
О.М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАСОБАМИ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Навчальний посібник

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів

**Київ
КОНДОР**

2005

УДК 621.311.004.18:62-83

ББК 31.291

Е 65

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів
(Лист № 14/18.2 - 1666 від 17.10.2003)*

Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І.

**Е 65 Енергозбереження засобами промислового електропривода:
Навчальний посібник. — К: Кондор, 2005. — 408 с.**

ISBN 966-7665-23-2

Книга відображає актуальні питання управління енергоефективністю (енергозбереження) засобами промислового електропривода. Розглядаються напрямки реалізації енергозбереження, енергетичні властивості та теплові режими електропривода, а також питання вибору раціональних режимів роботи і експлуатації технологічних приладів та електропривода. Значна увага приділена сучасним системам електропривода та питанням регулювання якості електроенергії засобами силових перетворювальної техніки промислового електропривода.

Для наукових працівників, інженерів, викладачів, аспірантів і студентів вузів.

ББК 31.291

ISBN 966-7665-23-2

© О.М. Закладний, А.В. Праховник,
О.І. Соловей, 2003

© «Кондор», 2003

Зміст

ВСТУП	7
1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ І ПІДХОДИ ДО ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ	11
1. Основні поняття і тенденції розвитку енергозбереження	11
2. Багаторівнева структура сучасного електропривода	27
3. Стан і перспективи розвитку силових напівпровідникових елементів регульованого електропривода	32
4. Шляхи реалізації енергозбереження засобами промислового електропривода	43
2. ЕНЕРГЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	67
1. Енергетичний канал електропривода	67
1.1. Структура енергетичного каналу електропривода	67
1.2. Баланс потужностей потоків енергії силового каналу	72
1.3. Коефіцієнт корисної дії	75
1.4. Узагальнений критерій енергетичної ефективності силового каналу	76
2. Енергетичні особливості і характеристики енергетичної ефективності статичних перетворювачів електроенергії	81
3. Типові структури перетворювачів електроенергії	92
3.1. Електромашинні перетворювачі	92
3.2. Статичні перетворювачі на напівкерованих електронних приладах (тиристорах)	94
3.3. Статичні перетворювачі на керованих електронних приладах	102
4. Енергетичні характеристики електромеханічних перетворювачів (нерегульованого електропривода) у статичному режимі	108
4.1. Втрати потужності	108
4.2. Коефіцієнт корисної дії електропривода	112
4.3. Коефіцієнт потужності електропривода	114
5. Енергетичні характеристики регульованих електроприводів у статичному режимі	117
5.1. Регульований електпривод із ДПС незалежного збудження	117
5.2. Регульований електропривод з АД	118

6. Енергетичні характеристики механічних перетворювачів у статичних режимах	120
7. Втрати електроенергії в перехідних процесах електропривода і способи їх зниження	122
3. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	131
1. Розрахунок потужності і вибір електродвигунів	131
2. Перевірка двигунів по нагріванню прямим методом	141
3. Перевірка двигунів по нагріванню непрямыми методами	145
3.1. Метод середніх втрат	145
3.2. Метод еквівалентних величин	147
4. Особливості перевірки двигунів по нагріванню при різних теплових режимах роботи	149
4.1. Тривалий режим роботи	149
4.2. Короткочасний режим роботи	150
4.3. Повторно-короткочасний режим роботи	153
4.4. Додаткові режими роботи	156
4. ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК І ЕЛЕКТРОПРИВОДА	159
1. Економія електроенергії технологічними установками і механізмами	159
1.1. Підйомні установки	
1.2. Вентиляторні установки	161
1.3. Водовідливні установки	164
1.4. Компресорні установки	165
1.5. Конвеєрні установки	167
2. Вибір раціонального способу і діапазону регулювання швидкості електропривода в залежності від технологічних умов роботи машин і механізмів	169
2.1. Регулювання продуктивності вентиляторних установок і вимоги до електропривода	169
2.2. Керування продуктивністю насосних установок	173
2.3. Регулювання швидкості конвеєрних установок	181
2.4. Регулювання швидкості вантажопідйомних машин	184
3. Вибір раціонального способу регулювання швидкості в залежності від характеру зміни навантаження	188
3.1. Вибір способу регулювання швидкості при постійному навантаженні двигуна	188
3.2. Вибір способу регулювання швидкості при постійній статичній потужності	190
4. Підвищення завантаження електропривода. Виключення режиму неробочого ходу	191

5. Зниження напруги на затискачах електродвигуна	194
6. Використання синхронної машини як компенсатора реактивної потужності	198
7. Використання акумуляторів енергії	201
5. ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО ТИПУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	214
1. Аналіз умов експлуатації електропривода	214
2. Вибір системи електропривода	218
3. Енергозберігаючі аспекти застосування частотно-регульованого електропривода	228
4. Приклади використання частотно-регульованого електропривода	232
4.1. Керування потоком рідини і газу	232
4.2. Переміщення матеріалів	234
4.3. Керування часом затримки в хімічних процесах	237
4.4. Модернізація верстатної обробки на виробництві	238
4.5. Керування часом нагрівання для екструзії і молдингу	240
4.6. Регулювання швидкості для підвищення якості і точності при механічній обробці матеріалів	242
4.7. Керування рівнями потоків мас	244
4.8. Керування рівнями виробництва	246
4.9. Керування операціями намотування	248
5. Тенденції розвитку сучасного електропривода	249
6. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗМІННОГО СТРУМУ	256
1. Частотно-регульований електропривод з асинхронними двигунами	256
2. Асинхронний електропривод з реалізацією енергії ковзання	275
3. Асинхронний електропривод з фазовим керуванням	284
4. Глибокорегульований електропривод із синхронними машинами (вентильний двигун)	287
4.1. Способи керування вентильними двигунами	287
4.2. Оцінка якості перетворення енергії вентильним двигуном	297
4.3. Оптимізація параметрів електроустаткування приводу з вентильними двигунами	305
4.4. Оптимальний за динамічними та енергетичними режимами самонастроюваний електропривод	308
4.5. Тримпульсний спосіб керування тиристорами циклоконвертора	313
5. Електропривод з вентильними індукторними двигунами	315
6. Електропривод з векторним керуванням	319

7. РЕГУЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗАСОБАМИ СИЛОВОЇ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	325
1. Генерування вищих гармонік векторними перетворювачами	325
1.1. Гармоніки струму мережі мостових перетворювачів і силових трансформаторів	325
1.2. Гармоніки струму мережі перетворювачів спеціального призначення	333
1.3. Аномальні гармоніки вентильних перетворювачів	338
2. Втрати потужності від вищих гармонік	340
2.1. Втрати в електричних машинах і трансформаторах	340
2.2. Втрати в батареях конденсаторів	346
3. Вплив вищих гармонік на силові установки, системи релейного захисту, автоматики і зв'язку	348
4. Підвищення енергетичних показників і зменшення впливу на мережу електроприводів з вентильними перетворювачами	355
4.1. Традиційні способи компенсації реактивної потужності	355
4.2. Силові резонансні фільтри енергетичного призначення	358
4.3. Використання ненастроєних фільтрів	364
4.4. Застосування багатофункціональних пристроїв на основі активних фільтрів	367
4.5. Розрахунок параметрів фільтрів для забезпечення електромагнітної сумісності вентильного перетворювача з мережею й електродвигуном	372
4.6. Використання статичних тиристонних компенсаторів ..	380
4.7. Зниження рівнів гармонік засобами мережі живлення	383
4.8. Спеціальні способи керування і схемні рішення вентильних перетворювачів	386
4.9. Системи керування вентильними перетворювачами	395
ЛІТЕРАТУРА	405

ВСТУП

Енергія, і зокрема електрична, є одним з найважливіших продуктів у індустріальному суспільстві. Дослідження показали, що середній прибуток, тривалість життя та інші важливі фактори рівня життя пов'язані зі споживанням електроенергії на душу населення в окремому регіоні чи в країні в цілому. Як і всі природні ресурси, енергетичні ресурси можуть виснажитися, тому важливо заощаджувати якомога більшу кількість енергії.

Можливий ефект енергозбереження — економія 200 млрд тонн умовного палива в 1986-2020 р.р., тобто такої його кількості, що було видобуто з надр за всю попередню історію людства. Прогнозується, що за рахунок енергозбереження буде задовольнятися дві третини приросту світових потреб енергії.

Енергозбереження як діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), спрямована на раціональне використання енергії і природних енергетичних ресурсів, — державна проблема, яка постала на порядок денний слідом за найважливішою політичною подією в житті України — здобуттям незалежності.

Входження у світову економіку неминуче припускає створення продукції, конкурентно спроможної на світових ринках (за якістю і вартістю). Але створена промислова база була орієнтована на низьку вартість енергетичної складової, котра дотувалася державою. Енергозатратні технології, значна частина застарілого, технічно зношеного устаткування призвели до критичних рівнів витратного й нераціонального використання паливно-енергетичних ресурсів, що викликало енергетичну кризу в нашій країні.

Україна видобуває 5% світового обсягу мінеральних ресурсів, але лише 12% з них надходить у виробництво, інше не використовується (у країнах Західної Європи у виробництво надходить 60%). Потреба в паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного їх видобутку задовольняється менше, ніж наполовину, при цьому енергоемність валового внутрішнього продукту в Україні в кілька

разів вища, ніж у розвинутих країнах. Комплексне розв'язання проблеми енергозбереження – найбільш прийнятний для України шлях подолання енергетичної кризи.

Провідні країни світу створили справжню індустрію енергозбереження, що дозволяє одержати величезний приріст продукції практично без істотного збільшення енерговитрат. Слід відмітити, що в розв'язання проблем, пов'язаних з енергетичною кризою 1973 р. у розвинутих країнах світу, вирішальний внесок зробили не нарощування видобутку паливно-енергетичних ресурсів, а конкретні заходи енергозбереження.

Так, відомо, що вироблення і використання електроенергії є важливим критерієм оцінки прогресу. Ще 40 років тому людство споживало майже половину тієї енергії, що споживає сьогодні. У XX столітті людство витратило більше ресурсів, ніж за весь період свого існування. На початку XXI століття виробництво електроенергії перевищило 15000 ТВтг, що розподіляється таким чином :

- 9000 ТВтг – країни з розвинутою ринковою економікою (800 млн чол.);
- 1700 ТВтг – країни СНД, Центральної і Східної Європи (400 млн чол.);
- 1300 ТВтг – Китай (1,3 млрд чол.);
- 3000 ТВтг – країни з ринковою економікою, що розвивається, (3,5 млрд чол.).

Індустріалізовані країни мають більшу частку (10700 ТВтг), у той час, як країни, що розвиваються, володіють малою часткою (4300 ТВтг). З погляду попиту на електроенергію (1,6 млрд чол. у країнах, що розвиваються, не мають доступу до електроенергії – 0 кВтг у рік на душу населення) виходить, що 20% населення з низьким рівнем доходів споживають 5% загальної кількості електроенергії, а 20% з високим рівнем доходів – 50%.

За даними Світової енергетичної ради, у 2000 році кількість електроенергії, споживана однією людиною протягом року, складала: у Канаді – 15500 кВтг, у США – 12700 кВтг, у індустріалізованих країнах Північної Європи – 9000 кВтг, у Японії – 8000 кВтг, у Росії – 6000 кВтг, в Україні 3400 кВтг, у Латинській Америці 100-200 кВтг. У середньому по країнах, що розвиваються, 900 кВтг за рік на душу населення. На сьогодні 1,2 млрд чол. (20% світового населення) в індустріалізованій частині планети споживають 60% загальної кількості енергії, у той час, як 4,8 млрд чол. (80% світового населення) у країнах, що розвиваються, споживають 40% загальної кількості енергії.

За таким узагальненням прихована набагато серйозніша ситуація. Два мільярди найбіднішого населення із середнім доходом менше 1000 доларів споживають всього 0,2 toe (тонни нафтового еквівалента) на душу населення, в основному у вигляді традиційної біомаси, у той час, як індустріалізовані країни використовують у середньому 5 toe сучасної енергії на душу населення, в Україні – 2,7 toe на душу населення (3,86 тонни умовного палива).

Альтернативи політиці енергозбереження в Україні немає, якщо вона не хоче бути сировинним придатком провідних країн світу. Енергозбереження повинно перетворитися в підгалузь промислової енергетики, додаткове джерело енергії. У цих умовах реалізація політики енергозбереження стає стратегічною лінією розвитку економіки і соціальної сфери.

Збереження електричної енергії є важливою частиною загальної тенденції щодо захисту навколишнього середовища. Серед споживачів електричної енергії значну частку складають електродвигуни різного призначення, що споживають більше половини виробленої енергії. Саме тут закладені найбільші резерви енергозбереження.

Більшість електродвигунів працюють у нерегульованому режимі, а отже – з низькою ефективністю. Через недоліки проектування й експлуатації електропривода коефіцієнт завантаження багатьох машин не перевищує 50%, що вимагає зниження встановленої потужності двигунів. Робота привода в недовантаженому режимі призводить до величезних втрат, не враховуючи зниженого значення коефіцієнта потужності, оскільки загальна встановлена потужність асинхронних двигунів у країні складає близько 40...50 млн кВт. Сумарна ж установлена потужність двигунів у СНД приблизно дорівнює 550 млн кВт.

Зростаюча складність одержання енергії, подальший розвиток енергоємних технологій, необхідність безаварійної роботи машин і механізмів вимагає використання регульованого електропривода. Перехід до регульованого електропривода змінного струму окремих механізмів дозволить заощадити до 50 % енергоресурсів.

Недавній прогрес у напівпровідниковій індустрії, особливо в силічній електроніці і мікроконтролерах, зробив приводи з регулюванням частоти обертання більш практичними і значно дешевшими. На сьогодні регульовані приводи вимагаються не лише у промисловому виробництві, як наприклад, обробні машини чи підйомні крани, але усе більше в побутовій техніці, наприклад, у

пральних машинах, компресорах, невеликих насосах, кондиціонерах повітря тощо.

На даному етапі розвитку промисловості в Україні особливого значення набувають питання розробки та широкого впровадження методів і способів керування енергоефективністю (енергозбереженням) засобами промислового електропривода, оскільки з однієї сторони гостро постала проблема економії електроенергії, а з іншого боку, — з'явилася реальна можливість її ефективного використання стосовно головного її споживача — електропривода.

1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ І ПІДХОДИ ДО ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

В Україні, що займає 2,7% території колишнього СРСР (603,7 тис. км²), у 1990 році було розміщено 15,2% основних виробничих фондів; випускалося понад 17% промислової і 22% сільськогосподарської продукції; добувалося 27% вугілля, 52% залізної руди; вироблялося 35% сталі; 95% магістральних тепловозів, 24% тракторів, 21% зерна і 50% цукру. У державі є понад 8 тис. родовищ, де розробляються 90 видів покладів корисних копалин; на її території знаходиться 28,6% чорноземів світу.

За даними Ради по вивченню продуктивних сил НАН України, у 1990 р. ВВП складав 207,8 млрд грн., а 1997 р. — 76,4 млрд грн., що в 2,72 рази менше. За сім років Україна втратила потенціал, що обчислювався в 636,3 млрд грн. У 2002 р. ВВП склав 43,2% від 1990 р., що більше ніж у 1997 р., але ще менше ніж у 1990 р. Відповідно відбувалося зниження попиту на електроенергію.

За даними західних експертів, світові запаси нафти і газу будуть вичерпані за 80–90 років, вугілля — за 350 років. Запаси вугілля України розраховані на 400 років, що дає можливість розглядати сучасну вугільну енергетику як пріоритетну, а вугілля — як основний енергетичний ресурс України.

Основні запаси кам'яного вугілля зосереджені в Донецькому (98% загальних запасів) і Львівсько-Волинському (2%) басейнах, бурого вугілля — в основному в Дніпропетровському басейні.

Діючий шахтний фонд України на 1996 р. складав 285 шахт і 7 розрізів із відкритим видобутком бурого вугілля. Можливий річний

енергетичний потенціал сягає 190 млн т. У Донецькому басейні є 261 шахта, з них 119 добувають коксівне вугілля. До 2010 року планується закрити 139 шахт. За останні 20 років у Донбасі не було закладено жодної шахти, 80% шахт працюють без реконструкції понад 20 років. У Львівсько-Волинському басейні до 2005 року з 17 діючих шахт продуктивністю 9,2млн т буде закрито 13. У Дніпропетровському буровугільному басейні діє 6 шахт і 7 розрізів продуктивністю 7млн т, усі підприємства вичерпують свої запаси в період 2000-2010 р.р.

Продуктивність праці на шахтах України складає 2-25% рівня, досягнутого в США і Західній Європі. У вугільній промисловості коефіцієнт використання гірничошахтного устаткування знаходиться на рівні 0,2. Таким чином, вугільна промисловість України у зв'язку з її пріоритетністю розвитку як єдиного в недалекому майбутньому природного енергоносія вимагає реорганізації, капітальних вкладень і підвищення ефективності роботи окремих процесів галузі.

У 1992-1997 р.р. у нашій державі високими темпами збільшувалася частка найбільш енергоємних галузей, що виробляли проміжну продукцію, і зменшувалася частка галузей, що випускали продукцію кінцевого споживання.

Сучасному етапу розвитку України властивий гострий енергодефіцит, оскільки потреба у використанні паливно-енергетичних ресурсів за рахунок власного їх видобутку задовольняється менше, ніж на 50%. Водночас енергоємність валового внутрішнього продукту в два рази вища, ніж той самий показник для країн Західної Європи і продовжує зростати (енергоємність у 1996 р. у порівнянні з 1992 роком зросла на 42%). Виробництво ж скоротилося на багатьох підприємствах до 20..25% колишнього потенціалу.

Споживання електроенергії в Україні в період 1990 – 2003 років зображено на рис 1.1.

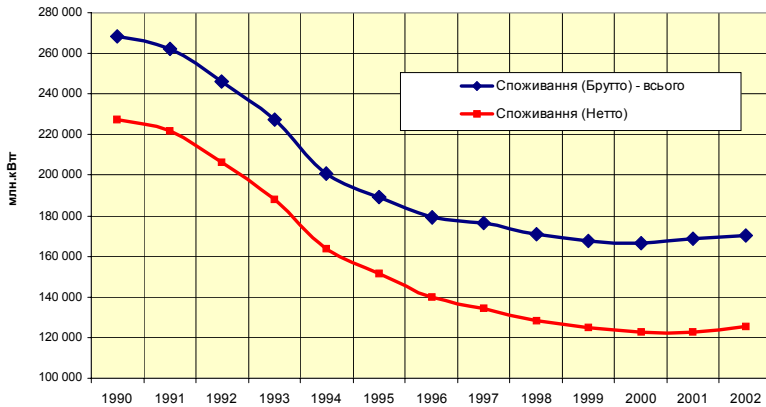


Рис. 1.1

Якщо в 1990 році споживання (брутто) становило 268,3 ТВтг, то в 2000 – 166,6 ТВтг, тобто знизилося до 62%. При цьому найбільший спад споживання відбувся в промисловості, сільському господарстві та транспорті. У той же час попит на електроенергію населення збільшився на 5,7%.

Споживання та відпуск електроенергії в період 1990-2003 років, млн кВт., наведено в табл. 1.1.

Таблиця № 1.1

Рік	Споживання (Брутто) - всього	Відпуск споживачам (Нетто)
1990	268 290	227 236
1991	262 438	221 647
1992	246 300	206 064
1993	227 171	187 906
1994	200 575	163 521
1995	189 419	151 254
1996	179 430	139 801
1997	176 630	134 387
1998	171 168	128 080
1999	167 835	124 805
2000	166 562	122 873
2001	168 869	122 516
2002	169 899	123 445
2003	174 687	129 340

Структура споживання електроенергії в Україні наведена на рис. 1.2.

Енергозбереження засобами промислового електропривода

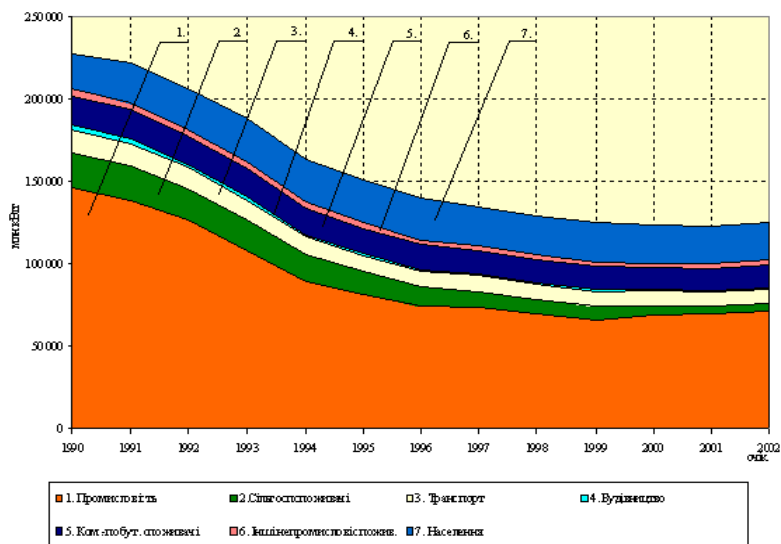


Рис 1.2

Структура споживання електроенергії в період 1990-2003 років, млн кВт·год. наведена в табл. 1.2

Таблиця № 1.2

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
1.Промисловість	146473	138185	126343	108022	88566	81067	73762	72869	68855	65994	68720	69805	69851	73767
2.Сільгоспспоживачі	20383	20775	19061	18406	16758	13589	11890	10004	8840	7852	5450	4155	3832	3631
3. Транспорт	14413	13592	12483	12111	10834	10278	10037	9615	9778	9573	9468	8888	8948	9307
4. Будівництво	2545	2461	2123	1985	1500	1264	1043	874	792	700	658	690	708	777
5. Ком.- побутові споживачі	18084	18241	17219	16705	15722	14807	14497	13917	13734	13929	13266	13342	13780	14130
6. Інші непромислові споживачі	4091	4132	3927	3779	3377	3242	3168	3142	3126	3119	2994	3173	3380	3872
7. Населення	21247	24260	24909	26898	26764	27008	25405	23965	22954	23638	22317	22462	22944	23852

Споживання електроенергії за 2003 рік: промисловість – 57,0%; сільське господарство – 2,8%; транспорт – 7,2%; будівництво – 0,6%; комунально-побутовий сектор – 10,9%; населення – 18,4%, ін. – 3,0%. В промисловості: 30,0% – металургійна; 8,2% – енергетична; 5,2% – хімічна і нафтохімічна; 5,2% – машинобудівна; 8,4% – інша.

Динаміка експорту з України в період 1990 – 2003 років зображена на рис. 1.3.

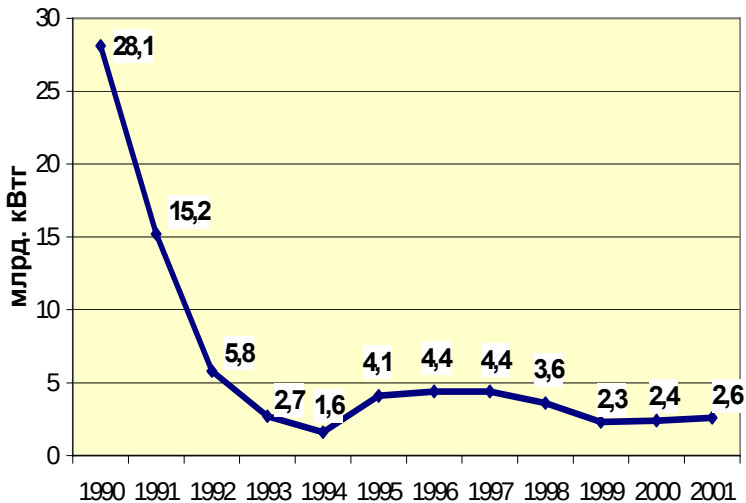


Рис. 1.3

Через спад рівня виробництва в країнах колишньої Ради економічної взаємодопомоги (РЕВ) – основних імпортерів української електроенергії, та завдяки їх активним діям щодо інтеграції в економіку західних країн, експорт електроенергії з 28,1 ТВтг знизився до 2,6 ТВтг. Паралельна робота з енергосистемами Центральної Європи була припинена, і експорт здійснювався тільки за направленими передачами з виділенням енергоблоків на Бурштинській та Добротвірській ТЕС. Наслідком зниження попиту та експорту було зменшення завантаження електростанцій та виробництва електроенергії в Україні.

Співвідношення встановленої потужності та виробництва електроенергії різними генеруючими джерелами станом на 2003 рік зображено на рис. 1.4.

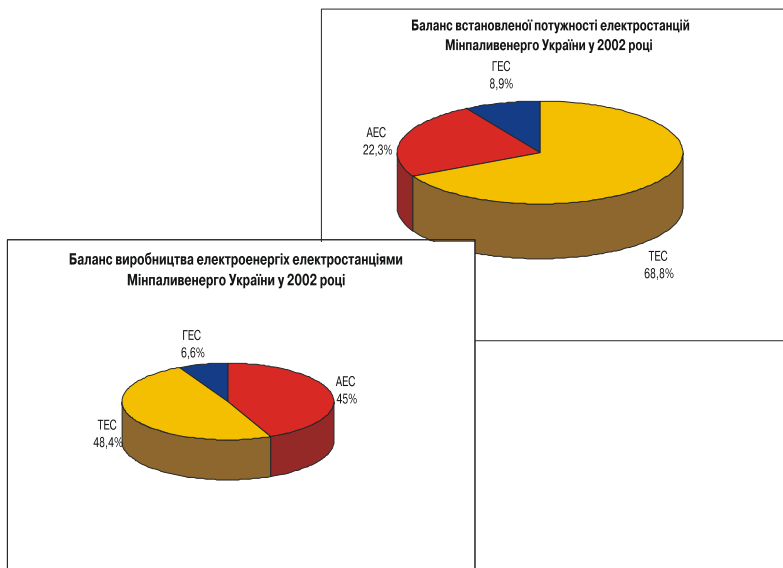


Рис. 1.4

Встановлена потужність електростанцій України наведена в табл. 1.3

Таблиця № 1.3

		1998	1999	2000	2001	2002	2003
ТЕС	млн кВт	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4	36,4
	%	67,5	67,5	68,8	67,5	68,8	68,8
АЕС	млн кВт	12,8	12,8	11,8	12,8	11,8	11,8
	%	23,8	23,8	22,3	23,8	22,3	22,3
ГЕС	млн кВт	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
	%	8,7	8,7	8,9	8,7	8,9	8,9
Усього	млн кВт	53,9	53,9	52,9	53,9	52,9	52,9

Виробництво електричної енергії електростанціями Мінпаливенерго України наведено в табл. 1.4. Загальне виробництво електроенергії в Україні в 2003 р. склало 179579,4 млн кВтг (з них блок-станціями і комунальними ТЕЦ – 8864,2 млн кВтг)

Таблиця №1.4

ТЕС	Млрд кВтг	2001	2002	2003
	Відсоток від загального виробництва	82,1	77,9	80,0
АЕС	Млрд кВтг	49,9	47,0	46,9
	Відсоток від загального виробництва	72,1	78,0	81,4
ГЕС	Млрд кВтг	41,8	47,1	47,7
	Відсоток від загального виробництва	11,4	9,7	9,3
Всього	Млрд кВтг	8,3	5,9	5,4
	Млрд кВтг	172,5	165,6	170,7

Останнім часом атомна енергетика стала завойовувати довіру в багатьох країнах, знаходить другий подих. За даними МАГАТЕ, у 31-й країні світу на 31.12.2000 р. діяло 438 реакторів загальною потужністю 351 327 МВт, що склало 16% у загальному виробництві електроенергії. У структурі світового споживання палива атомна енергетика на сьогодні складає близько 6%, а біля 89% приходить ся на органіку. Всі нетрадиційні джерела енергії – всього 2%.

У світі за останні 30 років на ТЕС використано 76 млрд т вугілля, 3млрд т мазуту, 3 трлн куб.м газу, а на АЕС – 0,2 млн т ядерного палива. Структура споживаного палива в останні роки на теплових електростанціях України має такий вигляд: вугілля – 68,5%; нафта (мазут) – 4,1%; газ – 27,4%.

Екологічні наслідки: лише 1 ТЕС у 1000МВт за рік спалює 2,5 млн т вугілля, «виробляючи» при цьому 6,5 млн т вуглекислого газу CO₂; 9тис.т окису сірки; 4,5тис.т окису азоту; 490т сполук важких металів і 700тис.т попелу. Крім того, теплова електростанція, що працює на вугіллі є джерелом переносу радіоактивних речовин з-під землі в атмосферу (про це мало хто говорить). Так, у золі після спалювання вугілля, відсоток змісту Th, Ra та інших радіоактивних елементів значний.

Спалювання органічного палива призводить до щорічного викиду 27 млрд м³ вуглекислого газу (CO₂) і мільйонів тонн оксидів сірки й азоту в атмосферу. Електроенергія АЕС забезпечує запобігання емісії 800 млн т діоксиду вуглецю щорічно. Для досягнення такого ж ефекту з доріг Європи треба було б забрати 200млн автомобілів.

Комісія ЄС підрахувала вартість 1кВтг електроенергії з урахуванням екологічних збитків: втрати при виробленні 1кВтг на вугільній станції складають 6,4 цента; на газовій – 2,8 цента; на атомній – 0,1 цента.

За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), потреби людства в енергії з 1997 р. по 2020 р. зростуть на 57%. Частка атомної енергетики і поновлюваних джерел у загальному обсязі енергоносіїв складе 10%, а в електроенергетиці – 24%. Сумарна потужність АЕС складе 570ГВт, а до 2050 року зросте до 1100ГВт.

В Україні діє потужний, високорозвинений електроенергетичний комплекс із повним технологічним циклом вироблення, розподілу, збуту електричної і теплової енергії. Основа електроенергетики України – Об'єднана енергетична система, що здійснює централізоване енергопостачання промисловості і населення країни, взаємодіє з енергосистемами сусідніх країн, забезпечує експорт і імпорт електроенергії. Вона поєднує 8 регіональних електроенергетичних систем, зв'язаних між собою системоутворюючими і міждержавними ЛЕП напругою 750, 330-500, 220 кВ. Вироблення електроенергії здійснюється тепловими, атомними і гідроелектростанціями 7 енергогенеруючих компаній і акціонерних товариств. Її розподіл виконує 27 енергопостачальних компаній, 13 з яких приватизовані. Передача електричної енергії від енергогенеруючих компаній і акціонерних товариств енергопостачальним компаніям здійснюється магістральними електромережами і розподільними – до споживачів.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА. Установлена потужність теплових електростанцій України на 01.01.2003 р. становила 36,4 млн кВт або 68,8 % загальної встановленої потужності. На ТЕС експлуатується 104 енергоблоки потужністю від 150 до 800 МВт, 90 з яких – на вугіллі. Комбіноване виробництво електричної і теплової енергії здійснюється на ТЕЦ, що входять до складу систем централізованого теплопостачання й охоплюють майже 63% побутових споживачів. Загальна потужність ТЕЦ складає 7,1 млн кВт. Питома вага електростанцій у відпусканні тепла для потреб централізованого теплозабезпечення сягає 23%.

АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА. Атомна енергетика України є потужною й ефективною галуззю. Зараз АЕС виробляють 45,3% всієї електроенергії України. До структури ядерно-енергетичного комплексу України входять:

- державний департамент ядерної енергетики в складі Міністерства палива й енергетики України;
- 5 атомних електростанцій у складі НАЕК «Енергоатом»;
- підприємства атомної промисловості;
- державні науково-дослідні центри, медико-санітарні частини, акціонерні підприємства, державний пакет акцій яких знаходиться в керуванні Мінпаливенерго. Після зупинки 15.12.2000 р.

енергоблоку №3 ЧАЕС загальна встановлена потужність 4-х атомних електростанцій України становить 11,8 млн кВт.

ГІДРОЕНЕРГЕТИКА. Установлена потужність ГЕС України складає 4,7 млн кВт або 8,9% від загальної встановленої потужності електростанцій. ГЕС відіграють істотну роль у покритті пікових навантажень енергосистеми. У Дніпровський каскад входять шість ГЕС сумарною потужністю 3,7 млн кВт, а з урахуванням Київської ГАЕС — 3,9млн кВт. Вони підпорядковані енергогенеруючій компанії ГАГК «Дніпрогідроенерго».

НЕТРАДИЦІЙНА ЕНЕРГЕТИКА. До нетрадиційних поновлюваних джерел енергії (НДЕ), що вважаються перспективними для України, належать такі: енергія вітру, сонячна (геліоенергетика), геотермальна енергія, біомаса, а також енергія малих водотоків. В 2003 р. НДЕ вироблено 7,9 млн кВтг електроенергії.

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ. Електричні мережі Мінпаливенерго України нараховують понад 1млнкм повітряних і кабельних ліній (ПЛ і КЛ) електропередачі всіх класів напруги, а також 206846 одиниць трансформаторних підстанцій (ТП) напругою 6-750 кВ загальною потужністю 202204МВА. Електропостачання промислових і побутових споживачів України здійснюється в основному за допомогою 27 акціонерних енергопостачальних компаній, що виконують експлуатаційне обслуговування розподільних електромереж напругою 0,4-150 кВ. Магістральні електричні мережі напругою 220-750 кВ і міждержавні напругою 35-800 кВ є власністю держави. Їх експлуатує одна з компаній Мінпаливенерго України НЕК «Укренерго», що забезпечує постійну і надійну роботу Об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України, здійснюючи оперативно-технологічне керування ОЕС.

Для експлуатації електроенергетичного господарства в складі НЕДО «Укренерго» за регіональною ознакою утворено 8 електроенергетичних систем. У цілому Мінпаливенерго нараховує 131 підстанцію напругою 220 кВ і вище загальною потужністю 76785 МВА. Довжина ПЛ напругою 220-750кВ складає майже 22тис.км. Зараз в Україні функціонує 7 підстанцій напругою 750 кВ загальною потужністю 15622МВА.

Це такі підстанції: Західно-Українська, Вінницька, Запорізька, Дніпровська, Донбаська, Південно-Донбаська, Західно-Донбаська. Довжина ПЛ електропередачі напругою 750кВ складає 4,1тис.км. Існуючі магістральні електричні мережі енергосистеми України забезпечують у повному обсязі необхідну при розподілі енергетичних потоків і надійну видачу потужностей АЕС у нормальних режимах.

Розподільні електричні мережі напругою 0,4-150кВ охоплюють усю територію України і виконують в основному функцію розподілу і передачі електричної енергії безпосередньо споживачу.

Однією з проблем української енергетики є те, що їй бракує маневрових потужностей, які дозволяють покривати попит на електроенергію під час пікових навантажень, а також перетоки електроенергії. За 5 місяців 1998 р. українська енергетика була в зимовій кризі, (дефіцит потужності складав понад 4 млнкВт) і у весняній кризі (надлишок потужності складав майже 7-8 млнкВт). Частота напруги коливалася від мінімального рівня 49,1 Гц до максимально припустимого рівня – 50,4 Гц. З серпня 2001 року енергосистема України перейшла на паралельну роботу з ОЕС Росії, і ситуація з частотою стабілізувалася.

Основні показники роботи ОЕС України в перспективі до 2030 року наведені в табл. 1.5.

Таблиця № 1.5

Рік	Встановлена потужність електростанцій, млн.кВт	Виробництво електроенергії, млрд.кВтг	Споживання електроенергії (брутто), в ОЕС України, млрд.кВтг.	Максимум навантаження ОЕС, млн.кВт
2002	52,9	171,7	169,9	28
2003	52,9	173	174,7	28,2
2004	53,4	174	170	28,3
2005	54,9	175	170	28,5
2010	57,3	190	185	30
2015	58,7	210	202	32
2020	59,7	230	222	35
2025	62	260	250	38
2030	65	280	270	40

Перспективна структура потужностей за генеруючими джерелами зображена на рис. 1.5.

Розділ 1

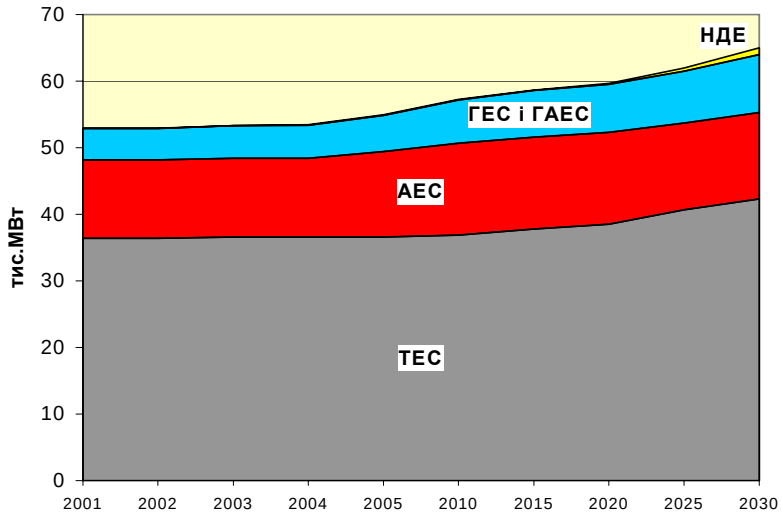


Рис. 1.5

Структура потужностей за генеруючими джерелами на перспективу до 2030 року, млнВт наведена в табл. 1.6

Таблиця № 1.6

Рік	Тип генеруючих джерел			
	ТЕС	АЕС	ГЕС і ГАЕС	НДЕ
2001	36,4	12,8	4,7	0,04
2002	36,4	11,8	4,7	0,04
2003	36,4	11,8	4,7	0,05
2004	36,6	11,8	5	0,05
2005	36,6	12,8	5,5	0,06
2010	36,9	13,8	6,5	0,08
2015	37,8	13,8	7	0,1
2020	38,5	13,8	7,2	0,2
2025	40,7	13	7,8	0,5
2030	42,3	13	8,7	1

Баланс виробництва електроенергії до 2030 року зображений на рис. 1.6.

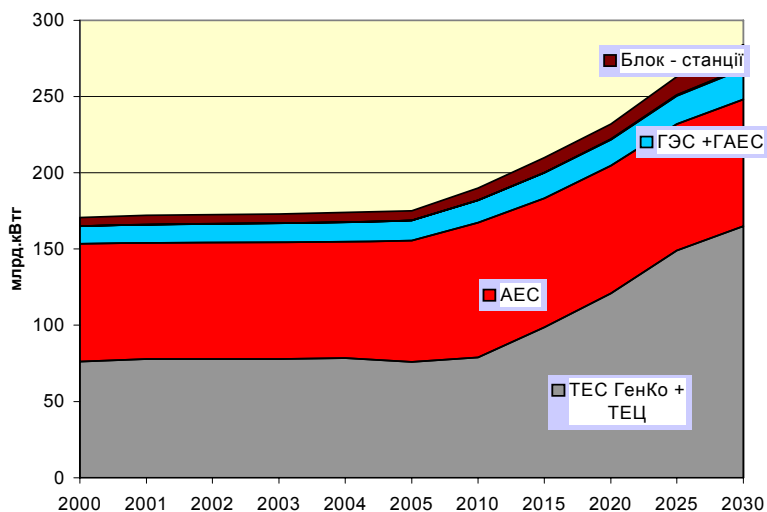


Рис 1.6

Баланс виробництва електроенергії за генеруючими джерелами на перспективу до 2030 року, млрд кВт год. наведено в табл. 1.7.

Таблица № 1.7

	ТЕС ГенКо + ТЕЦ	АЕС	ГЭС + ГАЕС	НДЕ	Блок - станції
2003	80,0	81,4	9,3	0,0079	8,9
2004	78,5	76,5	12,7	0,009	8,9
2005	76	79,5	13,2	0,01	8,9
2010	79	88,2	14,8	0,05	9
2015	98,6	84,6	16,7	0,1	10
2020	121	83,6	17,2	0,2	10
2025	149	83	18,5	0,5	12
2030	165	83	20	1	15

Енергозбереження — це комплекс заходів, спрямованих на раціональне використання енергетичних ресурсів. У результаті проведення цих заходів знижується потреба в паливно-енергетичних ресурсах на одиницю кінцевого продукту і зменшується шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Механізм втілення енергозбереження в життя — реалізація законодавчих, організаційних, економічних, технічних та інформаційних заходів, спрямованих на ефективне використання енергетичних ресурсів і поліпшення стану навколишнього середовища.

Крім поняття «енергозбереження» існують ще енергоефективність, енергоменеджмент, енерговикористання, енергоаудит, енергоконсалтинг...

Енергоефективність — властивість устаткування, чи технології виробництва, що характеризує міру використання енергії на одиницю кінцевого продукту. Енергоефективність оцінюється за допомогою показників як кількісно (кВтг, тонни умовного палива, кДж на одиницю кінцевого продукту), так і якісно (низька, висока).

Енергоменеджмент — керування раціональним використанням енергії на всіх стадіях її виробництва, передачі, розподілу і споживання, включаючи комплексне оптимальне розв'язання технічних, економічних і екологічних проблем, пов'язаних з цим процесом.

Енерговикористання — комплекс дій персоналу об'єкта, роботи його устаткування і технологій, пов'язаних із процесами від виробництва енергії до її споживання.

Енергоаудит — складова енергоменеджменту, зорієнтована на обстеження об'єкта з погляду його енерговикористання (виявлення фактів нерационального використання енергії, визначення заходів для енергозбереження, оцінки технічних і економічних можливостей щодо їх реалізації). Цей вид діяльності спрямований на зменшення споживання енергетичних ресурсів суб'єктами господарювання за рахунок підвищення ефективності використання енергії.

Енергоконсалтинг — консультативна діяльність, спрямована на роз'яснення переваг реалізації енергозбереження, надання практичної допомоги в розв'язанні енергетичних проблем замовника, вибір і обґрунтування енергоефективних рішень, популяризацію знань, навчання персоналу.

Енергосервісна компанія здійснює енергоконсалтингову діяльність в поєднанні з пошуком інвесторів для реалізації конкретних проєктів, енергозбереження чи сама виступає як такий інвестор.

Оскільки загальне визначення енергії — це потужність помножена на термін роботи, то одиницею вимірювання електричної енергії є кілоВат — година (кВт·г). Основними величинами і параметрами, за допомогою яких можна охарактеризувати електричну

енергію є загальновідомі: електрична напруга – U , (В); електричний струм – I , (А); повна, активна і реактивна потужності – S , P , Q у кілоВольт-Амперах ($\text{кВ} \cdot \text{А}$), кіловатах (кВт) і кіловольт-амперах реактивних (квар), відповідно; коефіцієнт потужності – $\cos\phi$, частота – f (Гц).

