководню до $0,03 \text{ г/м}^3$, соломистого пилу до $1,16 \text{ г/м}^3$ (тваринницькі та птахівничі приміщення). Наявність снігу та льоду не повинно заважати обертанню ротора. Двигуни морозостійкі, допускають обробку дезінфікуючими розчинами та аерозолями, ступінь захисту IP55.

За частотою обертання електродвигун вибирають відповідно до частоти обертання вала робочої машини. На цьому етапі аналізується кінематична схема механізму, зокрема частота обертання або лінійна швидкість робочого органу та передаточні відношення.

Трифазні асинхронні двигуни основних серій випускають на синхронні частоти обертання 3000, 1500, 1000, 750 об/хв. Для одержання нижчих швидкостей безпосередньо на вихідному валу застосовують мотор-редуктори різних типів.

При виборі двигуна необхідно мати на увазі, що двополюсні двигуни мають найвищі енергетичні показники (коефіцієнт потужності, ККД), найменшу масу та габарити, але недоліком їх є підвищений шум та вібрація, вищі вимоги до підшипників та їх змащення, невелике допустиме число пусків на годину.

Тихохідні електродвигуни мають нижчі енергетичні показники, більшу масу та габарити, але відносяться до малощумних і потребують меншу кількість проміжних передач для машин з невеликими швидкостями обертання.

Чотириполюсні електродвигуни мають середні показники і використовуються частіше.

Двигуни спеціальних серій виготовляються тільки на одну частоту обертання, наприклад, серії ПЭДВ всіх потужностей — на синхронну частоту обертання 3000 об/хв, АИРП — на 1000 об/хв.

Якщо частота обертання робочої машини менше 600 об/хв, то економічно доцільніше вибирати високошвидкісні двигуни і механічну передачу.

На цьому ж етапі вибирається тип привода — реверсивний або неререверсивний, нерегульований або регульований. В останньому випадку треба вибрати спосіб та діапазон регулювання частоти обертання.

За номінальною потужністю електродвигун вибирають згідно з навантажувальною діаграмою робочої машини за методикою, поданою у попередніх розділах.

Вибраний електродвигун перевіряють за допустимим механічним навантаженням на виступаючий кінець вала, на перевантажувальну здатність і за умовами пуску.

При з'єднанні двигуна з робочою машиною в залежності від його конструкції та способу монтажу найчастіше використовуються три основні види передач обертового моменту: пружною муфтою, клиновидним або плоским пасом, зубчатою передачею. На вал двигуна крім обертового моменту діють поперечні (радіальні) та по-

вздовжні (аксіальні) сили, які створюються цими передачами, силою від маси ротора з валом, а також сили одностороннього магнітного притягування.

При виборі двигуна необхідно перевірити допустиме навантаження на виступаючий кінець вала за такими параметрами: прогин вала; допустимі напруження, які визначаються матеріалом вала; довговічність підшипників.

Оскільки методика точного визначення радіальних та аксіальних сил відсутня, користуються наближеними методами.

При з'єднанні двигуна з робочою машиною через пружну муфту радіальна сила, H , визначається за емпіричною формулою:

$$F_{p1} = 5700 \sqrt{P/n}, \quad (10.1)$$

де P — потужність на валу, кВт; n — частота обертання вала, об/хв.

При пасовій передачі:

$$F_{p2} = 1,96 \cdot 10^7 \frac{P}{nD} C_y, \quad (10.2)$$

де D — діаметр шківа, мм; C_y — коефіцієнт, який залежить від виду паса (для клиновидного паса $C_y = 2 - 2,5$).

Радіальні сили при ланцюговій передачі, H :

$$F_{p3} = 1,96 \cdot 10^7 \frac{P}{nD_1} C_k C_d, \quad (10.3)$$

де D_1 — діаметр дільного кола зірочки, мм; C_k — коефіцієнт, який враховує додаткову силу, що виникає в зубчатих та ланцюгових передачах ($C_k = 1,1 - 1,3$ при одному зачепленні, $C_k = 0,7 - 0,8$ при двох зачепленнях); C_d — коефіцієнт, який враховує вид привідного механізму. Для основної групи сільськогосподарських машин (конвеєри, насоси, вентилятори, компресори, дробарки, подрібнювачі тощо) $C_d = 1,1 - 1,5$.

При прямозубчатій передачі:

$$F_{p4} = 2,07 \cdot 10^7 \frac{P}{nD_1} C_k C_d. \quad (10.4)$$

При косозубчатих передачах з кутом скошення β_0 радіальна та аксіальна сили, H , відповідно визначають за формулами:

$$F_{p5} = \frac{1}{\cos \beta_0} 2,07 \cdot 10^7 \frac{P}{nD_1} C_k C_d, \quad (10.5)$$

$$F_{a5} = \frac{1}{\cos \beta_0} 1,96 \cdot 10^7 \frac{P}{nD_1} C_k C_d. \quad (10.6)$$

Аксіальна сила діє на підшипники та створює напруження в матеріалі вала. Ця сила зумовлюється реакцією вентилятора на валу двигуна, вагою ротора при вертикальному розміщенні вала, а також аксіальною складовою сили при з'єднанні двигуна з робочим органом за допомогою косозубчастої передачі. Реакція вентилятора визначається за тиском повітря, який він створює, із зворотним знаком. При вертикальному розміщенні ротора додається маса деталей, закріплених на валу.

Одержані значення радіального та аксіального навантажень на виступаючий кінець вала порівнюють з допустимими, які розраховуються за спеціальними діаграмами, наведеними в довідковій літературі та даними заводських інструкцій з експлуатації двигунів.

Якість підшипників, тип з'єднання двигуна з машиною, якість монтажу двигуна і з'єднань суттєво впливають на рівень шуму та вібрації двигуна, які в даний час є також нормованими величинами.

Рівень шуму двигуна визначається в децибелах на відстані 1 м від поверхні двигуна при холостому ході. Для двигунів потужністю від 0,55 до 11,0 кВт він знаходиться в межах 74–82 дБ (двополюсні двигуни), 70–81 дБ (чотириполюсні), 60–78 дБ (шестипольюсні). Рівень вібрації визначається величиною віброшвидкості, мм/с, для якої встановлені такі допустимі значення: для двигунів з висотою осі обертання 56–132 мм — 1,8 мм/с, 160–225 мм — 2,8 мм/с.

Вибраний електродвигун перевіряється за умовами пуску при номінальній та зниженій напрузі, яка можлива за даних умов. Пусковий момент двигуна при даній напрузі повинен бути більшим за момент зрушення механізму з запасом 15–20%. Двигун перевіряється також за часом пуску чи за тепловим режимом при пуску. Методика розрахунків при цих перевірках наведена в попередніх розділах.

Крім того, двигун повинен бути перевірений на стійкість роботи при запуску іншого потужного двигуна і відповідному зниженні напруги мережі. В цьому випадку порівнюються критичний момент двигуна при даній напрузі та найбільший момент, взятий з навантажувальної діаграми.

На цьому ж етапі визначається тривалість пуску електропривода з даним механізмом з урахуванням допустимих відхилень напруги ($\pm 5\%$).

Після вибору електродвигуна та його перевірок приступають до розробки електричної принципіальної схеми керування електроприводом. При цьому використовують такі вихідні дані: тип електродвигуна та його електрична модифікація; особливості пуску (прямий, із введенням резисторів, перемиканням обмоток статора із «зірки» на «трикутник» тощо); особливості керування (нереверсивне, реверсивне, з електричним гальмуванням, керування з декількох місць); вимоги технологічного процесу щодо черговості запуску та зупинки; вимоги технологічного процесу щодо швидкісного режиму (одношвидкісний без регулювання, зі ступінчатою зміною швидкості, з плавним регулюванням швидкості, зі стабілізацією швидкості при змінах навантаження тощо); вимоги до рівня автоматизації керування (необхідність введення в схему датчиків, контролюючих та регулюючих пристроїв, кінцевих вимикачів тощо); можливі ненормальні режими, від яких треба захищати електропривод.

Схема розробляється на базі типових вузлів електричних схем: вузол захисту, вузли блокіровок, вузол сигналізації стану, вузол реверсування, вузол дистанційного керування.

Розроблена схема повинна бути простою і повністю забезпечувати вимоги технологічного процесу. Схему оцінюють за надійністю і при необхідності вносять корективи.

При наявності електричної принципіальної схеми та технічних даних електрообладнання (потужність, номінальний та пусковий струми, напруга живлення) приступають до вибору елементів схеми для силових кіл та кіл керування.

Елементи схеми вибирають з урахуванням їх новизни, технічних даних, вартості. З метою підвищення ремонтпридатності число однотипних елементів повинно бути максимальним.