Електрична енергія має ряд особливостей:

- безпосередньо не підлягає візуальному сприйняттю;
- легко перетворюється в інші види енергії (наприклад, у теплову, механічну);
- досить просто і з великою швидкістю передається на великі відстані;
- можливий її розподіл в електричних мережах;
- проста у використанні за допомогою машин, установок, приладів;
- дозволяє змінювати свої параметри (напругу, струм, частоту);
- зручна для контролю і керування;
- якість її визначає якість роботи устаткування, що споживає цю енергію;
- якість енергії в місці виробництва не може бути гарантією її якості в місці споживання;
- нерозривність у часовому вимірі процесів виробництва і споживання енергії;
- процес передачі енергії супроводжується її втратами.

Електричну енергію передає електромагнітне поле провідника. Цей процес має хвильовий характер, причому частина електроенергії, що передається, витрачається в самому провіднику, тобто втрачається. Звідси впливає поняття «втрати електроенергії». Втрати електроенергії є у всіх елементах електричної системи: генераторах, трансформаторах, лініях електропередачі тощо, а також у електроприймачах (електричних двигунах, електротехнологічних пристроях і агрегатах).

Нехай коефіцієнт корисної дії теплової електростанції дорівнює 33%. Це означає, що з 100 цистерн палива, яке надійшло на теплову електростанцію, більш ніж 66 викидається в навколишнє середовище у вигляді тепла. Якщо ще врахувати витрати енергії на видобуток палива, його транспортування, передачу електричної енергії, то виявляється, що з 100 цистерн палива раціонально використовується лише 20, а 80 цистерн викинуто в навколишнє середовище. Співвідношення раціонально використаної і витраченої енергії просто вимагає радикальної зміни цих величин.

Загальна втрата електроенергії складається з двох частин: номінальних втрат, що визначаються умовами роботи при номінальних режимах і оптимальному виборі параметрів системи електропостачання, і додаткових втрат, обумовлених відхиленням режимів і параметрів від номінальних значень. Економія електроенергії в системах електропостачання ґрунтується на мінімізації як номінальних, так і додаткових втрат.

Заходи щодо ефективного використання електричної енергії варто вибирати, виходячи з принципу досягнення мінімуму витрат при виконанні умов надійності системи електропостачання і якості електричної енергії. Необхідно вживати заходи щодо зниження втрат і підвищення рівня експлуатації елементів системи електропостачання.

Основним напрямом в галузі енергозбереження є економія електроенергії при її передачі, розподілі і використанні. Реальне енергозбереження стосується питань роботи електропостачальних мереж, перетворювачів енергії всіх типів і технологічних механізмів.

Енергозберігаючими заходами при передачі електроенергії є:

- раціональний вибір рівня напруги мережі живлення і роду струму (постійний чи змінний);
- прийняття економічно доцільного перетину проводів і кабелів;
- підвищення коефіцієнта потужності;
- наближення джерел живлення до споживачів;
- оптимізація графіків навантажень тощо.

Витрати електроенергії на її передачу непродуктивні, тому необхідно зводити їх значення до мінімуму. В електричних мережах України втрати (теоретичні) електричної енергії складають близько 11%. Фактично у 2002 році вони склали 20,04% — завдяки відсутності належного обліку електричної енергії, наявності неефективної системи управління, яка існує в державі. У розвинутих країнах цей показник значно нижчий. Наприклад, у ФРН втрати в мережах складають 6,5%.

Ефективність впровадження енергозберігаючих заходів споживачами електроенергії може бути значно вищою, оскільки понад 90% виробленої енергії споживається системами електропривода, електротехнологічними й освітлювальними установками. Найбільші резерви енергозбереження закладені в удосконаленні електропривода, на частку якого приходить близько 60% усієї споживаної електроенергії. У деяких галузях промисловості спожив-

вання електроенергії електроприводом досягає 80%. Зменшення швидкості двигуна до швидкості робочого механізму допомагає заощаджувати енергію і поліпшує керування технологічним процесом. У той же час про економічність привода говорити рано, хоча б у силу малих фактичних значень його коефіцієнтів завантаження.

Електропривод у порівнянні з іншими типами приводів має ряд переваг:

- робота без відходів і безшумність створює комфорт для людей;
- високий ККД, тобто виділяються менші теплові втрати.

Внаслідок цього зменшуються габарити устаткування і площа охолодження;

- електропривод регульований і оборотний.

Електроприводи зі складним, складно керованим технологічним процесом складають невелику частку від загального числа. Основна ж їх частина — прості, звичайно нерегульовані масові пристрої, як наприклад, вентилятори, насоси, конвеєри, підйомні крани, механізми в переробній промисловості, будівництві тощо. Саме ці об'єкти є основними споживачами електроенергії і тут можлива реальна її економія.

Розглянемо процеси, що впливають на енергозбереження в електроприводі і визначальні тенденції його розвитку:

- збільшення енергоємних технологій при зростаючій складності одержання енергії, дефіциті доступних енергоресурсів. Добути тонну палива і виробити відповідну кількість електроенергії приблизно вдвічі дорожче, ніж заощадити. Надалі ця різниця зростатиме;

- ускладнення технології, що призводить до збільшення частки регульованого чи керованого по пуску електропривода. Закінчується дискусія про можливі варіанти регульованого електропривода — практично однозначно вибір робиться на користь електропривода змінного струму;

- зростаючі вимоги створення умов для безаварійної роботи електропривода за рахунок підвищення ефективності керування режимами енерговикористання електричних машин, енергопостачальних мереж;

- бурхливий розвиток перетворювальної техніки (тиристорів, що запираються, силових транзисторів) та засобів керування (мікроелектроніки, мікропроцесорної техніки тощо);

- поява доступних кожному інженеру потужних обчислювальних засобів, що відкривають нові можливості раціонального проектування й оптимізації електропривода.

Тому актуальною є задача розробки і широкого впровадження енергозберігаючих заходів і засобів промислового електропривода.

2. БАГАТОРІВНЕВА СТРУКТУРА СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Електропривод — це електромеханічний пристрій, що здійснює кероване перетворення електричної енергії в механічну, а також зворотнє перетворення і призначений для надавання руху робочим машинам та механізмам. Електропривод є тою ланкою, що зв'язує енергосистему з технологічними установками. У деякій мірі електропривод виконує роль регулятора цих зв'язків.

Сучасний автоматизований електропривод є складною функціонально-взаємозалежною за елементами системою, яка являє собою конструктивну єдність електромеханічного перетворювача енергії (двигуна) і електричного перетворювача, що утворюють енергетичний (силовий) канал, а також пристроїв керування перетвореною енергією й інформаційно-вимірювальних, що складають керуючий канал. Електропривод забезпечує перетворення електричної енергії в механічну відповідно до алгоритму роботи технологічної установки.

Відмінною рисою сучасного регульованого привода змінного струму є наявність таких основних елементів (рис. 1.7):

- простого і надійного асинхронного чи синхронного двигуна, мінімізованого за масогабаритними, вартісними і енергетичними показниками;
- перетворювача частоти з ланкою постійного струму з інвертором на повністю керованих приладах і некерованим випрямлячем;
- датчиків енергетичних, механічних і технологічних параметрів регулювання, що забезпечують необхідну точність стабілізації координат у замкнутій системі;
- мікропроцесорної системи керування з функціями безпосереднього регулювання вихідних координат, формування законів широтно-імпульсного керування (ШІМ), діагностики, прогнозування, взаємодії з іншими локальними приводами.

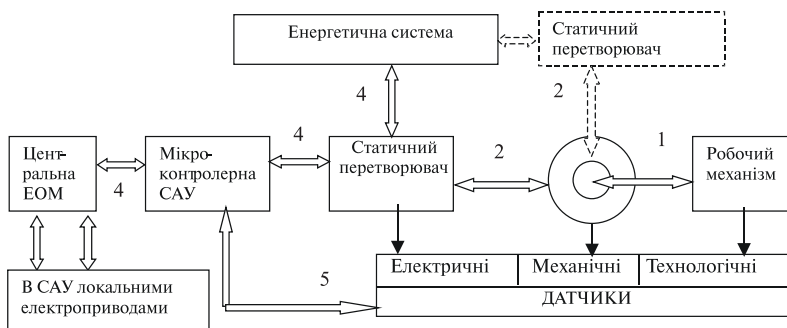


Рис. 1.7

Завдання об'єднання в єдину систему різних за природою функціонально-закінчених елементів електропривода покладається на багаторівневі сполучні пристрої. Це сукупність конструктивних, схемотехнічних і програмних засобів, що забезпечують безпосередню оптимальну взаємодію складених елементів привода з метою максимальної реалізації можливостей кожного з цих елементів.

Сполучний пристрій першого рівня характеризується механіко-енергетичною взаємодією двигуна і робочого механізму і є механічним, гідравлічним чи електромагнітним передавачем енергії від електричної машини на виконавчий механізм. Його функції зводяться до узгодження руху двигуна і виконавчого органу механізму при максимальному ККД передачі й усталеній роботі у всіх режимах. Останнє забезпечується узгодженням механічних характеристик двигуна і механізму відповідно до виразу:

$$\frac{M_J}{\Delta\omega} = \beta - \beta_c < 0,$$

де M_J – динамічний момент привода; $\Delta\omega$ – збільшення частоти обертання; β і β_c – жорсткості механічних характеристик двигуна і механізму.

Швидкодія механічної частини привода характеризується електромеханічною сталою часу T_m , що має порядок від десятків часток секунди до кількох секунд.

Другий і третій рівні – електроенергетичні. Для одержання двигуном електроенергії з необхідними параметрами амплітуди і

частоти напруги в кожній фазі, а також для керування і регулювання параметрів потоку енергії служить статичний перетворювач. Оскільки двигун – безперервний нелінійний елемент, а перетворювач – нелінійний дискретний елемент, то виникає необхідність в узгодженні їх роботи. Для одержання максимального ККД і найменшого коефіцієнта спотворення необхідно живити двигун квазісинусоїдальними струмом і напругою. На цих рівнях розв'язується завдання поліпшення енергетичних і динамічних характеристик привода. Швидкодія електроенергетичних рівнів характеризується електромагнітними сталими часу T_e , що мають порядок сотих і десятих часток секунди.

Четвертий рівень – інтерфейси локального керування і регулювання параметрів енергетичного каналу привода. Від організації даного інтерфейсу залежать функціональні і сервісні можливості привода, точність і швидкодія. Інтерфейс реалізований у вигляді портів, таймерів, цифроаналогових перетворювачів і підсилювачів формування сигналів керування силовими транзисторами або тиристорами.

П'ятий рівень – пристрої інформаційно-вимірювальної системи привода. Вимірюваними є фізичні величини:

- електричні (струм, напруга, ЕРС тощо)
- механічні (момент, швидкість, переміщення тощо)
- технологічні (тиск, температура тощо)

Пристрої п'ятого рівня здійснюють перетворення сигналів з первинних датчиків, гальванічну розв'язку, підсилення, інтегрування й аналого–цифрове чи імпульсно–цифрове перетворення сигналів для подання їх у форматі мікроконтролерної системи керування. Швидкодія такого рівня визначає точність і швидкодію четвертого рівня і забезпечується вибором принципів перетворення сигналів, характером обміну в цифровій системі і конкретній апаратній реалізації.

Мікроконтролерна САУ містить енергетичну модель електро-механічного пристрою, що враховує чотири складових: мережі, перетворювальний пристрій, двигун і технологічний механізм у площинах споживання енергії, її використання і енергоуправління.

Шостий рівень – інтерфейс міжприводного обміну, реалізує координацію роботи локальних електроприводів між собою і зв'язок з центральною ЕОМ вищого рівня ієрархії. Обмін, як правило, здійснюється в цифровому коді з високою швидкодією за наявності великої оперативної пам'яті для статистичної обробки інформації, з контролем поточного стану кожного привода і можливістю інтерактивного режиму зв'язку з оператором.

Останні роки ознаменувалися значними успіхами силової електроніки — було освоєно промислове виробництво біполярних транзисторів з ізольованим затвором IGBT, тиристорів, що запираються GTO, тиристорів, що комутуються з інтегрованим керуванням IGCT, а також силових інтелектуальних модулів IPM з вбудованими засобами захисту ключів та інтерфейсами для безпосереднього підключення до мікропроцесорних систем керування. Зростання ступеня інтеграції в мікропроцесорній техніці і перехід від мікропроцесорів до мікроконтролерів з вбудованим набором спеціалізованих периферійних пристроїв зробили необоротною тенденцію масової заміни аналогових систем керування приводами на системи прямого цифрового керування.

Під прямим цифровим керуванням розуміється не тільки безпосереднє керування від мікроконтролера кожним ключем силового перетворювача, але і забезпечення можливості прямого введення в мікроконтролер сигналів різних зворотних зв'язків (незалежно від типу сигналу: аналоговий чи цифровий) з подальшою програмно—апаратною обробкою всередині мікроконтролера. Таким чином, система прямого цифрового керування орієнтована на відмову від значного числа додаткових інтерфейсних пристроїв і створення одноплатних контролерів керування приводами. В решті решт вбудована система керування проектується як однокристальна і разом із силовим перетворювачем та виконавчим двигуном конструктивно інтегрується в одне ціле — мехатронний модуль руху.

Електроприводи, керовані по розвинутих алгоритмах за допомогою мікроконтролерів, мають ряд переваг:

- збільшення енергетичної ефективності системи — регулювання швидкості знижує втрати потужності;
- удосконалення функціонування — цифрове керування може додати такі властивості, як інтелектуальні замкнуті контури, зміна частотних властивостей, діапазону контрольованих несправностей і здатність до взаємодії з іншими системами;
- спрощення електромеханічного перетворювача енергії — регульовані приводи дозволяють усунути необхідність у трансмісіях, коробках передач, редукторах;
- простота відновлення програмного забезпечення — системи на базі мікроконтролерів із флеш-пам'яттю можуть швидко змінювати за необхідності свій алгоритм і регульовані змінні.

З виконанням приводів регульованими складність системи часто збільшується. Основною умовою їх використання є збере-

ження загальної вартості системи в обґрунтованих межах. Для ряду систем, особливо в побуті, загальна вартість повинна бути еквівалентна вартості нерегульованого варіанта.

Енергозбереження в електроприводі є частиною загального процесу ефективного використання електроенергії і визначається трьома процесами:

- енергоспоживанням;
- енерговикористанням споживаної енергії;
- енергоуправлінням процесу енергоспоживання.

Енергоспоживання — процес формування складових потужності на вході перетворювача при роботі електропривода. Цей процес характеризується залежностями активної, реактивної і потужності перетворення від швидкості і моменту двигуна.

У питаннях енергоспоживання необхідне чітке уявлення про характер перетворення енергії, складові потужності, про показники якості електроенергії (ПЯЕ), їх вплив на характеристики електромеханічних перетворювачів.

Енерговикористання — використання потужності споживаної з мережі. Цей показник характеризує якісну сторону процесу енергоспоживання. Він показує, наскільки ефективно використання споживаної електроенергії, яка частина її належить до втрат, а яка — до корисної потужності, що йде на вал робочої машини, як розподіляються втрати, що визначають робочий режим електродвигуна, його температуру і надійність.

У питаннях енерговикористання найважливішим є баланс складових потужності, що дозволяє виявити механізми старіння електроустаткування на додачу до відомих і пов'язаних в основному з термічним характером впливу енергопроцесів на робочі й експлуатаційні характеристики.

Енергоуправління — процес формування режимів енергоспоживання за допомогою технічних пристроїв і систем, що впливають на кола керування електроприводом та перетворювальними пристроями, що живлять ці кола. До енергоуправління варто віднести керування перерозподілом втрат в електричних двигунах, оптимізацію втрат, мінімізацію нагрівання активних частин електричної машини, зниження рівнів споживаної реактивної потужності і генерування гармонік струму. При цьому варто мати на увазі те, що зазначені вище позитивні властивості система електропривода здобуває не за рахунок використання деяких інших технічних засобів, а за рахунок використання регульовальних можливостей системи електропривода.

Такий енергетичний підхід, що базується на спільності процесів енергоспоживання, енерговикористання і енергоуправління, зв'язує в єдиний електромеханічний комплекс елементи, що розглядалися раніше без взаємозв'язку: енергосистема, споживач (електропривод) і технологічна установка. Кожний з компонентів має свої регульовальні можливості в галузі керування енергоспоживанням, перерозподілом втрат тощо.

3. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Вибір базового ключового елемента відіграє вирішальну роль у конструюванні перетворювача будь-якого типу. Перетворення електроенергії постійно має потребу в ідеальному ключі, який повинен мати такі основні характеристики:

- великий струм (струм, що комутується, діюче, середнє і максимальне значення, ударний струм);
- висока напруга (імпульсна повторювана, неповторювана перенапруга, тривала постійна);
- швидке перемикання (короткий час затримки на вмикання і вимикання, малий час фронтів при комутації, малий час вмикання і вимикання);
- малі втрати (статичні і динамічні);
- високу частоту (швидке перемикання, низькі динамічні втрати);
- високу надійність (низька ймовірність відмовлення, висока енергетична і теплова стійкість, висока комутуюча здатність, висока електродинамічна стійкість);
- компактну конструкцію.

Ці ідеали в розробці приладів реалізуються двома шляхами: через структуру транзистора і через структуру тиристора, при цьому основною перевагою тиристора є низькі статичні втрати, а транзистора — його добра здатність до вимикання.

Протягом ряду десятиліть, з моменту промислового освоєння в 60-х роках, силовий тріодний тиристор на базі класичної чотирискладової р-п-р-п структури залишався практично єдиним напівпровідниковим приладом для перетворювальних пристроїв. Незмінність функціональних можливостей базових приладів приз-

вела до того, що основні схемні рішення по перетворювачах на їх основі тривалий час також залишалися незмінними.

Ситуація в силовій електроніці кардинально змінилася наприкінці 80-х років із промисловим освоєнням силових тиристорів, що запираються, (GTO – Gate – turn – off). На сьогодні основні статичні параметри GTO сумірні з такими для звичайних тиристорів. Головний недолік GTO – значні струми керування, що приводять до необхідності створення громіздких і потужних блоків керування та систем передачі енергії на керуючий електрод тиристорів. Саме ця обставина стримує широке використання GTO у перетворювачах.

До середини 90-х років з'явилися інші напівпровідникові прилади ключового типу – потужні біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor). Поступаючись GTO статичними параметрами, вони принципово перевершують їх по динаміці (насамперед, за часом вмикання і вимикання). Крім того, IGBT, що має в складі свого електрода керування польовий транзистор, не вимагає великих струмів для запуску процесів вмикання і вимикання, що спрощує систему керування.

На сьогодні транзистори IGBT випускаються, як правило, у вигляді модулів з одностороннім притискуванням і охолодженням, і тільки компанія «Toshiba Semiconductor Group» повідомляє про створення IGBT у таблетковому корпусі (PP HV IGBT – press – park – high – voltage IGBT), що дозволяє здійснити двостороннє охолодження приладу.

Деякі розробники прагнуть створити прилад, що поєднує кращі якості обох типів приладів, використовуючи переваги тиристора у ввімкненому стані, сполучаючи його з транзистором, як із кращим на етапі вимикання.

Тиристорна структура переважає за кількістю пропонованих приладів, тому що вони мають споконвічну здатність проводити великі струми з мінімальними втратами. Однак, до сьогоднішнього дня було лише кілька серйозних кандидатів на високовольтне застосування: GTO (тиристор) з його громіздким снаббером і IGBT (транзистор) із властивими йому великими втратами. Останні розробки показали перевагу приладів, що вдало комбінують кращі характеристики тиристорів і транзисторів, цілком задовольняючи вимогам відтворюваності (серійної придатності) і високої надійності.

Саме останнім часом з'явилася зовсім нова розробка, одночасно створена фірмою «ABB Semiconductors» і фірмою «Mitsubishi».

Це так званий тиристор, що комутується по електроду керування (Gate Commutated Thyristor – GCT) і має вбудований інтегрований блок керування – тиристор IGCT (Integrated GCT).

Тиристиори GCT – це напівпровідникові прилади, що базуються на GTO структурі, чие керуюче коло має таку низьку індуктивність, що перехід катод – емітер може бути закритий «миттєво», практично перетворюючи прилад у біполярний транзистор, що вимикається.

У цих приладах комплексно реалізовані вимоги до силового ключового елемента. GCT одночасно поєднує в собі симетричну таблеткову конструкцію з двостороннім тепловідводом, має мінімальне падіння напруги у ввімкненому стані, не вимагає високоенергоємних кіл живлення блоків керування, має достатню заводостійкість при невисоких динамічних втратах і, в силу особливостей необхідного керуючого імпульсу (крутизна струму запирання до 3000 А/мкс), відрізняються ідентичністю динамічних характеристик.

У результаті майже на порядок зменшується (у порівнянні з GTO) час комутації, знижуються комутаційні втрати. GCT можуть працювати безснабберної ємності. Тиристиори IGCT відкривають практичну можливість послідовного їх сполучення для створення високовольтних цілком керованих тиристорних вентилів. Крім того, у IGCT є інтегрований на одному кристалі з GCT зворотний швидко відновлюваний діод.

На світовому ринку представлена широка і швидко змінювана номенклатура силових напівпровідникових приладів. Їх конструкція стає усе досконалішою, потужність неухильно зростає. З'являється все більше альтернативних варіантів силових ключів для застосування в перетворювачах. Правильний вибір базового силового приладу визначає конструктивні, функціональні і вартісні переваги пристрою в порівнянні з аналогами, що використовують у своїй головній схемі менш вдалі для цього випадку прилади.

Параметри потужних напівпровідникових силових приладів різних типів наведено в табл. 1.8

Таблиця № 1.8

Тип приладу	Фірма-виготовлювач	Марка	I, А	U_{DRM} , В	U_{RRM} , В	ΔU , В
Традиційний тиристор SCR	«ABB Semiconductors»	5STP 34N5200	3350	4400	4200	2,54
GTO	«ABB Semiconductors»	5SGT 30J6004	3000	6000	17	3,35
IGC	«ABB Semiconductors»	5SHY 35L4502	4000	6000	19	2,65
GCT	«Mitsubishi»	PGC4000AX-90DS	4000	4500	19	2,65
IGBT (PP HV IGBT)	«Toshiba Semiconductor Group»	ST1200FXF21	1200	3300	20	4,5
Примітки: 1. Струм I для традиційного тиристора – номінальний середній струм; для інших (повністю керованих) приладів – максимальний повторюваний струм, що комутується. 2. ΔU для традиційного тиристора визначається при амплітудному струмі $I_m = \pi I$. Значення ΔU для інших (повністю керованих) приладів визначаються при максимальному повторюваному струмі, що комутується, I. 3. Позначення U_{DRM} , U_{RRM} для IGBT слід розуміти як U_{CES} , U_{GES} відповідно.						

Порівняння споживчих характеристик вибраних електронних ключів наведено в табл. 1.9

Таблиця № 1.9

Тип приладу	Переваги	Недоліки	Ціна, у. о. 1 у.о=260 €
Традиційний тиристор SCR	Найнижчі втрати у ввімкненому стані. Найвища переважна спроможність. Висока надійність. Легко сполучаються паралельно і послідовно.	Не здатний до примусового запирання по керуючому електроду. Низька робоча частота.	≈ 0,5
GTO	Здатність до керованого запирання. Порівняно висока переважна спроможність. Можливість послідовного сполучення. Робочі частоти до 250 Гц при напрузі до 4 кВ.	Високі втрати у ввімкненому стані. Складні системи керування і передачі енергії на тиристор. Дуже великі втрати в системі керування. Великі втрати на перемикання.	≈ 1
IGCT	Здатність до керованого запирання. Переважна спроможність та ж, що й у GTO. Низькі втрати у ввімкненому стані на перемикання. Робоча частота – до одиниць кГц. Вбудований блок керування. Можливість послідовного сполучення.	Не виявлені через відсутність достатнього досвіду експлуатації.	≈ 1,5
IGBT (PP HV IGBT)	Здатність до керованого запирання. Найвища робоча частота (до 10 кГц). Проста неенергоємна система керування. Вбудований драйвер.	Дуже високі втрати у ввімкненому стані.	≈ 2

Наразі основними приладами силової електроніки у сфері струмів, що комутуються, до 50 А є:

- тиристори SCR;
- біполярні транзистори (BPT – Bipolar Power Transistor);
- польові транзистори з ізольованим затвором (MOSFET – Metal – Semiconductor – Field – Effect – Transistor);
- силові інтегральні схеми (Power IC);
- інтелектуальні силові інтегральні схеми (Smart Power IC).

В області струмів, що комутуються, понад 50 А основними приладами силової електроніки є:

- силові модулі на базі біполярних транзисторів BPT;
- силові модулі на базі IGBT;
- тиристори SCR;
- тиристори, що запираються, GTO;
- тиристори, що комутуються, GCT;
- тиристори, що комутуються, з інтегрованим керуванням IGCT;

Обсяг продажу силових напівпровідникових приладів у 1996 р. склав понад 13 млрд дол. США. Структура світового ринку приладів силової електроніки зображена на рис. 1.8: а – приладів до 50 А (1 – силові ІС; 2 – інтелектуальні ІС; 3 – біполярні транзистори; 4 – MOSFET; 5 – IGBT; 6 – тиристори; 7 – діоди); б – прилади понад 50 А (1 – біполярні модулі; 2 – IGBT модулі; 3 – тиристори; 4 – GTO; 5 – діоди).

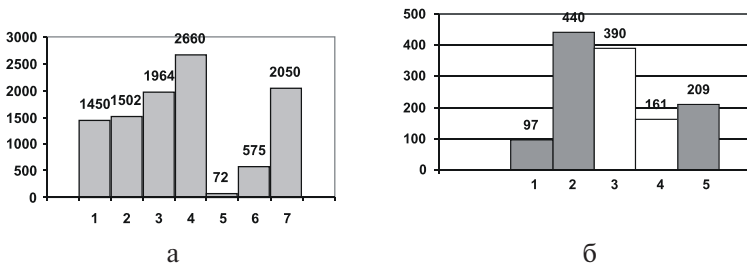


Рис. 1.8

Значну частку ринку приладів у діапазоні до 50 А складають силові польові транзистори з ізольованим затвором – MOSFET (25%). Ці прилади, маючи малі статичні та динамічні втрати (мінімальні втрати на керування), незначний час перемикання (робоча частота до 1 МГц), практично цілком витиснули з низьковольтних пристроїв (нижче 200 В) всі інші типи силових напівпровідникових приладів. Новітні технології дозволили знизити питомий опір відкритого транзистора до одиниць мОм.

Істотну частку ринку займають силові інтегральні схеми (14%) та інтелектуальні силові інтегральні схеми (15%). Обсяг виробництва останніх у 1996 р. перевищив 1,5 млрд Дол. США і продовжує зростати.

Силові біполярні транзистори в діапазоні до 50 А складають 19% ринку і знаходять застосування головним чином у масовому і дешевому побутовому та промисловому устаткуванні.

У сфері середніх напруг (500 – 600 В і вище) найліпшими для застосування є біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT. Однак в області $I < 50$ А частка IGBT у загальних обсягах продажу складає близько 1%. Це пояснюється великою вартістю IGBT у порівнянні з BPT.

Серед великої потужності ($I > 50$ А) найпоширенішими приладами є дискретні IGBT і силові модулі на їх основі (35% ринку).

За обсягами продажу цей клас приладів перевищив навіть сектор тиристорів (30%). Частка силових модулів на базі ВРТ складає лише 7% загальних обсягів і продовжує зменшуватися.

На сьогодні IGBT забезпечують комутацію струмів до 1800 А і напруг до 4,5 кВ. При цьому час перемикання біполярних транзисторів з ізольованим затвором лежить у діапазоні 200 – 400 нс. Поява в останні роки IGBT з напругою понад 1,2 кВ призвело до витиснення тиристорів, що запираються, (GTO) у пристроях потужністю до 1 МВт і напругою до 3,5 кВ.

Можливість роботи без застосування дорогих снабберних кіл (кіл формування траєкторії перемикання) для захисту від перевищення du/dt і di/dt , а також громіздких блоків керування, легкість послідовного сполучення IGC дозволяє застосування їх у високовольних перетворювачах потужністю 1 – 100 МВ • А.

За існуючої технічної можливості послідовного і паралельного сполучення прилади IGCT дозволяють нарощувати рівень потужності до кількох сотень МВ • А. Перший перетворювач потужністю 100 МВ • А, створений на IGCT, уже реалізований і знаходиться в експлуатації більше року, виправдуючи тим самим передбачуваний високий рівень надійності нової технології.

Технологія тиристорів має переваги в порівнянні з транзисторною технологією в здатності блокувати напругу понад 2,5 кВ, розподіл плазми подібний до розподілу плазми в діодній структурі, у результаті чого досягається оптимальне співвідношення між напругою у відкритому стані і блокуючою напругою.

Сфери переважного використання IGBT і IGCT наведені на рис. 1.9. Порівняльні характеристики високовольних інверторів, виконаних на IGBT і IGCT, наведені на рис. 1.10 і в табл. 1.10 (3 МВА, 600 Гц).

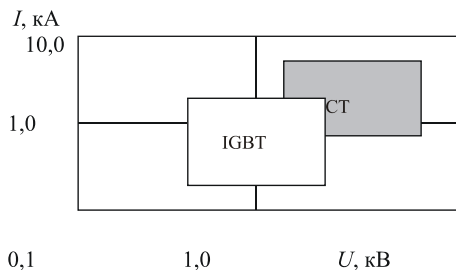


Рис. 1.9

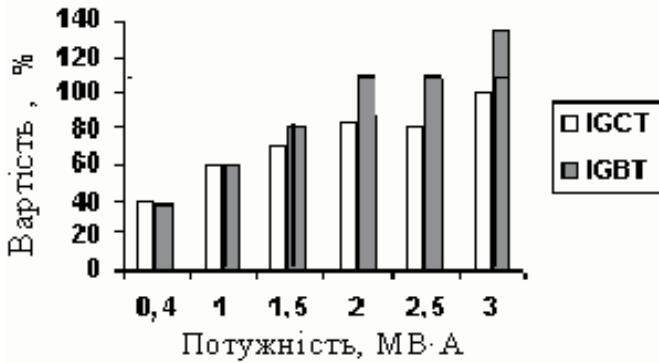


Рис. 1.10

Таблиця 1.10

Параметр	Тип	GTO	IGBT	IGCT
Число відмовлень за 10 ⁹ год (FIT)		7000	13000	2300
Втрати, кВт		72	45	26
Маса, кг		190	70	60
Об'єм, л		456	200	80
Об'єм, л		200	80	200
Термоцикли ($\Delta T = 80^\circ \text{C}$)		36×5	18×2,5	1×32
Модульність лк				

Прилад IGCT поєднує у собі оптимальну комбінацію доведених технологій тиристорів із властивими їм низькими втратами і безснабберної, високоефективної, вигідної технології вимикання шляхом впливу на керуючий електрод. Прилад IGCT — ідеальне рішення для застосування в галузі силової електроніки середньої і високої напруги. У цьому випадку практично не залишається зони для застосування GTO і SCR (як раніше і для силових біполярних транзисторів).

Унікальні характеристики МОП-керованих приладів вплинули практично на всі сторони теорії і практики силової електроніки.

У схемотехніці домінуючим став принцип комутації напруги. На зміну численним схемам примусової комутації прийшли класичні схеми перетворювачів. У переважній більшості перетворювачів постійного струму в змінний використовуються інвертори напруги.

Висока робоча частота МОП-транзисторів забезпечила повсюдне впровадження принципів широтно-імпульсної модуляції.

МОП-керовані прилади стимулювали розвиток силових модулів, у яких ключові елементи з'єднуються методами плівкової технології на спільній теплопровідній ізолюючій підкладці, утворюючи всю (або частину) силову схему перетворювального пристрою. Низький рівень втрат і мала потужність керування МОП-транзисторів дозволили реалізувати силові інтегральні схеми, у яких на одному кристалі технологічними прийомами виготовляються силові ключові елементи, схеми їх запуску і захисту, пристрою керування, регулювання і діагностики. Через наявність в їх складі елементів, що виконують логічні операції й автоматично забезпечують визначені режими роботи навантажень, такі пристрої одержали назву інтелектуальних (Smart Intelligent) схем.

Інтелектуальні схеми вплинули на розвиток силової електроніки, особливо в зоні невеликих потужностей і низьких напруг. Здійснюючи зв'язок між керуючими командами малої потужності і навантаженням, силові інтегральні схеми є фізично активними частинами перетворюючого пристрою. Силові інтегральні схеми дозволяють у кілька разів знизити масу, габарити, трудомісткість виготовлення і, як наслідок, собівартість устаткування, підвищуючи при цьому його надійність.

Однокристалні силові інтегральні схеми найширше застосовуються в автомобільній електроніці, як інвертори, контролери постійного і змінного струму.

Поява сучасних силових інтегральних схем змінило і характер виготовлення перетворювального устаткування, забезпечивши значне зниження частки ручної праці. Основні трудовитрати на виготовлення перетворювального устаткування переносяться на етап автоматизованого виробництва силових інтегральних схем. Завдяки цьому підвищується якість виготовлення. Наявність вбудованої діагностики забезпечує підвищення експлуатаційної надійності устаткування, що збільшується також через зменшення кількості дискретних елементів і монтажних з'єднань. Можливість роботи безпосередньо від мікроконтролерів розширює функціональні можливості силових інтегральних схем.

Якщо однокристалні силові інтегральні схеми випускають, головним чином, на низькі напруги (кілька десятків вольт), то гібридні схеми виготовляються практично на всі необхідні рівні напруги як промислових, так і побутових мереж. Щорічне зростання продажу цих елементів складає до 30%.

Перспективи розвитку різних приладів силової електроніки полягають у тому, що біполярні транзистори ВРТ через складність

і велику вартість схем керування, низьку швидкодію і стійкість до перевантажень — на сьогодні вже застарілий компонент. Однак швидкодіючі BPT поки мають важливу перевагу перед MOSFET за показником «потужність, що комутується/ціна» для діапазону напруг понад 400 В. Тому силові біполярні транзистори залишаються ефективним компонентом для дешевих масових застосувань (наприклад, ключові джерела живлення).

Тиристори SCR. Незважаючи на очевидні переваги: низьке падіння напруги (1,2 — 1,5 В для середнього діапазону напруг і небагато більше для високовольтного діапазону), висока густина струму, найвище значення показника «потужність, що комутується/площа кремнію», високі напруги (до 8 кВ), що комутуються, і струми (4кА), простота і низька вартість схем керування, стійкість до перевантажень по струму, висока надійність притисної таблетишкової конструкції, через один істотний недолік — неможливість вимикання по керуючому електроду, цей клас приладів силовій електроніці на сьогодні можна віднести до застарілого. Цей прилад більше і більше буде витіснятися повністю керованими приладами: IGBT і IGCT. Оскільки SCR має все-таки найвищі значення показника «потужність, що комутується/ціна», ці дві області застосування залишаються кращими для їх використання:

- побутові прилади, де ціна є визначальним чинником. Ринок триаків (575 млн дол. США в 1996 р.) особливо в комбінації «мікроконтролер + триак» буде збільшуватися, як потенційне рішення для дешевих масових застосувань;
- надпотужні і надсильнострумові застосування в перетворювачах із природною комутацією (високовольтні лінії передачі постійного струму, компенсатори реактивної потужності, випрямлячі для гальваніки, металургії тощо).

Поліпшення характеристик і розвиток SCR будуть пов'язані з об'єднанням деяких допоміжних функцій у високовольтному тиристорі (подібно захисту від перенапруг), створенням інтегральних дво-, чотири- і шестиключових тиристорних схем на одному кристалі. Розвиток триаків (симисторів) пов'язаний з поліпшенням стійкості до du/dt , сумісності керування з виходом мікроконтролера, розробкою нових корпусів.

Тиристори, що запираються, GTO і IGCT. Модернізація GTO за рахунок застосування нових технологій (буферного шару, «прозорого» емітера, поліпшення контролю часу життя за рахунок протонного випромінювання, об'єднання в одному пристрої зі схемою керування) дозволили в IGCT підвищити швидкодію, знач-

но скоротити статичні і динамічні втрати, забезпечивши роботу без снаббера в діапазоні напруг до 4,5 кВ і вище і струмів декількох кілоампер. Тому у високовольтних (понад 3,5 кВ) застосуваннях домінує положення займають IGCT. У розвитку IGCT у найближчі п'ять років намічаються такі етапи: безснабберне використання, розширення діапазону напруг, що комутуються, до 6 кВ і далі до 9 кВ, низькотемпературне зварювання, прилади з рідинним охолодженням, пластмасові корпуси, модулі з ізолюваною підкладкою.

Польові транзистори з ізолюваним затвором MOSFET. Маючи всі переваги по високих швидкостях комутації, низьких статичних і динамічних втратах, малій потужності керування, високій стійкості до перевантажень MOSFET є і будуть головними компонентами для низьковольтних застосувань і використання в інтелектуальних силових інтегральних схемах Smart IC.

Біполярні транзистори з ізолюваним затвором IGBT. На сьогоднішній день і в найближчому майбутньому цей клас приладів силової електроніки займає і буде займати домінуюче положення для діапазону потужностей від одиниць кіловат до одиниць мегават. Подальший розвиток IGBT пов'язаний з вимогами ринку і буде йти шляхом:

- підвищення діапазонів граничних струмів, що комутуються, і напруг (1-2 кА, 5–7 кВ);
- підвищення стійкості до перевантажень і аварійних режимів;
- зниження прямого падіння напруги;
- розробка нових структур із густиною струмів, що наближаються до тиристорної;
- розвиток інтелектуальних IGBT (з вбудованими функціями діагностики і захистів) та модулів на їх основі;
- створення нових високонадійних корпусів, у тому числі з використанням притискної конструкції.

Розвиток якісної силової напівпровідникової техніки на транзисторах IGBT і тиристорах IGCT вирішує ряд важливих задач підвищення енергетичної ефективності регульованого електропривода.

По-перше, повністю керована техніка дозволить радикально вирішити питання якості споживаної енергії (споживання реактивної потужності, генерування гармонік струму і напруги). У перетворювачах із широтно-імпульсним регулюванням застосовують некеровані вхідні випрямлячі, що забезпечують коефіцієнт зсуву першої гармоніки струму щодо напруги мережі близький до 1,0.

У системах фазового керування напругою можливе регулювання з досить високими показниками за коефіцієнтом потужності і коефіцієнта спотворення при різному поєднанні перетворювальних пристроїв на традиційних тиристорах і приладах, що запираються.

По-друге, застосування техніки, що запирається, призводить до істотного зниження витрат на електротехнічне устаткування – енергопостачальні мережі, трансформаторне і розподільне устаткування. Використання регульованого електропривода з некерованим випрямлячем з коефіцієнтом зсуву, що дорівнює 1,0 у всьому діапазоні регулювання, дозволить знизити розрахункову потужність узгоджувального трансформатора залежно від реальної тахограми технологічного механізму. Застосування техніки, що запирається, в електроприводах постійного струму дозволить відмовитися від запасу по куту для стійкого інвертування. При цьому з'являється можливість зниження розрахункової потужності узгоджувального трансформатора за рахунок зменшення його вихідної напруги обернено пропорційно косинусу мінімального значення кута випередження.

По-третє, застосування силової техніки, що запирається, дозволить створити принципово нові технічні рішення систем електропривода. Представляється реальним створення електромеханічних систем із синхронними двигунами індукторного збудження, яке здійснюється від постійних магнітів. Використання техніки, що запирається, істотно підвищує перевантажувальну спроможність вентильного двигуна і виключає труднощі реалізації пускового режиму.

Відкриваються також широкі можливості створення масового частотно-регульованого привода з асинхронними короткозамкненими двигунами. Силова техніка, що запирається, дозволила створити системи електропривода змінного струму, що за своїми характеристиками, включаючи динамічні, істотно перевищують показники приводів постійного струму.

4. ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАСОБАМИ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

ПЕРШИЙ ШЛЯХ стосується найпростішого некерованого масового електропривода і полягає в удосконаленні процедури

вибору двигуна для конкретної технологічної установки з метою дотримання номінального теплового режиму двигуна при експлуатації.

Постановка задачі очевидна — двигун заниженої потужності швидко виходить з ладу, а двигун завищеної потужності перетворює енергію неефективно, тобто з високими питомими втратами в самому двигуні (низький ККД) і в мережі живлення (низький $\cos\varphi$). Розв'язання задачі не завжди елементарне, зустрічаються помилки, а оскільки найпростіших електроприводів мільйони, то можливі великі збитки. У випадках, коли навантаження незмінне, помилки викликані лише низькою кваліфікацією проектувальників (двигун вибирали за діаметром вала). Коли навантаження змінюється, вибір виявляється значно складнішим, що додатково ускладнюється недостатністю вихідної інформації, паспортних і каталожних даних.

В основі взаємовідносин між енергопостачальною організацією і підприємством лежать встановлювані з урахуванням тих чи інших факторів тарифи на електроенергію. Недосконалість тарифу очевидна, оскільки він не враховує якість споживаної енергії і вплив цього параметра на характеристики електроустаткування.

Мінімальні витрати енергії можливі при різному ступені аварійності електроустаткування, є досить складною функціональною залежністю від стану устаткування, рівня його обслуговування, стану енергетичного господарства в цілому, включаючи і показники якості електроенергії. Загальні витрати включають не тільки сплату за електроенергію, перетворену тим чи іншим способом на корисний продукт, але й витрати на ремонт і обслуговування електроустаткування. З цієї причини доцільніше розглядати показник, що дорівнює сумі безпосередніх платежів за електроенергію і витрат на відновлення електроустаткування:

$$Z = Z_1 + Z_2,$$

де Z_1 — витрати на електроенергію, визначені за триставочним чи зонним тарифом; Z_2 — вартість ремонтів, відновлення електроустаткування.

Останній показник досить високий і в основному характеризує стан енергогосподарства: при задовільному — витрати на ремонт мінімальні, при незадовільному — приблизно однакові з платежами по основних статтях.

Відомо, що в окремих підгалузях промисловості аварійність електродвигунів коливається від 20 до 60 – 70 % на рік, причому зазначені показники відрізняються навіть у випадку однотипних підприємств чи виробництв. Характерно, що при загальному спаді виробництва кількість аварійних відмовлень машин не зменшується, а зростає.

З урахуванням недовантаження електричних машин у нормальному технологічному режимі на 20 – 25 % і зниженні продуктивності в 2,5 – 3 рази, витрати на ремонт двигунів (при наробітку на відмовлення 4000 годин) впритул наближаються до вартості електроенергії, що спожив би двигун за час експлуатації між двома ремонтами за умови, що ціна 1 кВтгод знаходиться на рівні 0,13–0,15 грн. З урахуванням транспортних та інших витрат, пов'язаних з аварійним виходом двигунів з ладу, питомі витрати на ремонт наближаються до відповідного показника для нових заводських машин.

ДРУГИЙ ШЛЯХ підвищення економічності масового нерегульованого електропривода – перехід на енергозберігаючі двигуни і двигуни поліпшеної конструкції, спеціально призначені для роботи з регульованим електроприводом.

В енергозберігаючих двигунах за рахунок збільшення маси активних матеріалів (заліза і міді) підвищені номінальні значення ККД і $\cos\phi$. Енергозберігаючі двигуни використовуються, наприклад, у США і дають ефект при постійному навантаженні. Доцільність застосування енергозберігаючих двигунів повинна оцінюватися з урахуванням додаткових витрат, оскільки невелике (до 5%) підвищення номінальних ККД і $\cos\phi$ досягається за рахунок збільшення маси заліза на 30–35%, міді на 20–25%, алюмінію на 10–15% і в цілому двигуна на 25–30% відносно звичайних двигунів.

Орієнтовні залежності ККД і $\cos\phi$ від номінальної потужності для звичайних і енергозберігаючих двигунів фірми Гоулд наведені на рис. 1.11.

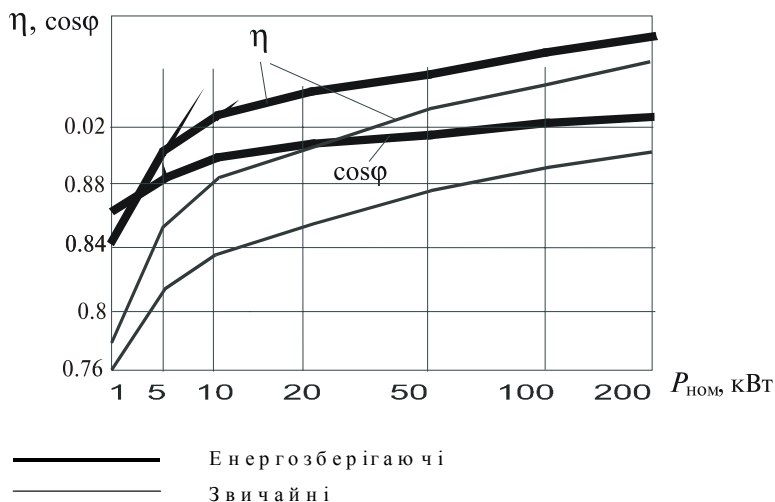


Рис. 1.11

Очікується зміна методик проектування двигунів, що відповідають їх застосуванню в складі саме регульованого електропривода. Насамперед це стосується асинхронного двигуна, для якого відмова від традиційних вимог фіксованої амплітуди і частоти мережі живлення, прямого вмикання в мережу живлення, забезпечення заданої перевантажної спроможності призводить до істотної зміни конструкції і різкого поліпшення характеристик. Слід відзначити випуск серії асинхронних двигунів, спроектованих фірмою Siemens для загальнопромислових електроприводів. Змінюється методика проектування й інших типів двигунів, розширюється їх номенклатура. Очевидно, варто очікувати різкого, вибухового поліпшення характеристик по-новому спроектованих двигунів для регульованого електропривода, і відповідного коригування вимог до систем керування. Так прогнозується зростання частоти живлення двигунів у регульованому електроприводі до 500–1000 Гц і вище та зниження індуктивностей обмоток.

Спостерігається зростання випуску електропривода із синхронними двигунами зі збудженням від постійних магнітів (так званий безконтактний вентильний двигун (ВД) постійного струму). Ці двигуни мають найкращі масогабаритні показники. Серед інших типів двигунів виділимо індукторний двигун (Switch Reluctance Motor), який розроблений і активно пропонується в ос-

танні роки. Як стверджують розробники, його характеристики поліпшені, що в комбінації зі спрощеним силовим перетворювачем дозволяє сподіватися на його масове застосування.

Перспективним є також синхронно-реактивний двигун, що за прогнозами матиме масогабаритні показники, які лежать у проміжку між відповідними рекордними значеннями синхронного й асинхронного двигунів, а за енергетичною ефективністю, можливо, перевершує їх, причому при нижчій вартості. Реактивні вентильні двигуни спрощують схеми комутаторів і якірних обмоток. При оптимізації кута випередження інвертора можна домогтися збільшення моменту і ККД привода. Існує оптимальний кут випередження залежно від частоти обертання. Збільшення ККД досягається також за рахунок відповідного скорочування кроку обмотки.

P , МВт

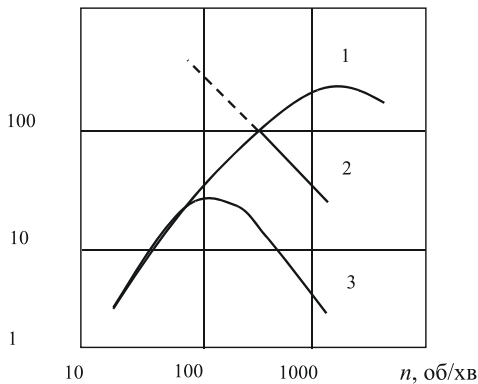


Рис. 1.12

На рис.1.12 зображені максимальні потужності електричних машин (1- синхронних з надпровідною обмоткою і з пуском за схемою ВД; 2- синхронних з асинхронним пуском; 3- постійного струму.).

Для найкращого використання синхронного двигуна традиційної конструкції необхідно зменшити надперехідні реактивні опори (за рахунок відкритих пазів статора, збільшення повітряного зазору, демпферної обмотки на роторі тощо) і реакцію якоря (за рахунок збільшення повітряного зазору і вибором коефіцієнта полюсного перекриття).

Слід також відмітити, що Першотравневим заводом у Донбасі налагоджений випуск низьковольтних (380/660В) асинхронних короткозамкнених двигунів з підвищеним пусковим моментом (до 3...4 відн. од.). Такі двигуни ефективні в системах регульованого привода і споживають практично в два рази менший пусковий струм, а також можуть бути використані в умовах вугільних шахт (у вибухо-пожежонебезпечних умовах).

ТРЕТІЙ ШЛЯХ полягає в усуненні проміжних передач.

Суть проблеми полягає в тім, що електрична енергія доступна на фіксованій частоті (50 Гц), а механічна енергія потрібна в широкому спектрі частот (швидкостей). Методи, розроблені багато років тому для вирішення цієї проблеми, використовують дорогі системи, двигун чи механічні регулятори.

До складу узагальненої схеми електропривода входять — перетворювач чи механічний регулятор (коробки швидкостей, муфта ковзання), муфта, редуктор і робочий орган, що є частиною робочої машини (рис. 1.13).

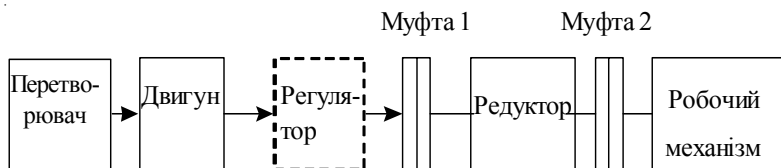


Рис. 1.13

Орієнтовні значення ККД елементів привода складають:

перетворювач — $\eta_{\text{п}} = 0,5 \div 0,95$ (менші значення — для малих швидкостей обертання, великі — для більш високих швидкостей);

двигун — $\eta_{\text{д}} = 0,75 \div 0,95$ (менші значення для мікромашин, більші — для машин підвищеної потужності);

механічний регулятор — $\eta_{\text{рег}} \approx 0,9 \div 0,95$;

муфта — $\eta_{\text{м}} \approx 0,99$;

редуктор — $\eta_{\text{р}} = 0,95$;

робочий механізм — $\eta_{\text{рм}} \approx 0,95$ (для приводного барабана стрічкового конвеєра).

Коефіцієнт корисної дії системи електропривода

$$\eta = \eta_{\text{п}} \eta_{\text{д}} \eta_{\text{м}}^i \eta_{\text{р}} \eta_{\text{рм}}$$

Підстановка у формулу усереднених значень ККД для привода з електродвигуном потужністю 10–100 кВт дає значення ККД у діапазоні $\eta=0,65-0,75$. При цьому в середньому від семи до десяти відсотків потужності втрачається в механічних передачах. Таким чином, усунення механічних передач призводить до істотного підвищення ККД системи (на 7–10%), що є однією з основних тенденцій розвитку електропривода, а в перспективі – поєднання електродвигуна і робочого органу.

За способом передачі механічної енергії від вала двигуна до робочого механізму електропривод поділяють на три групи:

- груповий (рис. 1.14.а), у якому кілька робочих машин приводяться в рух через передачі одним двигуном (привод зернозбирального комбайна);
- одиночний (рис. 1.14.б), у якому кожен механізм приводиться в рух одним двигуном;
- багатодвигуновий (рис. 1.14.в), у якому окремий механізм приводиться в рух кількома двигунами (приводний барабан конвеєра, барабан підйомної машини, привод повороту потужного екскаватора).

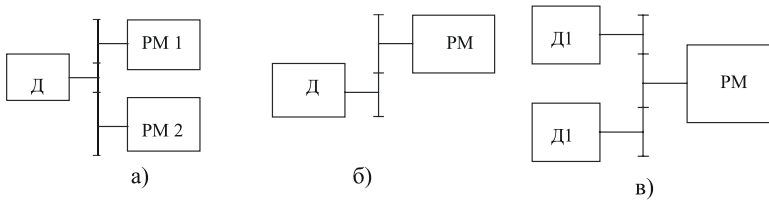


Рис. 1.14

Впровадження одиночного привода крім зниження в кілька разів енергоємності виробництва за рахунок усунення безлічі проміжних передач і кращого використання встановленої потужності привода дозволило значно підвищити надійність виконання технологічних процесів, крім того, знизити виробничий травматизм, обумовлений наявністю великої кількості відкритих механічних передач. Також покращилися умови праці за рахунок усунення звукових ефектів, пов'язаних з роботою великої кількості ремінних і ланцюгових передач, різноманітних муфт, валів, що обертаються, довжиною до 20 м, зубцевих і черв'ячних передач тощо.

Для приведення в рух робочого механізму до нього необхідно прикласти деякий момент при визначеній швидкості. При цьому потужність на валу складе:

$$P = M\omega$$

На рис. 1.15 зображено розподіл енергії в одношвидкісному приводі.

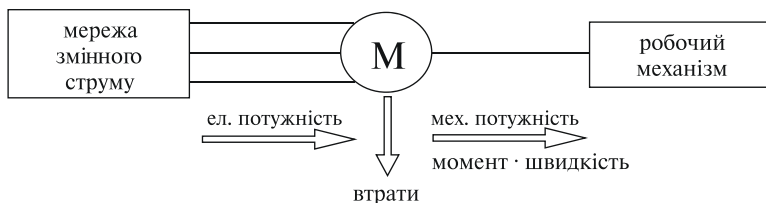


Рис. 1.15

Умови змінюються, якщо регулювати швидкість розглянутого устаткування, використовуючи редуктор фрикційного типу (муфта, ремінь, гідравлічне сполучення тощо). У цьому випадку момент на валу двигуна і робочого механізму однаковий, але швидкості різні (рис. 1.16). Таким чином, різниця потужностей перетворюється в тепло фрикційної передачі:

$$M\omega_d - M\omega_{pm} = M(\omega_d - \omega_{pm}) = \Delta P$$

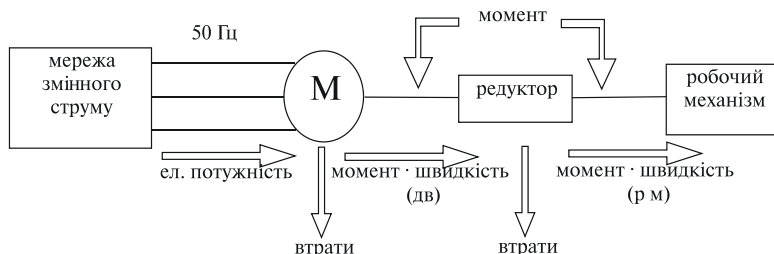


Рис. 1.16

Інший приклад показаний на рис. 1.17. Як привод насоса використовується двигун з постійною швидкістю. Потік рідини контролюється закриттям і відкриттям клапана. Крім випадку, коли клапан цілком відкритий, енергія втрачається в клапані і насосі. Таким чином, регулювання дроселюванням неефективне.

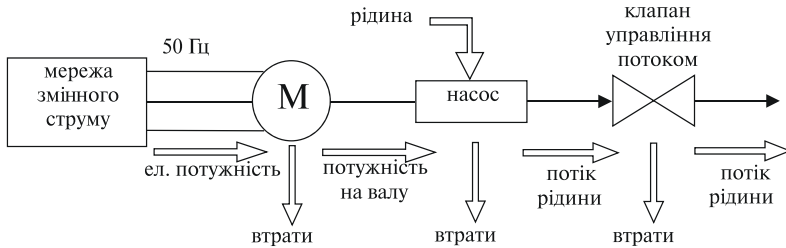


Рис. 1.17

Практично немає втрат у випадку, коли керування здійснюється за допомогою механічних передач (рис. 1.18), тому що передача перетворює і момент, і швидкість. Їх добуток залишається постійним. При якісному обслуговуванні передачі мають дуже мале тертя. Таким чином, потужності на вході і виході привода практично дорівнюють одна одній. Однак передачі, що постійно перемикаються, непридатні для приводів з великою потужністю, вони дорогі і мають потребу в частому обслуговуванні. Стационарні багаторівневі коробки передач, хоч і придатні для потужних приводів, мають усі вищезгадані недоліки.

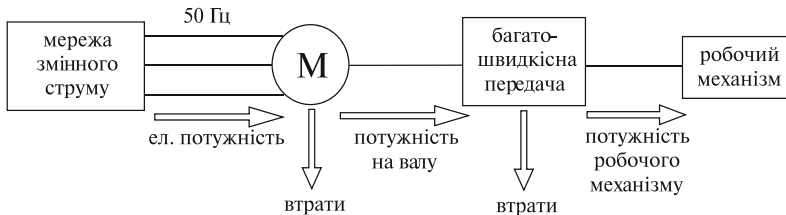


Рис. 1.18

При виборі перспективних варіантів систем електроприводів варто враховувати можливість використання багатодвигунового електропривода, що у даний час одержав значне поширення в промисловості. Його використання обумовлене такими причинами:

- відсутністю приводного двигуна, редуктора чи іншої механічної передачі необхідної потужності;
- бажанням підвищити швидкість привода за рахунок зниження сумарного моменту інерції приводних двигунів;

- необхідністю забезпечення підвищеної надійності приводних пристроїв шляхом завищення встановленої потужності привода, тобто створення резерву на випадок виходу з ладу одного чи декількох двигунів;

- бажанням створення більш сучасних машин і механізмів (наприклад, стрічкових конвеєрів із двома і більше приводними барабанами, установок із проміжними приводами тощо);

- необхідністю економії електроенергії в механізмах з великим діапазоном зміни навантаження (більше, ніж у $1,5 \div 2$ рази).

Застосування багатодвигунового привода в складних технологічних установках найчастіше дозволяє значно спростити й здешевити їх за рахунок усунення складних і дорогих механічних передач між різними виконавчими органами. При цьому з'являються також можливості підвищення продуктивності, економічності і поліпшення інших експлуатаційних характеристик.

ЧЕТВЕРТИЙ ШЛЯХ полягає в економії електроенергії робочими установками і механізмами за рахунок підвищення ефективності виконання технологічного процесу.

Промислові підприємства вимагають підвищення ефективності роботи технологічних установок і механізмів, особливо вугільні шахти, які є великими споживачами електричної енергії зі складним електроенергетичним господарством. Встановлена потужність окремих електроприймачів шахт складає десятки тисяч кіловат при річному споживанні електроенергії в десятки і навіть сотні мільйонів кіловат — годин, одинична ж потужність окремих машин досягає кількох тисяч кіловат.

Структура електроспоживання шахти (рис. 1.19) залежить від багатьох факторів, основними з яких є глибина шахти, водонасиченість, продуктивність тощо (ДСТУ 3224-95 «Методи визначення норм витрачання електроенергії гірничими підприємствами»). Тут: 1- видобувні роботи — 5,26%; 2- підготовчі — 1,29%; 3- підземний транспорт — 5,60%; 4- кондиціонування повітря — 10,88%; 5- водовідлив — 14,28%; 6- підйом — 13,32%; 7- вентиляція 17,13%; 8- технологічний комплекс поверхні — 3,75%; 9- вироблення стиснутого повітря — 2,46%; 10- інші електроприймачі — 20,58%; 11- освітлення — 0,69%; 12- втрати електроенергії — 4,76%.

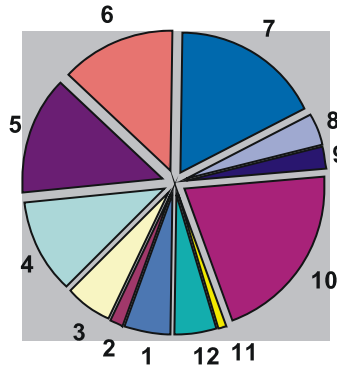


Рис. 1.19

Економія електроенергії установками і механізмами за рахунок підвищення ефективності виконання технологічного процесу містить у собі такі основні заходи:

- узгодження режимів роботи установки при зміні навантаження;
- підвищення ККД установки;
- регулювання продуктивності установки;
- виконання оптимальної циклограми й упорядкування графіка навантажень;
- забезпечення нормованого завантаження (для підйомних машин, конвеєрів тощо);
- контроль стану технологічної установки;
- застосування нових видів електропривода;
- організаційні заходи.

Особливості видобутку вугілля вимагають збільшення електроспоживання окремих електроприймачів. Так для водонасичених шахт потрібна установка 10, а в деяких випадках і більшої кількості насосів. Для шахт крутого падіння потрібна розгалужена мережа стиснутого повітря з компресорним господарством у десятки тисяч кіловат. У глибоких шахтах потрібне збільшення потужності підйомної машини до 10 МВт. За таких умов економія електроенергії в окремих споживачах і шахти в цілому може мати значну величину, що в остаточному підсумку позначиться на зниженні собівартості видобутого вугілля.

П'ЯТИЙ ШЛЯХ полягає у виборі раціональних режимів роботи й експлуатації електропривода. Сюди входять:

- вибір раціонального способу і діапазону регулювання швидкості електропривода залежно від технологічних умов роботи машин і механізмів;
- вибір раціонального способу регулювання швидкості залежно від характеру зміни навантаження;
- підвищення завантаження робочих машин;
- виключення режиму неробочого ходу;
- зниження напруги на затискачах двигуна;
- мінімізація струму і втрат енергії АД при зміні навантаження;
- оптимізація динамічних режимів;
- використання синхронної машини як компенсатора реактивної потужності;
- використання акумуляторів енергії.

Необхідність вивчення технологічного режиму робочої машини є основою для можливого комплексу заходів, що забезпечують ефективність енергозбереження. При цьому мова може йти як про регулювання швидкості технологічного агрегату, так і про його керованість. Під терміном «керованість» розуміється можливість зміни параметрів технологічного режиму за рахунок інших методів впливу, у тому числі й найпростіших — періодичних пусків і зупинок.

Розглядаючи, наприклад, електропривід турбомеханізмів, можна відмітити, що можливі три принципово різних способи регулювання технологічного параметра:

- аеродинамічним шляхом, що полягає у впливі на характеристики проточної частини (дроселюванням чи установкою кута нахилу лопаток направляючого апарата). Спосіб пов'язаний з істотним зниженням ККД;
- зміною швидкості обертання шляхом застосування регульованого електропривода. Це забезпечує практично незмінний високий ККД при істотному збільшенні капітальних витрат;
- шляхом вмикання і вимикання кількох агрегатів у випадку, якщо працює група електроприводів.

Третій варіант регулювання має обмеження — за числом пусків нерегульованих електроприводів через небезпеку виходу з ладу електричних машин, з одного боку, і за числом пусків для технологічного механізму через екстремальні технологічні навантаження в агрегаті, що пускається, при прямому некерованому пуску, з іншого. Аналіз показує, що при плавному керованому пуску практично виконуються дві наведені умови. Стосовно до приводів змінного струму як варіант схеми керованого пуску може служити

схема з тиристорним регулятором напруги (ТРН) у колі статора. Вартість таких пристроїв приблизно в п'ять разів нижче вартості систем частотно-регульованого електропривода. В окремих випадках застосування пускових систем підвищує час наробітку на відмову синхронних двигунів у кілька разів, робочих коліс відцентрового насоса на 15 – 75 % тощо.

Іноді пуски двигунів утруднюються через високу концентрацію робочого тіла в робочій частині турбомеханізму (руда в млині), заклинювання коліс насосів тощо. За таких умов навіть при повній напрузі живлення пусковий момент двигуна може бути меншим моменту зрушення механізму, і звичайна схема ТРН для пуску таких технологічних машин не дає необхідного позитивного результату. У цьому випадку є виправданим переведення ТРН у режим перетворювача частоти, тобто застосування так званого квазічастотного керування. Цей захід дає позитивний результат, оскільки дозволяє здійснити передпускове прокручування агрегату при частотах 0 – 0,7 Гц. Застосування пускових пристроїв дозволяє вирішити дві пов'язані одна з одною задачі: забезпечити реальне енергозбереження засобами електропривода і зберегти працездатність механічного й електромеханічного устаткування.

Зниження продуктивності машин і установок призводить до зниження ресурсу працездатності за цілим числом факторів, так чи інакше пов'язаних зі зростанням числа пусків електричних двигунів (у тому числі і в регульованих електроприводах). При цьому необхідно враховувати таке:

- в умовах істотного зниження продуктивності агрегатів і процесів, відсутності можливості використання регульованого електропривода через його дорожнечу, істотним резервом економії електроенергії є періодичні відімкнення енергоємних споживачів. При цьому необхідно використовувати спеціалізоване енергозберігаюче устаткування – пускові системи, що забезпечують як безпосередню економію енергоресурсів, так і працездатність електричних машин;

- насиченість парку електричними машинами, що були в ремонті, свідомо визначає досить високі витрати на ремонт електроустаткування. При цьому висока аварійність електричних машин визначається не стільки низькою якістю ремонту, скільки зміною характеристик конструкційних матеріалів (насамперед електротехнічної сталі), що призводять до перерозподілу втрат у двигуні і зміни теплового балансу та зниження реальної навантажувальної спроможності;

- відхилення напруги живлення, через відсутність засобів її ефективного регулювання, призводить до зростання споживаної реактивної потужності асинхронними двигунами, зниження її генерування синхронними машинами, збільшення втрат у сталі, підвищення аварійності двигуна;

- будь-які форми неякісної напруги живлення, порушень використання енергії споживачем через зміну його внутрішніх характеристик призводять не лише до збільшення втрат, але і появи змінних складових електромагнітного моменту двигуна. Знакозмінні складові моменту є причиною високочастотних вібрацій всіх елементів конструкції, передчасного старіння ізоляції і підвищення аварійності електроустаткування.

Як правило, необхідність регулювання швидкості чи моменту електроприводів виробничих механізмів диктується вимогами технологічного процесу. Наприклад, зниження швидкості ліфта необхідне для точного позиціонування кабіни перед зупинкою. Однак існує ряд механізмів безперервного транспорту для переміщення твердих, рідких і газоподібних продуктів (конвеєри, вентилятори, насоси) з нерегульованим асинхронним електроприводом, що надає руху робочим органам з постійною швидкістю незалежно від завантаження механізмів. При неповному навантаженні робота з постійною швидкістю характеризується підвищеною питомою витратою електроенергії в порівнянні з номінальним режимом.

Зниження швидкості механізмів безперервного транспорту при недовантаженні дозволяє виконати необхідну роботу з меншою питомою витратою електроенергії. У цьому випадку економічний ефект з'являється також за рахунок поліпшення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування. Так, при зниженні швидкості зменшується знос тягового органа транспортера, збільшується термін служби трубопроводів за рахунок зниження тиску тощо. Ефект у сфері технології часто виявляється істотно вищим, ніж за рахунок економії електроенергії.

З іншого боку, висувається необґрунтоване бажання використовувати плавно регульовані системи привода з великим діапазоном регулювання для цих установок. У той же час досить великий діапазон регулювання продуктивності для механізмів з вентиляторним характером навантаження можна одержати при діапазоні зміни швидкості, що не перевищує 20%.

Як інший приклад можна навести ліфти в невисоких будинках (до 16 – 24 поверхів), коли замість дорогої, складної і менш надійної плавно регульованої системи можна обійтися викори-

станням двошвидкісного АД з короткозамкненим ротором і підвищеним пусковим моментом.

Такий привод дозволяє в кілька разів знизити робочу швидкість кабіни перед зупинкою, що зменшує знос гальмівного пристрою і збільшує саму точність зупинки. Пуск двошвидкісних двигунів — прямий на високу швидкість. Гальмування виконується перемиканням напруги на обмотку малої швидкості. Відтак двигун переходить у режим генераторного гальмування і частота його обертання знижується в 3-4 рази. Зупинка двигуна здійснюється відключенням від мережі обмотки малої швидкості і накладенням механічного гальма.

Наступний напрям енергозбереження належить до основних споживачів електричної енергії — електроприводів з нерегульованими АД і полягає в створенні спеціальних схемних рішень, що забезпечують мінімізацію шкідливого впливу на енергетичні показники при відхиленні навантаження від номінального. Спеціальні регулятори електричної енергії (регулятори напруги), що включаються між джерелом живлення і статором двигуна, крім енергозбереження виконують також інші функції (керують режимами пуску і гальмування, регулюють швидкість і момент, здійснюють захист, діагностику тощо), тобто підвищують технічний рівень привода, збільшують його надійність.

При роботі АД має місце недовикористання встановленої потужності, необґрунтоване завищення їх потужності, а також недовантаження. При цьому знижуються ККД і коефіцієнт потужності АД. Регулювання напруги на статорі АД при постійній частоті забезпечує найекономічніший режим його роботи при зміні навантаження. Отже, мінімізується споживаний асинхронним двигуном струм і тим самим втрачається електроенергія в ньому.

Регулювання напруги АД у функції струму знижує втрати електроенергії до 5%, що при широкому застосуванні асинхронного електропривода дозволяє одержати великий економічний ефект.

Проблема акумуляторів енергії для систем електропривода є досить важливою. Акумулятори енергії з різними фізичними принципами її акумуляції перспективні насамперед для транспортних систем. Визначено перспективу в застосуванні акумуляторів — компенсаторів в електроприводах з різкозмінним навантаженням, як регульованих, так і нерегульованих. Нова елементна база і насамперед, малогабаритні ємнісні акумулятори, робить реальними передумови до створення принципово нових комплектних пристроїв для сучасного електропривода — накопичувально-компенсуючих пристроїв, з відповідними системами керування.

ШОСТИЙ ШЛЯХ полягає у виборі раціонального типу електропривода для конкретної технологічної установки і переході від нерегульованого електропривода до регульованого. Він припускає виконання таких операцій:

- аналіз технологічного процесу, умов експлуатації і, у результаті, розробка технічних вимог до електропривода;
- вибір перспективних варіантів систем електроприводів, їх техніко-економічне порівняння і вибір раціонального типу електропривода;
- розрахунок системи електропривода, у тому числі встановленої потужності і розробка системи керування;
- розробка конструкторської документації.

Удосконалювання технологічних процесів і автоматизація виробництва пов'язані з застосуванням регульованого електропривода. Застосування регульованого електропривода сприяє вирішенню задач щодо забезпечення оптимальних режимів роботи механізмів, зниження собівартості і підвищення якості продукції, що випускається, зростання продуктивності праці, підвищення ефективності використання енергії, надійності і терміну служби устаткування.

Варто згадати, що асинхронні двигуни зі змінним опором у колі ротора (рис. 1.20) і двигуни постійного струму незалежного збудження з регульованим реостатом (рис. 1.21), керуються зі збільшенням втрат.

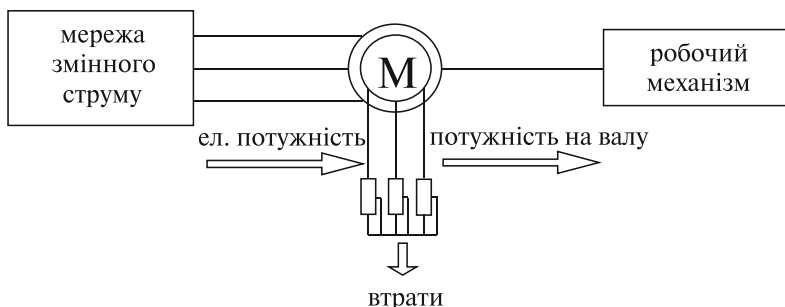


Рис. 1.20

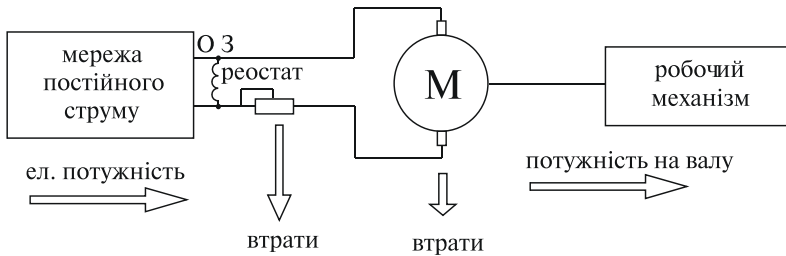


Рис. 1.21

З погляду енергозбереження найбільш ефективні регульовані електроприводи змінного струму, особливо для турбомеханізмів (вентиляторів, компресорів, насосів), підйомних машин, верстатів із ЧПУ тощо. Економія електроенергії може складати до 50%.

Цілий ряд промислових механізмів (транспортні, підйомно-транспортні, транспортно-складських і робототехнічних систем, ліфти тощо) працюють з частими вмиканнями, вимагаючи реалізації пускагальмівних режимів. Використання для керування такими механізмами відносно недорогих систем ТРН-АД дозволяє здійснювати режими плавного (м'якого) пуску і гальмування за рахунок формування необхідного часового закону зміни напруги першої гармоніки при ударі у пуску чи значення постійної напруги при динамічному гальмуванні. Це забезпечує істотне зниження пускових струмів, зменшення енергоспоживання на 3–6% (залежно від потужності двигуна й інтенсивності роботи), а також вирішення ряду технологічних задач (обмеження механічних кінематичних передач, зниження прискорень і ривків, збільшення надійності і терміну служби устаткування).

Якщо за сукупністю вимог для керування механізмом доцільно використовувати регульований, частотно-регульований електропривод, то реалізація режимів частотного пуску і гальмування дозволяє знизити втрати енергії в перехідних режимах у кілька разів у порівнянні з некерованими перехідними процесами. У цьому випадку, функціональна схема виглядає, як показано на рис. 1.22. На противагу рис. 1.15 видно, що двигун змінного струму живиться електроенергією зі змінюваною частотою від перетворювача частоти (ПЧ). Оскільки швидкість двигуна буде відповідати частоті електричного струму мережі, регулюючи частоту на виході перетворювача, одержимо зміну швидкості двигуна. Втрати

енергії, що спостерігалися на рис. 1.16; 1.17; 1.20 і 1.21 зведені до нуля.

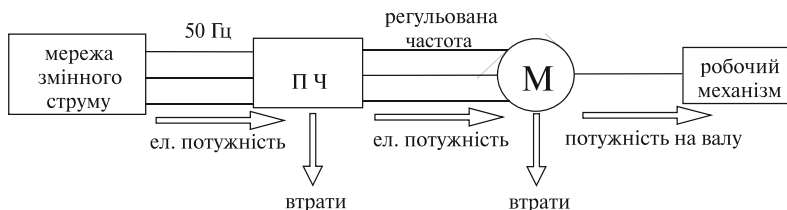


Рис. 1.22

Дуже перспективні вентильні двигуни з постійними магнітами. Новим шляхом енергозбереження стає переведення двигунів на модульну конструкцію й оптимізація режимів їх роботи на базі мікроконтролерів, що дозволить у $3 \div 5$ разів знизити втрати енергії, у $2 \div 3$ рази зменшити масу двигунів.

При переході від нерегульованого електропривода до регульованого варто пам'ятати, що:

- економія енергії часто досягається не за рахунок власне привода, а за рахунок того процесу, що привод обслуговує. При цьому економія може в багато разів перевищувати власне споживання електропривода;
- для одержання корисного енергетичного ефекту часто не-обхідне регулювання в дуже невеликих межах при обмежених вимогах до якості регулювання. Так, лише незначне регулювання швидкості насоса, що подає гарячу воду в будинок, забезпечує істотну економію дорогої гарячої води. Такий підхід дозволяє замість дорогих і складних перетворювачів частоти використовувати значно дешевші і надійніші регулятори напруги, підведеної до обмоток статорів асинхронних двигунів;
- в даний час намітилася тенденція заміни регульованого привода постійного струму на привод змінного струму. На сьогоднішній день частка регульованого привода змінного струму мала, однак вона постійно зростає.

У галузях промислового використання приводів постійного струму з'явився попит на більш надійні безколекторні машини, при експлуатації яких потрібно менше витрат. Назріла також необхідність у застосуванні безконтактних приводів змінного струму, що забезпечують підвищення ККД і енергетичних показників установки, її продуктивність і надійність. У таких великих маши-

нах, як шахтні стаціонарні установки, для економічного регулювання продуктивності необхідний безконтактний привод.

У підйомних установках підвищення ККД, надійності, ресурсу працездатності і зменшення експлуатаційних витрат неможливі без заміни привода постійного струму на безредукторний безколекторний привод змінного струму з аналогічними регульовальними властивостями.

Економічна доцільність використання синхронних двигунів на потужних конвеєрах і технологічні вимоги обумовлюють необхідність застосування безколекторного чи безконтактного регульованого привода змінного струму з СД.

Сформовані традиції застосування синхронних двигунів для потужних турбомеханізмів з метою підтримки високих загальношахтних енергетичних показників при мінімальних витратах і вимоги регулювання продуктивності зміною частоти обертання робочого колеса свідчать про актуальність використання регульованого безколекторного привода змінного струму з СД.

Одним з найбільш перспективних і універсальних типів електроприводів із синхронними машинами є безколекторний або безконтактний вентильний двигун, у якому регулювання швидкості і моменту здійснюється підведеними напругою, струмом збудження і кутом випередження вмикання вентилів при самоуправлінні по частоті живлення. Він має регульовальні якості машин постійного струму і надійність систем змінного струму.

Для широкого впровадження регульованого електропривода необхідно вирішити безліч задач, у тому числі такі:

- розробити спеціальні синхронні двигуни для застосування їх у системі вентильного двигуна (у тому числі індукторні);
- розробити спеціальні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором для застосування їх у системах частотно-регульованого електропривода;
- зменшити вплив вентильних перетворювачів на мережу;
- створити перетворювачі, форма струму і напруги яких наближалася б до синусоїдальної.

Істотне зниження енергоспоживання за рахунок широкого застосування регульованого електропривода в даний час важко реалізувати через обмежені можливості капіталовкладень з метою реконструкції електроприводів. Необхідно використовувати раціональний підхід, що поєднує можливості регульованого і нерегульованого, наприклад, керованого по пуску, що забезпечує ефект досить близький до найдосконаліших приводів. Варто вра-

ховувати і рівень обслуговування електроустаткування, що, як правило, не відповідає стандартам, властивим регульованим приводам з високими технічними характеристиками. У цьому зв'язку для одержання економічної ефективності при мінімальних витратах необхідно розробити такі системи і заходи:

- системи полегшеного пуску синхронних двигунів електроприводів, що забезпечують економію електроенергії до 10 – 15 % і підвищення технічної надійності СД у 2-3 рази;
- системи плавного запуску групи потужних синхронних двигунів турбокомпресорів, насосів, вентиляторів за схемою ТРН-СД, що забезпечують підвищення надійності електричних машин, турбо cơanismів і зниження плати за електроенергію до 20%;
- пристрої і системи для керування рівнем напруги живлення, що забезпечують істотне зниження енерговитрат і підвищення працездатності електроустаткування;
- формування технологічного завантаження електродвигунів відповідно до сертифікаційних параметрів, одержаних в ході після-ремонтних випробувань при експлуатації;
- використання систем діагностики електроприводів, які базуються на енергетичних критеріях, що забезпечить визначення втрат і сертифікацію двигунів після їх ремонту на спеціалізованих підприємствах;
- формування графіків навантаження установок з потужними електроприводами, технологічними ємностями тощо.

Для приводів механізмів, що вимагають плавного пуску і незначного (до 10%) діапазону регулювання швидкості (насоси, вентилятори, компресори, конвеєри тощо) застосовують тиристорні регулятори напруги. Завод ХЕМЗ виготовив і впровадив кілька таких систем у високовольтному виконанні (6 кВ) для привода механізмів з вентиляторним характером навантаження. На Запорізькому електроапаратному заводі налагоджений випуск низьковольтних регуляторів напруги для керування двигунами потужністю до 100 кВт.

Аналіз режимів роботи регульованого і нерегульованого електропривода вказує на неоднозначність поняття ефективної роботи приводів змінного струму в області частот обертання близьких до номінальної. Очевидно, що тут є визначений діапазон швидкостей, де застосування нерегульованого електропривода більш раціональне. Це пояснюється тим, що будь-яка схема регульованого електропривода крім втрат енергії, що йдуть на її перетворення, призводить до додаткових втрат у самому двигуні і шкідливо

впливає на мережу живлення й інші пристрої і системи. Під поняттям «шкідливо» розуміють насамперед додаткові втрати, електромагнітну несумісність і передчасну зношуваність електроізоляційних матеріалів.

Очевидна необхідність створення систем, що забезпечували б контроль зони економічної роботи ($\omega_n - D\omega_1 J\omega J\omega_n + D\omega_2$), а також значення швидкостей $\omega_{вг}$ і $\omega_{нг}$, при яких робота привода неефективна через технічні й інші обмеження з одного боку, і небезпечна при перевищенні припустимої швидкості, з іншого (рис. 1.23).

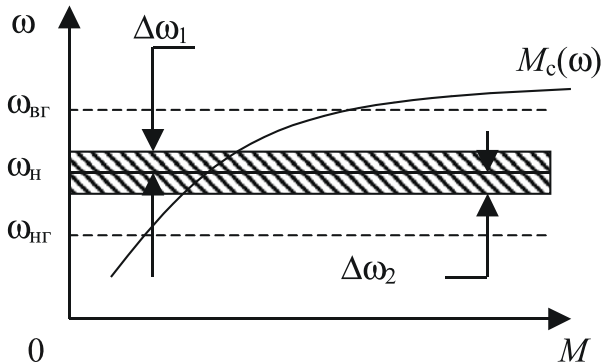


Рис. 1.23

СЬОМИЙ ШЛЯХ полягає в поліпшенні якості електроенергії засобами силової перетворювальної техніки регульованого електропривода.

Регульований електропривод при роботі впливає на мережу електропостачання, що виражається в зниженні коефіцієнта потужності на вході перетворювача, коливаннях напруги в мережі і спотворенні синусоїдальної форми напруги.

Зниження коефіцієнта потужності збільшує реактивну потужність системи електропостачання, що призводить до додаткових втрат напруги й енергії і вимагає збільшення пропускної здатності її елементів.

В електричних мережах підприємства із сучасним устаткуванням вентильні перетворювачі знаходять усе ширше застосування. Питома вага нелінійних навантажень безупинно зростає. В цих умовах рівень вищих гармонік у кривій напруги мережі нерідко досягає 10-15%.

Несинусоїдальність напруги і струму обумовлює додаткові втрати і нагрівання, а також прискорене старіння ізоляції електродвигунів, трансформаторів і, крім того, негативно позначається на функціонуванні різних видів електроустаткування. Специфічний вплив на різні види електроустаткування, системи релейного захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку виявляється диференційованим і залежить від амплітудного спектру напруги (струму), параметрів електричних мереж та інших факторів. У загальному випадку відсутня залежність між енергією гармонічної перешкоди і ступенем впливу її на електричну мережу. Ця обставина обумовила широке застосування показника, що характеризує спотворення кривої напруги мережі на затискачах електроприймачів, який називається коефіцієнтом несинусоїдальності напруги, %:

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^l U_n^2}}{U_{\text{н}}} 100,$$

де U_n і $U_{\text{н}}$ — напруга n -ї гармоніки і номінальна напруга мережі.

Відповідно до ДСТУ 13109-87 припустимі значення $k_{\text{нс}}$ обмежується 5% з інтегральною ймовірністю 95% за час вимірювання, зазначений у стандарті. Номер останньої з гармонік, що враховуються, не наведений. Він може бути визначений у конкретних випадках, виходячи з загальноприйнятого в електротехніці 5%-ого рівня значимості результатів. Не враховуються в розрахунок $k_{\text{нс}}$ гармоніки, нехтування якими призводить до додаткової похибки понад 5%.

У стандарті не вказуються припустимі значення $k_{\text{нс}}$, значення окремих гармонік напруги і струму у вузлах мережі; немає також вказівок щодо характеру частотної характеристики мережі. Вимоги ДСТ 13109-87 відносяться до електричних мереж загального призначення; тому в деяких випадках може бути допущений $k_{\text{нс}} > 5\%$. Наприклад, на шинах перетворювачів прокатних станів припустиму несинусоїдальність напруги визначають, виходячи з умов нормальної роботи перетворювачів при відсутності на їх шинах інших навантажень.

Остання обставина послужила причиною обмежень несинусоїдальності на більш високих ступенях напруги, що містяться в стандартах деяких країн. Так, у Швеції для мереж 0,25—0,43 кВ припустимі значення $k_{\text{нс}}$ відповідають 4%, для мереж 3,3–24 кВ —

3%, 36 – 72 кВ – 2%, вище 84 кВ – 1%. У Японії для мереж 1 – 66 кВ і більше – відповідно 2 і 1%. У Європейському стандарті EN 50,006 припустимі значення гармонік напруги задаються на затискачах еталонних опорів, що рівносильне нормуванню гармонік струму.

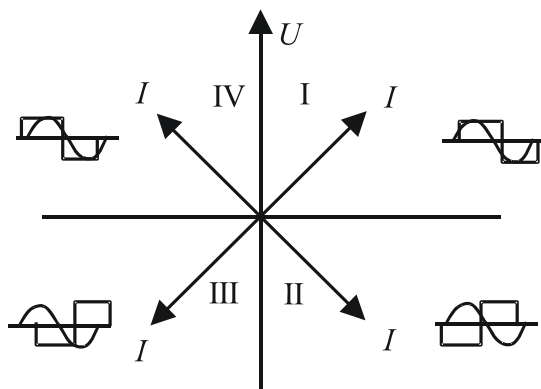
Обмеження гармонік струму, генерованих окремими не-лінійними навантаженнями чи проникаючих з розподільних мереж у мережі енергосистеми, у найбільшій мірі сприяє зменшенню впливу гармонічних перешкод на інші електроприймачі й електричні мережі. Так, у Франції і ФРН ці струми обмежуються 5% діючого значення усіх вищих гармонік струму, генерованого не-лінійними навантаженнями чи цеху, чи підприємства. У публікації 555-2 МЕК передбачене обмеження гармонік струму, створюваних побутовими електроприладами в низьковольтній системі електропостачання.