Методика вибору елементів схеми наведена в розділі «Апарати керування та захисту електроприводів».

Після вибору складають таблицю переліку елементів схеми (табл. 10.1), яка є основою для замовлення обладнання та апаратури.

Для розміщення апаратури керування та захисту вибирають металеву оболонку необхідних розмірів та з відповідним ступенем захисту від дії навколишнього середовища. Ящик або шафа із вмонтованими апаратами, призначені для розподілу електроенергії, захисту

та керування споживачами електроенергії називається низьковольтним комплектним пристроєм (НКП).

НКП відрізняються між собою за призначенням, видом і кількістю керованих двигунів, функціями, ступенем автоматизації та іншими ознаками.

Таблиця 10.1

**ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Позиційне позначення	Найменування	Кількість	Примітки
КМ1	Приклад Пускач електромагнітний ПМЛ4200-04Б, ТУ 16.644.001-83	2	$U_{\text{кот}}=220 \text{ В}$
QF1	Вимикач автоматичний АП50Б-ЗМТУЗ, ТУ 16.522.139-78	1	$I_{\text{розч}}=16 \text{ А}$

Як правило, вибираються серійні НКП, а при їх відсутності або невідповідності вимогам складають схему з'єднань та готують технічні умови на виготовлення НКП.

10.2. Розрахунки надійності електроприводу

Надійність — це властивість пристрою виконувати задані функції, зберігаючи при цьому значення установлених експлуатаційних показників в заданих межах. Надійність є комплексною властивістю, обумовленою безвідмовністю, ремонтоздатністю, довговічністю і збереженістю.

Безвідмовність — це властивість пристрою зберігати працездатність протягом певного часу або певного напрацювання. Якщо працездатність пристрою порушується, то таку подію називають відмовою.

Ремонтоздатність є властивістю пристрою, яка полягає в його пристосованості до попередження, виявлення та ліквідації відмов шляхом проведення технічних обслуговувань та ремонтів.

Довговічність — це здатність пристрою зберігати працездатність до деякого граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Під граничним станом розуміють стан пристрою, при якому подальша експлуатація його повинна бути

припинена через технічні або економічні причини, умови безпеки, необхідності середнього або капітального ремонту. Календарну тривалість або об'єм роботи пристрою до настання граничного стану називають терміном служби або технічним ресурсом (напрацюванням).

Для електродвигунів серії АИР розрахунковий термін служби встановлений 20000 годин при ймовірності безвідмовної роботи не менше 0,9.

Збереженість — це властивість пристрою безперервно зберігати працездатність після зберігання та транспортування.

В інженерній практиці використовують три методи розрахунку надійності електропроводів: за середньогруповими значеннями; з використанням даних експлуатації систем; з використанням коефіцієнтів надійності. Найчастіше розрахунки виконують за третім методом у такій послідовності:

1. Визначаються ознаки відмови системи на основі строгого формулювання задачі, яку повинна виконувати система. Розглядаються кількісні значення параметрів, які характеризують роботу системи, і допустимі межі їх зміни.

2. Складається логічна схема для розрахунку надійності, яка характеризує логічні з'єднання елементів у системі в процесі виконання заданої функції (основне, паралельне, змішане).

3. Визначаються вихідні дані для розрахунку надійності: тип використаних елементів, їх кількість n_i і номінальні параметри; інтенсивність відмов елементів λ_i ; період часу T , для якого розраховується надійність; допустимий час усунення відмов системи; середній час відновлення i -го елемента t_{ai} ; характеристика навколишнього середовища, в якому експлуатується система.

Інтенсивність відмов елементів електропривода λ_i , поправочні коефіцієнти, що враховують режим експлуатації електропривода, затрати часу на відновлення елементів t_{ai} наведені у спеціальній літературі.

Сукупність елементів електропривода можна представити як систему взаємозв'язаних елементів, вихід із ладу хоч би одного з них призводить до відмови всієї системи та порушення технологічних процесів. Загальна інтенсивність відмов визначається за формулою:

$$\lambda = \sum_1^b \lambda_i n_i K_d, \quad (10.7)$$

де λ_i — інтенсивність відмов елементів в лабораторних умовах; n_i — число однотипних елементів; K_d — поправочний коефіцієнт на кон-

критичні умови експлуатації (для лабораторних умов $K_n=1$, для стаціонарних процесів у виробничих приміщеннях $K_n=10-15$, для мобільних агрегатів $K_n=25-30$).