Створення й освоєння промисловістю високоефективних силових електронних приладів типу IGBT, GTO тощо дозволило істотно розширити функції силових електронних пристроїв, використовуваних для регулювання якості електроенергії. Вирішення цих задач стало особливо актуальним у зв'язку з реалізацією програм енергозбереження. За останні роки в промислових країнах впроваджені стандарти з жорсткими вимогами до якості електроенергії.

Традиційно для регулювання якості електроенергії використовувалися тиристорні стабілізатори, компенсатори реактивної потужності та пасивні фільтри. Нова елементна база силової електроніки дозволяє створювати перетворювачі змінного/постійного струму, що працюють у 4-х квадрантах комплексної площини на стороні змінного струму з імпульсною модуляцією на підвищених частотах (цей термін відповідає новому стандарту МЕК 60030551). Це дозволяє керувати потоками електроенергії в будь-якому напрямку відповідно до заданого закону.

На рис. 1.24 зображено принцип роботи чотириквadrантного перетворювача (напруга має синусоїдальну форму, а струм – трапецієподібну, при цьому фазовий зсув відповідає квадранту площини на векторній діаграмі).

Режим випрямляча



Інверторний режим

При підмиканні акумуляторів енергії до перетворювача з боку постійного струму стає можливим здійснювати обмін реактивною потужністю, що включає потужність вищих гармонік між мережею змінного струму і акумулятором. Така схема лежить в основі більшості сучасних методів регулювання якості електроенергії.

При коливаннях напруги, особливо в малопотужних електросистемах (невеликі струми короткого замикання), існує проблема їх компенсації, оскільки в цьому випадку вимагаються високошвидкісні пристрої компенсації реактивної потужності.

У цьому випадку ефективне вирішення проблеми може бути здійснене за допомогою нового покоління статичних тиристорних компенсаторів — СТК-лайт, розроблених компанією «Асеа Браун Боверн» (ABB).

Технологія компенсаторів СТК-лайт використовує в принципі ту ж саму технологію перетворення напруги мережі, що вже багато років застосовується в електродвигунових установках. Причиною того, що дана технологія не була впроваджена в пристрої компенсації реактивної потужності раніше, був факт відсутності керуючих напівпровідникових пристроїв великої потужності.

2. ЕНЕРГЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

1. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КАНАЛ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Структура енергетичного каналу електропривода

Структурну схему енергетичного каналу електропривода зображено на рис. 2.1.



Рис. 2.1

Пристрої керування зображені без поділу на блоки. У загальному випадку вони можуть бути зв'язані з усіма силовими елементами. Ці зв'язки — двох типів: від пристроїв керування до енергетичної частини — керуючі, від енергетичної частини до пристроїв — сигнали зворотних зв'язків. Двонаправлені стрілки в силовому каналі позначають те, що енергія може передаватися між двома еле-

ментами в будь-якому напрямку. Кожний з елементів кола перетворення енергії може бути охарактеризований трьома основними показниками: якістю протікання процесу, тривалістю його протікання і можливістю керування цим процесом.

Перший елемент – розподільна мережа (РМ), по якій здійснюється підведення електроенергії. Параметри мережі впливають на параметри електроенергії, що надходить на вхід електропривода. Якість електроенергії за існуючими уявленнями містить у собі несинусоїдальність і несиметрію напруги живлення, коливання і відхилення напруги і частоти. Якість напруги живлення впливає на режим роботи електропривода і навпаки, характеристики і режими силового каналу електропривода визначають режим і втрати енергії в розподільній мережі.

Питання електромеханічного й енергетичного зв'язку територіально розосереджених електроприводів, оцінки їх взаємного впливу є дуже важливими для потужних агрегатів, зв'язаних загальною мережею живлення. Режими роботи окремо взятих електроприймачів впливають на сусідні, що призводить до певних наслідків технологічного характеру. Умови реалізації енергозберігаючих заходів шляхом відключення технологічних установок вимагають вживання заходів не лише для полегшення пуску таких приводів, але і заходів, що виключають вплив на інші агрегати, в тому числі і територіально відокремлені. Відповідні проблеми виникають і при керуванні енергетичними режимами таких приводів.

Працездатність розподільної мережі як частини енергосистеми – показник, що характеризує надійність і залежить від режиму енергопостачання, а також від показників якості енергії (ПЯЕ). Енергосистема має можливість формувати як ПЯЕ, так і режим енергопостачання. Якщо електропривод містить у собі перетворювач енергії, його показники споживання енергії мають близький до ПЯЕ характер, але відрізняються тим, що показники неякісності споживання енергії деякою мірою визначають ПЯЕ системи. До цих показників належать складові повної потужності і гармонік струму та напруги, споживаних з мережі.

Миттєва потужність, обумовлена добутком миттєвих напруг і струму на вході перетворювача, дорівнює швидкості надходження електромагнітної енергії в перетворювач у даний момент і змінюється протягом періоду змінного струму і за величиною, і за знаком. Якщо миттєва потужність позитивна, то енергія надходить у перетворювач, якщо негативна – повертається джерелу. Можливість повернення енергії джерелу обумовлена тим, що з елект-

ричним колом зв'язане електромагнітне поле, що запасає її протягом однієї частини періоду змінного струму і повертає протягом іншої частини періоду. У схемі електричного кола привода цей оборотний енергетичний процес відбивають індуктивності і ємності.

Активна потужність дорівнює середньому значенню миттєвої потужності за період напруги живлення і визначає кількість електромагнітної енергії, що безповоротно перетворюється за секунду в теплоту чи інші форми енергії. Вона характеризує корисну роботу в навантаженні, включаючи корисну потужність і потужність втрат в установці.

Повна потужність визначає розрахункові струми і напруги мережі. Вона завжди більша фактично переданої навантаженню активної потужності через існування неактивних складових потужностей, що, не створюючи корисного ефекту, призводять до збільшення втрат у мережі живлення й електроприводі. Відомі три неактивних складових повної потужності: реактивна потужність, потужність спотворень і потужність несиметрії.

Реактивна потужність, чи потужність зсуву, обумовлена зсувом по фазі основної гармоніки струму навантаження щодо синусоїдальної напруги мережі живлення. При цьому під основною гармонікою струму розуміється його складова, що змінюється з частотою напруги мережі. Внаслідок зсуву основної гармоніки струму з'являється реактивна складова струму, що не бере участі у передачі активної потужності навантаженню, оскільки середнє арифметичне миттєвої потужності за період від цієї складової дорівнює нулю. У той же час, протікаючи в перетворювачі і мережі живлення, реактивна складова створює додаткові втрати енергії.

Потужність спотворень обумовлена протіканням гармонік струму, що не збігаються по частоті з напругою мережі. Середнє арифметичне миттєвої потужності, зв'язаної з цими гармоніками, за період також дорівнює нулю, однак і вони викликають додаткові втрати енергії в мережі.

Потужність несиметрії враховує додаткові втрати енергії, пов'язані з нерівномірним розподілом струму по фазах багатофазного кола. Втрати пропорційні квадрату струму, і збільшення струму в одній з фаз за рахунок інших призводить до збільшення сумарних втрат.

Електричний перетворювач (ЕП) перетворює електроенергію, що надходить на його вхід до виду, необхідного для подальшого перетворення її в механічну роботу електромеханічним перетво-

рювачем (ЕМП). Електроперетворювач керує рівнями потоків енергії до електроmechanічного перетворювача і має можливість керування параметрами споживаної і перетвореної енергії. Так, можливі:

- регулювання споживаної реактивної потужності у визначених межах (регулювання коефіцієнта зсуву першої гармоніки струму щодо напруги);
- регулювання гармонічного складу струму (регулювання коефіцієнта спотворення струму мережі відповідно до заданої функціональної залежності);
- керування амплітудою і фазою тієї чи іншої гармоніки струму мережі перетворювального пристрою для взаємної компенсації складових струму двох чи більш перетворювальних пристроїв, що живляться від загальної мережі;
- симетрування навантаження в мережі живлення у випадку використання перетворювачів великої потужності.

Як ЕП у сучасному приводі використовуються:

- керовані і некеровані випрямлячі (рис. 2.2, а);
- інвертори (рис. 2.2, б);
- перетворювачі з ланкою постійного струму (рис. 2.2, в);
- циклоконвертори чи перетворювачі з безпосереднім зв'язком (рис. 2.2, г);
- регулятори напруги і струму.

Електроmechanічний перетворювач (двигун) перетворює електроенергію в механічну та задає з урахуванням параметрів механічної частини характер механічного руху робочого органу (РО) і змінний електромагнітний момент M та частоту обертання ω при обертальному русі (силу F і лінійну швидкість V при поступальному русі).

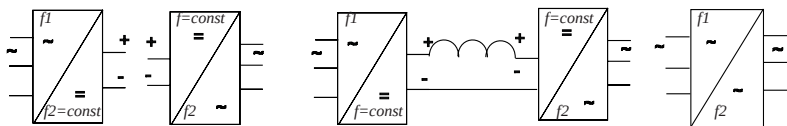


Рис. 2.2

Аналіз системи електропривода разом з перетворювачем енергії в режимах керування енергоспоживанням показує, що при незмінній швидкості обертання зміна енергетичного стану за ра-

хунок зміни струму збудження і напруги призводить до зміни параметрів енергоспоживання перетворювача енергії, причому ця зміна залежить від багатьох факторів, у тому числі й від конструкції перетворювального пристрою. Це говорить про зв'язаний енергетичний ефект перетворювача і двигуна.

До складу силової частини входить передавальний механізм (ПМ), що зв'язує електромеханічний перетворювач ЕМП і виконавчий механізм (ВМ). Найчастіше використовується редуктор, що знижує швидкість двигуна до рівня виконавчого механізму. Виконавчий механізм, наприклад, барабан лебідки – трос – відхиляючі шків, забезпечує остаточне узгодження швидкості підвіски (робочого органу РО) зі швидкістю технологічного об'єкта ТО (вантажу).

Приклад фізичної реалізації силового каналу показаний на рис. 2.3.

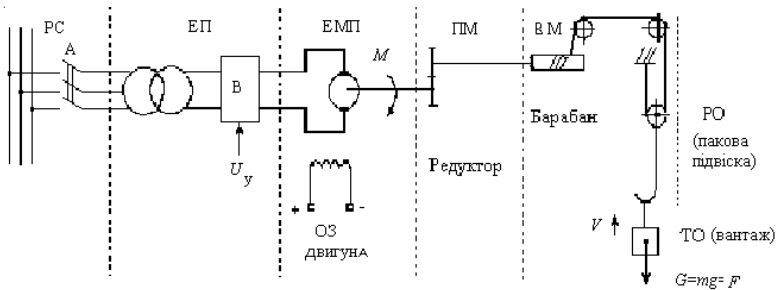


Рис. 2.3

Процес передачі і перетворення енергії в силовому каналі супроводжується її частковою втратою в кожному з елементів (DW) незалежно від напрямку її передачі. В остаточному підсумку втрати енергії виділяються у вигляді теплоти.

Всі елементи силового каналу здатні накопичувати енергію в тому чи іншому вигляді залежно від типу елемента:

- на індуктивностях накопичується енергія магнітного поля;
- на ємностях – енергія електричного поля;
- на пружних елементах і піднятих над землею масах – потенційна механічна енергія;
- на обертових і масах, що лінійно рухаються, – кінетична енергія.

У силових електроприводах найбільш ємними нагромаджувачами енергії є елементи механічної частини. Наприклад, електропривод підйому, зображений на рис. 2.3, застосований у мостово-

му крані. Визначимо запаси електромагнітної і кінетичної енергії в його елементах. Нехай індуктивність якоря двигуна $L_{\text{я}} = 10^{-2}$ Гн, а приведений момент інерції $J' = 2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Підйому номінального вантажу відповідає струм $I_{\text{я}} = 100 \text{ А}$ при частоті обертання вала двигуна $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$.

У цьому стані накопичується енергія в індуктивностях:

$$W_L = L_{\text{я}} \frac{I^2}{2} = 0,005 \cdot 10^4 \text{ Дж},$$

у механічній частині:

$$W_J = J' \frac{\omega^2}{2} = 10^4 \text{ Дж}.$$

1.2. Баланс потужностей потоків енергії силового каналу

Складемо баланс потужностей потоків енергії для силового каналу електропривода з урахуванням кінетичної енергії мас, що рухаються, вважаючи, що зміна потенціальної енергії в системі не відбувається:

$$P_e = \sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt} + \sum_k \Delta P_k + M\omega + FV,$$

де P_e – електрична потужність потоку енергії між джерелом електроенергії і розподільною ділянкою мережі;

$$\sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt} \text{ – потужності, що виникають у дина-}$$

мічних режимах і пов'язані зі зміною кінетичної енергії обертючих мас, що лінійно рухаються;

$$\sum_k \Delta P_k \text{ – сумарні втрати потужності у всіх елементах силового кола;}$$

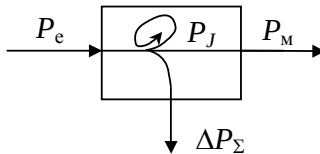
$M\omega$, FV – потужності механічної енергії, пов’язані з обертовим і поступальним рухом.

Приймаючи умовно позитивним напрямком потоку енергії від джерела до робочого органу, підкреслимо, що крім втрат енергії, значення яких не можуть бути негативними, інші складові за напрямком можуть бути як позитивними, так і негативними. Наприклад, при збільшенні кінетичної енергії механічної частини привода потужність позитивна

$$\frac{dW_J}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{J\omega^2}{2} \right) = J\omega \frac{d\omega}{dt} > 0.$$

І навпаки, при гальмуванні привода, коли кінетична енергія вивільняється, ця складова потужності негативна.

Складові рівняння можуть мати різні поєднання рівнів, напрямків енергії і знаків, визначаючи тим самим розмаїття енергетичних станів силового каналу, різноманітність режимів його роботи. Згорнемо структурну схему привода з урахуванням рівняння балансу потужностей потоків енергії (рис. 2.4).

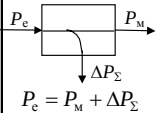
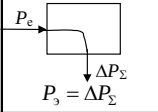
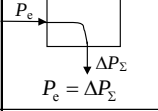
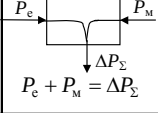
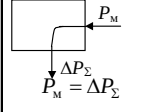
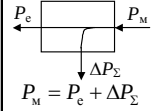
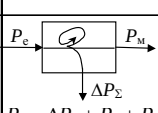


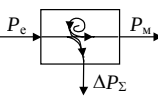
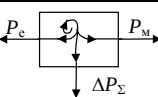
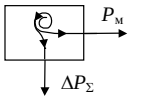
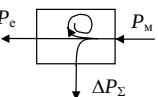
Тут показані позитивні напрямки потоків потужності: P_e – електричної потужності; P_m – механічної потужності; P_J – потужності, пов’язаної зі зміною запасу кінетичної енергії механічної частини; ΔP_Σ – сумарної потужності втрат.

Кожна зі складових потужності має самостійне значення для аналізу енергетики електропривода. Так, $P_e \int P_e dt$ – характеризують відповідно витрати потужності й енергії; $P_m \int P_m dt$ – механічну потужність і корисну роботу; $\Delta P_\Sigma \int \Delta P_\Sigma dt$ – потужність втрати і енергію процесу нагрівання елементів силового каналу. Ці складові визначають біля десятка енергетичних станів електропривода. У табл. 2.1 наведені сполучення рівнів і напрямків енергії, зображені умовною схемою балансу потужностей. Перші шість станів – статичні,

інші п'ять – динамічні режими роботи електропривода.

Таблиця 2.1

активна електрична P_e	Потужність			Баланс потужностей	Режими роботи привода
	механічна P_m	пов'язана зі змінною кінетичною енергією P_J	втрати потужності ΔP_Σ		
1	2	3	4	5	6
+	+	0	+	 $P_e = P_m + \Delta P_\Sigma$	Рушійний. Енергія, яка споживається з мережі, за винятком втрат передається механізму.
+	$M = 0$	0	+	 $P_e = \Delta P_\Sigma$	Вільний хід. Енергія, яка споживається з мережі, йде на покриття втрат у двигуні, перетворювачі і передачах.
+	$\omega = 0$	0	+	 $P_e = \Delta P_\Sigma$	Режим короткого замикання. Двигун підключений до мережі, але нерухомий. Енергія, яка споживається з мережі розсіюється в двигуні і перетворювачі.
+	-	0	+	 $P_e + P_m = \Delta P_\Sigma$	Гальмівний – протитримання. Енергія одночасно надходить від мережі і механізму, розсіюючись у вигляді втрат у перетворювачі, двигуні і передачах.
0	-	0	+	 $P_m = \Delta P_\Sigma$	Гальмівний – динамічне гальмування. Енергія розсіюється в елементах привода.
-	-	0	+	 $P_m = P_e + \Delta P_\Sigma$	Генераторний з рекуперацією енергії в мережу. Потужність, що розвивається навантаженням, передається (за винятком втрат у передачах, двигуні і перетворювачі) у мережу.
+	+	+	+	 $P_e = \Delta P_\Sigma + P_J + P_m$	Збільшення швидкості. Енергія, яка споживається з мережі йде на здійснення корисної роботи, збільшення запасу кінетичної енергії привода і частково втрачається.

1	2	3	4	5	6
+	+	-	+	 $P_e + P_J = P_m + \Delta P_\Sigma$	Рухливий режим гальмування. Зниження швидкості. Кінетична енергія, що вивільняється, разом зі споживаною з мережі йде на корисну роботу і покриття втрат.
-	+	-	+	 $P_J = P_e + P_m + \Delta P_\Sigma$	Гальмування (перехідний процес). Енергія, що вивільняється, частково повертається в мережу, йде на корисну роботу і втрачається.
0	+	-	+	 $P_J = \Delta P_\Sigma + P_m$	Гальмування (перехідний процес) при відсутності зв'язку з мережею.
-	-	+	+	 $P_m = P_J + P_e + \Delta P_\Sigma$	Збільшення швидкості за рахунок енергії, що надходить від навантаження, при цьому частина її повертається в мережу.

1.3 Коефіцієнт корисної дії

Потреба в порівнянні ефективності роботи елементів силового каналу з'явилася з можливістю вирішувати ту саму технічну задачу за допомогою різних за конструкцією і принципом роботи пристроїв. Найбільш широко використовуваний показник ефективності процесу енергоспоживання – ККД, що є мірою економічності перетворення енергії в електроприводі, мірою корисного використання споживаної енергії.

Коефіцієнт корисної дії визначається як відношення корисної роботи (енергії) на виході пристрою до витраченої енергії на вході

$$\eta = \frac{W_{\text{кор}}}{W_{\text{ввт}}}.$$

Якщо робота пристрою оцінюється за період часу, протягом якого потужності на виході і вході постійні, то ККД:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{внт}}}.$$

При змінному характері навантаження за цикл роботи t_u значення ККД

$$\eta = \frac{\int_0^{t_u} P_{\text{кор}} dt}{\int_0^{t_u} P_{\text{кор}} dt + \int_0^{t_u} \Delta P_{\Sigma} dt}.$$

Для послідовного силового каналу вихід попереднього елемента ($P_{\text{кор}}$) є входом наступного ($P_{\text{внт}}$), тому ККД визначається добутком:

$$\eta_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n \eta_i.$$

Недостатність урахування за допомогою ККД властивостей електропривода лише як перетворювача енергії і неврахування характеристик як її споживача спричиняє потребу розробки нових підходів до процесів енергоспоживання і енерговикористання.

1.4. Узагальнений критерій енергетичної ефективності силового каналу

Щоб вирішити, яка система електропривода в енергетичному відношенні має перевагу, чи всі елементи силового каналу цілком завантажені, наскільки вдало вибраний спосіб керування, як електропривод взаємодіє з джерелом енергії, необхідно застосувати узагальнений критерій енергетичної ефективності. Для цього представимо силовий канал у вигляді послідовно сполучених елементів (рис. 2.5).

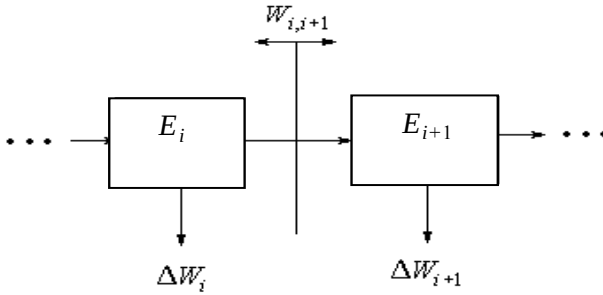


Рис. 2.5

Корисна механічна робота, реалізована електроприводом, пов'язана такими процесами:

- зміною потенційної енергії технологічного об'єкта;
- зміною кінетичної енергії об'єкта;
- зміною внутрішньої енергії об'єкта;
- зміною геометричних розмірів об'єкта.

Технологія виконання корисної роботи і параметри елементів силового каналу електропривода визначають кількість енергії $W_{i,i+1}$, якою обмінюються «сусідні» елементи, і кількість енергії, що втрачається в кожному елементі ΔW_j .

Визнання корисною не лише енергії, переданої від джерела до механізму, що виконує механічну роботу (підйом вантажу), але й енергії, що надходить від механізму (спуск); точна вказівка перетину енергетичного каналу ($i, i+1$), для якого виробляється оцінка ефективності; елементів каналу, у яких враховуються втрати; інтервалу часу, для якого справедлива оцінка, дозволили одержати узагальнений критерій у такому вигляді:

$$H = \frac{W_{i,i+1}}{W_{i,i+1} + \sum_j \Delta W_j},$$

де $W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} |P_{i,i+1}(t)| dt$ — енергії обміну між сусідніми елементами

силового каналу за період оцінки, обумовлені даним режимом і параметрами каналу; $|P_{i,i+1}(t)|$ — модуль потужності цього потоку

енергії; $\sum_j \Delta W_j = \sum_j \int_{t_1}^{t_1+\tau} \Delta P_j(t) dt$ — сумарні втрати енергії у вибраних j -

елементах силового каналу; $P_{i,i+1}(t)$ – корисна потужність, що проходить через $i, i+1$ перетин енергетичного каналу; $\Delta P_j(t)$ – втрати потужності в j -му елементі; t_1, Φ – початок і кінець часового інтервалу, в окремому випадку $t_1 = 0$ і Φ – час циклу.

Визначимо, наприклад, узагальнений критерій для статичних режимів двигуна постійного струму незалежного збудження (рис. 2.6).

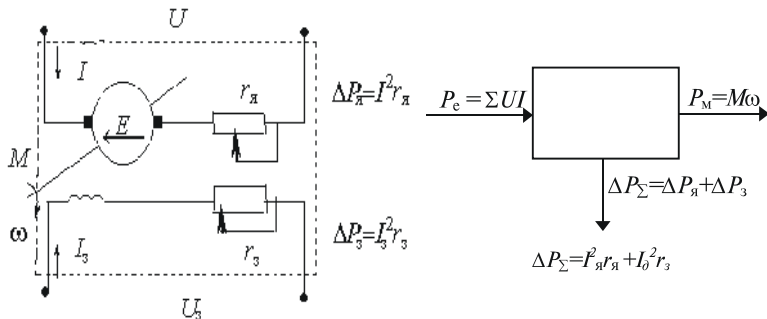


Рис. 2.6

Візьмемо до уваги лише втрати в двигуні, обумовлені тепловим розсіюванням енергії в якірному колі. Баланс потужностей для статичного режиму якірного кола двигуна визначається рівністю

$$UI = M\omega + I^2 r_{\text{я}},$$

де $UI = P_e$ – електрична потужність на вході двигуна (споживана);

$P_m = M\omega$ – механічна; $I^2 r_{\text{я}}$ – втрати в якірному колі.

Енергія, споживана по колі збудження, у процесі перетворення енергії не бере участі, вона необхідна лише для підтримки магнітного потоку машини.

Зв'язок між швидкістю і моментом двигуна:

$$\omega = \frac{UI - I^2 r_{\text{я}}}{M},$$

або з урахуванням $M = k\Phi I$, механічна характеристика (рис. 2.7).

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{Mr_{\text{я}}}{(k\Phi)^2},$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{U}{k\Phi}; M_{\text{кз}} = k\Phi I_{\text{кз}}, I_{\text{кз}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}.$$

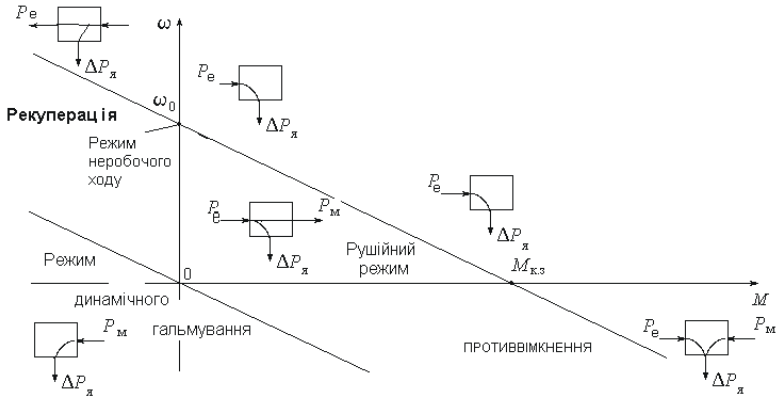


Рис. 2.7

Прийmemo в першому випадку $W_{i,i+1}$ як енергію на електричному вході машини:

$$W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} UI dt,$$

в другому — як енергію на механічному вході:

$$W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} M\omega dt.$$

Оцінюючи значення узагальненого критерію для статичних режимів, замість енергії $W_{i,i+j}$ підставимо відповідні потужності. При цьому потужність втрат у якорі:

$$\Delta P_{\text{я}} = I^2 r_{\text{я}} = UI - M\omega = M(\omega_0 - \omega).$$

Стосовно електричного і механічного входів одержимо відно

$$H_e = \frac{|UI|}{|UI| + |M(\omega_0 - \omega)|} = \frac{|M\omega_0|}{|M\omega_0| + |M(\omega_0 - \omega)|},$$

$$H_i = \frac{|M\omega|}{|M\omega| + |M(\omega_0 - \omega)|}.$$

Залежності $H_e(\omega)$ і $H_M(\omega)$ показані на рис. 2.8.

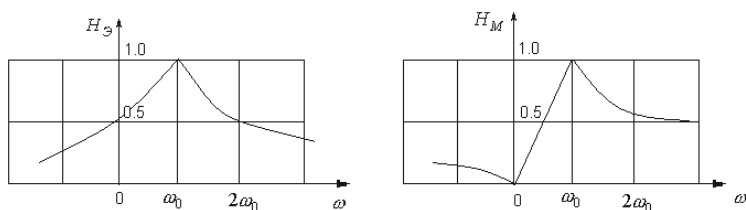


Рис. 2.8.

Коефіцієнт H_e оцінює ефективність двигуна як споживача енергії, а H_M — як перетворювача енергії. Проаналізуємо їх зміну для характерних режимів двигуна.

Для прийнятих умов ($DP_b = 0$) у режимі вільного ходу, тобто при $\omega = \omega_0$ $H_e = H_M = 1$, оскільки втрати дорівнюють нулю. У рекуперативному режимі ($\omega > \omega_0$) обидва показники знижуються, причому ефективність машини стосовно мережі H_e падає швидше, ніж H_M . У рушійному режимі $0 < \omega < \omega_0$ значення H_e і H_M знижуються, однак значення H_M знижується швидше, приймаючи при $\omega = 0$ значення $H_M = 0$, а $H_e = 0,5$. При $\omega < 0$ значення H_M зростає до 0,5, а H_e прагне до нуля (режим противімкнення). Для режиму динамічного гальмування $H_e = 0$ (двигун не зв'язаний з мережею $P_e = 0$), а $H_M = 0,5$, оскільки завжди $\Delta P_{я} = P_M$.

При урахуванні постійних втрат (не залежних від режиму роботи силового каналу) жоден з показників не може досягти значення рівного одиниці. При будь-якій фізичній реалізації системи втрати неминучі. Найбільшому значенню H повинні відповідати найменші втрати енергії

$$\Delta W_{\Sigma} = \int_0^T \Delta P_{\Sigma} dt \rightarrow \min,$$

де T — час виконання корисної механічної роботи $W_{\text{пол}}$, що визначається необхідною продуктивністю.

Граничним значенням коефіцієнта ефективності $H_{\text{гр}}$ для електропривода з даними параметрами є його значення при найменших можливих втратах ΔW_{Σ} , відповідних виконанню заданої роботи при $P_{i,i+1} = \text{const}$ і $W_{\text{пол}}/T = P_{\text{пол}} = \text{const}$. Наприклад, для перетину «робочий орган — технологічний об'єкт»

$$H_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{пол}}}{W_{\text{пол}} + \Delta W'_{\Sigma}}.$$

Щоб за допомогою критерію ефективності стимулювати енергозбереження, необхідно поставити в залежність від його значення оплату за використану електроенергію. Зокрема, для наведеного прикладу з двигуном постійного струму, такий підхід припускає збільшення оплати за режими вільного ходу.

2. ЕНЕРГЕТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Перетворювачі електроенергії перетворюють змінний струм у постійний і навпаки, змінний струм однієї частоти і величини в змінний струм з іншими параметрами, регулюють чи стабілізують вихідний струм або напругу. Тому важливе значення має характеристика перетворювача як приймача електроенергії. Економічність прийому електроенергії приводом залежить як від типу і технічних характеристик елементів привода, так і від режимів його роботи.

Застосовуються два основних типи перетворювачів — статичні і електромашинні. З погляду якості електроенергії і впливу на мережу електромашинні перетворювачі мають переваги перед статичними. Однак їх частка постійно зменшується, оскільки вони громіздкі і мають гірший ККД, ніж статичні перетворювачі.

Найбільш поширеними є статичні напівпровідникові перетворювачі на базі діодів, тиристорів і транзисторів. За своїми енергетичними властивостями вони мають ряд особливостей.

Процеси перетворення і регулювання електроенергії в статичних перетворювачах відбуваються за рахунок роботи напівпровідникових приладів у ключовому режимі, що є причиною виникнення вищих гармонічних струмів і напруг на вході і виході перетво-

руювачів. Генерація вищих гармонічних струму і напруги викликає спотворення напруги в мережах живлення і підвищені втрати в каналі передачі електроенергії, а також призводить до знакозмінних складових моменту, що негативно позначається на працездатності електричної машини.

Інша їх особливість обумовлена фазовим способом регулювання вихідної напруги. Це регулювання здійснюється за рахунок затримки моменту включення тиристорів стосовно напруги мережі. У результаті цього перша гармонічна складова струму, обумовлена частотою мережі, виявляється зсунутою на деякий кут щодо напруги мережі. Тому перетворювачі споживають реактивну потужність не тільки на частотах вищих гармонічних, але і на частоті мережі.

Ускладнення схем перетворювальних установок і методів керування ними, обумовлене бажанням підвищити коефіцієнт потужності, а також поява несиметричних за конструкцією і керуванням перетворювачів та перетворювачів з імпульсним керуванням і різними вентильними перетворювачами частоти створили великий клас вентильних установок з несиметричним навантаженням, у яких з'явилися додаткові складові повної потужності.

У загальному випадку, коли в трифазному перетворювачі відсутня симетрія навантаження, повна потужність перетворювача містить чотири складових: активну потужність P , реактивну потужність Q , потужність спотворення P_c і потужність несиметрії $P_{нс}$.

Величина і наявність тих чи інших складових повної потужності визначаються схемою перетворювача, законом керування його вентильми і характером зміни величини навантаження залежно від величини вихідної напруги. Тому при визначенні енергетичних показників і складових повної потужності необхідно враховувати конкретні особливості розглянутої установки.

Активна потужність P визначає кількість електричної енергії, що безповоротно перетворюється за секунду в теплоту чи інші форми енергії, і містить у собі корисну потужність і потужність втрат в установці. Під активною потужністю вентильного перетворювача розуміють його активну потужність на виводах мережі змінного струму, що у випрямному режимі дорівнює потужності постійного струму плюс втрати в установці, а в інверторному режимі дорівнює потужності постійного струму мінус втрати в установці.

Ця потужність визначається інтегральним виразом:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt,$$

який є середнім за період значенням миттєвої потужності $p = ui$, і при синусоїдальних напругах живлення для трифазного кола приводиться до вигляду

$$P = \sqrt{3}U_1 I_{1(1)} \cos \varphi_1$$

де U_1 — діюче значення напруги мережі, $I_{1(1)}$ — діюче значення першої гармоніки струму мережі; φ_1 — фазний кут цієї гармоніки.

Активна потужність, споживана складним колом, дорівнює сумі активних потужностей окремих елементів цього кола.

Реактивна потужність, чи потужність зсуву, Q у вентильних перетворювачах при синусоїдальних напругах джерела обумовлена зсувом основної гармоніки струму мережі щодо напруги і визначається кутом керування, індуктивностями розсіювання обмоток і струмом намагнічування трансформатора живлення.

Для однієї фази реактивна потужність визначається інтегральним виразом при частоті джерела ω

$$Q = -\frac{1}{\omega T} \int_0^T i \frac{du}{dt} dt.$$

У більшості випадків миттєві значення u і i , що входять у вираз, є або постійними значеннями, або гармонічними функціями, що дає можливість одержати дуже прості розрахункові вирази навіть для складних схем.

Для трифазного кола при симетричному навантаженні фаз вираз приводиться до більш простого вигляду:

$$Q = \sqrt{3}U_1 I_{1(1)} \sin \varphi_1.$$

Реактивну потужність складного кола можна відповідно до теорему приведення визначити алгебраїчним підсумовуванням приведених реактивних потужностей окремих елементів.

Потужність спотворення P_c — це складова повної потужності, обумовлена наявністю в кривій струму мережі вищих і нижчих гармонік, відсутніх у кривій напруги мережі. У вентильних перетворювачах вона створюється струмами вищих і нижчих гармонік, викликаних вентильною дією і режимами керування цих пристроїв.

У загальному випадку потужність спотворень визначається з виразу:

$$P_c = U_1 \sqrt{\sum_{k=2}^n I_{1(k)}^2}.$$

Потужність спотворень, обумовлена струмами вищих гармонік, шкідливо впливає на мережу живлення і підімкнені до неї приймачі, оскільки викликає додаткові втрати в міді і сталі магнітопроводів, породжує при несприятливому співвідношенні параметрів шкідливі резонансні явища і, крім того, створює істотні перешкоди в розташованих поблизу лініях зв'язку.

При циклічному керуванні вентиляним перетворювачем у кривій первинного струму виникають додаткові низькочастотні гармонічні складові. При цьому через навантаження перетворювача проходять кілька повних хвиль струму, після чого вентиля закриваються, і струм у навантаженні припиняється.

У такому перетворювачі середнє значення випрямленої напруги U_d регулюється ступінчасто за рахунок зміни співвідношення між повним часом циклу T і часом T_p , протягом якого через навантаження протікає струм. Циклічне керування з погляду використання мережі живлення аналогічне повторно-короткочасному режиму електричних машин і відрізняється від цих режимів малою тривалістю циклу.

Ступінь регулювання напруги при такому керуванні змінюється дискретно і дорівнює:

$$C_p = \frac{T_p}{T} = \frac{p}{q} = \frac{U_d}{U_{d0}} = \text{ТВ},$$

де q — повне число хвиль, що міститься в циклі; p — число за один цикл хвиль струму, що протікають через перетворювач; U_{d0} — вихідна напруга в некеруваному режимі (максимальна); ТВ — відносна тривалість протікання струму через навантаження.

Внаслідок циклічного характеру керування первинний струм випрямляча містить гармонічні як високої, так і низької частоти. У цьому випадку потужність спотворень визначається сумою низькочастотної (субгармонічної) і високочастотної складових

$$P_c = U_1 \sqrt{\sum_{k=1}^{l-1} I_{1(k)}^2}; P_c = U_1 \sqrt{\sum_{k=L+1}^n I_{1(k)}^2}.$$

Слід відмітити, що потужність спотворень всього кола не можна визначити алгебраїчним підсумовуванням потужностей спотворень окремих елементів, оскільки потужність спотворень обумовлена протіканням струмів різних частот.

Потужність несиметрії $P_{нс}$ — це складова повної потужності, що виникає тільки в багатофазному колі й обумовлена несиметрією навантаження фаз. У вентильних перетворювачах, що живляться від симетричних синусоїдальних джерел, потужність несиметрії викликається або несиметрією конструкції перетворювача, або несиметрією режимів його керування (наприклад, у перетворювачах з циклічними режимами керування).

Для трифазних вентильних перетворювачів з несиметричними первинними струмами і синусоїдальними лінійними напругами живлення повна потужність виражається рівністю

$$S = U \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2} = U \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{A(k)}^2 + \sum_{k=1}^n I_{B(k)}^2 + \sum_{k=1}^n I_{C(k)}^2},$$

де U — лінійна напруга мережі живлення;

$$I_A = \sqrt{I_{A(1)}^2 + \dots + I_{A(l)}^2 + \dots + I_{A(n)}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{A(k)}^2},$$

$$I_B = \sqrt{I_{B(1)}^2 + \dots + I_{B(l)}^2 + \dots + I_{B(n)}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{B(k)}^2},$$

$$I_C = \sqrt{I_{C(1)}^2 + \dots + I_{C(l)}^2 + \dots + I_{C(n)}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{C(k)}^2}$$

- несиметричні лінійні струми; $I_{A(l)}$, $I_{B(l)}$ і $I_{C(l)}$ при циклічному керуванні перетворювачем є гармонічними складовими струму частоти мережі.

Вираз повної потужності можна після перетворень привести до вигляду:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2 + P_{нс}^2}.$$

Потужність несиметрії може бути визначена за виразом:

$$P_{\text{нс}} = \sqrt{S_1^2 - (P^2 + Q^2 + P_c^2)}.$$

Як і потужність спотворень, потужність несиметрії не можна визначати алгебраїчним підсумовуванням окремих складових.

Потужність несиметрії є критерієм оцінки впливу несиметрії перетворювача на втрати, нагрівання і ступінь використання елементів мережі живлення. Потужність несиметрії може бути зведена до нуля повним симетруванням фазних струмів вентильного перетворювача у всьому діапазоні керування. Можлива повна компенсація несиметрії застосуванням кількох одночасно працюючих вентильних перетворювачів, сумарні фазні струми яких є симетричними.

При симетричному навантаженні фаз потужність несиметрії дорівнює нулю, і повна потужність дорівнює сумі трьох складових: активної, реактивної і спотворень:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2}.$$

Розглянуті розрахункові вирази повної потужності вентильних перетворювачів і її складових дозволяють визначити й енергетичні коефіцієнти, що характеризують перетворювач як приймач електроенергії. Це коефіцієнт потужності $k_{\text{п}}$, коефіцієнт зсуву $k_{\text{з}}$, коефіцієнт спотворень $k_{\text{с}}$ і коефіцієнт несиметрії $k_{\text{нсм}}$.

Коефіцієнт потужності $k_{\text{п}}$ трифазного перетворювача дорівнює відношенню активної потужності до повної:

$$k_{\text{п}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2 + P_{\text{нс}}^2}} = \frac{P}{UI}.$$

Активна потужність P при періодичних несинусоїдальних струмах і напругах дорівнює сумі всіх гармонічних складових:

$$P = \sum_i U_i I_i \cos \varphi_i,$$

а повна потужність дорівнює добутку діючих значень напруги і струму.

Коефіцієнт потужності визначає ступінь використання повної потужності, що поглинається з мережі і може бути виражений через інші енергетичні коефіцієнти в такий спосіб:

$$k_{\Pi} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2}} \frac{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2 + P_{nc}^2}} = k_3 k_c k_{nc}.$$

У формулі коефіцієнт зсуву k_3 характеризує величину генерованої у мережу реактивної потужності, коефіцієнт спотворень k_c характеризує вплив як вищих, так і нижчих гармонічних струму на величину коефіцієнта потужності, а коефіцієнт несиметрії k_{nc} враховує додаткове нагрівання чи втрати в елементах мережі живлення і зменшення її пропускної здатності, обумовлені несиметрією перетворювача.

Коефіцієнт зсуву k_3 характеризує співвідношення між активною і реактивною потужностями і для трифазного перетворювача визначається рівністю:

$$k_3 = \sqrt{\frac{P^2}{P^2 + Q^2}}.$$

У симетричних трифазних перетворювачах цей коефіцієнт дорівнює косинусу кута зсуву основної гармоніки струму щодо синусоїдальної напруги живлення

$$k_3 = \cos \varphi_1,$$

і в такий спосіб характеризує зсув по фазі основної гармоніки струму щодо напруги живлення.

Коефіцієнт зсуву, як одна з енергетичних характеристик процесу енергоспоживання електроприводів змінного струму, визначає економічність споживання активної потужності. У трифазній системі сума миттєвих періодичних складових потужності дорівнює нулю, тобто якщо по одній з фаз енергія віддається джерелу, то по двох інших одночасно існує потік енергії зворотного напрямку тієї ж потужності. Ще менш економічна передача енергії за допомогою вентильних перетворювачів, коли при регулюванні спотворюється форма синусоїдального струму.

Коефіцієнт спотворень трифазного перетворювача знаходиться з виразу:

$$k_c = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2}}.$$

При симетричному навантаженні фаз він визначається, як і в однофазних колах, відношенням діючого значення основної гармоніки струму мережі до діючого значення цього струму:

$$k_c = \frac{I_{1(1)}}{I_1},$$

і визначає ступінь спотворень струму мережі. При синусоїдальному струмі коефіцієнт спотворень дорівнює одиниці.

Виразимо потужність спотворень через повну потужність першої гармоніки струму і коефіцієнт спотворень:

$$P_c = U_1 I_{1(1)} \sqrt{\frac{1}{k_c^2} - 1} = \sqrt{(P^2 + Q^2) \left(\frac{1}{k_c^2} - 1 \right)},$$

$$\text{де } k_c = \frac{S_{(1)}}{S}; S_{(1)} = U_1 I_{1(1)} = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Коефіцієнт несиметрії $k_{\text{нсм}}$ трифазного перетворювача характеризує ступінь несиметрії навантаження фаз і визначається з виразу

$$k_{\text{нсм}} = \sqrt{\frac{P^2 + Q^2 + P_c^2}{S^2}}.$$

У симетричному перетворювачі цей коефіцієнт дорівнює одиниці.

Енергетичні показники електроприводів з напівпровідниковими перетворювачами визначаються:

- втратами в перетворювачі від першої гармонічної складової струму;
- втратами в силовому каналі від вищих гармонічних струмів;
- величиною споживаної реактивної енергії при регулюванні кута ϕ .

Втрати від першої гармонічної (корисної) складової струму визначають шляхом відповідного збільшення активного опору в колах обмоток двигуна. Внутрішній опір перетворювача враховує втрати на вході (у трансформаторах, мережних реакторах), виході (згладжуючих і зрівнювальних реакторах) та в самих напівпровідникових приладах.

Внутрішній опір перетворювача (випрямляча) визначають за номінальними даними:

$$r_n \approx \frac{P_n(1-\eta_n)}{\eta_n I_n^2},$$

де P_n, I_n — номінальні потужність і струм на виході перетворювача; η_n — номінальний ККД перетворювача.

У перетворювачах із природною комутацією (випрямлячах і перетворювачах змінної напруги) кут φ залежить від кута керування α .

Споживана потужність на вході перетворювача:

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi.$$

Середнє значення випрямленої потужності на виході випрямляча:

$$P_d = U_{d0} I_d \cos \alpha = U_d I_d,$$

де U_d і I_d — середні значення випрямлених напруги та струму. Знехтувавши активними втратами, одержимо $P_1 = P_d$; звідси:

$$\begin{aligned} \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi &= U_{d0} I_d \cos \alpha; \\ \cos \varphi &= \frac{U_{d0} I_d}{\sqrt{3} U_1 I_1} \cos \alpha; \\ \cos \varphi &= A \cos \alpha, \end{aligned}$$

де $A = \frac{U_{d0} I_d}{\sqrt{3} U_1 I_1}$ — коефіцієнт пропорційності.

Кут зсуву визначають як:

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2},$$

де γ — кут комутації.

У перетворювачах змінної напруги при сталій частоті кут φ залежить також від кута φ_1 між напругою і струмом електродвигуна

(рис.2.9). Такий перетворювач використовується для регулювання напруги АД, кут φ_1 визначається зі схеми заміщення.

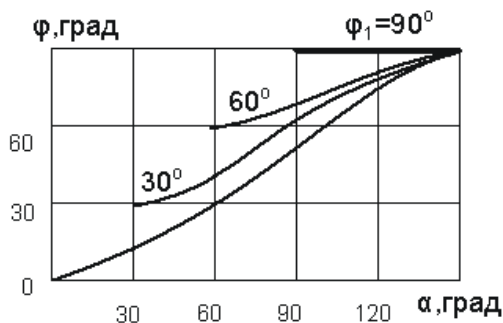


Рис. 2.9

З виразу $\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2}$ видно, що коефіцієнт потужності вентиляного електропривода постійного струму (також вентиляного двигуна із синхронною машиною і частотно-регульованим приводом з асинхронною машиною) залежить від швидкості двигуна, обумовленої кутом керування α і його навантаження, від якого залежить кут комутації γ . Збільшення діапазону регулювання (зниження швидкості) чи збільшення навантаження призводить до зменшення коефіцієнта потужності електропривода, тобто до зростання споживаної реактивної потужності з мережі.

Залежність $\cos\varphi$ від відносної швидкості ω^* при номінальному навантаженні на валу ДПС характеризується кривою, зображеною на рис. 2.10.

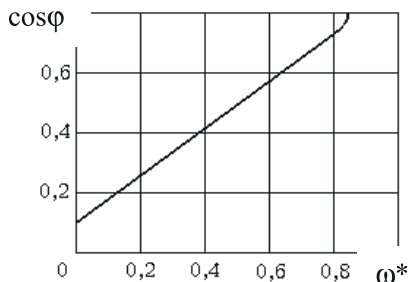


Рис. 2.10

З рис.2.10 видно, що зменшення коефіцієнта потужності відбувається пропорційно зниженню швидкості, тобто збільшенню діапазону регулювання.

Коефіцієнт спотворень визначається гармонічними складовими споживаного з мережі струму. Порядкові номери гармонічних складових, присутніх у струмі перетворювача, визначаються з виразу:

$$n = mp \pm 1,$$

де $p = 1, 2, 3, \dots$; m — пульсність перетворювача ($m = 6$ для мостових схем).

Амплітуди гармонічних складових струмів залежать від кута керування, тому коефіцієнт спотворень також є функцією кута α . Для грубої оцінки приймають при $m = 6$ для керованих перетворювачів $k_c \geq 0,95$, для некерованих $k_c \approx 1$.

Вищі гармонічні струму крім додаткових втрат у мережі, що враховуються k_c , викликають додаткові втрати в двигунах.

У двигунах постійного струму ці втрати викликаються вищими гармонічними випрямленого струму I_{dn} . Якщо перетворювач працює в режимі джерела струму, то вищі гармонічні струму визначаються розкладанням у ряд Фур'є випрямленого струму, якщо в режимі джерела напруги — то вищі гармонічні складові струму залежать від амплітуд гармонічних випрямленої напруги й опорів якоря.

Трохи інший характер мають енергетичні співвідношення у вентильних перетворювачах частоти, в яких відбувається безпосередній обмін реактивною енергією між низькочастотним навантаженням і мережею живлення, а крива вихідної напруги формується окремими вентилями і наближається до синусоїди тільки при певному співвідношенні частот мережі і вихідної. Ці обставини істотно відрізняють енергетичний режим цих пристроїв і змушують ввести для них поняття складових повної потужності як для значень протягом провідності одного вентиля, так і для середніх значень циклу.

Відмічені особливості статичних перетворювачів електроенергії викликають збільшення втрат у силовому каналі електропривода.

Істотною позитивною властивістю статичних перетворювачів є менші втрати від першої гармонічної складової струму. Це пояснюється двома причинами. По-перше, менші втрати в самому пе-

перетворювачі в порівнянні з електричною машиною (відсутні механічні втрати, втрати на збудження), і, по-друге, — менше число ступенів перетворення електроенергії. Наприклад, ККД випрямлячів досягає 0,95-0,98, а перетворювачів — 0,95.

3. ТИПОВІ СТРУКТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1. Електромашинні перетворювачі

Схема електромашинного перетворювача змінного струму в постійний показана на рис. 2.11.

Перетворювач містить приводний двигун генератора ПДГ — асинхронний чи синхронний. Головна вимога до ПДГ — жорстка характеристика (для того, щоб швидкість генератора не залежала від навантаження). Генератор — електрична машина постійного струму незалежного збудження з компенсаційною обмоткою. Необхідність компенсації полягає в тому, щоб ЕРС генератора не залежала від навантаження. Є два входи енергії — механічний (ω_r) і джерело збудження ($U_{зг}$). Для керування використовується потенціометр.

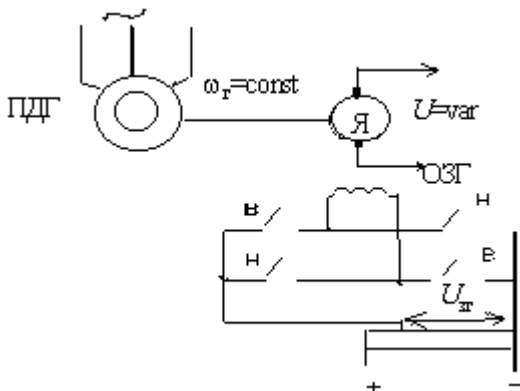


Рис. 2.11

Схема електромашинного перетворювача з регулюванням вихідної напруги по амплітуді і частоті зображена на рис. 2.12.

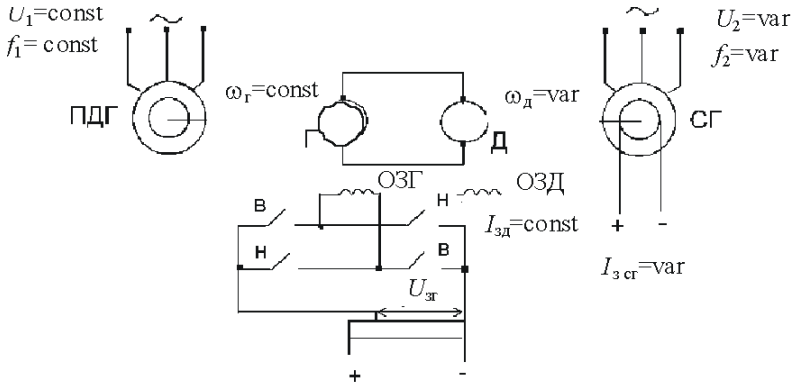


Рис. 2.12

Швидкість двигуна Д регулюється зміною напруги на якірній обмотці

$$\omega_d = \frac{E_r}{k_d \Phi_d} - \frac{I_{r_я}}{k_d \Phi_d}, \text{ чи } \omega_d = \frac{c_r I_{3г}}{k_d \Phi_d} - \frac{I_{r_я}}{k_d \Phi_d},$$

де $c_r = k_r k_{3г} \omega_r$ – стала генератора; $k_d i k_r = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивні коефіцієнти двигуна і генератора; $k_{3г}$ – коефіцієнт збудження генератора, визначається з кривої намагнічування генератора; $r_я = r_{яг} + r_{яд}$ – опір якірного кола електромашинного перетворювача.

ЕРС генератора:

$$E_r = c_r I_{3г}.$$

Вал двигуна сполучений з валом синхронного генератора СГ, частота напруги якого пропорційна швидкості двигуна, а амплітуда регулюється струмом збудження $I_{3,сг}$.

Недоліки перерахованих систем – низький ККД, наявність великого числа обертових машин, мала швидкодія. Встановлена потужність устаткування перевищує більш, ніж у 4 рази необхідну (при умовному $\eta = 1$). ККД перетворювача:

$$\eta_n \approx \eta_n^k$$

де η_n — номінальний ККД приводного двигуна; k — число ступенів перетворення енергії.

Якщо ККД електричних машин середньої потужності складає 0,85–0,9, то при подвійному перетворенні енергії ККД перетворювача не перевищує 0,7–0,8, а при чотириразовому 0,5–0,65. Тобто якщо приводний двигун генератора має потужність 1000 кВт, то 350–500 кВт витрачається на нагрівання повітря.

3.2. Статичні перетворювачі на напівкерованих електронних приладах (тиристорах)

Розглянемо найбільш застосовувані в електроприводі схеми напівпровідникових перетворювачів, основним елементом яких є тиристор (SCR — Silicon Controlled Rectifier). Тиристор — це напівкерований електронний прилад.

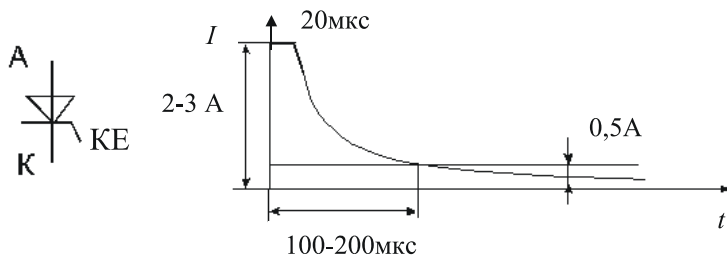


Рис. 2.13

Відкривається тиристор при подачі на керуючий електрод (КЕ) імпульсу струму і наявності на аноді позитивного потенціалу (рис. 2.13). Якщо на анод подати напругу вище припустимої прямої напруги, то відбудеться некероване самовідкривання — пробій тиристора. Тому робоча анодна напруга вибирається в кілька разів нижчою.

Відкриванням тиристора можна керувати, змінюючи струм управління I_y за величиною — горизонтальне керування. Наприклад, при $I_{y\max}$ тиристор відкривається при малій анодній напрузі. Але таке керування можливе тільки до половини напруги, тобто керування неповне.

В основному застосовується вертикальний спосіб керування (фазове керування). Вибирається $I_y = \max$, і його величина залишається постійною, а змінюється фаза подачі імпульсу струму.

Змінюючи імпульс по фазі, можна змінювати кут керування α в межах $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Вольт-амперна характеристика тиристора зображена на рис. 2.14.

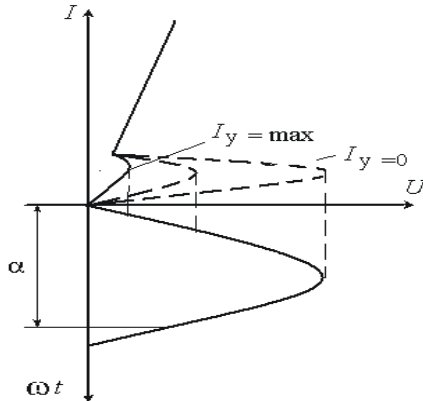


Рис. 2.14

Тиристор закривається двома способами:

- зміною полярності анодної напруги на зворотну (природна комутація);
- обривом кола протікання струму (примусова комутація).

Схема трифазного мостового перетворювача змінного струму в постійний зображена на рис. 2.15.

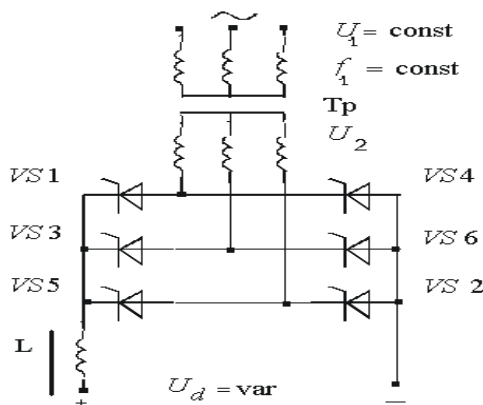


Рис. 2.15

Кут керування тиристорів α – кут між точкою природного відкриття і реальним моментом відкриття тиристора (рис. 2.16). Точка природного відкриття – рівність фазних напруг одна одній, або лінійна напруга дорівнює нулю.

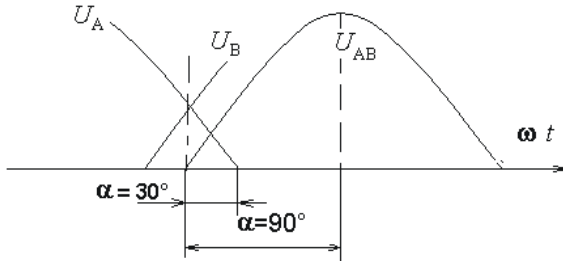


Рис. 2.16

Діаграми напруг і струмів, що пояснюють принцип роботи шестипульсового мостового випрямляча при $\alpha = 0$, зображені на рис. 2.17.

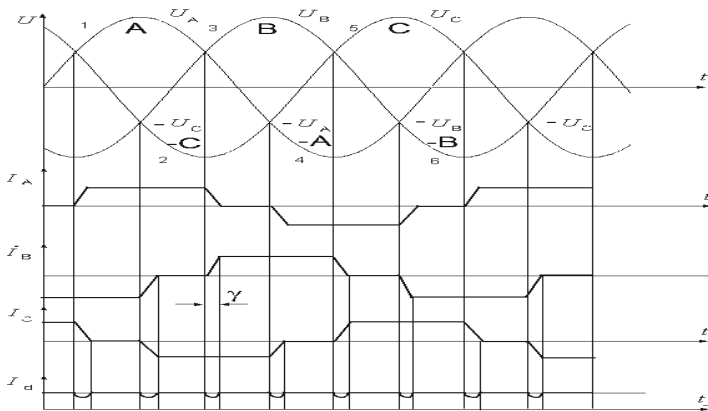


Рис. 2.17

Кут комутації γ – час переведення струму з одного вентиля на інший ($\gamma \approx 15 - 20^\circ$ частоти мережі живлення).

Середнє значення ЕРС на виході перетворювача:

$$e_d = e_{d0} \cos \alpha,$$

де $e_{d0} = k_{cx} E_{2T}$ ($e_{d0} = k_{cx} U_C$) – максимальна величина середнього значення випрямленої ЕРС; k_{cx} – коефіцієнт схеми ($k_{cx} = 1,35$ для лінійної напруги чи 2,34 для фазної); $E_{2T}(U_C)$ – ЕРС вторинної обмотки трансформатора чи напруга мережі.

Кутова характеристика перетворювача зображена на рис. 2.18.

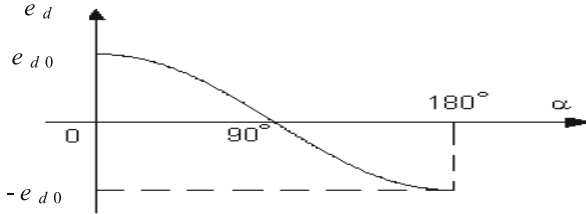


Рис. 2.18

При $0 < \alpha < 90^\circ$, $e_d > 0$ – випрямний режим;

$90^\circ < \alpha < 180^\circ$, $e_d < 0$ – інверторний режим.

Діаграма напруг на вході і виході шестипульсного мостового випрямляча при різних кутах керування зображена на рис. 2.19.

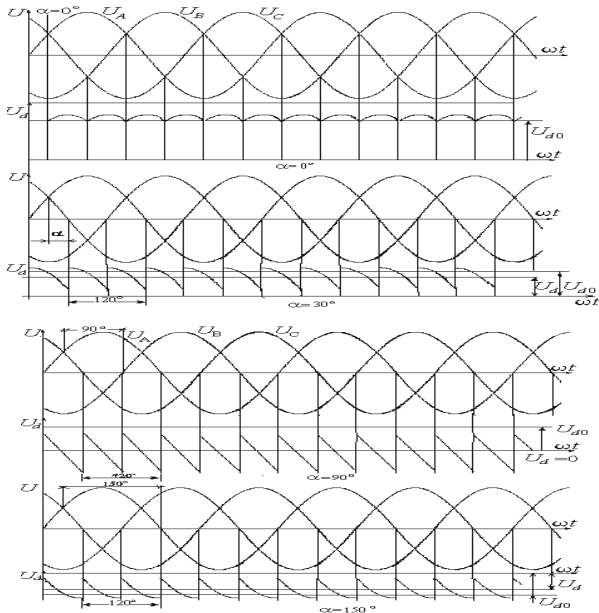


Рис. 2.19

Схема перетворювача постійного струму з нульовою точкою зображена на рис. 2.20.

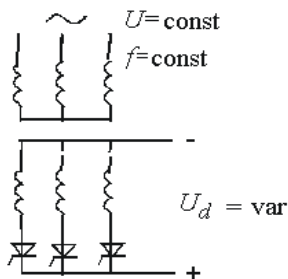


Рис. 2.20

Схема перетворювача постійного струму з імпульсним регулюванням напруги зображена на рис. 2.21.

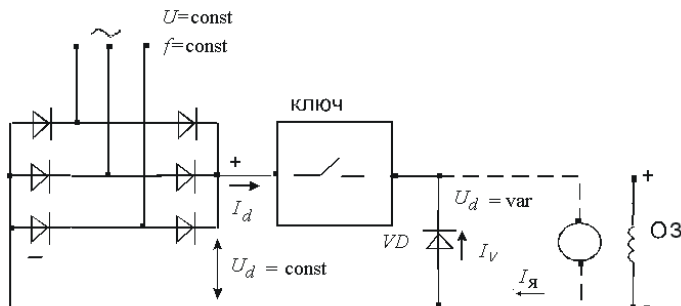


Рис. 2.21

Існують два способи керування електронним ключем – широтноімпульсний і частотноімпульсний. При широтноімпульсному період комутації ключа T_k , що складається з часу замкнутого t_z і розімкнутого t_p стану ключа, залишається постійним $T_k = t_z + t_p = \text{const}$, а змінюється час t_z . Відношення часу замкнутого стану ключа до періоду комутації називається скважністю:

$$D = \frac{t_z}{T_k} = \frac{t_z}{t_z + t_p}.$$

При замкнутому ключі струм у навантаженні (наприклад, у двигуні постійного струму) протікає під дією напруги випрямля-

ча, а при розімкненому – під дією ЕРС самоіндукції, замикаючись через діод VD (електродинамічний режим гальмування). Струм у якорі має пульсуючий характер (рис. 2.22, а). Струм у навантаженні при $t = t_3$ дорівнює струму, що протікає з випрямляча $I_{я} = I_d$, при $t = t_p$ струм $I_{я} = I_v$.

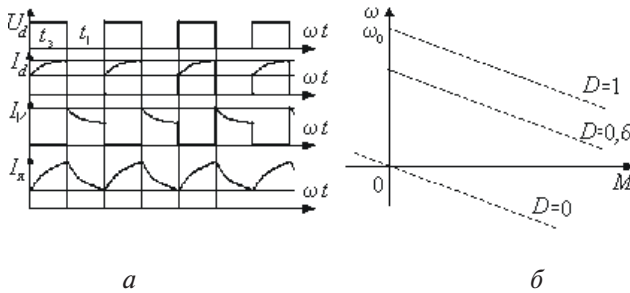


Рис. 2.22

Регулюючи скважність D роботи ключа, можна одержати різні характеристики (рис. 2.22, б). При $D = 1$ на якор постійно подається повна напруга мережі, і двигун постійного струму (ДПС) має природну характеристику. При розімкненому ключі $D = 0$ напруга не подається, і двигун переходить у режим електродинамічного гальмування.

Електронні ключі виконуються на транзисторах, тиристорах і тиристорах, що запираються. Схема електронного ключа на тиристорі зі штучною комутацією зображена на рис. 2.23.

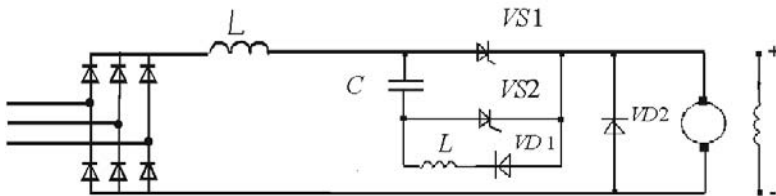


Рис. 2.23

Для ввімкнення привода в роботу спочатку сигнал подається на допоміжний тиристор $VS2$, при відкриванні якого по якорному колу двигуна протікає струм заряду конденсатора C . Потенціал на верхній обкладці конденсатора стає позитивним після закінчення заряду, а струм зменшується до нуля.

Потім по черзі подаються сигнали на відкривання тиристорів $VS1$ і $VS2$. При відкриванні основного тиристора $VS1$ двигун підключається до мережі. Через тиристор $VS1$ проходить струм якоря і струм перезаряду конденсатора C , що замикається по контурі $C-VS1-VD1-L$. У результаті перезаряду конденсатор одержує негативний потенціал на верхній обкладці.

Наступне відкривання $VS2$ призводить до шунтування основного тиристора конденсатором. При цьому потенціал анода $VS1$ стає негативним стосовно катода, що викликає його запирання в результаті перезаряду ємності. Верхня обкладка конденсатора після закінчення процесу стає позитивною.

Перевага імпульсного способу – простота, $\cos\varphi = 1$. Недолік – пульсації струму.

Схема перетворювача змінного струму з регулюванням напруги при постійній частоті зображена на рис. 2.24.

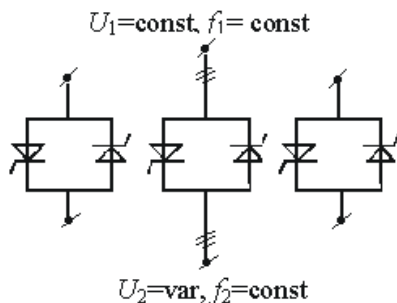


Рис. 2.24

Схема перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком зображена на рис. 2.25.

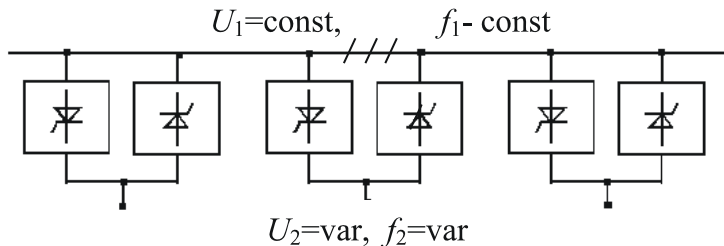


Рис. 2.25

Такий перетворювач впливає на мережу внаслідок більшого числа випрямних мостів (6 штук) — вища частота пульсації, але менша амплітуда. Керування здійснюється за частотним законом $\frac{U}{f} = \text{const}$. Однак вихідна частота перетворювача не перевищує 30 % вхідної, тобто 15 Гц. Крім того, перетворювач має складну систему керування.

Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму з автономним інвертором зображена на рис. 2.26.

Перетворювач складається з керованого випрямляча КВ, за допомогою якого здійснюється регулювання напруги, і автономного інвертора АІ зі штучною комутацією, за допомогою якого регулюється частота. Комутація тиристорів інвертора здійснюється за рахунок енергії, накопиченої в реактивних елементах L і C . Діоди $VD1$ – $VD6$ служать для відділення комутуючого струму від струму навантаження.

Для віддачі реактивної енергії в мережу служить випрямляч В, увімкнений зустрічно основному. Дросель Др і ємність $C1$ служать для згладжування струму і напруги на вході інвертора. Ємність $C1$ вказує на те, що інвертор виконаний за схемою джерела напруги (вихідний струм синусоїдальної форми, а напруга — ступінчатої). Індуктивності $L1$, $L2$ призначені для обмеження струму розряду через діоди випрямляча В.

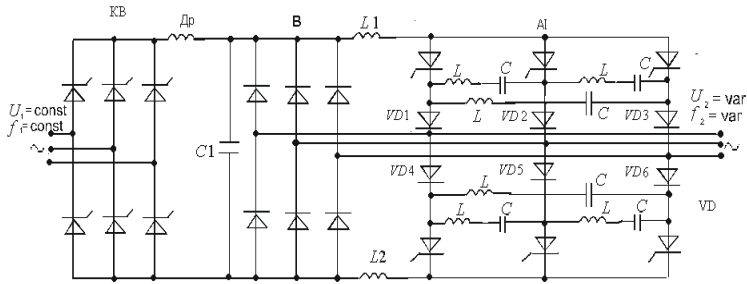


Рис. 2.26

Такий перетворювач відрізняється високими ККД (близько 0,96) і швидкодією. Недоліки — значна встановлена потужність перетворювача ($P \approx 2,5 P_n$), наявність реактивних елементів і складність системи керування.

3.3 Статичні перетворювачі на керованих електронних приладах

Масове виробництво перетворювачів для електропривода на основі сучасних двоопераційних приладів освоєно практично усіма провідними електротехнічними компаніями світу. При всьому різноманітті існуючих перетворювачів, їм властиве використання силової схеми однієї і тієї ж класичної структури (рис.2.27): трифазний мостовий некерований (нерегульований) випрямляч В, LC – фільтр ланки постійного струму, трифазний мостовий автономний інвертор напруги (АІН) із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Некерований режим роботи випрямляча і властивості силових керованих ключів інвертора знімають питання обмеження di/dt і du/dt у колах вентилів, застосування громіздких снабберів для захисту від перенапруг тощо.

Розмаїтість силових схем зводиться лише до розходження типів і способів увімкнення комутаційних і захисних апаратів (електромагнітні пускачі, автоматичні вимикачі, запобіжники, струмообмежувальні реактори), датчиків струму і напруги, пристроїв гальмування (мережний інвертор для рекуперації, ключ електродинамічного гальмування). Акцент розробки силової частини перетворювачів змістився з галузі схемотехніки (істотної для тиристорних пристроїв) в галузь оптимізації конструкторсько-компонувальних рішень і теплофізичних розрахунків, підвищення стійкості до аварійних режимів.

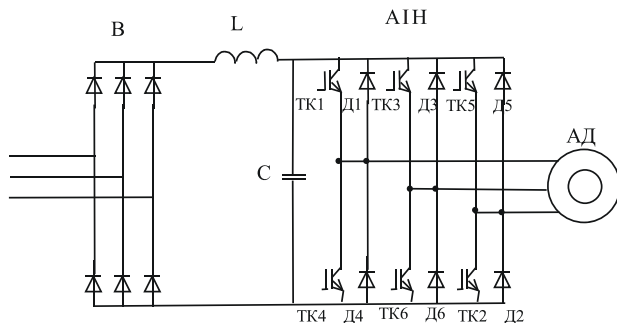


Рис. 2.27

Основний вплив на споживчі властивості перетворювачів і електроприводів чинить їх інформаційний канал — використову-

вані алгоритми керування і регулювання та реалізуючі їх мікроконтролерні системи МСУ. Саме останні визначають регульовальні властивості і динамічні характеристики електропривода, його функціональність і адаптованість до складних систем автоматичного керування різними технологічними процесами.

Автономний інвертор (рис. 2.27) живиться від постійної напруги з виходу некерованого діодного випрямляча або від автономного джерела постійної напруги. Ємність C згладжує пульсації на виході випрямляча. Ключ складається з біполярного ключа VT з польовим керуванням (IGBT-ключ) і діода VD , ввімкненого протилежно напрузі живлення. Діод VD призначений для повернення енергії в мережу у випадку, коли струм через ключ має напрямок протилежний напрямку напруги на ньому. Подібна ситуація спостерігається при реактивно-активному навантаженні. Схема сполучення діодів $VD1$ - $VD6$ є трифазним мостовим шестинапівперіодним діодним випрямлячем, що дозволяє здійснити повернення енергії від двигуна в мережу.

Для реалізації режиму рекуперації замість некерованого випрямляча використовують керований реверсивний перетворювач на тиристорах. Режим електродинамічного гальмування здійснюється підключенням зовнішнього реостата через додатковий ключ IGBT паралельно автономному інвертору.

У типовій схемі автономного інвертора напруги міститься 6 ключів. Транзисторні ключі, перемикаючись у певній послідовності, формують на виході інвертора періодичний трифазний сигнал. У такому інверторі фази двигуна можуть бути підключені до потенціалів постійної напруги $2^3=8$ різними способами. Результуючий вектор напруги на виході АІН має, відповідно, 8 положень, з яких 2 положення є виродженими, тому що вони призводять до нульового значення результуючого вектора.

Регулювання частоти трифазної напруги на виході АІН здійснюється шляхом зміни частоти перемикань транзисторних ключів. Зміна амплітуди трифазної напруги здійснюється за допомогою широтно-імпульсного регулювання.

У сучасних IGBT час перемикання менше однієї мікросекунди. Така висока швидкість перемикання дозволяє повною мірою використовувати переваги методу широтно-імпульсної модуляції: здійснювати комутацію на частоті понад 16 кГц, що вирішує проблему акустичних шумів, зменшує масу і габарити реактивних елементів — фільтрів вищих гармонік. Нарешті при великій кратності частоти комутації і низькою частотою вихідної напруги значно

підвищується швидкодія системи регулювання, що дозволяє поліпшити динамічні характеристики перетворювача.

У той же час при підвищенні частоти комутації значно зростає частка комутаційних втрат, через що приходится знижувати припустимі струми і напруги при частотах 5 кГц і вище. Збільшення комутаційних втрат зменшує перевантажувальну здатність транзисторів. Швидке перемикання транзисторів через ефект di/dt на паразитних індуктивностях у контурі комутації призводить до появи значних перенапруг на елементах схеми. При швидких перемиканнях транзисторів на виході перетворювача швидкість зміни напруги може досягати значень 5000 В/мкс. При довжині сполучних кабелів між перетворювачем і навантаженням 10-100 м і більше напруги можуть досягати двократних стосовно номінальних значень. Це явище особливо небезпечне в регульованих електроприводах. Під впливом цих швидкозростаючих, із крутим фронтом, значних за величиною імпульсів напруги може бути ушкоджена ізоляція двигуна.

Відмічені проблеми виникають при так званій жорсткій комутації і використанні широтно-імпульсної модуляції в її класичному варіанті. Очевидний шлях подолання зазначених труднощів — зниження швидкості перемикань. Зниження частоти ШІМ є бажаним, однак воно призводить до зростання амплітуд найближчих до основної вищих гармонік на виході інвертора, що спричиняє збільшення втрат у двигуні. З іншого боку, ШІМ істотно послаблює лише найближчі до основної гармоніки. Для ослаблення гармонік більш високої частоти необхідно підвищувати частоту комутації ключів інвертора, що, природно, призводить до збільшення втрат у перетворювачі частоти.

Інший напрямок цих робіт пов'язаний з відродженням техніки резонансних інверторів, при якій «м'яке» перемикання вентилів відбувається при нулі струму чи напруги.

Недоліком такої схеми є те, що форма одержуваної фазної напруги відрізняється від синусоїди. У результаті енергетичні характеристики АД погіршуються, якщо їх порівняти з енергетичними характеристиками двигуна, що живиться від трифазної синусоїдальної напруги. Для поліпшення енергетичних характеристик привода використовуються різні способи широтно-імпульсної модуляції: синусоїдальні, лінійні і їх різні модифікації. Широтно-імпульсна модуляція має на меті послаблювати істотні по амплітуді вищі гармоніки, найбільш близькі до основної. Це досягається тим, що протягом періоду повторюваності $T/6$ здійснюється

періодична зміна основної діаграми роботи ключів інвертора при одночасному введенні нульових ділянок.

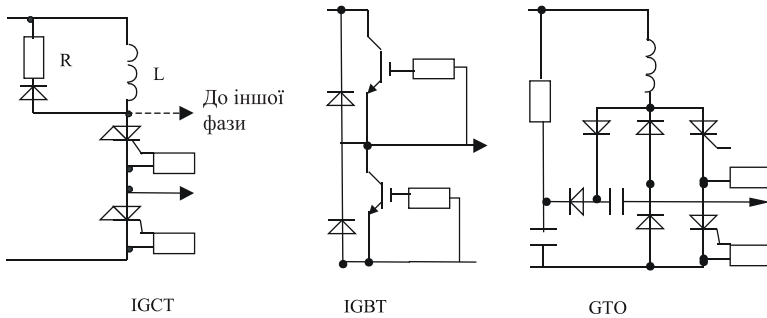


Рис. 2.28

На рис. 2.28 показані фазові плечі GTO, IGCT і IGBT інверторів напруги, звідки видно число основних компонентів в інверторі. У цьому відношенні IGBT пропонує найбільш витончене рішення, оскільки є можливість використання мінімальної кількості елементів, керуючі блоки є частиною IGBT модулів. Дійсно, для струмів до 200 А повний інвертор міг би бути виготовлений у вигляді одного модуля і число компонентів буде 1, але при 1200 А це число дорівнює 6 (6 окремих ключових модулів), а для 3600 А — 18 (3х1200 А).

З погляду надійності число компонентів — це число необхідних дискретних компонентів у модульному чи іншому виконанні, що поставляються виготовлювачем напівпровідників. Таким чином, інвертор на силових IGBT на струм 50 А (за вимоги не застосовувати паралельного сполучення приладів) мав би 18 пристроїв (IGBT + діод + керуючий блок), у кожного з яких визначена норма наробітку на відмовлення. Ці норми залежать від багатьох факторів: числа кристалів, монтажних проводів, паяних та рознімних з'єднань, робочої температури, електричних і механічних навантажень тощо. Одиначний напівпровідниковий елемент буде мати типову, властиву йому норму наробітку на відмовлення, наприклад 10 (10 відмовлень протягом 1000000000 год. роботи), і безпосередньо керуючий драйвер, що складається з багатьох активних і пасивних компонентів, мав би норму відмовлення приблизно 500.

IGBT складаються з багатьох стандартних індивідуальних кристалів, установлених паралельно, що одночасно є як сильною, так

і слабкою стороною. Стандартні кристали дозволяють робити стандартні пластини, що закінчуються одним виробом на струм від 50 до 1000 А, а монолітний підхід, заснований на використанні кристалів, вирізаних з великої пластини, гарантує найкраще використання кремнію. З іншого боку, з ростом струму приладу пропорційно збільшується норма відмовлення.

У той час GTO, незважаючи на монолітну провідникову структуру, вимагає багатьох допоміжних компонентів, і, як видно з рис. 2.28, кожен ключ має певний коефіцієнт норми відмовлення (не говорячи вже про вартість і масогабаритні параметри).

Характерною рисою переліку якостей «ідеального» ключа є надійність, тобто щоб повний складовий показник був обмежений, незалежно від того, досягають компоненти видимих розмірів чи ні. У цьому змісті IGC технологія гарантує, що не тільки зовнішніх компонентів в інверторі буде небагато (приблизно 3), але і що всі «внутрішні» напівпровідники будуть монолітними. На рис. 2.29 порівнюється число силових компонентів (пасивні елементи + кристали, крім елемента керування) для інвертора, що працює від 2,8 кВ із двохпозиційним ШІМ на частоті 600 Гц для всіх трьох технологій.

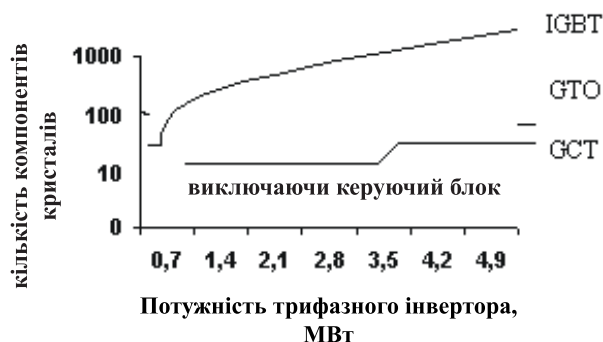


Рис. 2.29

На рис. 2.30 зображена схема двоключового «інтелектуального» силового IGBT-модуля з повними функціями захистів від перевантаження по струму, короткого замикання, перенапруг і перегрівання силових елементів.

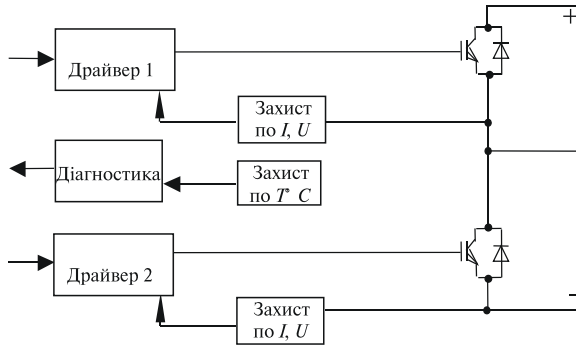


Рис. 2.30

В електроприводі постійного струму основні способи керування реалізуються за допомогою зміни напруги якоря і потоку збудження. У загальному випадку потрібно забезпечити керування двигуном постійного струму у всіх режимах роботи, у тому числі в реверсивному режимі з рекуперацією енергії в первинне джерело живлення. Найбільш ефективно всі ці режими реалізуються в схемі, що забезпечує роботу в чотирьох квадрантах на стороні постійного струму, виконаній на цілком керованих ключах і регульованій способом широтно-імпульсної модуляції (рис.2.31). На малюнку: а – схема; б – діаграма станів транзисторів.

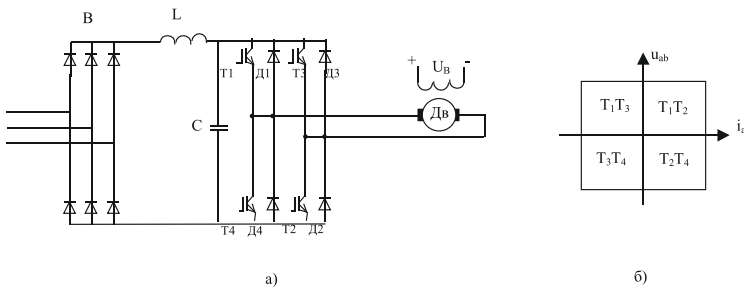


Рис. 2.31

4. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ (НЕРЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА) У СТАТИЧНОМУ РЕЖИМІ

4.1. Втрати потужності

Втрати потужності в електричній машині поділяються на постійні і змінні:

$$\Delta P = K + V.$$

Постійні втрати потужності не залежать від струму двигуна (навантаження) і містять у собі втрати :

- у сталі K_c ;
- механічні від тертя в підшипниках і вентиляційні K_m ;
- від струму збудження K_z .

Втрати в сталі залежать від амплітуди і частоти зміни потоку:

$$K_c = K_{cн} \left(\frac{f}{f_n} \right)^b \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} \right)^2,$$

де $K_{cн}$ – втрати при номінальній частоті обертання двигуна;
 $b = 1,2 \div 1,5$ – показник, що залежить від марки електротехнічної сталі.

Механічні втрати визначаються кутовою швидкістю двигунів:

$$K_m = K_{mн} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^n,$$

де $n = 1 \div 2$.

Втрати від струму збудження для ДПС незалежного збудження:

$$K_z = I_z^2 r_z.$$

В асинхронних двигунах немає спеціальної обмотки збудження, призначеної для створення магнітного потоку. Потік АД ство-

рюється реактивною складовою струму статора I_μ , яка називається струмом намагнічування. Тому втрати АД від струму намагнічування складають:

$$K_\mu = 3I_\mu^2 r_1,$$

де r_1 – активний опір обмотки статора.

Постійні втрати в АД складаються з механічних – K_m , втрат у сталі статора K_{c1} і ротора K_{c2} , а також втрат у міді обмотки статора від протікання струму намагнічування I_μ :

$$K = K_m + K_{c1} + K_{c2} + 3I_\mu^2 r_1.$$

Змінні втрати визначаються втратами в міді обмоток двигунів при протіканні по них струму навантаження, що змінюється. Для ДПС:

$$V = I^2 r_\Sigma = I_\Sigma^2 r_\Sigma \left(\frac{I}{I_\Sigma} \right)^2 = V_\Sigma \left(\frac{I}{I_\Sigma} \right)^2,$$

де $V_\Sigma = I_\Sigma^2 r_\Sigma$ – номінальні змінні втрати.

Для асинхронних двигунів змінні втрати складаються з втрат в обмотках статора і ротора за винятком втрат від струму намагнічування:

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 r_1 + 3(I_2')^2 r_2' = 3(I_2')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma^2} \right),$$

де V_1, V_2 – втрати в міді статора і ротора; $I_2' r_2'$ – струм і опір ротора, приведені до обмотки статора; $\sigma = \frac{I_2'}{I_1}$.

$$\text{Тоді } V = 3(I_{2n}')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma_n^2} \right) \left(\frac{I_2'}{I_{2n}'} \right)^2 = V_n \left(\frac{I_2'}{I_{2n}'} \right)^2,$$

де $V_n = 3(I_{2n}')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma_n^2} \right)$ – номінальні змінні втрати;

$$\sigma_n = \frac{I'_{2n}}{I_{1n}} \approx 0,85 \div 0,95.$$

Для СД змінні втрати потужності:

$$V = 3I_1^2 r_1 = 3I_{1n}^2 r_1 \left(\frac{I_1}{I_n} \right)^2 = V_n \left(\frac{I_1}{I_n} \right)^2.$$

Якщо позначити кратність струму двигунів через X , то змінні втрати потужності для різних двигунів:

$$V = V_n X^2.$$

Повні втрати потужності в електромеханічному перетворювачі:

$$\Delta P = K + V_n X^2 = V_n (a + X^2),$$

де $a = \frac{K}{V_n}$ – коефіцієнт втрат (для двигунів нормального виконання залежно від потужності і швидкості $a \approx 0,5 \div 2$).