Середнє напрацювання електропривода на відмову:

$$t_a = \frac{1}{\lambda}. \quad (10.8)$$

Затрати часу на усунення відмови (час відновлення):

$$T_a = K_n \frac{\sum_{i=1}^b \lambda_i n_i t_{ai}}{\sum_{i=1}^b \lambda_i n_i}, \quad (10.9)$$

де K_n — коефіцієнт, який враховує час пошуку несправності в системі ($K_n=1,5-2$); t_{ai} — час відновлення i -того елемента.

Очікувана кількість відмов системи за рік:

$$m_o = \lambda t_p, \quad (10.10)$$

де t_p — час роботи системи протягом року.

Очікуваний сумарний час простою технологічного обладнання за рік:

$$t_{nc} = m_o \cdot t_{np}, \quad (10.11)$$

де t_{np} — час простою технологічного обладнання при одній відмові;

$$t_{np} = t_{ev} + T_a, \quad (10.12)$$

де t_{ev} — затрати часу на виклик ремонтно-обслуговуючого персоналу та доставку обладнання.

Коефіцієнт готовності

$$K_z = \frac{t_p}{t_p + t_{nc}}, \quad (10.13)$$

де t_p — безвідмовний час роботи обладнання.

Імовірність безвідмовної роботи визначається за формулою:

$$p = e^{-\lambda T}, \quad (10.14)$$

де T — заданий інтервал часу.

10.3. Техніко-економічна оцінка електроприводу

Вартість кожного елемента електропривода визначається за прейскурантами, до сумарної вартості додається вартість монтажу. Якщо вартість монтажу якого-небудь елемента невідома, то орієнтовно приймають 13% від його вартості. При виборі серійного пристрою враховується його загальна вартість.

Крім того до кошторисної вартості входять вартість електродвигунів з урахуванням монтажу та вартість попередньо вибраних проводів та кабелів для силової частини приводу та кіл керування.

При розрахунках кошторисної вартості вибраного комплекту, як правило, розглядають не менше двох варіантів комплектації та монтажу, при цьому за основу приймають дешевший варіант при рівноцінності їх за надійністю роботи.

10.4. Питання для самоконтролю

1. Які вихідні дані необхідно мати для вибору електропривода?
2. Які основні етапи вибору електропривода?
3. Які існують електричні модифікації асинхронних двигунів, для приводу яких машин вони застосовуються?
4. Які конструктивні виконання електродвигунів застосовуються у сільськогосподарському виробництві?
5. Як вибирають електродвигуни за ступенем захисту від дії оточуючого середовища, кліматичним виконанням та категорією розміщення?
6. Які необхідно виконувати перевірки при виборі електродвигуна?
7. Які основні показники надійності застосовуються при оцінці електроприводів?
8. Як виконують техніко-економічну оцінку електропривода?



БІБЛІОГРАФІЯ

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 722 с.
2. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А.Соболенская. — М.: Энергоиздат, 1982. — 504 с.
3. Асинхронные электродвигатели с векторным управлением/ В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. — Л.: Энергоатомиздат, 1987, — 136 с.
4. Владимирский электромоторный завод. Технический каталог. Часть I — Владимир. — 2003. — 64 с.
5. Грундулис А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. — М.: Колос, 1982. — 104 с.
6. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній: Підручник/ Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. Є.Л. Жулая. — К.: Вища освіта, 2001. — 288 с.
7. Електропривод: Ч.1. О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. — К.: Урожай, 1995. — 208 с.
8. Зеленов А.Б. Теория электропривода. Часть I: Учебн пособие. / А.Б. Зеленов. — Алчевск: ДонГТУ, 2005. — 394 с.
9. Зеленов А.Б. Теория электропривода. Часть II: Учебн пособие. / А.Б. Зеленов. — Алчевск: ДонГТУ, 2005. — 513 с.
10. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980. — 360 с.
11. Кукеков Г.А. и др. Полупроводниковые электрические аппараты: Учеб. пособие для вузов/ Г.А. Кукеков, К.Н. Васерина, В.П. Лунин. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. — 256 с.

12. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві / О.С. Марченко, О.В. Дацішин, Ю.М. Лавріненко та ін.; За ред. О.С. Марченка. — К.: Урожай, 1995. — 416 с.
13. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 416 с.
14. ОАО Харьковский электротехнический завод «Укрэлектромаш». Технический каталог. — Харьков: ООО «Торговый дом ХЭЛЗ», 2007. — 44 с.
15. Правила устройства электроустановок. — Харьков: Издательство «Индустрия», 2007. — 416 с.
16. Радин В.И. и др. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов / Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е.; Под ред. И.П. Копылова — М.: Высш. шк., 1988. — 328 с.
17. Родштейн Л.А. Электрические апараты: Учебник для техникумов. — 4-е изд., перераб. и доп. — Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. — 304 с.
18. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 616 с.
19. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 456 с.
20. Таев И.С. Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. — М.: Энергия, 1965. — 224 с.
21. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро/ В.И. Радин, Й Лондин, В.Д. Розенкноп и др.; Под ред. В.И. Радиана. — Энергоатомиздат, 1990. — 416 с.
22. Устройство защитного отключения. К.: ООО «Интерэлектрокомплект», 2003. — 28 с.
23. Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами/ Под ред. О.В. Сlezжановского. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 240 с.
24. Частотно-керований асинхронний та синхронний електроприводи: навч. посібник / О.Г. Плахтина, С.С. Мазепа, А.С. Куцик. — Львів: Видавн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2002. — 228 с.
25. Чиликин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.А. Основы автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов. — М., «Энергия», 1974. — 568 с.
26. Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 720 с.



ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

- Автономний інвертор напруги 203
 - струму 205
- Апарати електричні:
 - , категорії застосування 343
 - , класифікація 340
 - комбіновані 403
 - , комутаційна здатність 344
 - , напівпровідникові 397
 - , нормовані параметри 341
 - , стійкість проти спрацювань 344

Б

- Блокувальні зв'язки у схемах керування 449

В

- Векторне керування 209
- Вимикачі:
 - автоматичні 418
 - - будова 421
 - - вибір 423
 - - захисна характеристика 421
 - пакетні 369
 - пакетно-кулачкові 370
 - шляхові 373
- Відносна тривалість вмикання 291

Ж

- Жорсткість механічної характеристики 33

З

- Запобіжники плавкі:
 - , будова 408
 - , вибір 412
 - , захисна характеристика 409
 - швидкодіючі 412
- Зворотний зв'язок від'ємний по моменту 238
 - струму 238
 - швидкості 233
 - додатний по струму 236

К

- Каскад вентиляно-машинний 220
 - електромеханічний 221
 - - електричний 223
- Керування автоматизоване 438
 - автоматичне 438
- Класи нагрівостійкості ізоляції електричних машин 278
- Кнопки керування 371
- Коефіцієнт:
 - інерції 26
 - механічного перевантаження 317

Д

Двигуни асинхронні:

- з підвищеним ковзанням 93,320
- пусковим моментом 93
- фазним ротором 80,93
- багатшвидкісні 209
- однофазні 101
- для короткочасного режиму роботи 313

Двигуни синхронні 104

Допустиме число вмикань:

- електродвигуна 329
- електричного апарата 342

Дуга електрична:

- , вольт-амперні характеристики 354

- , способи гасіння 356

- , умови гасіння 357

Контактор:

- , будова 378, 380

- , вибір 383

- комбінований 403

Короткозамкнений виток 367

Е

Електромагніти:

- електричних апаратів 364

- змінного струму 380

- , вібрації 366

- постійного струму 364

- , тягова характеристика 365

Електропривод:

- , визначення 15

- , класифікація 16

М

Матеріали контактів 348

Метод еквівалентного моменту 309

- потужності 310

- струму 306

- середніх втрат 301

Механічна характеристика 32

- термічного перевантаження 316

Командоапарати 371

Командоконтролери 372

Контакти:

- , будова 350

- , перехідний опір 346

- , режими роботи 347

- , конструкції 350

Приставка напівпровідникова 382

Пристрої:

- дугогасні з дугогасними решітками 363

- поздовжніми щілинами 360

- послідовною котушкою 361

- захисного вимикання 427

- , будова 427

- , класифікація 430

- , вибір 431

- захисту з електронними блоками 431

- температурного захисту 424

Пускачі:

- електромагнітні 383

- , будова 384

- , вибір 386

- , номінальний робочий струм 386

- , номінальний струм 386

- ручні 371

- тиристорні 401

Р

Регулювання кутової швидкості:

зміню напруги 157, 188, 226

- магнітного потоку 177, 189

- числа пар полюсів 209

- імпульсне 182

- , показники 152

- реостатне 170, 187, 215

- частотне 192

- шунтуванням обмотки збудження 189

- якоря 174, 189

Режим роботи:

- двигунний 45, 53

- - двигуна постійного струму 47, 48, 63
- - - асинхронного 81
- - - асинхронного динамічна 142
- - - однофазного 102
- - - синхронного 105
- - природна 32
- - робочої машини 31
- - штучна 32

Момент активний 20

- динамічний 27
- інерції 25, 36
- - зведений 25
- - методи визначення 36
- короткого замикання 122
- критичний 85
- пусковий 86
- реактивний 20
- статичних опорів 20
- - - зведений 22, 24
- електромагнітний 47, 127

Н

Навантажувальна діаграма 289

П

Перемикачі:

- пакетні 369
- пакетно-кулачкові 370
- шляхові 373

Перетворювач частоти електро-механічний 201

- - транзисторний 205
- - будова 415
- - вибір 417
- - характеристики 417
- класифікація 388
- напруги 392
- проміжні 393
- струму 390
- , характеристики загальні 389
- часу 394

- - гальмівний динамічний 55, 66, 97
- - - противмиканням 54, 65, 96
- - - рекуперативний 53, 94
- - контакторів 376
- - короткочасний 291, 376
- - переміжний 298
- - повторно-короткочасний 291, 376
- - тривалий 291, 376

Реле:

- герконові 396
- електротеплові 414
- керування нереверсивного 451
- - АД з гальмуванням противмиканням 465
- - - динамічним гальмуванням 467
- - двошвидкісним двигуном 460
- - тришвидкісним двигуном 461
- - однофазним двигуном 462
- - пуском АД у функції струму 458
- - - частоти струму 459
- - - часу 454, 455, 457
- - - шляху 454
- - пуском ДПС у функції ЕРС 473
- - - струму 474
- - - часу 472
- - реверсивного 452
- - у функції шляху 454
- - кінематична 22, 23, 24
- - електричних з'єднань 445
- - принципіальна 442

Т

Типові вузли схем керування 445

Тиристори:

- структура умовного позначення 399
- способи керування 400

У

Універсальні перемикачі 372

Рівняння:

- нагрівання двигуна 282
- охолодження двигуна 284
- перехідного процесу:
 - ковзання 132, 136
 - моменту 126, 129, 133
 - струму 125, 129
 - швидкості 123, 128, 132
- Розрахунок опорів резисторів:
 - - - гальмівних 61, 64
 - - - пускових 58, 69, 100

Розчіплювачі автоматичних вимикачів 419

Рубильники 368

С

Система керований вентилювальний двигун 165

- Г-Д 165

Способи пуску ДПС НЗ 57

- - асинхронних двигунів 98

- - синхронних двигунів 105

Стала часу електромагнітна 144

- - електромеханічна 122, 123, 128

- - нагрівання 283

- - - методи визначення 286

- - охолодження 285

Статична стійкість електропривода

34

Схема заміщення АД 80

Х

Характеристика динамічна 142

- електромеханічна 32, 47, 48, 83

- кутова 105

- механічна 32, 47, 48, 63, 87, 105

- - у відносних одиницях 50

- природна 32, 49

- штучна 32, 49, 91

Ч

Час

- перехідного процесу пуску 116, 121

- циклу 291

Навчальне видання

ЛАВРІНЕНКО Юрій Миколайович,
МАРЧЕНКО Олександр Савич,
САВЧЕНКО Петро Ілліч,
СИНЯВСЬКИЙ Олександр Юрійович,
ВОЙТЮК Дмитро Григорович,
ЛИСЕНКО Віталій Пилипович

ЕЛЕКТРОПРИВОД

Підручник

Літературний редактор: *Урбан Анатолій Адольфович*
Комп'ютерна верстка: *Іваненко Оксана Миколаївна*
Дизайн обкладинки: *Сєдих Олег Олександрович*

Підписано до друку 30.10.2008.
Формат 84×108 1/32. Папір офсетний. Друк офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Умовн. друк. аркушів — 10,92.
Обл.-вид. аркушів — 13,6. Зам. № 70.12
Надруковано: ПП «Мрія-Друк»
m-druk@meta.ua
Видавництво «Ліра-К»
Свідоцтво ДК № 1156 від 17.12.2002 р.
03067, м. Київ, вул. Прилужна 14, кв. 42
тел./факс (044) 247-93-37; 450-91-96