Втрати потужності в номінальному режимі ($X=1$) визначаються за паспортними даними:

$$\Delta P_n = P_n \frac{1-\eta_n}{\eta_n}.$$

Постійні втрати потужності:

$$K = \Delta P_n - V_n.$$

Аналіз енерговикористання двигуна як електромеханічного перетворювача енергії показує, що рівень втрат енергії в ньому залежить як від режиму енергоспоживання, так і від якості підведеної до нього енергії. Втрати потужності в електричній машині постійного струму складають:

$$\Delta P = K_M + K_C + K_Z + V.$$

Крім першої складової ці втрати можна віднести до класу втрат, що «нагрівають», визначаючи тепловий режим електричної

машини. Оскільки струм якоря залежить від статичного моменту і магнітного потоку, то для кожного статичного навантаження є струм збудження, при якому сумарні втрати мінімальні.

Однак пошук мінімуму сумарних втрат призводить до перерозподілу втрат по активних частинах електричної машини, у результаті чого деякі з них виявляються в більшому температурному полі ніж без оптимізації, що позначається на працездатності двигуна. Особливо це відчутно для машин, що пройшли ремонт із частковою або повною заміною обмотки якоря.

Ремонтні роботи, передремонтна підготовка й експлуатація призводять до того, що результуюча індукція після кожного з ремонтів знижується. При цьому спостерігається зростання складових втрат, викликаних вихровими струмами. Встановлено, що кожен наступний ремонт збільшує втрати в сталі на 5 – 13 %. Зростаючі втрати в основному зосереджуються в місцях локальних чи розподілених дефектів у верхній частині зубців. Це призводить до різкого збільшення теплової напруженості і швидкого порушення ізоляції.

В електричних машинах змінного струму причина збільшення втрат залишається без змін, а на їх перерозподіл у значній мірі впливають як зміна характеристик електротехнічної сталі, так і режим напруги живлення. При цьому встановлено, що ремонт асинхронних двигунів масових серій призводить до зменшення їх надійності.

У високовольтних електричних машинах у випадку наявності несправності віддаляється частина секцій обмотки статора, у результаті чого двигун змінює свій режим роботи, будучи при цьому вже несиметричним по конструкції. Як встановлено, неякісність напруги живлення, несиметрія конструкції є першопричинами вібрації обмотки й інших частин двигуна. Вібрації призведуть до передчасного зношування і механічної частини, зокрема, підшипників.

Втрати енергії за час роботи двигуна з постійним навантаженням визначаються добутком потужності втрат на час роботи:

$$\Delta W = \Delta P_t \cdot t.$$

При роботі двигуна з циклічним навантаженням втрати енергії

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i,$$

де ΔP_i , t_i – втрати потужності і час роботи при навантаженні;
 $X_i = \frac{I_i}{I_{\text{н}}}$; n – число значень навантаження на окремих ділян-
 ках; $\sum_{i=1}^n t_i = t_{\text{ц}}$ – час циклу.

4.2. Коефіцієнт корисної дії електропривода

Витрачена енергія відрізняється від корисної на величину втрат. Потужність втрат енергії містить постійну і змінну складові. Постійна складова не залежить від навантаження (корисної потужності), змінна – пропорційна корисній потужності в степені більше 1.

Коефіцієнт корисної дії електромеханічного перетворювача є відношенням повної механічної потужності на валу до потужності, споживаної з мережі. Прийmemo, що при роботі на природній ха-
 рактеристиці $X = \frac{I}{I_{\text{н}}} = \frac{P}{P_{\text{н}}}$, тоді ККД:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{н}}} = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{X}{X + \left(\frac{V_{\text{н}}}{P_{\text{н}}}\right)(a + X^2)}.$$

У номінальному режимі $X = 1$:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{\text{н}}}{P_{\text{н}}}\right)(1 + a)}.$$

Залежність ККД від кратності навантаження має максимум при:

$$X_{\text{опт}} = \sqrt{a}.$$

Максимальне значення ККД:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_H}{P_H} \right) \sqrt{a}} .$$

На рис. 2.32 зображена залежність коефіцієнта корисної дії від потужності.

Значення ККД, що відповідають робочому діапазону, знаходяться в межах $0 \dots P_H$. Не випадково номінальне значення навантаження (потужності) вибирається при $\eta < \eta_{\max}$. Пояснюється це тим, що практично всі пристрої працюють у режимах зі змінним у часі рівнем навантаження. Крім того, при розрахунку електромашин передбачаються накопичення по потужності. Це призводить до того, що фактичне навантаження пристроїв виявляється меншим номінального. Взагалі значення ККД вище.

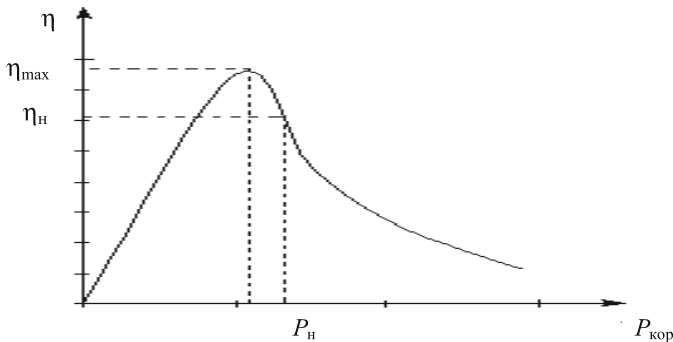


Рис. 2.32

Зазначене співвідношення між максимальним і номінальним значеннями ККД сприяє підвищенню ККД циклу, оскільки миттєві значення зосереджуються біля максимуму. З огляду на те, що реально навантаження асинхронних двигунів знаходяться в області $(0,6 \dots 0,7)P_H$, розробники масової серії двигунів 4А найбільший розрахунковий ККД розташували саме біля цих значень. Залежність номінального ККД асинхронних двигунів від номінальної потужності показана на рис. 2.33 (1 – АД серії А2; 2 – АД серії А4 ($w_0 = 157$ і 107 сек^{-1}); 3 – АД серії А4 ($w_0 = 314 \text{ с}^{-1}$)).

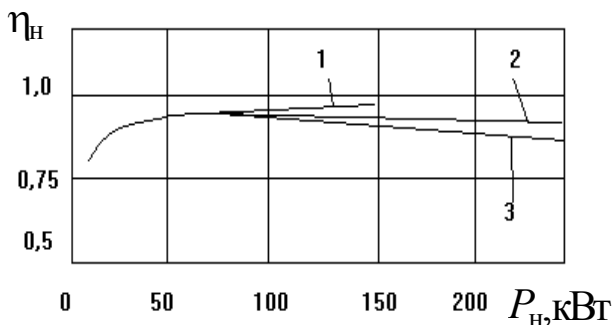


Рис. 2.33

Якщо привод постійно працює зі сталим навантаженням то вигідніше, щоб при цьому ККД був максимальним. У цьому випадку доцільно спеціально проектувати елементи силового кола з малими питомими втратами (меншими густиною струмів, індукцій, коефіцієнтами тертя в механічній частині), із застосуванням високоякісних матеріалів. Додаткові витрати на матеріали окупляться меншими втратами енергії й у підсумку — меншими сумарними витратами.

Найбільше значення ККД двигунів знаходиться в області номінального навантаження. Тому для зменшення втрат потужності необхідно забезпечити повне навантаження й обмежити їх неробочий хід. При наявності малозавантажених двигунів доцільно зробити їх заміну на двигуни менших габаритів.

4.3. Коефіцієнт потужності електропривода

Електропривод змінного струму споживає з мережі активну P і реактивну Q потужності. Активна потужність витрачається на здійснення електроприводом корисної роботи і покриття втрат у ньому, а реактивна забезпечує створення обертового магнітного поля двигуна і безпосередньо корисної роботи не виконує.

Коефіцієнт потужності електропривода:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}},$$

де S – повна споживана потужність.

Кут φ визначає зсув фаз між напругою мережі і струмом електропривода. Електропривод, споживаючи реактивну потужність, додатково навантажує систему електропостачання, викликаючи додаткові втрати напруги й енергії в її елементах.

Якщо електропривод працює в якомусь циклі при різних навантаженнях чи швидкостях, то він як споживач електричної енергії характеризується середньозваженим чи цикловим коефіцієнтом потужності, що визначається відношенням спожитої активної енергії за цикл W_a до повного W :

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{W} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}.$$

Активна і реактивна потужності АД:

$$\begin{aligned} P &= M\omega_0 + 3I_1^2 r_1; \\ Q &= 3I_{\mu}^2 x_{\mu} + 3I_1^2 x_1 + 3(I_2')^2 x_2'. \end{aligned}$$

Для більшості АД $\cos \varphi_n \approx 0,8 \div 0,9$. Для цих значень $Q = (0,5 \div 0,75)P$, тобто АД на кожен кіловат активної потужності споживає з мережі 0,5...0,75 квар реактивної потужності. Чим нижче $\cos \varphi$, тим більшу реактивну потужність споживає АД з мережі, завантажуючи її додатковим струмом і викликаючи в ній додаткові втрати.

Коефіцієнт потужності АД істотно залежить від його навантаження. При неробочому ході АД коефіцієнт невеликий, оскільки відносно велика частка реактивної потужності в порівнянні з активною. Збільшуючи навантаження АД зростає і $\cos \varphi$, досягаючи свого максимального значення приблизно в області номінального навантаження. Залежність $\cos \varphi$ від кратності механічного навантаження для АД серії 4А при різних рівнях номінальних $\cos \varphi_n$ зображена на рис. 2.34 (1 – $\cos \varphi = 0,9$; 2 – $\cos \varphi = 0,8$; 3 – $\cos \varphi = 0,7$).

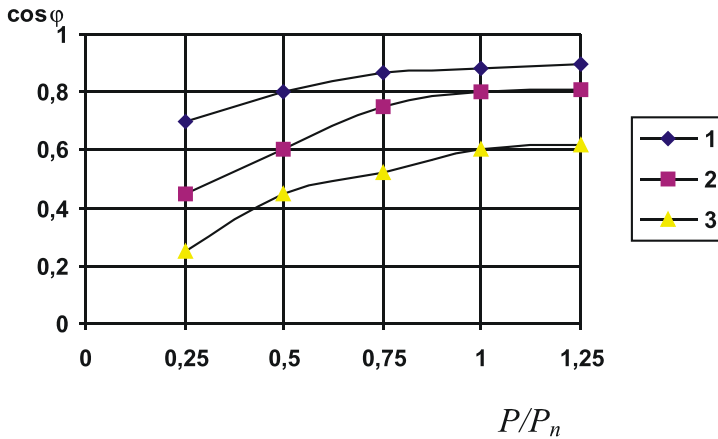


Рис. 2.34

Асинхронні двигуни є основними споживачами реактивної потужності в системі електропостачання.

Для зниження споживання АД реактивної потужності і тим самим підвищення коефіцієнта потужності необхідно виконати таке:

- замінити мало завантажений АД двигуном меншої потужності. При заміні АД меншої потужності буде працювати в області великих навантажень з вищим $\cos \varphi$. Крім того ККД цілком завантаженого двигуна буде високим;

- знизити напругу в АД, що працює з малим завантаженням. При цьому зменшуються споживаний з мережі струм і реактивна потужність, та підвищується $\cos \varphi$. Реалізується це за допомогою регулятора напруги, перемиканням обмотки статора зі схеми трикутника на зірку, що призводить до зниження напруги на обмотці кожної фази в $\sqrt{3}$ раз;

- обмеження неробочого ходу АД;
- застосування СД замість АД;
- використання компенсаційних пристроїв у вигляді конденсаторів.

5. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ У СТАТИЧНОМУ РЕЖИМІ

5.1. Регульований електродвигун із ДПС незалежного збудження

При визначенні енергетичних показників регульованих приводів необхідно враховувати, що:

- зміна швидкості двигуна викликає зміну постійних втрат у двигуні. Особливо істотно постійні втрати змінюються при регулюванні струму збудження ДПС;
- наявність силового перетворювача викликає додаткові втрати потужності в перетворювачі і двигуні;
- перетворювач є споживачем реактивної потужності і вносить спотворення в синусоїдальну форму кривої напруги і струму.

За критерієм втрат потужності способи регулювання швидкості можуть бути економічними (характеризуються малими втратами) і неекономічними. До економічних належить регулювання швидкості ДПС за допомогою керованих перетворювачів.

Постійні втрати ДПС:

$$K = K_c + K_{\text{мн}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2 + K_3.$$

Змінні втрати в якорному колі:

$$V = I^2 r_{\text{я}} = M (\omega_{0\text{р}} - \omega),$$

де $\omega_{0\text{р}}$ — швидкість ідеального неробочого ходу при роботі двигуна на регульовальній (штучній) характеристиці.

При регулюванні швидкості реостатним способом змінні втрати зростають пропорційно відносному перепаду швидкості:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Сумарні втрати:

$$\Delta P = K_c + K_{\text{мн}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2 + K_3 + M(\omega_{0\text{p}} - \omega).$$

При регулюванні швидкості за допомогою перетворювача необхідно враховувати втрати в перетворювачі. Постійні втрати $K_{\text{н}}$ визначаються втратами в сталі силового трансформатора і реакторів. Змінні втрати перетворювача визначаються втратами в міді обмоток трансформатора реактора і вентилів:

$$V_{\text{н}} = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2 + \Delta P_{\text{р}} + \Delta P_{\text{вн}},$$

де I_1 , I_2 -первинний і вторинний струми трансформатора.

При регулюванні швидкості ДПС зміною струму збудження змінюються постійні втрати від струму збудження і втрати в сталі:

$$\Delta P = I_3^2 r_3 + K_{\text{сн}} \left(\frac{f}{f_{\text{н}}} \right)^3 \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 + K_{\text{мн}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2 + M(\omega_{0\text{p}} - \omega).$$

5.2. Регульований електропривід з АД

При реостатному регулюванні втрати в сталі:

$$K_c \approx K_{\text{сн}} (1 - s^{1,3}).$$

Зі зменшенням швидкості збільшення втрат у сталі компенсується зменшенням механічних втрат, тому постійні втрати майже не змінюються.

Змінні втрати потужності:

$$V = V_1 + V_2 = M\omega_0 s + M\omega_0 s \frac{r_1}{r_2}.$$

При частотному способі регулювання швидкості АД робоче ковзання двигуна невелике у всьому діапазоні регулювання. Тоді

втратами в сталі ротора через малу частоту можна знехтувати і при

законі регулювання $\frac{u}{f_1} = \text{const}$:

$$K_c \approx K_{c1H} \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^{3,3}.$$

Експериментальні дослідження показали, що при живленні АД від перетворювача частоти з несинусоїдальною формою напруги виникають додаткові втрати, що впливають на нагрівання, припустиме навантаження, робочі й інші характеристики двигунів. Так при $f = 50$ Гц втрати в сталі статора підвищуються на 30 %, струм неробочого ходу – на 32%, ККД знижується на 1,5%, коефіцієнт потужності – на 0,05, струм в обмотці статора в робочому режимі збільшується на 8%, а ковзання – на 3%. На рис.2.35 показано рекомендоване заводом ХЕМЗ гранично припустиме навантаження двигуна.

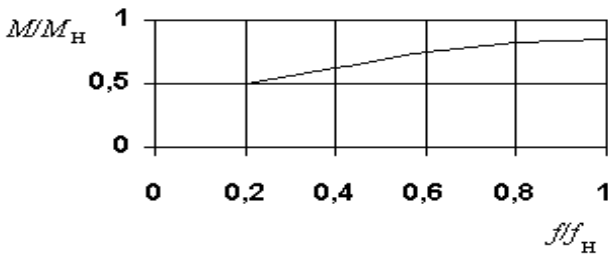


Рис. 2.35

Видно, що в номінальному режимі двигун розвиває потужність на 15% меншу, ніж при живленні від мережі із синусоїдальною формою напруги. При частоті 10 Гц момент, що розвивається двигуном, складає половину від номінального, а потужність, що розвивається ним, – 10% від номінальної. ККД складає лише 72% від ККД при $f=50$ Гц. Відбувається також зниження максимального моменту на 10...20% при $f > 25$ Гц.

6. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ У СТАТИЧНИХ РЕЖИМАХ

Втрати енергії в механічній частині електропривода пов'язані з наявністю тертя між елементами, які взаємно переміщуються, передатних і виконавчих механізмів. Є два типи тертя:

- ковзання;
- кочення.

Тертя ковзання обумовлене взаємодією нерівностей елементів, які ковзають один відносно одного в механізмах (рис.2.36).

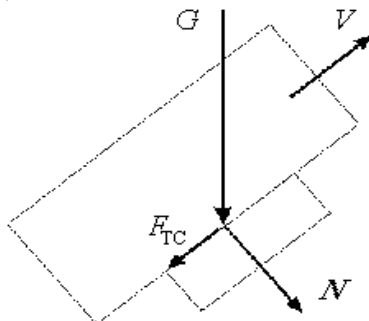


Рис. 2.36

Сили тертя, що виникають як реакція на взаємний рух, залежать від матеріалів взаємодіючих деталей і сили, що діє перпендикулярно лінії взаємодії — сили нормального тиску N . Тертя ковзання характерне для підшипників ковзання, направляючих ліфтових установок тощо. Коефіцієнт тертя ковзання:

$$\mu = \frac{F_{\text{тс}}}{N},$$

де $F_{\text{тс}}$, N — відповідно сили тертя ковзання і нормального тиску.

Тертя кочення виникає при коченні круглих тіл по поверхнях. При цьому виникає сила дотична до твірної тіла, що котиться, яка визначає момент опору щодо осі обертання (рис. 2.37).

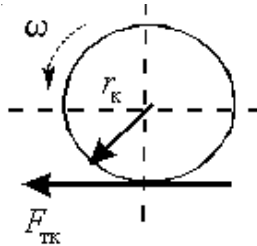


Рис. 2.37

Тертя кочення виникає в підшипниках кочення, у механізмах переміщення на колісному ході, кулькових, роликів опорах. Величиною, що характеризує опір при коченні, є момент тертя щодо осі обертання тіла, яке котиться. Діаметр тіла, що котиться, (плече моменту тертя кочення) при даній силі визначає момент — чим більше плече, тим більший момент. З іншого боку, при більшому діаметрі менша крутизна змінання, що перешкоджає коченню. Тому момент тертя залежить у першому наближенні лише від матеріалів взаємодіючих тіл і нормального тиску їх один на одного.

Коефіцієнт тертя кочення:

$$f_{\text{TK}} = \frac{M_{\text{TK}}}{N}, \text{ м},$$

де M_{TK} — момент тертя кочення ($M_{\text{TK}} = F_{\text{TK}} r_{\text{TK}}$).

Зазначені сили, що викликані тертям, визначають втрати енергії при взаємному переміщенні дотичних деталей механізму, при цьому втрати потужності залежать також від відносної швидкості взаємного переміщення:

$$\begin{aligned} \Delta P &= F_{\text{TK}} V'; \\ \Delta P &= M_{\text{TK}} \omega', \end{aligned}$$

де V' , ω' — відносні лінійна і кутова швидкості поверхонь тертя.

У будь-якому механізмі, навіть за відсутності передачі або перетворення енергії, діють внутрішні сили (сила ваги, сила конструктивних з'єднань деталей тощо), тому тертя і втрати енергії виникають і при неробочому русі механізмів. При передачі і перетворенні енергії нормальні зусилля зростають і, отже, збільшують

ся відповідні сили і моменти тертя, втрати. Тому моменти тертя можна відобразити лінійною залежністю від корисних моментів:

$$\eta = \frac{M_{\text{кор}}}{M_{\text{кор}} + M_{\text{тр}}}.$$

Для даного класу механізмів конструктори-механіки задають залежність ККД від навантаження, за допомогою якої визначаються значення $M_{\text{кор}}$. Номінальні значення ККД деяких механічних передач наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Вид передачі	Тип передачі		ККД
Зубчасті колеса на підшипниках кочення	Закрита з рідким мастилом	Циліндрична	$0,97 \div 0,99$
		Конічна	$0,96 \div 0,98$
	Відкрита з консистентним змащенням	Циліндрична	$0,95 \div 0,97$
		Конічна	$0,94 \div 0,95$

7. ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДА І СПОСОБИ ЇХ ЗНИЖЕННЯ

У перехідних режимах струми, що проходять по обмотках двигуна, істотно перевищують номінальні значення і викликають підвищені втрати енергії, тобто додаткове нагрівання двигуна. Особливо великого значення набуває визначення втрат електроенергії в перехідних процесах для електроприводів, у яких динамічний режим є основним або займає помітний час протягом циклу (електроприводи прокатних станів, підйомних кранів, шахтних підйомних машин).

Втрати енергії за час перехідного процесу:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{np}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{np}}} (K + V) dt = \int_0^{t_{\text{np}}} K dt + \int_0^{t_{\text{np}}} V dt = \Delta W_K + \Delta W_V,$$

де ΔW_K і ΔW_V — втрати енергії обумовлені відповідно постійними і змінними втратами потужності.

Звичайно приймають, що постійні втрати потужності не змінюються за час перехідного процесу:

$$\Delta W_K = \int_0^{t_{\text{пп}}} K dt = K t_{\text{пп}}.$$

Точне обчислення інтеграла змінних втрат у багатьох випадках ускладнюється через те, що необхідно знати закон зміни струмів двигуна в перехідному процесі $i(t)$ і мати у своєму розпорядженні дані про зміну R . Зручніше виражати втрати електроенергії в перехідних процесах, якщо змінні втрати потужності представити через механічні величини.

Потужність змінних втрат у ДПС:

$$\Delta P = I^2 r_{\text{я}} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 s, \quad (\Delta P = P_c - P = P_c s),$$

де $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ — відносний перепад швидкості (ковзання двигуна).

З урахуванням рівняння руху електропривода:

$$\Delta P = M\omega_0 s = \left(M_c + J \frac{d\omega}{dt} \right) \omega_0 s = M_c \omega_0 s + J \omega_0 s \frac{d\omega}{dt}.$$

Втрати енергії:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} M_c \omega_0 s dt + \int_0^{t_{\text{пп}}} J \omega_0 s d\omega.$$

Приймаємо $M_c = 0$. Замінюємо $d\omega$ на ds :

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 (1 - s), \\ d\omega &= -\omega_0 ds, \\ \Delta W &= \int_0^{t_{\text{пп}}} -J \omega_0^2 s ds. \end{aligned}$$

Змінимо границі інтегрування. Моменту часу $t=0$ буде відповідати $s = s_{\text{поч}}$, а часу $t_{\text{пп}}$ — відповідати $s = s_{\text{кін}}$.

$$\Delta W = \int_{s_{\text{поч}}}^{s_{\text{кін}}} -J\omega_0^2 s ds = \int_{s_{\text{кін}}}^{s_{\text{поч}}} J\omega_0^2 s ds = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2).$$

Визначимо втрати енергії при пуску, реверсі і гальмуванні двигунів.

При пуску двигунів без навантаження $\omega_{\text{поч}} = 0$, $\omega_{\text{кін}} = \omega_0$. Тоді $s_{\text{поч}} = 1$, $s_{\text{кін}} = 0$ (рис. 2.38).

$$\Delta W_{\text{п}} = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

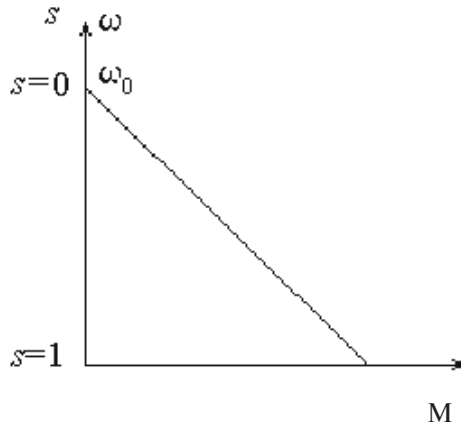


Рис. 2.38

Втрати енергії при пуску дорівнюють величині кінетичної енергії, що буде запасена до кінця пуску в частинах електропривода, що рухаються.

Для динамічного гальмування $s_{\text{поч}} = 0$, $s_{\text{кін}} = 1$ (рис. 2.39)

$$\Delta W_{\text{дт}} = -J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

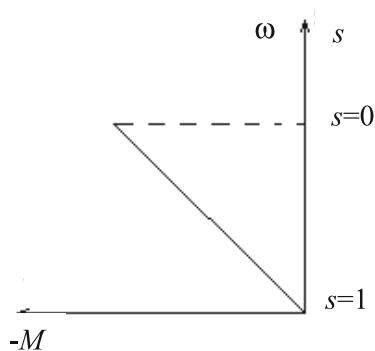


Рис. 2.39

При динамічному гальмуванні весь запас кінетичної енергії перетворюється у втрати енергії, які виділяються в двигуні у вигляді тепла.

Для режиму противімкнення $\omega_{\text{поч}} = \omega_0$ і $\omega_{\text{кін}} = 0$. Тоді $s_{\text{поч}} = 2$, $s_{\text{кін}} = 1$ (рис. 2.40)

$$\Delta W_{\text{тв}} = J \frac{\omega_0^2}{2} (4-1) = 3J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

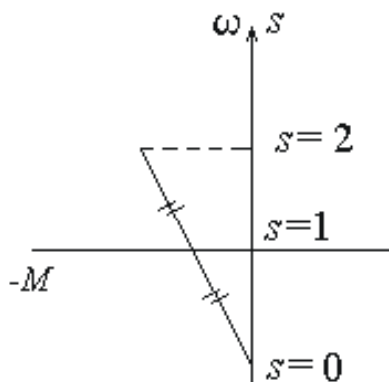


Рис. 2.40

При противімкненні втрати енергії дорівнюють потрібному запасу кінетичної енергії електропривода .

Для режиму реверсу $\omega_{\text{поч}} = \omega_0$, $\omega_{\text{кін}} = -\omega_0$. Тоді $s_{\text{поч}} = 2$, $s_{\text{кін}} = 0$ і втрати енергії складуть (рис. 2.41)

$$\Delta W_p = 4J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

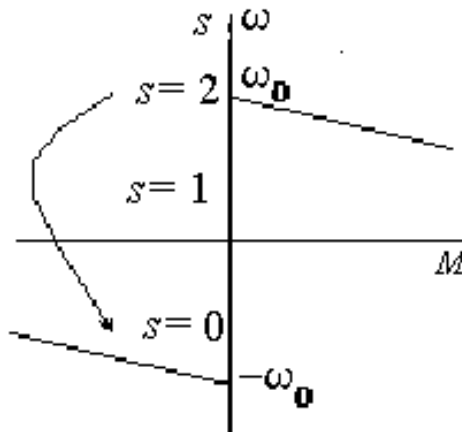


Рис. 2.41

Втрати енергії дорівнюють сумі втрат при гальмуванні противімкненням і пуску.

Втрати енергії в роторі АД виражаються так само, як і для кола якоря ДПС незалежного збудження. Втрати енергії в міді статора АД виразимо через втрати потужності:

$$V_1 = 3I_1^2 r_1 \approx 3(I_2')^2 r_1 = 3(I_2')^2 r_2' \frac{r_1}{r_2'} = V_2 \frac{r_1}{r_2'}.$$

Повні втрати енергії в АД:

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right).$$

Втрати в роторі АД не залежать від його опору, у той час як втрати в статорі АД обернено пропорційні опору ротора.

Для визначення втрат енергії при роботі двигуна під навантаженням необхідно обчислити вираз:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} M_c (\omega_0 - \omega) dt + J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2).$$

У загальному вигляді розв'язання виразу утруднене, оскільки момент навантаження і швидкість можуть бути нелінійними функціями часу. Для спрощення прийемо $M_c = \text{const}$, тоді:

$$\Delta W = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) + M_c \omega_0 t_{\text{пп}} - M_c \int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt.$$

Для визначення втрат необхідно знати аналітичний вираз зміни швидкості в часі. Якщо вираз $\omega(t)$ складний, то для визначення інтеграла використовується графоаналітичний метод (рис.2.42).

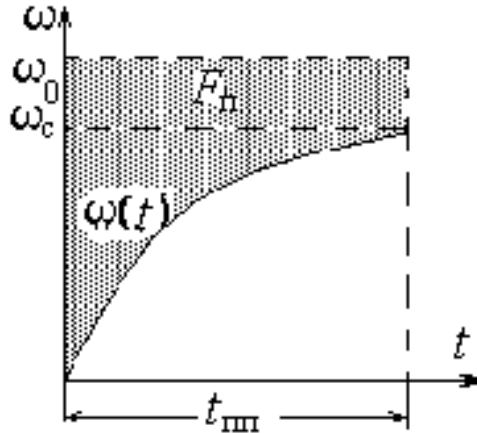


Рис. 2.42

Інтеграл $\int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt$ — це площа, обмежена кривою $\omega(t)$, віссю часу і вертикальною лінією $t=t_{\text{пп}}$. Заштрихована на малюнку площа:

$$F_n = \omega_0 t_{nn} - \int_0^{t_{nn}} \omega dt.$$

Тоді втрати запишемо у вигляді:

$$\Delta W = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) + M_c F_n.$$

Таким чином, для підрахування втрат енергії в якорі ДПС і роторі АД при $M_c = \text{const}$ варто визначити втрати енергії при $M_c = 0$, виконати побудову залежності $\omega(t)$ і, знайшовши площу F_n , визначити другу складову втрат.

Для визначення втрат у статорі АД знайдені втрати в роторі збільшуються на відношення опорів кіл статора і ротора:

$$\Delta W_1 = \Delta W_2 \frac{r_1}{r_2'},$$

після чого визначаються сумарні втрати АД:

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2.$$

Аналіз отриманих співвідношень визначає два основних способи зниження втрат електроенергії в перехідних процесах:

- зменшення моменту інерції електропривода;
- регулювання швидкості ідеального вільного ходу в перехідних процесах.

Зменшити момент інерції привода можна такими способами:

- застосуванням малоінерційних електродвигунів, що мають знижений момент інерції якоря чи ротора (збільшена довжина якоря і зменшений діаметр);
- раціональним конструюванням механічної передачі (вибором оптимального передаточного числа редуктора, раціональним розміром і формою елементів механічної передачі і конструкційних матеріалів);
- заміною одного двигуна двома, що мають половинну потужність замінюваного двигуна (сумарний момент інерції менше моменту інерції одного двигуна на повну потужність). Наприклад, два двигуни типу 4АН200 потужністю по 45 кВт мають сумарний момент інерції $2 \times 13 = 2,76 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Двигун 4АН250 потужністю 90

кВт на ту саму швидкість має момент інерції $3,53 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, що майже на 30% більше.

Найефективнішим засобом зниження втрат є реалізація керованих перехідних процесів. Розглянемо найпростіший спосіб керування пуском, коли швидкість ідеального неробочого ходу задається в два етапи. Такий пуск можливий при використанні двошвидкісного АД (рис. 2.43).

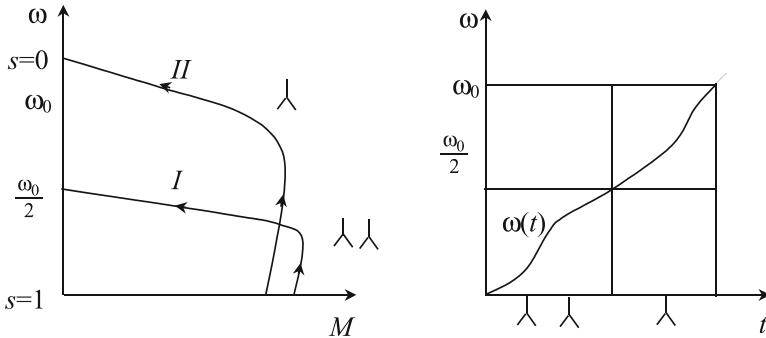


Рис. 2.43

Втрати енергії в роторі АД при прямому пуску на характеристику з урахуванням $s_{\text{нач}}=1$, $s_{\text{кін}}=0$

$$\Delta W_{\text{п}} = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2) = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

Втрати енергії при ступінчатому пуску при розгоні за характеристикою I (перший ступінь пуску) з урахуванням $s_{\text{поч}}=1$, $s_{\text{кін}}=0$, $\omega'_0 = \frac{\omega_0}{2}$ можна визначити як:

$$\Delta W_I = J \left(\frac{\omega_0}{2} \right)^2 \frac{1}{2} = J \frac{\omega_0^2}{8}.$$

Втрати енергії при розгоні за характеристикою II (другий ступінь пуску) з урахуванням $s_{\text{поч}}=0,5$; $s_{\text{кін}}=0$ складають:

$$\Delta W_I = J \left(\frac{\omega_0}{2} \right)^2 \frac{1}{2} = J \frac{\omega_0^2}{8}.$$

Сумарні втрати при двоступеневому пуску:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_I + \Delta W_{II} = J \frac{\omega_0^2}{4}.$$

Втрати скоротилися вдвічі в порівнянні з пуском в один ступінь. Відзначимо, що зниження втрат енергії в роторі викликає зниження втрат у статорі АД. Якщо швидкість ідеального неробочого ходу в перехідному процесі має n ступенів регулювання, втрати енергії в роторі зменшуються в n раз

$$\Delta W_n = J \frac{\omega_0^2}{2n},$$

де ω_0 — максимальна швидкість ідеального неробочого ходу, що відповідає останньому ступеню.

При плавній зміні швидкості ідеального вільного ходу втрати знижуються в $2T_m/\text{пп}$ рази. Чим повільніше розгін, тим менші момент, втрати потужності, сумарні втрати за час пуску. Однак це справедливо при відсутності втрат, пов'язаних з наявністю статичного навантаження, що збільшуються зі зростанням часу пуску.

3. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ І ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Головною вимогою при виборі електродвигуна є відповідність його потужності умовам технологічного процесу робочої машини.

Застосування двигуна недостатньої потужності призводить до порушення технологічного режиму роботи установки, зниження продуктивності, підвищення нагрівання, прискорення старіння ізоляції і виходу двигуна з ладу.

Неприпустимим є також використання двигуна завищеної потужності, оскільки при цьому підвищується вартість привода, збільшуються втрати електроенергії за рахунок зниження ККД двигуна, а для асинхронного електропривода, крім того, знижується коефіцієнт потужності.

Коефіцієнт завантаження двигуна розраховується за формулою:

$$k_3 = \frac{P_{\phi}}{P_n} \approx \frac{P_c}{P_{nc}},$$

де P_{ϕ} — фактична потужність, яку розвиває привід; P_c — потужність, споживана з мережі. Визначається за показниками приладів за період часу як потужність, споживана двигуном з мережі при даному навантаженні. Тоді за номінальну потужність беруть потужність, споживану двигуном з мережі при номінальному навантаженні:

$$P_{ис} = \frac{P_n}{\eta},$$

де η – ККД системи електропривода.

Нормативні документи Міністерства палива та енергетики України рекомендують:

при $0 \leq k_3 < (0,4 \dots 0,5)$ – необхідна заміна двигуна іншим, меншої потужності;

при $(0,4 \dots 0,5) \leq k_3 < (0,7 \dots 0,75)$ – доцільність зниження встановленої потужності привода повинна бути підтверджена розрахунками;

при $(0,7 \dots 0,75) \leq k_3 \leq 0,9$ – потужність привода обрана вірно.

Обмеження максимального значення k_3 величиною 0,9 дозволяє запобігти можливому перевантаженню двигуна у випадку зниження напруги мережі живлення.

На рис. 3.1 зображена усереднена залежність ККД від коефіцієнта завантаження, що показує, наскільки небажана робота привода з малим коефіцієнтом завантаження.

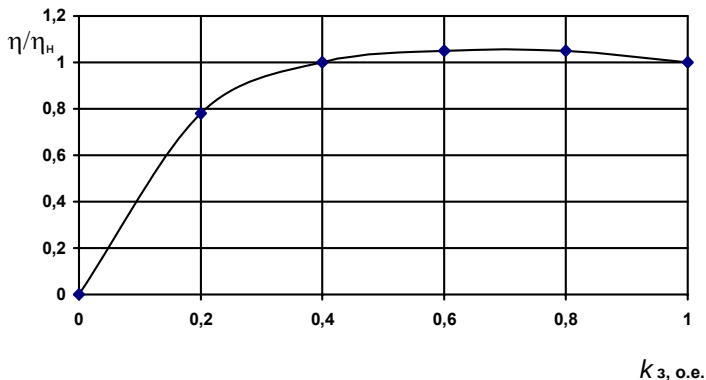


Рис. 3.1

Для точнішого визначення ККД залежно від величини коефіцієнта завантаження існує кілька емпіричних виразів:

$$\eta = \frac{k_3 \eta_n}{0,6(1 - \eta_n) + 0,6k_3 \eta_n + 0,4k_3}, \text{ або}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{k_3} + b},$$

де $a = 0,6 \frac{1-\eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}$; $b = 0,4 \frac{1-\eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}$ — для механізмів зі складними кінематичними схемами; $a = b = 0,5 \frac{1-\eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}$ — для приводів конвеєрів та ін. механізмів з простими кінематичними схемами.

Значення економії електроенергії, одержуване в результаті підвищення завантаження машин, можна визначити з рис. 3.2. Тут $k_{\text{в}}$ — коефіцієнт зростання питої витрати електричної енергії:

$$k_{\text{в}} = \frac{W_y}{W_{\text{yo}}},$$

де W_y — фактичне значення питої витрати електроенергії за фіксований проміжок часу, кВт · год/(година, доба тощо); W_{yo} — питома витрата енергії при відсутності неробочого ходу і завантаженні $k_3 = 1$, кВт · год/(година, доба тощо).

Коефіцієнт використання робочої машини

$$k_{\text{т}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{нх}}},$$

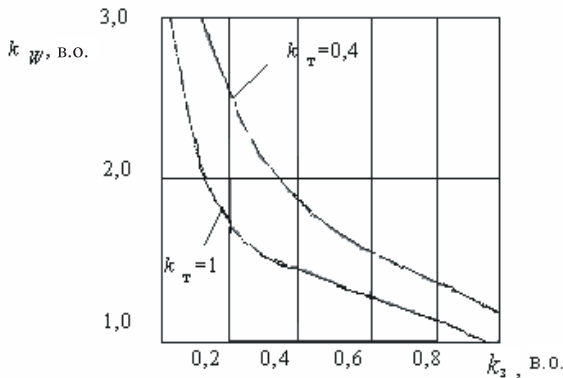


Рис. 3.2.

де t_n — час роботи під навантаженням, годин; t_{nx} — час вільного ходу, год. Вибір електродвигунів проводиться з урахуванням таких показників:

- вид струму. Двигун повинен мати вид і величину напруги, що відповідають мережам змінного чи постійного струму даного підприємства;
- значення швидкості. Вибір номінальної швидкості двигуна при наявному редукторі виконується за заданою швидкістю виконавчого органу і передаточним числом редуктора;
- конструктивне виконання. Конструкція вибраного двигуна повинна відповідати умовам його компонування з виконавчим органом;
- спосіб вентиляції і захисту від дії навколишнього середовища.

За способом захисту від дії навколишнього середовища розрізняють відкриті, захищені і герметичні двигуни. За способом вентиляції розрізняють двигуни з природною вентиляцією, самовентильовані і примусовою вентиляцією.

Вибір двигуна проводиться в такій послідовності:

- розрахунок потужності і попередній вибір двигуна;
- перевірка вибраного двигуна за умовами пуску і перевантаження;
- перевірка вибраного двигуна по нагріванню.

Основою для розрахунку потужності і вибору двигуна є навантажувальні діаграми виконавчого органу робочої машини, куди входять:

- діаграма швидкості (тахограма) $V(t)$ чи $\omega(t)$;
- залежність прискорення в часі $a(t)$ чи $\epsilon(t)$;
- навантажувальна діаграма виконавчого органу (залежність приведенного до вала двигуна статичного моменту від часу $M_c(t)$;
- залежність моменту (струму) і потужності в часі $M(t)$, $I(t)$, $P(t)$.

Навантажувальні діаграми пов'язують режим роботи двигуна з технологічним процесом. Їх можна поділити на дві групи:

- діаграми, у яких статичний момент змінюється випадковим способом за невідомим законом;
- діаграми, у яких статичний момент змінюється за відомим законом.

У першому випадку експериментально знімається залежність струму двигуна в часі, що далі розбивається на ряд ділянок. Для кожної ділянки за середнім значенням струму зі статичних характеристик визначаються величини швидкості і моменту. Приско-

рення визначається як тангенс кута нахилу кривої швидкості до осі часу.

Для другого випадку, виходячи з припущення, що ніяких перетворень не здійснюється на механічній, гідравлічній, пневматичній тощо стороні привода, механічні характеристики можуть бути поділені на такі чотири основних категорії.

Момент постійний, тобто не залежить від швидкості (рис. 3.3). Типовий приклад — підйомний кран. Прийнята незмінною вага піднятого вантажу створює силу i , таким чином, момент двигуна. Можливі незначні відхилення, обумовлені змінами в терті при змінах швидкості. У цьому випадку потужність на валу, що є добутком моменту і швидкості, лінійно залежить від швидкості.

У деяких випадках, наприклад, при перемішуванні речовин з низькою частотою обертання, момент пропорційний частоті обертання (рис. 3.4). Потужність, будучи добутком моменту і швидкості, буде пропорційна другому степеню (квадрату) швидкості. Таким чином, при швидкості яка дорівнює половині номінальної, необхідний момент дорівнює також половині номінального, а потужність — чверті номінального значення.

Для переміщення рідин і газів потрібен тиск, пропорційний квадрату швидкості (тобто переміщуваному об'єму). Оскільки відцентровий насос переміщує об'єм пропорційний швидкості, то тиск і момент двигуна будуть пропорційні квадрату швидкості (рис. 3.5). Отже, потужність буде пропорційна третьому степеню швидкості. У цьому випадку, при зменшенні потоку вдвічі, потрібно тільки 12,5 відсотків потужності, споживаної при повному потоці.

Є деякі дуже грузлі речовини (наприклад, хлібне тісто), що стають менш грузлими при збільшенні швидкості перемішування. Ці типи навантажень мають характеристики моменту і потужності, як показано на рис. 3.6. У цих випадках момент при пуску (швидкість дорівнює 0) може бути значно вище, якщо, наприклад, речовина стала більш грузлою після тривалого простою. Цей тип навантаження може мати цікаву властивість: максимальна потужність може споживатися при швидкості меншій від номінальної.

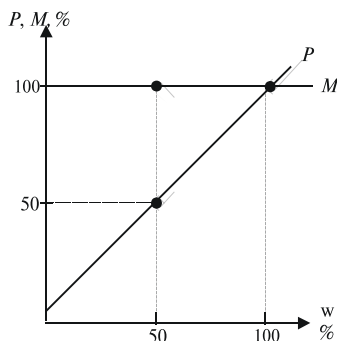


Рис. 3.3

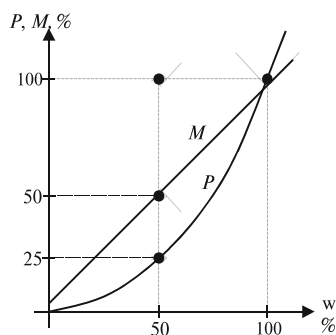


Рис. 3.4

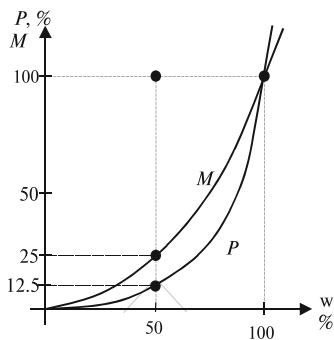


Рис. 3.5

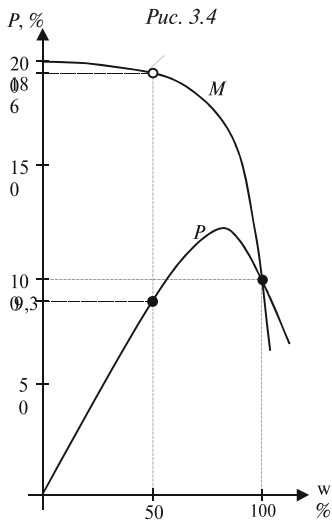


Рис. 3.6

На рис. 3.7 наведені типові навантажувальні діаграми електропривода підйому. Число періодів (ділянок) у таких діаграмах може бути від трьох до семи.

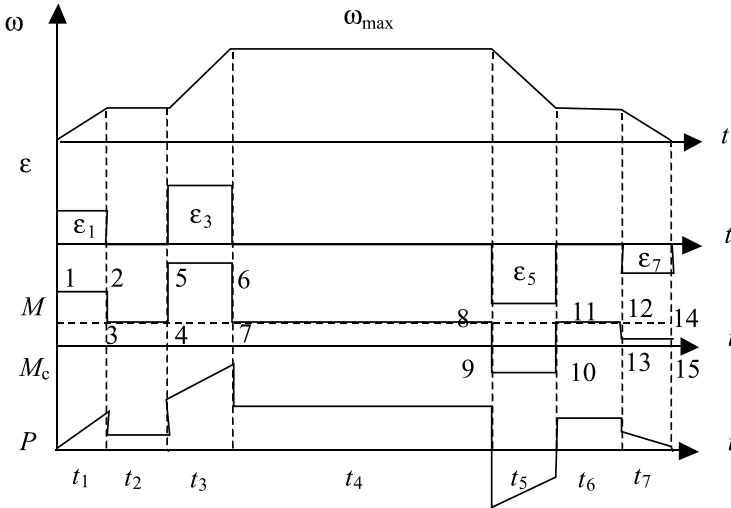


Рис. 3.7

Залежно від величини і знака гальмівного моменту (ділянка t_3) можливі три режими гальмування:

- $M_{9-10} > 0$, у рушійному режимі;
- $M_{9-10} \approx 0$, вільним вибігом;
- $M_{9-10} < 0$, електричне з від'ємним моментом (динамічне гальмування).

Моменти опору деяких машин і механізмів визначаються за такими формулами.

Механізми підйому лебідки:

$$M_c = \frac{FR}{i_p \eta_p},$$

де F – сила ваги вантажу, що піднімається, Н; R – радіус барабана лебідки, м; i_p , η_p – передаточне число і ККД редуктора.

Механізми пересування підйомних кранів:

$$M_c = \frac{k_1 F (\mu R + f)}{i_p \eta_p},$$

де F – сила ваги переміщуваної маси, Н; $f = (5...12) \cdot 10^{-4}$ – коефіцієнт тертя кочення ходових коліс по рейках, м; $k_1 = 1,8...2,5$ – коефіцієнт, що враховує збільшення опору руху через тертя реборд ходових коліс об рейки; $\mu = 0,015...0,15$ – коефіцієнт тертя в опорах ходових коліс; R – радіус шийки осі ходового колеса, м.

Вентилятори:

$$M_c = \frac{kQH}{\eta_v \omega_v},$$

де Q – продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$; H – напір (тиск) газу, Па; $\eta_v = (0,4...0,85)$ – ККД вентилятора; ω_v – частота обертання робочого колеса вентилятора, с^{-1} ; $k = 1,1...1,5$ – коефіцієнт запасу.

Насоси

$$M_c = \frac{k_{згп} Q(H + \Delta H)}{\eta_{nc} \omega_{nc}},$$

де Q – продуктивність насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; H – статичний напір, м; ΔH – втрати напору в трубопроводі, м; $g = 9,81$ – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; ρ – густина рідини, що перекачується, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k = 1,1...1,3$ – коефіцієнт запасу; $\eta_{nc} = 0,45...0,75$ – ККД насоса; ω_{nc} – частота обертання насоса, с^{-1} .

За навантажувальною діаграмою знаходимо:

у випадку невеликих змін статичного моменту середнє його значення:

$$M_{c \text{ порівн}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ci} t_i}{\sum_{i=1}^n t_i};$$

у випадку значної зміни статичного моменту еквівалентне його значення

$$M_{c \text{ еква}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{ci}^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}.$$

Далі визначається розрахункова потужність привода з урахуванням максимальної швидкості:

$$P_p = M_c \omega_{\max} k \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

де $k = 1, 1, \dots, 1, 3$ – коефіцієнт запасу, що враховує динамічні режими роботи двигуна.

З урахуванням падіння напруги мережі живлення встановлену потужність привода визначають за формулами:

- для рушійного режиму:

$$P_y = \frac{P_p}{k' \eta k'};$$

- для гальмівного режиму:

$$P_y = \frac{\eta P_p}{k' \eta k'};$$

де k' – коефіцієнт запасу за встановленою потужністю привода, необхідний для врахування падіння напруги мережі живлення:

$$k' = \left(1 - \frac{\Delta U}{U_H} \right)^2 \text{ – для приводів змінного струму; } k' = \left(1 - \frac{\Delta U}{U_H} \right) \text{ –}$$

для приводів постійного струму; ΔU – максимальне тривале падіння напруги мережі живлення в процесі експлуатації; k – коефіцієнт запасу за встановленою потужністю багатодвигунового привода ($k = 1$ для однодвигунового).

З каталогу вибирається двигун за умовами

$$P_n \geq P_p, \omega_n \approx \omega_{\max}, U_n = U_{\text{мережі}};$$

Далі будується залежність моменту двигуна від часу за рівнянням механічного руху:

$$M_i = M_{ci} \pm J \varepsilon_i,$$

де J – приведений момент інерції привода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Для перевірки вибраного двигуна по перевантажувальній спроможності порівнюється максимальний момент двигуна з паспортних даних $M_{\max}$ з максимальним моментом, узятим із залежності $M(t)$. Наприклад, $M_{\max} \geq M_{5-6}$ (рис. 3.7).

Якщо співвідношення не виконується, то двигун не забезпечить необхідне прискорення на ділянці основного розгону.

Для двигуна постійного струму звичайно користуються моментом пропорційним до припустимого струму, що визначається з умов комутації колектора:

$$M_{\max} = M_{\text{доп}} = (2 \div 2,5) M_n.$$

Для асинхронного двигуна з фазним ротором максимальний момент приймають рівним критичному:

$$M_{\max} = M_{\text{кр}} = (1,8 \div 2,2) M_n = \frac{mU^2}{2\omega_0 x_k},$$

де m – число фаз; x_k – опір короткого замикання двигуна.

Для синхронного двигуна:

$$M_{\max} = \frac{mUE}{\omega_0 x_c} = (2 \dots 3) M_n,$$

де E – ЕРС синхронного двигуна; x_c – синхронний опір двигуна.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором повинен бути перевірений за умовами пуску, для чого порівнюється його пусковий момент M_n із моментом навантаження M_{c0} при $\omega = 0$

$$M_n \geq M_{c0}.$$

Якщо вибраний двигун відповідає зазначеним умовам, то далі здійснюється його перевірка за нагріванням.

2. ПЕРЕВІРКА ДВИГУНІВ ЗА НАГРІВАННЯМ ПРЯМИМ МЕТОДОМ

Електричний двигун при роботі може нагріватися лише до визначеної, допустимої температури, обумовленої нагрівостійкістю ізоляційних матеріалів. Дотримання установленної виготовлювачем допустимої температури нагрівання забезпечує нормативний термін служби двигуна 15...20 років. Перевищення допустимої температури веде до передчасного руйнування ізоляції обмоток і скорочення терміну служби. Так, для ізоляції класу *A* *перевищення температури нагрівання на 8...10° С скорочує термін служби вдвічі*.

У сучасних двигунах застосовуються такі класи ізоляції (табл.3.1).

Таблиця 3.1.

клас ізоляції	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
гранично припустима температура, °С	105	120	130	155	180	>180

Основними класами є *B*, *F*, *H*.

Сутність перевірки двигуна з нагрівання полягає в порівнянні допустимої для нього температури з тією, котру він має при роботі. Очевидно, що якщо робоча температура двигуна не перевищує допустиму, то двигун працює в допустимому тепловому режимі і навпаки. Звичайно оцінюється не абсолютна температура, а перегрів чи перевищення температури τ , що є різницею температур двигуна θ_d і навколишнього середовища θ_c :

$$\tau = \theta_d - \theta_c.$$

При виконанні теплових розрахунків приймається стандартна температура навколишнього середовища рівна 40° С.

Двигун буде працювати в припустимому тепловому режимі при виконанні умови:

$$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}},$$

де $\tau_{\max}$ — максимальний нагрів при роботі двигуна; $\tau_{\text{доп}}$ — допустимий нагрів двигуна, обумовлений класом ізоляції.

Перевірка цієї умови може бути виконана прямим методом, що передбачає побудову кривої нагрівання $t(t)$ за цикл роботи двигуна.

У зв'язку з неможливістю проведення точного вивчення теплового режиму роботи звичайно приймають такі припущення:

- двигун розглядається як однорідне тіло, що має нескінченно велику теплопровідність і однакову температуру в усіх своїх точках;
- тепловіддача в зовнішнє середовище пропорційна різниці температур двигуна і навколишнього середовища;
- навколишнє середовище має нескінченно велику теплоємність, тобто в процесі нагрівання двигуна її температура не змінюється;
- теплоємність двигуна і його тепловіддача не залежать від температури двигуна.

Складемо рівняння теплового балансу:

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau,$$

де ΔP — втрати потужності в двигуні, чи кількість тепла, що виділяється в двигуні за 1с; $\Delta P dt$ — кількість теплоти, що виділяється в двигуні за час dt ; $A \tau dt$ — кількість теплоти, що віддається в навколишнє середовище; $C d\tau$ — кількість теплоти, що поглинається двигуном; A — тепловіддача двигуна — кількість теплоти, що віддається двигуном у навколишнє середовище за 1с при різниці

температур двигуна і навколишнього середовища в 1°C , $(\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{град}})$;

C — теплоємність двигуна — кількість теплоти, необхідна для підвищення температури двигуна на 1°C , $(\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{град}})$.

Розділимо обидві частини рівняння на $A d\tau$:

$$T_n \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{ст}},$$

де $T_n = \frac{C}{A}$ — стала часу нагрівання двигуна; $\tau_{\text{ст}} = \frac{\Delta P}{A}$ — стале перевищення температури двигуна.

Теплові процеси двигуна з урахуванням прийнятих припущень описується лінійним диференціальним рівнянням першого порядку. При постійних втратах $\Delta P = \text{const}$ його розв'язання має вид:

$$\tau = \tau_{\text{ст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}\right) + \tau_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}$$

Фізичне тлумачення сталої часу нагрівання полягає в тому, що це час нагрівання двигуна до сталою перевищення температури при відсутності тепловіддачі в навколишнє середовище.

Рівняння нагрівання може бути використане як при нагріванні, так і при охолодженні.

Кількісно погіршення тепловіддачі характеризується коефіцієнтом погіршення тепловіддачі при нерухомому роторі:

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A},$$

де A_0 , A – тепловіддача відповідно при нерухомому двигуні і номінальній швидкості.

Орієнтовні значення коефіцієнта β_0 для двигунів з різною системою охолодження представлені в табл.3.2.

Таблиця 3.2

Виконання двигуна	β_0
закритий з незалежною вентиляцією	1
закритий без примусового охолодження	0,95...0,98
закритий самовентильований	0,45...0,55
захищений самовентильований	0,25...0,35

Стала часу охолодження при нерухомому двигуні

$$T_0 = \frac{T_{\text{н}}}{\beta_0}.$$

Оскільки $\beta_0 \leq 1$, то $T_0 \geq T_{\text{н}}$, тобто охолодження нерухомого двигуна відбувається повільніше, ніж його нагрівання.

На рис. 3.8а наведені криві нагрівання двигуна для різних $\tau_{\text{поч}}$ і DP . Великим втратам потужності в двигуні відповідає більше значення сталою перевищення температури. Час перехідного процесу – $T_{\text{пт}}$.

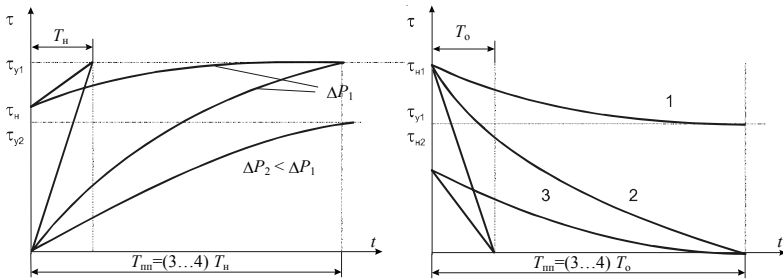


Рис. 3.8

Таким чином, час досягнення перегрівом свого сталою значення залежить від сталої часу нагрівання двигуна. Оскільки теплоємність двигуна пропорційна його об'єму, а тепловіддача — площі, то двигуни більшої потужності, що мають великі габарити, мають і велику сталу часу нагрівання (її величина складає від кількох хвилин до декількох годин).

Охолодження двигуна (рис. 3.8б) супроводжується зниженням перегріву з кривою 1 при зменшенні навантаження і за кривими 2 і 3 при відключенні двигуна від мережі.

Порядок перевірки двигуна з нагрівання прямим методом полягає в наступному. За графіком навантаження двигуна визначаються втрати потужності на окремих ділянках циклу, і з їх допомогою знаходяться значення сталою перегріву на кожній ділянці за формулою:

$$\tau_{\text{ст } i} = \frac{\Delta P_i}{A_i}.$$

Далі для ділянок роботи (нагрівання) і паузи (охолодження) визначаються сталі часу нагрівання й охолодження:

$$T_o = \frac{C}{A_o} = \frac{C}{\beta_o A} = \frac{T_n}{\beta_o}.$$

Потім за рівнянням нагрівання будується крива $\tau(t)$, при цьому початковим значенням $\tau_{\text{поч } i}$ на кожній наступній ділянці є його кінцеве значення $\tau_{\text{кін } i-1}$ на попередній ділянці.

З побудованої в такий спосіб кривої перегріву $\tau(t)$ знаходиться його максимальне значення, і перевіряється виконання умови:

$$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}.$$

3. ПЕРЕВІРКА ДВИГУНІВ З НАГРІВАННЯ НЕПРЯМИМИ МЕТОДАМИ

3.1. Метод середніх витрат

Прямий метод перевірки двигунів з нагрівання дає найточнішу оцінку нагрівання двигуна, однак має істотний недолік — необхідно знати значення тепловіддачі і теплоємності, що у каталогах і довідниках відсутні. У зв'язку з цим, у більшості випадків перевірка двигунів з нагрівання здійснюється непрямими методами, що не вимагають побудови графіка $\tau(t)$.

Суть методу полягає у визначенні середніх витрат потужності $\Delta P_{\text{ср}}$ за цикл роботи двигуна і порівнянні їх з номінальними втратами $\Delta P_{\text{н}}$. При цьому розглядається досить тривалий цикл роботи двигуна, у якому середній перегрів не змінюється. У цьому випадку кількість теплоти $Cd\tau$, акумульованої двигуном за цикл, дорівнює нулю, і рівняння теплового балансу приймає вид:

$$\int_0^{t_u} \Delta P dt = A \tau_{\text{ср}} t_u;$$

$$\tau_{\text{ср}} = \int_0^{t_u} \frac{\Delta P dt}{A t_u} = \frac{\Delta P_{\text{ср}}}{A},$$

де $\int_0^{t_u} \frac{\Delta P dt}{t_u}$ — середні втрати потужності за цикл.

Відповідно до рівняння середні втрати за цикл визначають середній перегрів двигуна. Аналогічно номінальні втрати потужності в двигуні визначають його припустиме нагрівання:

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{\Delta P_{\text{н}}}{A}.$$

Припустимо нагрівання двигуна буде за умови:

$$\Delta P_{\text{cp}} \leq \Delta P_{\text{H}}.$$

У випадку, коли на окремих ділянках циклу навантаження стало, середні втрати визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum t_i} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

Графік роботи двигуна з циклічним навантаженням зображений на рис. 3.9.

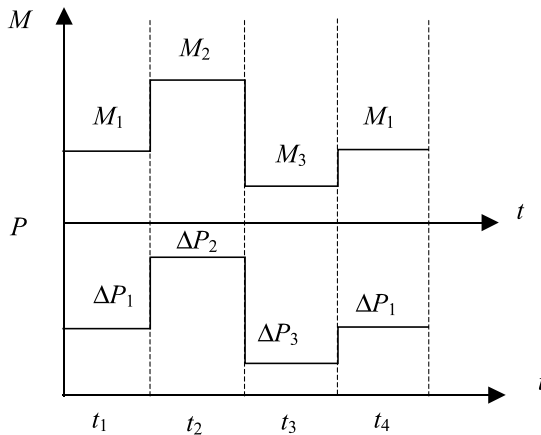


Рис. 3.9

Номинальні втрати потужності двигуна визначаються за паспортними даними:

$$\Delta P_{\text{H}} = P_{\text{H}} \frac{1 - \eta_{\text{H}}}{\eta_{\text{H}}}.$$

Метод середніх втрат є найбільш точним і універсальним з непрямих методів. Точність методу тим вище, чим більше стала нагрівання двигуна буде перевищувати значення t_{max} найбільш три-

валої ділянки циклу, тобто у випадку виконання нерівності $t_{\max} < T_n$.
При цьому $\tau_{\text{ср}} \approx \tau_{\max}$.

3.2. Метод еквівалентних величин

Метод еквівалентних величин заснований на тому положенні, що дійсну величину замінюють еквівалентною, котра за робочий цикл створює такі ж втрати в двигуні, як і дійсна.

Метод еквівалентного (середньоквадратичного) струму доцільно використовувати в тому випадку, якщо відомий графік зміни струму двигуна в часі. Графік зміни струму двигуна при циклічному навантаженні зображений на рис. 3.10.

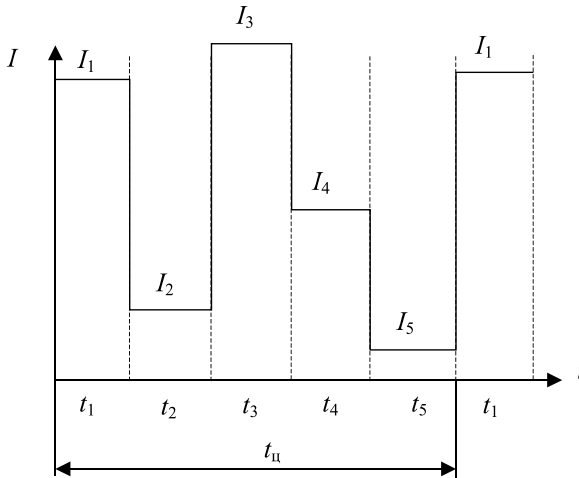


Рис. 3.10

Еквівалентний струм визначається за формулою:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{t_{\text{цк}}}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + \dots + I_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}}.$$

Нагрівання двигуна не буде перевищувати припустимого рівня, якщо еквівалентний струм за цикл його роботи не буде перевищувати величини номінального струму:

$$I_{\text{екв}} \leq I_{\text{ін}}.$$

Метод справедливий, якщо постійні втрати й опори головних кіл двигуна залишаються незмінними за цикл роботи. Метод не-застосовний для короткозамкнених двигунів із глибокими пазами чи подвійною кліткою, тому що їх опори в значній мірі змінюють-ся в динамічних режимах.

Метод еквівалентного моменту зручно використовувати в тому випадку, коли відомий графік зміни моменту двигуна в часі. При застосуванні методу магнітний потік повинен бути постійний. Тоді:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} = M_{\text{екв}} \leq M_{\text{н}}.$$

Метод еквівалентної потужності використовується, якщо відо-мий графік зміни потужності в часі, а також при виконанні умов застосування методу еквівалентного моменту і сталої швидкості двигуна на всіх ділянках робочого циклу. Тоді:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} = M_{\text{екв}} \omega_{\text{н}} = P_{\text{екв}} \leq P_{\text{н}}.$$

Якщо виконуються дані умови, то нагрівання двигуна не пе-ревищить допустимого рівня.

4. ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕВІРКИ ДВИГУНІВ НАГРІВАННЯМ ПРИ РІЗНИХ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

4.1. Тривалий режим роботи

Робота двигунів за характером зміни навантаження на їх валу, а також за видом їх нагрівання й охолодження поділяється на вісім режимів S1...S8.

Тривалий режим роботи S1 двигуна характеризується незмінним навантаженням протягом часу, упродовж якого нагрівання його частин досягає сталого значення не перевищуючи допустимого при будь якій тривалості роботи:

$$t_p \geq (3 \div 4) T_H$$

де t_p — час роботи двигуна.

Режим S1 характеризується незмінними втратами протягом усього часу роботи. Робота двигуна в режимі S1 може відбуватися з постійним чи змінним циклічним навантаженням.

Графік зміни потужності на валу P , моменту M , втрат потужності ΔP і нагріву τ для режиму S1 при постійному навантаженні зображені на $\tau_{\text{ст}}$ рис. 3.11.

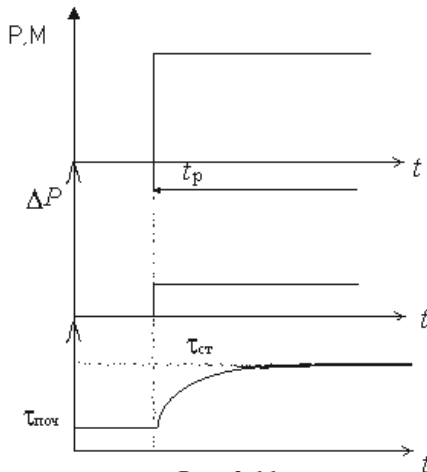


Рис. 3.11

Оскільки двигун вибирається за умовою $P \leq P_H$, то виконується й умова $\Delta P \leq \Delta P_H$, і $\tau_{\max} = \tau_{\text{ст}} \leq \tau_{\text{доп}}$.

Якщо навантаження на вал двигуна періодично змінюється, то також періодично будуть змінюватись втрати в двигуні і його температура. Перевірка двигуна в цьому випадку виконується методами середніх втрат чи еквівалентних величин.

4.2 КОРОТКОЧАСНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ

Короткочасний режим роботи S_2 характеризується чергуванням періодів незмінного навантаження з періодами відімкнення двигуна. При цьому за час роботи t перевищення температури не досягне сталого значення, а за час паузи t_0 усі частини двигуна охолоджуються до температури навколишнього середовища:

$$t_p \leq (3 \div 4)T_H, t_0 \geq (3 \div 4)T_H.$$

ДСТ 183–74 встановлює стандартні значення тривалості робочого періоду – 10, 30, 60 і 90 хв.

Графіки, що характеризують короткочасний режим роботи S_2 , наведені на рис. 3.12.

Якщо двигун розрахований на тривалий режим роботи, то при короткочасному режимі його перегрівання до кінця робочого періоду не досягне сталого значення. У цьому випадку двигун буде недовикористаний з нагрівання, а тим самим за своєю потужністю.

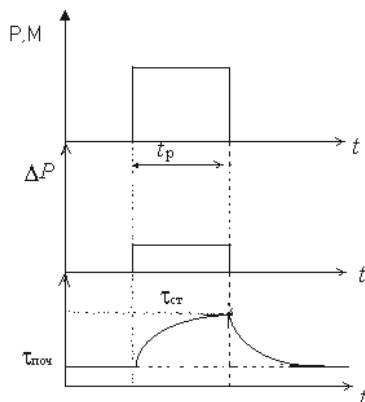


Рис. 3.12

Для повного використання в короткочасному режимі роботи двигуна, призначеного для тривалого режиму, його варто перевантажувати за потужністю на валу. Тоді до кінця робочого періоду його перегрів досягне припустимого рівня.

Для кількісної оцінки перевантаження і нагрівання двигуна використовуються коефіцієнти термічного і механічного перевантажень.

Коефіцієнтом термічного перевантаження p_t називається відношення втрат потужності при короткочасному режимі ΔP_k до номінальних втрат потужності ΔP_n

$$p_t = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_n} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}} > 1.$$

Коефіцієнтом механічного перевантаження p_m називається відношення потужності навантаження двигуна в короткочасному режимі P_k до номінальної потужності P_n у тривалому режимі:

$$p_m = \frac{P_k}{P_n} > 1.$$

Коефіцієнти механічного і термічного перевантажень пов'язані між собою виразами:

$$p_t = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_n} = \frac{k + V_n p_m^2}{k + V_n} = \frac{a + p_m^2}{a + 1},$$

$$p_m = \sqrt{(1 + a)p_t - a},$$

де $a = \frac{k}{V_n}$ — коефіцієнт втрат.

Якщо знехтувати постійними втратами, то $a = 0$,

$$p_m = \sqrt{p_t}.$$

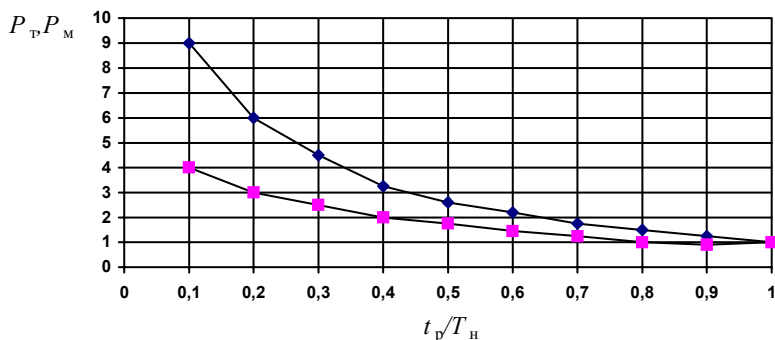


Рис. 3.13

Залежність коефіцієнтів термічного і механічного перевантажень при короткочасному режимі роботи від відносної тривалості робочого періоду t_p/T_n показана на рис. 3.13.

При відношенні $t_p/T_n = 0,3 \div 0,4$ припустимий за умовами нагрівання коефіцієнт механічного перевантаження приблизно дорівнює 2,5, що в середньому відповідає перевантажувальній спроможності двигунів загальпромислових серій. Внаслідок цього при менших відношеннях t_p/T_n повне використання двигунів з нагрівання обмежується їхньою перевантажувальною спроможністю. Іншими словами, при малих відношеннях t_p/T_n зазначені двигуни недовикористовуються, і тому в цьому випадку можна взагалі не проводити перевірку двигуна за нагрівання, а варто обмежитися лише його перевіркою за умовами перевантаження.

Повне використання двигунів з нагрівання можливе тільки при великих значеннях t_p/T_n . Промисловість випускає спеціальні двигуни, розраховані для короткочасного режиму роботи. Вони мають підвищену перевантажувальну спроможність, що дозволяє повніше використовувати їх по нагрівання.

Час роботи цих двигунів нормується. Це значить, що двигун, який, наприклад, має номінальну потужність $P_n = 10$ кВт при $t_p = 30$ хв, може розвивати протягом 30 хвилин потужність 10 кВт, не перегріваючись. Потім він повинен бути відключений від мережі для охолодження.

У загальному випадку перевірка таких двигунів з нагрівання може виконуватися двома варіантами. Якщо дані навантажувальної діаграми відповідають номінальним даним, то перевірки за нагріванням не потрібно. Якщо ж дані навантажувальної діаграми

відрізняються від паспортних даних, то варто розрахувати еквівалентну потужність, привівши її до найближчого стандартного часу $t_{\text{рст}}$:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{екв}} \sqrt{\frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{рст}}}},$$

де $t_{\text{р}}$ — дійсний час короткочасної роботи двигуна з навантажувальних діаграм.

Для більш точної оцінки можна скористатися виразом:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{н}} \sqrt{\frac{(1+a)(1-e^{-\frac{t_{\text{рст}}}{T_{\text{н}}}})}{(1-e^{-\frac{t_{\text{р}}}{T_{\text{н}}}})-a}}$$

Якщо розрахована за формулою припустима потужність $P_{\text{к}}$ перевищує еквівалентну, тобто $P_{\text{к}} \geq P_{\text{екв}}$, то двигун буде працювати в нормальному тепловому режимі, не перегріваючись понад припустимий рівень.

Необхідно відмітити, що двигуни, призначені для короткочасного режиму роботи, недоцільно використовувати в тривалому режимі через властиві їм підвищені постійні втрати потужності. Іноді такі двигуни не можуть працювати в тривалому режимі навіть без навантаження, перегріваючись при цьому вище припустимого рівня.

4.3. Повторно-короткочасний режим роботи

Повторно-короткочасний режим роботи $S3$ характеризується короткочасними робочими періодами $t_{\text{р}}$ незмінного навантаження, що чергуються з періодами $t_{\text{о}}$ відключення двигуна (паузами), причому як робочі періоди, так і паузи не настільки тривалі, щоб перевищення температури могли досягти сталих значень:

$$t_{\text{р}} \leq (3 \div 4)T_{\text{н}}, t_{\text{о}} \leq (3 \div 4)T_{\text{о}}.$$

Графіки навантаження для повторно-короткочасного режиму роботи представлені на рис. 3.14.

Режим характеризується відносною тривалістю ввімкнення:

$$ТВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100 = \frac{t_p}{t_{\Sigma}} 100, \%$$

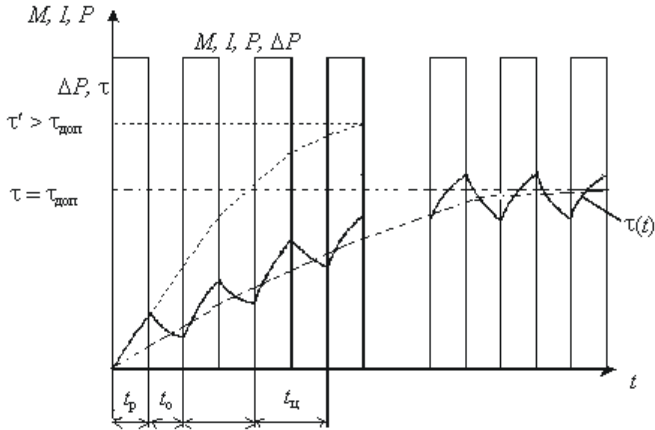


Рис. 3.14

Для повторно-короткочасного режиму роботи випускаються спеціальні двигуни, у паспортних даних яких указується номінальна потужність при нормативній тривалості ввімкнення $ТВ_n = 15, 25, 40, 60$.

Тривалість робочого циклу для них не повинна перевищувати 10 хв., у іншому випадку двигун вважається працюючим у тривалому режимі.

Якщо потужність навантаження і ТВ близькі до номінальних даних двигуна, то перевірка його з нагрівання не потрібна, оскільки робота при таких параметрах навантажувальної діаграми гарантується виготовлювачем.

Розглянемо перевірку двигуна з нагрівання для випадку, коли тривалість ввімкнення в реальному циклі $ТВ_1$ помітно відрізняється від нормативної величини $ТВ_n$, тобто $ТВ_1 \neq ТВ_n$. Нехай $ТВ_1$ відповідає навантаженню P_1 , а стандартній $ТВ_n$ відповідає номінальна потужність P_n (рис. 3.15).

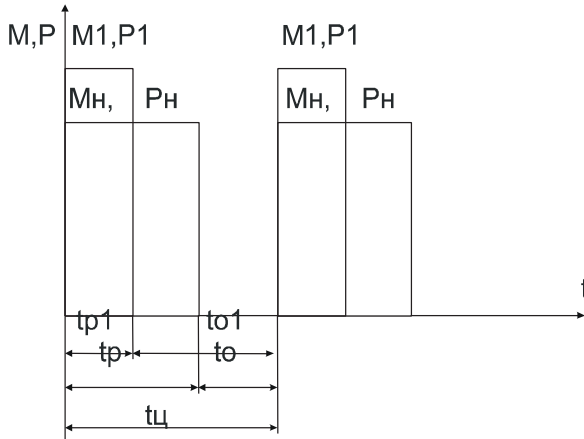


Рис. 3.15

На підставі методу середніх втрат можна стверджувати, що середнє перевищення температури двигуна при його роботі з потужністю $P_1 \neq P_n$ при $TB_1 \neq TB_n$ не буде перевищувати припустимої температури, якщо середні втрати потужності за цикл при P_1 і TB_1 не будуть перевищувати втрати за той самий цикл при P_n і TB_n , тобто:

$$\Delta P_{TB_1} \leq \Delta P_{TB_n}.$$

Звідси випливає, що для того, щоб при роботі з потужністю P_1 і TB_1 середня температура двигуна не перевищувала припустиму, між втратами потужності повинне виконуватися співвідношення:

$$\frac{\Delta P_{TB_1}}{TB_n} \leq \Delta P_n.$$

Порядок перевірки двигуна з нагрівання полягає в наступному. Визначаються ΔP_1 і TB_1 . Потім за паспортними даними двигуна для найближчої нормативної TB_n знаходяться номінальні втрати двигуна, і перевіряється умова $\frac{\Delta P_1 TB_1}{TB_n} \leq \Delta P_n$. При його виконанні нагрів двигуна не буде перевищувати нормативного.

Перевірка двигуна з нагрівання може бути виконана також порівнянням номінальної й еквівалентної потужності двигуна

$$P_n \geq P_1 \sqrt{\frac{TB_1}{TB_1 + \beta_0(1 + \alpha)(1 - TB)}}$$

Якщо ця умова виконується, то температура двигуна не буде перевищувати припустимого значення. Коли реальна тривалість ввімкнення не набагато відрізняється від нормативної, добутком $\alpha(TB_n - TB_1)$ можна знехтувати, тоді одержимо:

$$P_n \geq P_1 \sqrt{\frac{TB_1}{TB_n}}$$

де $\beta_0 = \frac{A_0}{A}$ — коефіцієнт погіршення тепловіддачі.

При $TB > 70 \dots 80 \%$ вибір двигуна можна робити, як для двигуна, що працює в режимі *SI*.

4.4. Додаткові режими роботи

Розглянуті режими *S1*, *S2* і *S3* є основними і найбільш характерними для електродвигунів. Існує ще п'ять режимів *S4*–*S8*, що є різновидами перших трьох і зустрічаються набагато рідше. Перевірка двигунів з нагрівання в цих режимах виконується методами середніх втрат чи еквівалентних величин.

Повторно-короткочасний режим роботи з частими пусками *S4* — це режим, при якому періоди пуску і короткочасного незмінного навантаження чергуються з періодами відключення двигуна, при цьому перевищення температури двигуна не досягає сталого значення. У режимі нормуються відносна тривалість включення у відсотках, число пусків за годину (30, 60, 120 чи 240) і коефіцієнт інерції *F1* електропривода. Коефіцієнт *F1* дорівнює відношенню сумарного приведенного моменту інерції привода до моменту інерції якоря (ротора) двигуна (1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3; 10).

Тривалість ввімкнення:

$$ТВ = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_0} 100 \%,$$

де t_n — час пуску, с.

Повторно-короточасний режим роботи з частими пусками й електричним гальмуванням $S5$ — це режим, у якому періоди пуску, короточасного незмінного навантаження й електричного гальмування t_r чергуються з періодами відключення двигуна, причому перевищення температури двигуна не досягає сталого значення.

Нормовані величини ті ж самі, що і для режиму $S4$, але ТВ визначається виразом:

$$ТВ = \frac{t_n + t_p + t_r}{t_n + t_p + t_0 + t_r} 100\%.$$

Почерговий режим роботи $S6$ — це режим, при якому періоди незмінного робочого навантаження чергуються з періодами без навантаження, під час яких двигун не відключається, при цьому перевищення температури двигуна не досягає сталого значення. Режим характеризується відносною тривалістю навантаження ТН:

$$ТН = \frac{t_p}{t_p + t_{нх}} 100\%,$$

де $t_{нх}$ — тривалість періоду неробочого ходу.

Нормовані значення ТН рівні 15, 20, 40 і 60%.

Почерговий режим роботи з частими реверсами $S7$ — це режим, у якому періоди роботи з незмінним навантаженням чергуються періодами реверсу з електричним гальмуванням, причому температура двигуна не досягає сталого значення. Нормується число вмикань за годину (30, 60, 120 і 240) і коефіцієнт $F1$ (1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0).

Почерговий режим роботи з двома чи більш кутовими швидкостями $S8$ — це режим, у якому періоди робіт з одним навантаженням на одній швидкості чергуються з періодами роботи на іншій швидкості, з іншим, але також незмінним навантаженням. При цьому перевищення температури двигуна не перевищує встановленого рівня. Нормуються число циклів за годину (30, 60, 120 чи 240), коефіцієнт інерції $F1$ (1,2; 1,6; 2,0; 2,5 і 4,0) і відносна (у

відсотках до тривалості циклу) тривалість навантаження на кожній з частот обертання.

Для електроприводів, що працюють у режимах *S4*, *S5* доцільно вибирати двигуни, призначені для роботи в режимі *S3*.

Для електроприводів, що працюють у режимах *S6*, *S7* і *S8* звичайно вибирають двигуни, призначені для роботи в режимі *S1*.

4. ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ Й ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК І ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1. ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ УСТАНОВКАМИ І МЕХАНІЗМАМИ

1.1. Підйомні установки

Шляхи економії електроенергії в підйомних установках: виконання оптимальної діаграми швидкості; забезпечення нормованого завантаження підйомних посудин; ліквідація або скорочення роботи на неробочому ходу; контроль стану підйомних посудин; застосування досконалих видів електропривода; специфічні способи, обумовлені типом електропривода.

Оптимальною діаграмою швидкості з погляду витрати електроенергії буде та, де множник швидкості приймає найменше значення:

$$\lambda = \frac{V_{\max}}{V_{\text{ср}}} = \frac{V_{\max} T_{\text{п}}}{H_{\text{п}}},$$

де $V_{\max}$, $V_{\text{ср}}$ — максимальна і середня швидкості руху підйомної ємності м/с; $H_{\text{п}}$ — висота підйому, м; $T_{\text{п}}$ — час підйому ємності, с.

Оптимальну діаграму швидкості можна одержати збільшенням прискорення при запуску й уповільнення при гальмуванні (в останньому випадку це доцільно при руховому уповільненні чи вільним вибігом), а також при збільшенні в припустимих межах максимальної швидкості підйому.

Виконання оптимальної діаграми швидкості забезпечується повною автоматизацією керування, у результаті чого підвищується продуктивність установки і забезпечується робота з мінімальною витратою електроенергії.

Для перевірки відповідності фактичної діаграми швидкості оптимальній необхідно не рідше одного разу в півріччя виконувати вимірювання швидкості та побудову графіка з наступною корекцією при відхиленні параметрів у схемі керування установкою.

При недовантаженні скіпів і вагонеток при видачі гірської маси, неповному завантаженню клітей при спуску – підйомі людей нераціональна витрата електроенергії складе:

$$\Delta W = W_{\text{ц}} n_{\text{нр}}, \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де $W_{\text{ц}} = W_{\text{доб}}/n_{\text{ф}}$ – витрата електроенергії за один цикл підйому, кВт · год/цикл; $W_{\text{доб}}$ – добове споживання електроенергії підйомної установки (визначається за показниками лічильника активної енергії), кВт · год/добу; $n_{\text{ф}}$ – фактичне число підйомів за добу; $n_{\text{нр}} = n_{\text{ф}} - n_{\text{рац}}$ – нераціональне число циклів за розрахунковий

період часу T (дн); $n_{\text{рац}} = \frac{A_{\text{ф}}}{Q_{\text{норм}}}$ – раціональне число циклів за

розрахунковий період при нормованому завантаженні підйомної ємності; $A_{\text{ф}}$ – фактична кількість виданої гірської маси за розрахунковий період, т; $Q_{\text{норм}}$ – нормована вантажопідйомність підйомної ємності.

Робота без навантаження пов'язана зі збільшенням нераціональних циклів і додатковою витратою електроенергії. Для її усунення необхідно мати графік роботи підйомної установки і суворо його дотримуватись.

У результаті налипання гірської маси на внутрішню поверхню скіпа знижується його фактична ємність і, як наслідок, знижується загальна продуктивність підйому, що дає додаткову витрату електроенергії. Контроль за станом скіпів повинен проводитися не рідше одного разу на місяць.

Недоліком реостатних систем керування роботою підйому є значні втрати енергії при пуску і гальмуванні. Частотно-керовані, ТП-Д та інші системи мають високі регульовальні властивості і кращі техніко-економічні показники, в тому числі при меншій витраті електричної енергії.

При дводвигуновому електроприводі під час ремонтних і профілактичних робіт, а також у початковий момент прискорення чи гальмування можливо використовувати один двигун.

1.2 Вентиляторні установки

Сумарна встановлена потужність приводних двигунів вентиляторів, компресорів, насосів складає близько 20% від потужності всіх електростанцій СНД; при цьому тільки вентилятори споживають близько 10% від всієї енергії, продукуваної в співдружності.

Обстеження Криворізького басейну показали, що більшість вентиляторних установок шахт мають ККД значно нижче норми (0,6, а в деяких випадках — 0,3...0,4). Тільки 22% вентиляторів працюють у зоні економічного використання. Фактично питома витрата потужності в 1,5...2 рази перевищує припустиму величину, а загальна вартість перевитрати електроенергії приводами головних вентиляторів складає четверту частину витрат електроенергії всіма установками за рік.

Це пояснюється тим, що більшість вентиляторів експлуатується поза зоною економічної роботи, тобто режим роботи вентиляторів не відповідає параметрам вентиляційних мереж (невідповідність фактичних значень еквівалентних отворів вентиляційних напрямків шахт їх проектним значенням; наявність великих підсмоктувань повітря з поверхні через зону обвалення і надшахтні споруди; обладнання вентиляторів нерегульованим приводом тощо.

Причиною низьких енергетичних показників вентиляторів є:

- змінний аеродинамічний опір мережі в процесі розробки шахтного поля. Вентилятор вибирається на максимальні значення продуктивності і тиску, що досягаються тільки через кілька років роботи. Тому вентилятор тривалий час працює в режимах, відмінних від розрахункового;
- відмінність реальних величин параметрів вентиляції (кількість метану, довжина і перетин виробок, витоки повітря тощо) від розрахункових призводить до того, що фактичний режим роботи вентилятора значно відрізняється від розрахункового;
- зміна величини природної тяги від пори року, а іноді і протягом доби залежно від температури повітря на поверхні;
- зміна метановиділення, що залежить від атмосферних, гірничо-геологічних факторів і призводить до простоїв у випадку підви-

щення припустимої концентрації чи до перевитрати електроенергії.

Експериментально встановлено, що коливання депресії між лютим і вереснем на деяких шахтах складає 20 мм.вод.ст. при зміні витрати повітря понад 12%. Особливо великі коливання природної тяги в районах з різко континентальним кліматом, де природна тяга має змінний напрямок у різний час року, а іноді й доби.

Шляхи економії електроенергії у вентиляторних установках: узгодження режиму роботи вентилятора з характеристикою вентиляційної мережі, підвищення ККД вентиляційної мережі, підвищення експлуатаційного ККД вентиляторних установок; регулювання продуктивності вентиляторних установок.

Робоча точка вентилятора визначається як точка перетину напірної характеристики вентилятора з характеристикою вентиляційної мережі. Вона повинна лежати на стійкій частині характеристики вентилятора і бути за можливістю ближче до точки, що відповідає максимальному ККД вентилятора. Якщо має місце неефективна робота вентилятора, то робочу точку можна перемістити в зону економічної роботи як за допомогою зміни робочих параметрів вентилятора, так і зміною характеристики вентиляційної мережі. Визначення робочої точки вентилятора при уточненні характеристики вентиляційної мережі повинно проводитись не рідше одного разу в півріччя.

Підвищення ККД вентиляційної мережі забезпечується за рахунок зниження підсмоктувань (витоків) повітря через надшахтні споруди і канали вентилятора та зниженням опору (депресії) вентиляційної мережі. Для зниження підсмоктувань повітря через надшахтні споруди необхідно поштукатурити стіни, закрити щілини, обладнати вікна подвійними рамами, а також упорядкувати роботу шлюзових і розвантажувальних пристроїв. Клітьові підйоми повинні бути обладнані спеціальними повітряними клапанами. Для зменшення підсмоктувань повітря у вентиляційних каналах необхідно ущільнювати ляди, забезпечивши ретельне припасування гуми, що ущільнює, до рами і надійне кріплення останньої до бетону каналів; обладнати оглядові колодязі і входи в канал подвійними щільно прилягаючими лядами та прокладкою з м'якої гуми.

Для визначення стану шахтної вентиляційної мережі, що змінюється, необхідно періодично робити депресивні зйомки вентиляційних мереж, що дає загальну картину розподілу загальношахтної депресії, на якій можна виділити ділянки різкого збільшення аеродинамічних опорів.

Стосовно цих ділянок і всієї вентиляційної мережі проводяться заходи щодо зниження опору протяжних ділянок і місцевих опорів:

- збільшення площі поперечного перерізу вентиляційних виробок шляхом їх перекріплення;
- поліпшення аеродинамічних властивостей виробок за рахунок їх затягувань, обшивання, штукатурки стін, згладжування кутів при вигинах виробок, установки обтічників на розстрілах тощо;
- зниження місцевих опорів шляхом усунення вагонеток і устаткування з виробок, розбирання завалів тощо.

Потужність, споживана з мережі двигуном вентиляторної установки, визначається виразом

$$P = \frac{HQ \cdot 10^{-3}}{\eta_v \eta_d}.$$

Так, якщо в шахту подається $Q = 200 \text{ м}^3/\text{с}$ свіжого повітря при $\eta_v = 0,65$, $\eta_d = 0,85$ і за рахунок реконструкції вентиляційної мережі знизити загальношахтну депресію на 400 Па (розкріплення 500 м вентиляційного штреку зі збільшенням перетину з 4 м² до 6 м², видалення зі штреку двох вагонеток з інертним пилом, згладжування кута повороту струменя повітря), то одержимо річну економію (за $T_b = 8760$ год. роботи вентилятора)

$$\Delta W = 400 \cdot 200 \cdot 8760 \cdot 10^{-3} / (0,65 \cdot 0,85) \approx 1270 \text{ тис.кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Підвищення експлуатаційного ККД вентиляторних установок досягається:

- виключенням роботи осьового вентилятора з переверненим колесом;
- забезпеченням нормативних зазорів робочого колеса;
- наявністю обтічника перед входом робочого колеса осьового вентилятора;
- забезпеченням нормативних параметрів дифузора на виході осьового вентилятора;
- точною установкою лопаток направляючого апарата;
- експлуатаційними змінами параметрів робочих коліс слабозавантажених двоступеневих осьових вентиляторів;
- підвищенням активного навантаження двигуна вентилятора.

Регулювання продуктивності вентиляторних установок може

здійснюватися аеродинамічними способами і зміною частоти обертання робочого колеса вентилятора за допомогою регульованого електропривода.

1.3. Водовідливні установки

Шляхи економії електроенергії у водовідливних установках: підвищення ККД насосів і трубопроводів; регулювання продуктивності водовідливної установки; упорядкування графіка навантаження водовідливної установки; організаційні заходи.

Підвищення ККД насосів забезпечується за рахунок ретельного балансування робочих коліс, регулярною заміною ущільнювачів, забезпечення робочої точки насоса в зоні максимальних значень ККД.

Підвищення ККД трубопроводу може бути за рахунок:

- збільшення перетину труб по всій довжині і на окремих ділянках;
- включення на паралельну роботу резервного нагнітального ставу;
- скорочення довжини трубопроводу, заміна похилих ділянок вертикальними;
- регулярне очищення трубопроводу;
- ліквідація в трубопроводі зайвої арматури і непотрібних поворотів чи зниження їх опору згладжуванням гострих кутів;
- використання арматури з меншими значеннями коефіцієнта місцевого опору (наприклад, заміна в прийомних пристроях на всмоктувальних трубопроводах тарілчастих клапанів на кульові).

Витрата електроенергії за насосною установкою за рік (кВт • год/рік) визначається виразом

$$W = \frac{0,00272 H Q T}{\eta_{\text{nc}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{д}}}, \text{ кВт} \cdot \text{год/рік},$$

де T — число годин роботи насоса за рік, год/рік; H — висота підйому води, м; $\eta_{\text{тр}}$ — ККД трубопроводу; Q — подача, м³/г.

При зміні значень величин, що входять у формулу, підраховується витрата енергії за базовим варіантом та з урахуванням впровадження енергозберігаючих заходів, різниця витрат енергії дасть економію електроенергії.

Регулювання продуктивності насосної установки при використанні відцентрових насосів у даний час практично не використо-

ується, оскільки одночасно зміняться напір і подача. Тому регулювання можливе лише в невеликому діапазоні для відпрацювання робочої точки з максимальним ККД.

Це може бути здійснено:

- за рахунок дроселювання на стороні нагнітального трубопроводу;
- використанням різного виду муфт;
- використанням регульованого електропривода.

Шляхом зміни часу включення насосної установки на період мінімального підземного навантаження можна зменшити втрату енергії в ствольовому кабелі. Зазначений захід, можливо, буде пов'язаний зі збільшенням водозбірника водовідливної установки, однак останнє може мати додатковий ефект за рахунок позалікового електроспоживання насосів.

Організаційні заходи містять:

- усунення витоків у трубопроводі;
- використання напору трубопроводу для зрошення (відпадає необхідність у насосах зрошення);
- регулярне чищення водозбірника (поліпшується робота прийомного пристрою насосної установки і насоса);
- попередження проникнення води в шахту;
- правильна експлуатація електродвигунів насосів.

1.4. Компресорні установки

Шляхи економії електроенергії в компресорних установках: періодичний контроль ККД компресорів; застосування резонансного наддування поршневих компресорів; зниження наднормативних витоків стиснутого повітря і втрат тиску в пневмомережах шахт; узгодження режимів роботи компресорної станції з режимом споживаного стиснутого повітря; заміна пневмообладнання на електрообладнання; використання регульованого електропривода.

Щоб не відбувалося зниження ККД компресорів, необхідно здійснювати заходи щодо підвищення ефективності їх роботи, а саме:

- контроль опору повітрязабірного пристрою;
- регулярне очищення фільтрів;
- регулювання притискних пружин клапанів;
- застосування високоякісного мастила для частин тертя і суворо регламентована його подача в циліндри;

- підтримка в справному стані регуляторів продуктивності і забезпечення їх чіткої роботи;

- контроль інтенсивності охолодження компресорів.

Температура стиснутого повітря на виході з проміжного холодильника не повинна перевищувати температуру охолоджувальної води на вході більше ніж на $5 - 10^{\circ}\text{C}$.

Застосування резонансної довжини всмоктувальних трубопроводів поршневих компресорів скорочує питому витрату електроенергії на $3 - 5\%$ при одночасному підвищенні продуктивності на $5 - 8\%$. Резонансна довжина (м) визначається виразом $L=5160/n$ (n – швидкість обертання колінчастого вала компресора, об/хв).

Відповідно до вимоги «ПТЕ вугільних і сланцевих шахт» витрати стиснутого повітря не повинні перевищувати 20% . Для дотримання цієї вимоги необхідно:

- вести систематичний контроль за витокami стиснутого повітря;

- замінювати гумовотканинні повітропроводи на типові гнучкі з металоплівкою і уніфікованою пневмоапаратурою;

- не допускати установки товстостінних труб замість тонкостінних, збільшувати діаметр труб на окремих ділянках;

- установлювати необхідну кількість водовіддільників;

- використовувати пересувні компресори для подачі невеликої кількості стиснутого повітря віддаленим споживачам;

- за можливістю використовувати теплоізоляцію трубопроводу;

- виключити нераціональну витрату стиснутого повітря.

Потужність електродвигуна компресора визначається виразом:

$$P = \frac{1380}{\eta_{из} \eta_d} \frac{p_1 Q_{гн}}{\gamma_d} \lg \frac{p_2}{p_1}, \text{ кВт},$$

де η_3 – ізотермічний ККД компресора; γ_n – густина повітря при 273°K і тиску $0,1\text{ МПа}$, кг/м^3 ; p_1 – початковий тиск всмоктуваного повітря, МПа ; p_2 – тиск стиснутого повітря, МПа ; Q_k – подача компресора, $\text{м}^3/\text{с}$.

Зниження тиску стиснутого повітря на 1% зменшує витрату електроенергії приблизно на $0,5\%$. Графік роботи компресорної станції повинен бути погоджений із графіком споживання стиснутого повітря, що скорочує надлишкове вироблення стиснутого повітря і додаткові втрати.

При можливості заміни пневматичної енергії на електричну окремих споживачів має місце 7 – 10 кратна економія енергії.

1.5 Конвеєрні установки

Шляхи економії електроенергії на конвеєрному транспорті: підвищення середнього завантаження конвеєрів до номінального значення; виключення додаткової роботи конвеєрів у холосту; виключення нераціонального використання скребкових конвеєрів; підтримка високого технічного стану конвеєра; застосування регульованого електропривода.

Витрата електроенергії одним конвеєром за розрахунковий період часу визначається виразом

- для стрічкового конвеєра:

$$W_{\text{ст}} = 0,013L\delta \left[C_{\text{ст}}V_{\text{ст}}t_p + 0,28Q_p \left(1 \pm \frac{\sin \beta}{\delta} \right) \right], \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

- для скребкового конвеєра:

$$W_{\text{ск}} = 0,01L_i\delta \left[C_{\text{ск}}V_{\text{ск}}t_p + 0,34Q_p (1 \pm 2tg\beta) \right], \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де L – довжина конвеєра, м; якщо приймається вантаж з виїмочних ділянок, його довжина визначається, виходячи з його довжини на початок планованого періоду, $L_n \pm$ половина просування лінії вибою L_θ за розрахунковий період роботи при подовженні (вкорочуванні) конвеєра $L = L_n \pm L_\theta/2$; β – кут установки конвеєра, градус; $L_r = L \cos \beta$ – горизонтальна довжина конвеєра, м; δ – коефіцієнт опору руху: для стаціонарних конвеєрів $\delta = (0,02.....0,033)$; для конвеєрів встановлених у межах виїмочних ділянок $\delta = (0,04.....0,066)$; для конвеєрів, що працюють в особливо тяжких умовах $\delta = (0,08.....0,12)$; C_s, C_c – погонна маса частин конвеєра, що рухаються, кг/м, величина таблична залежно від типу конвеєра; t_p – час роботи конвеєра за розрахунковий період, год; $V_c, V_{\text{ск}}$ – швидкість відповідно стрічки і ланцюга конвеєра, м/с; Q_p – розрахункова маса вантажу, перевезеного конвеєром за час роботи t_p , т.

Для визначення нераціональної витрати електроенергії при роботі конвеєрів без навантаження використовується лише перший

доданок зазначених виразів, і замість t_p підставляється час t_x холо-
стого ходу конвеєра за розрахунковий період.

З метою збільшення завантаження конвеєра до номінальних значень слід за конвеєром, що приймає вугілля (породу) встановлювати бункер чи іншу усереднюючу ємність, з якої здійснюється навантажування послідовно працюючих конвеєрів з номінальним завантаженням. Варто регулярно стежити за станом бункерів і усереднюючих ємностей, за роботою завантажувальних пристроїв; при бункерах ємністю 1000 м³ і більше використовувати датчики верхнього і нижнього рівня, зблоковані зі схемою автоматизації конвеєрної лінії.

У деяких випадках має місце нераціональне використання скребкових конвеєрів, які можна замінити стрічковими. Економічний ефект цього заходу, а також використання бункерів можна розрахувати, використовуючи наведені аналітичні вирази витрати енергії конвеєрами.

Для підтримки високого технічного стану конвеєрів, що знижує електроспоживання, слід:

- періодично проводити машування механічних вузлів відповідно до карти мащення заводу — виготовлювача;
- не допускати заштибовки конвеєра і кінцевих станцій;
- не допускати експлуатацію конвеєра при надмірному зношенні окремих вузлів;
- у стрічкових конвеєрах систематично перевіряти стан пристроїв для очищення стрічки і барабанів;
- у скребкових конвеєрах підтримувати в нормальному стані замкові з'єднання і стики секцій регулюванням натягу скребкового ланцюга в заданих межах;
- вчасно робити планово попереджувальний ремонт.

2. ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО СПОСОБУ І ДІАПАЗОНУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗАЛЕЖНО ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВ РОБОТИ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ

2.1 Регулювання продуктивності вентиляторних установок і вимоги до електропривода

Вентиляторні установки головного провітрювання є одним з найбільш відповідальних і найбільш енергоємних агрегатів шахти. Режим роботи вентилятора змінюється і залежить від багатьох факторів. Параметри витрати і депресії змінюються на достатню величину, тому необхідно забезпечити можливо більшу зону економічних режимів.

При виборі раціонального способу і діапазону регулювання швидкості електропривода необхідно враховувати наступне:

- сезонні коливання тиску і температури навколишнього середовища вимагають регулювання продуктивності в межах 10...15%;
- за період експлуатації шахти продуктивність може зрости в 1,5...2 рази;
- зміна добового ритму гірничих робіт (підривні роботи наприкінці змін) вимагає підвищення продуктивності на 15...20%;
- у святкові і ремонтні дні продуктивність може складати 30...50% робочої.

Аеродинамічне регулювання здійснюється такими методами: дроселюванням; поворотом лопаток направляючого апарата; поворотом лопаток робочого колеса (для осьових вентиляторів) чи поворотом закрилок (для відцентрових вентиляторів).

Перший метод не застосовується через низьку економічність. Найбільш поширене регулювання направляючим апаратом. Але в такого методу мала глибина економічного регулювання. Також з'являються пульсації потоку і надмірні вібрації. Найбільш ефективним є застосування цього методу при підтримці постійної продуктивності, оскільки крива економічної роботи більш полого (похила).

Більш економічним методом є третій метод, але через складність і ненадійність конструкції застосовується мало.

Найбільш перспективним є регулювання зміною швидкості обертання робочого колеса. Закони пропорційності чи закони експлуатації турбомашин формуються: зі зміною частоти обертання робочого колеса турбомашини при постійній характеристиці зовнішньої мережі подача (продуктивність) змінюється пропорційно першому степеню, напір – пропорційно квадрату, а споживана потужність – пропорційно кубу частоти обертання:

$$Q_1 = Q \cdot (n_1/n); \quad H_1 = H \cdot (n_1/n)^2; \quad P_1 = P \cdot (n_1/n)^3;$$

$$\text{звідки} \quad H_1 = H \cdot (Q_1/Q)^2; \quad P_1 = P \cdot (Q_1/Q)^3.$$

Останні два рівняння є відповідно рівняннями квадратичної і кубічної парабол, які в свою чергу є геометричним місцем точок, координати яких визначають подібні режими турбомашини при зміні її частоти обертання.

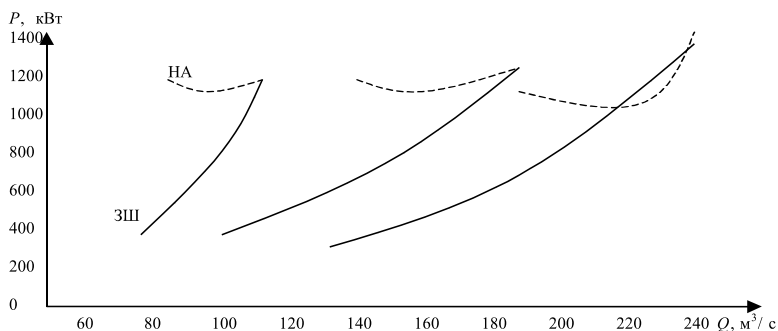


Рис. 4.1

На рис. 4.1 зображені графіки потужності при регулюванні відцентрового вентилятора ВЦД-32 направляючим апаратом (НА) і зміною швидкості (ЗШ).

Аналіз характеристик показує, що при невеликій глибині регулювання в області малих і середніх витрат економічність обох методів однакова. Але з ростом глибини зміни витрати ефективність регулювання різко зростає.

Області економічної роботи відцентрових і осьових вентиляторів залежно від способу регулювання зображені на мал. 4.2 (1 – ВЦД-3,5 і 2 – ВЦД-32 – регулювання направляючим апаратом; 3 – ВОД-30 – регулювання направляючим апаратом і пово-

ротом лопаток колеса; 4 – ВЦД-32 – регулювання швидкості обертання за допомогою регульованого електропривода).

З рис. 4.2 видно, що найбільша зона економічної роботи у відцентрового вентилятора з регулюванням швидкості роботи. Розширення зони економічної роботи дозволяє з більшою ймовірністю забезпечити економічність проектованої чи підвищити ККД діючої установки.

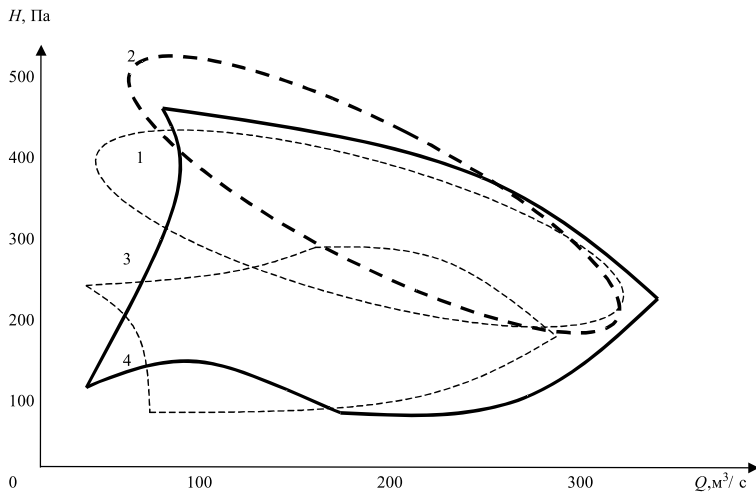


Рис. 4.2

На рис. 4.3 зображені криві, що характеризують економічність регулювання вентиляторних установок різними способами. Тут: 1 – дросельне регулювання; 2 – направляючим апаратом; 3 – муфтами ковзання; 4 – реостатне з АД; 5 – каскадними схемами з АД.

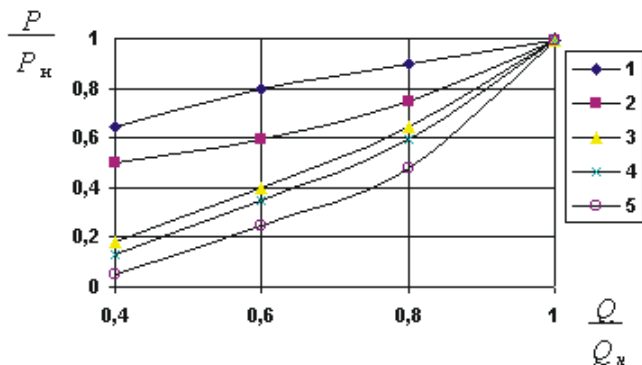


Рис.4.3

Аналіз кривих показує, що найбільш економічним способом регулювання продуктивності вентиляторів головного провітрювання є регулювання за допомогою зміни швидкості обертання, найменш економічне – дросельне регулювання. Розрахунки показують, що регульований привод дозволяє значно скоротити витрату споживаної електроенергії (до 40%). Більш половини цього заощаджується за рахунок скорочення споживання в неробочі дні, коли продуктивність вентилятора може бути зменшена до 50% від граничного значення.

До переваг способу регулювання частоти обертання належать: висока економічність роботи; постійний ККД вентилятора при регулюванні з постійним еквівалентним отвором; простота конструкції вентилятора за рахунок виключення направляючого і поворотного пристроїв; збільшення границі (зони) економічної роботи і зниження енергоспоживання.

Регулювання швидкості обертання виконується при обертанні двигуна і дозволяє здійснити налаштування вентилятора на необхідний режим роботи. Регульований електропривод найзручніше поєднувати зі схемами автоматизації й автоматичного регулювання провітрювання. Існує практична можливість тривалої роботи вентиляторних установок зі зниженою в порівнянні з розрахунковою продуктивністю.

Застосування регульованого електропривода додатково дає:

- зняття обмежень за газовим фактором на ведення технологічного процесу видобутку і можливість підвищення продуктивності шахти при тому самому устаткуванні і витратах;

- істотне збільшення зони економічної роботи вентилятора, зменшення числа типорозмірів вентиляторів, підвищення серійності і зниження вартості вентиляторів;
- збільшення терміну служби вентилятора за рахунок роботи в полегшених режимах при зниженій швидкості обертання;
- зниження витрат на виробництво, передачу і розподіл електроенергії, що обумовлено скороченням її споживання майже в два рази.

Додатково нова технологія енергозбереження у вентиляторних установках з великою сумарною потужністю дозволяє регулювати потужність у години максимуму навантаження і тим самим скоротити витрати на електроенергію при двоставочному тарифі.

Електропривод і система регулювання вентиляторів головного провітрювання вугільних шахт повинні забезпечувати:

- глибину регулювання за витратою 1:2, за тиском 1:3 при плавному характері зміни параметрів;
- якомога більшу зону економічної роботи вентилятора;
- високі енергетичні показники — ККД і коефіцієнт потужності;
- стійку швидкість при падінні чи кидку навантаження і коливаннях напруги мережі живлення;
- можливість оперативного регулювання режиму роботи вентилятора.

Наведений порівняльний аналіз показує безумовну доцільність устаткування потужних шахтних вентиляторів регульованим електроприводом.

2.2. Керування продуктивністю насосних установок

Насосні агрегати можна умовно розділити на три великі групи: потужні (понад 500 кВт) агрегати енергетичних об'єктів; промислові агрегати і насосні станції централізованого водопостачання (50-300 кВт); масові установки (2-50 кВт), до яких належать насоси з подачею 12-100 м³/год і напором 20-80 мм вод.ст.

У першій групі в силу її специфіки застосовуються прогресивні види електропривода. В другій і особливо в третій, найбільш масовій, дотепер переважає нерегульований електропривод з асинхронними короткозамкненими двигунами, а керування продуктивністю здійснюється вкрай неефективним способом — дроселюванням. Це не дозволяє забезпечити режим раціонального енер-

госпоживання і витрати води, пари, повітря тощо при зміні технологічних потреб у широких межах.

Характерним прикладом таких механізмів є насосні станції холодного і гарячого водопостачання та систем опалення жилих будинків і промислових споруд. Вибрані, виходячи з максимальної продуктивності, механізми значну частину часу працюють з меншою продуктивністю, що визначається зміною потреби в різні періоди часу. За деякими даними середньодобове завантаження насосів холодного водопостачання складає всього 50-55% максимального. Існуючі системи водопостачання не забезпечують помітного зниження споживаної потужності при зменшенні витрати, а також обумовлюють істотне зростання тиску (напору) у системі, що призводить до витоків води і несприятливо позначається на роботі технологічного устаткування і мереж водопостачання.

Насос має квадратичну залежність моменту опору від швидкості, а потужність на валу двигуна турбомеханізму зменшується в кубічній залежності при зниженні частоти обертання. Відповідно великі і можливості енергозбереження.

Традиційні способи регулювання подачі насосних установок полягають в дроселюванні напірних ліній насосів і зміні загального числа працюючих агрегатів за одним з технологічних параметрів — тиску на колекторі в точці мережі, рівню в прийомному чи регулюючому резервуарі тощо. Ці способи регулювання спрямовані на вирішення технологічних задач і практично не враховують енергетичних аспектів транспорту води. При такому регулюванні від 5 до 15%, а в окремих випадках до 25-30% споживаної електроенергії витрачається нерационально через:

- втрати енергії в дроселюючому органі;
- створення надлишкових напорів у трубопровідній мережі;
- витоків і непродуктивних витрат води в мережі й у споживача;
- збільшення геометричного підйому при відкачці води з резервуарів каналізаційних насосних станцій тощо.

Тому з появою надійного регульованого електропривода створилися передумови для розробки принципово нової технології транспорту води з плавним регулюванням робочих параметрів насосної установки без непродуктивних витрат електроенергії із широкими можливостями підвищення точності й ефективності технологічних критеріїв роботи систем водоподачі. При цьому геометричним місцем робочих точок насосної установки стають характеристики трубопроводів, а не характеристики насосів як у ви-

падку регулювання подачі насосних агрегатів з постійною частотою обертання.

Однак саме по собі оснащення насосної установки регульованим електроприводом не гарантує економії електроенергії. Щоб одержати економію електроенергії необхідно наступне. По-перше, переконатися в потенційній можливості її економії на об'єкті з урахуванням його технологічних, гідравлічних і режимних характеристик, а, по-друге, розробити раціональні технічні рішення з урахуванням додаткових капітальних витрат на їх впровадження і здійснити такий алгоритм керування насосною установкою, при якому практично реалізується потенційна можливість економії електроенергії.

Для розв'язання цих задач обов'язковий системний підхід, коли насосна установка як об'єкт аналізу і керування розглядається з погляду кількісної визначеності всіх параметрів стану взаємопов'язаних характеристик працюючих регульованих і нерегульованих насосів, характеристики трубопровідної мережі, режим енергоспоживання насосної установки, частоти обертання електроприводів, діапазону і характеру розподілу подач насосної установки тощо.

Рис. 4.4 ілюструє можливості зниження потужності, споживаної двигуном насоса, при регулюванні швидкості електропривода в порівнянні з регулюванням дросельною заслінкою.

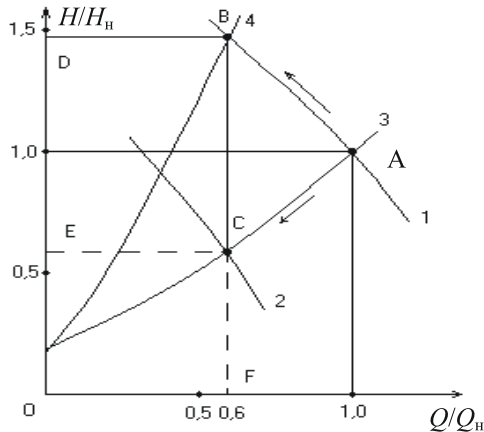


Рис. 4.4

При номінальній витраті і напорі насос працює в точці А, що відповідає характеристиці магістралі 3 і характеристиці $Q - H$ на-

соса (крива 1) при номінальній швидкості двигуна. Зі зменшенням витрати при нерегульованому електроприводі (на малюнку показана витрата, що складає $0,6 Q_n$) за рахунок дросельного регулювання відбувається зміна опору магістралі (крива 4). Насос працює в точці В кривої 1, що призводить до зростання напору, який стає більшим від номінального. Потужність, споживана насосом, пропорційна площі прямокутника ODBF.

При використанні регульованого електропривода за рахунок зниження швидкості насос працює при зниженні витрати в точці С, що відповідає іншій характеристиці $Q - H$ (крива 2) при незмінній характеристиці магістралі (крива 3). Потужність, споживана електроприводом у цьому випадку, пропорційна ОЕСФ, що наочно ілюструє можливість істотного зниження енергоспоживання при впровадженні регульованих електроприводів насосів. Найкращі техніко-економічні показники при регулюванні швидкості насосів забезпечує система ПЧ-АД.

Щоб повніше представити енергетичні процеси в насосній установці, обладнаній регульованим електроприводом, варто враховувати, що переміщення робочих координат насоса щодо характеристики водоводу при зниженні подачі насосної установки призводить, як правило, до виходу робочих точок насоса з робочої зони, тобто до зниження ККД працюючих агрегатів, а в ряді випадків до кавітаційного чи помпажного режиму. Особливо значних змін зазнає ККД регульованих насосів — у них він може змінюватися від номінальних значень до нуля, коли при зниженні частоти обертання тиск, що розвивається насосом, дорівнює або нижче тиску, створюваного роботою паралельно ввімкнених насосів, чи геометричного підйому.

На рис. 4.5 показана у відносних одиницях $n^* = n/n_n$ і H_{cm}/H_ϕ область значень ККД регульованого насоса η_i , обмежена величинами $h_i = 0,95\eta_n$ і $\eta_i = 0,1h_n$. Тут n_i , n_n — поточна і номінальна частота обертання насоса; H_{ct} і H_ϕ — геометричний підйом чи протитиск і фіктивний напір насоса при нульовій подачі.

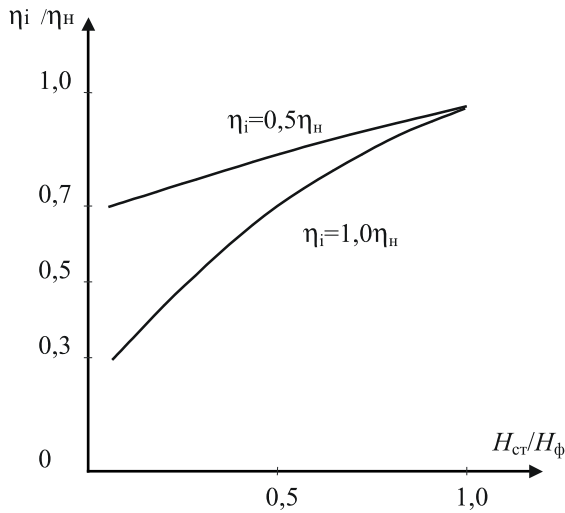


Рис. 4.5

З рисунка видно, що значення ККД залежать як від частоти обертання, так і від поточних координат насоса, водоводу і протитиску в мережі. Тому закономірна поява питання, якою мірою зниження ККД насоса при зменшенні обертів компенсується зниженням напорів при русі по траєкторії водоводу. Визначено, що для регульованого насоса залежно від його характеристик, а також характеристик паралельно працюючих насосів і трубопроводної мережі існує обмежений інтервал частоти обертання, на якому його енергетичні характеристики не гірші ніж при номінальній частоті обертання.

На рис. 4.6 зображені криві, що відбивають залежності відносних питомих витрат електроенергії W^* на перекачування одиниці об'єму води від відносної частоти обертання (n_i/n_n) насоса при різних значеннях протитиску в мережі.

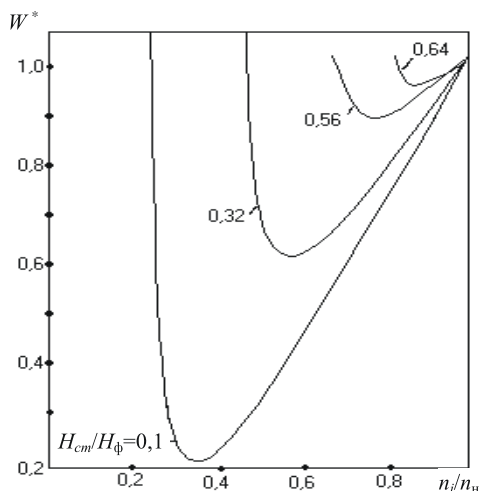


Рис. 4.6

Залежності мають яскраво виражений екстремальний характер. Спочатку при зниженні частоти обертання від номінальних обертів питомі витрати електроенергії знижуються, а потім, коли економія електроенергії від зниження напору стає сумірною з втратами від зниження ККД насоса, виявляється екстремум функції. В подальшому зменшення частоти обертання призводить до різкого зростання питомих витрат електроенергії, і ліва ділянка кривих прямує в нескінченність при прямованні ККД насоса до нульового значення. Абсолютне значення екстремуму кривих залежить від протитиску з боку працюючих насосів. При зміні числа насосів екстремум зміщується в ту чи іншу сторону.

Оскільки системи водоподачі є динамічними об'єктами, у яких постійно змінюються в часі робочі параметри, насосна установка може потрапити в режим роботи, при якому значення ККД виявляться занадто низькими (до 0,1). За деяких умов цей режим може бути тривалим (до 3 – 5 год. на добу). Щоб уникнути таких режимів, уже на стадії розробки САУ розраховують режимні точки, при яких варто робити зміну загального числа працюючих агрегатів, щоб мінімізувати енергоспоживання насосної установки. При реалізації систем автоматичного керування застосовуються технічні рішення, що дозволяють утримувати регульовані агрегати від вход-

ження в зону низьких значень ККД насоса. Ці рішення використовують сучасну програмувальну мікропроцесорну регулюючу апаратуру, здатну ідентифікувати об'єкт керування і розраховувати поточні значення настроювальних параметрів САУ. Потім за допомогою регульованого електропривода переміщувати вектор параметрів стану об'єкта відповідно до критерію регулювання, що розраховується тим самим регулюючим пристроєм або задається по зовнішній програмі.

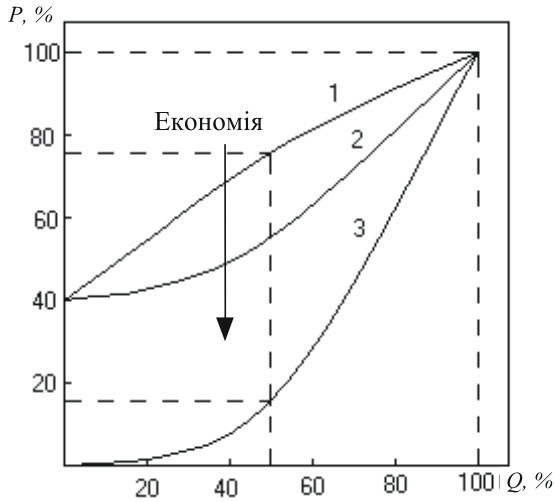


Рис.4.7

На рис.4.7 порівнюються криві необхідної потужності насосних приводів трьох принципів керування. Як видно з рисунка при подачі в обсязі 50% розрахункового максимуму необхідна потужність при дроселюванні (крива 1) складає 73%, при використанні запірно-регулюючої арматури (крива 2) — тільки 50% номінальної, при регулюванні частоти обертання електродвигуна (крива 3) — всього 14% номінальної потужності.

Економічність визначається не тільки енергетичними витратами, враховуються також шуми при регулюванні. Рис.4.8 показує зміну рівня звукового тиску (шумів) при регулюванні потоку з трьома різними системами. Тут: 1 — регулювання дроселем; 2 — використання запірно-регулюючої арматури; 3 — регулювання частоти обертання електродвигуна.

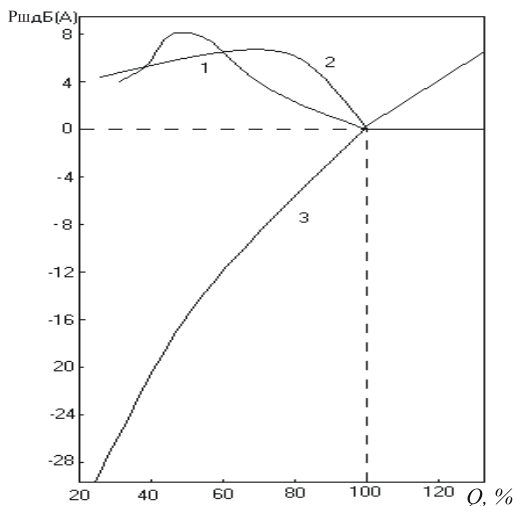


Рис. 4.8

Виходячи з номінальної точки, показане зростання рівня звуку для обох механічних систем, особливо в діапазоні частот потрібного робочого режиму – від 40 до 80% проектного максимуму. У цьому випадку при електричному регулюванні частоти обертання електродвигуна рівень звуку падає на 20 дБ. У порівнянні з механічною системою вигода складає 20-30 дБ, завдяки чому витрати на шумознижуючі заходи значно зменшуються.

Для кількісної оцінки економії електроенергії і води при впровадженні регульованого електропривода на одній з підкачувальних насосних станцій холодного водопостачання, житлових будинків був установлений частотно-регульований електропривод, що забезпечує сталість напору на виході насоса незалежно від витрати, і виконані запис тиску на вході і виході насосної станції та виміри витрати електроенергії і води при роботі в нерегульованому і регульованому режимах. Насос з номінальною подачею 100 м³/год і напором 32 м приводився в обертання асинхронним двигуном потужністю 15 кВт. Проведені вимірювання показали, що за рік економія електроенергії склала близько 45500 кВт · год (40,5%), а економія води – 114135 м³ (25%). При економічному ефекті тільки за рахунок економії електроенергії вартість електричного устаткування для регулювання частоти обертання електродвигуна окупиється за рік експлуатації.

Наведений приклад переконливо підтверджує можливості істотного зниження енергоспоживання при використанні систем регульованих асинхронних електроприводів (особливо ПЧ-АД). Попередні розрахунки показують, що при широкому впровадженні частотно-регульованих приводів можна заощадити 7-10% виробленої електроенергії.

Поява регульованого електропривода в насосних установках систем водопостачання і водовідведення дозволить створити принципово нову енергозберігаючу технологію транспорту води, у якій заощаджується не тільки електроенергія, але і зберігається теплова енергія, скорочується витрата води за рахунок витоків її при перевищеннях тиску в магістралі, коли витрата мала. При частотному регулюванні насосів можна в значній мірі уникнути аварійних ситуацій за рахунок запобігання гідравлічним ударами, що виникають при зміні режимів роботи і пуску системи при нерегульованому електроприводі.

Отримано можливість гнучкого й оперативного розв'язання задач водоподачі і водовідведення при істотному зниженні витрати електроенергії при перекачуванні води і стоків. Однак, щоб реалізувати таку можливість, необхідно на всіх стадіях розробки, впровадження й експлуатації систем керування режимом водоподачі мати у своєму розпорядженні максимально повну кількісну інформацію про стан об'єкта автоматизації.

2.3. Регулювання швидкості конвеєрних установок

На рис.4.9 зображений стрічковий конвеєр зі стрічкою, що рухається зі швидкістю x . Рух стрічки передається від двигуна Д через редуктор Р і барабан Б.

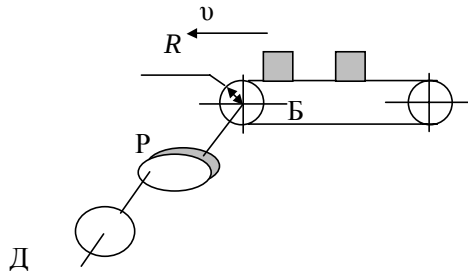


Рис.4.9

Момент на валу приводного двигуна конвеєра:

$$M = \frac{FR}{i_p \eta_p},$$

де R — радіус барабана; F — зусилля на приводному барабані. Зусилля на барабані має дві складові:

$$F = F_0 + F_b,$$

де F_0 — зусилля, витрачуване на переміщення стрічки конвеєра; F_b — зусилля необхідне для переміщення вантажу.

Коли вантаж на конвеєрі відсутній, двигун розвиває момент неробочого ходу:

$$M_0 = \frac{F_0 R}{i_p \eta_{p0}},$$

де η_{p0} — ККД редуктора, що відповідає зусиллю F_0 .

З огляду на властивості механічних передач, залежність моменту на валу двигуна від зусилля на барабані

$$M_* = M_{0*} + (1 - M_{0*}) F_{b*},$$

де $M_* = \frac{M}{M_H}$; $M_{0*} = \frac{M_0}{M_H}$; $F_{b*} = \frac{F_b}{F_{BH}}$; M_H — номінальний момент на валу двигуна необхідний для переміщення стрічки і номінального вантажу при номінальній швидкості; F_{BH} — складова тягового зусилля F в органі конвеєра, виникаюча за рахунок переміщення лише номінального корисного вантажу.

Складова F_b тягового зусилля і швидкість переміщення стрічки V конвеєра визначають його продуктивність:

$$Q_* = F_{b*} V_*$$

де $Q_* = \frac{Q}{Q_H}$; Q_H — номінальна продуктивність конвеєра; $V_* = \frac{V}{V_H}$; V_H і V — відповідно, номінальна і фактична швидкості руху стрічки.

При постійній номінальній швидкості конвеєра ($V_* = 1$):

$$Q_* = F_{B*},$$

потужність, що розвивається двигуном на валу:

$$P_* = M_* \omega_* = M_{0*} + (1 - M_{0*}) Q_*,$$

де $P_* = \frac{P}{P_n}$; $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_n} = 1$; $\omega = \frac{V_{ip}}{R}$, P_n , ω_n – номінальна потужність і кутова швидкість на валу двигуна.

Аналіз залежності показує, що коли знижується продуктивність ефективність роботи конвеєра зменшується, оскільки зростає відносна частка потужності, що витрачається на подолання моменту неробочого ходу M_0 . Очевидно, що при недовантаженні конвеєра більш економічним по витратах енергії є режим роботи зі змінною швидкістю, що забезпечує ту саму продуктивність, але при сталості складової зусилля $F_{B*} = 1$. Відповідно до $Q_* = F_{B*} V_*$ швидкість у цьому випадку повинна змінюватися за законом:

$$\omega_* = V_* = Q^*,$$

якому відповідає потужність на валу двигуна

$$P_*' = M_* \omega_* = [M_{0*} + (1 - M_{0*})] Q_* = Q_*.$$

На рис.4.10 показані залежності потужності на валу двигуна для конвеєра з моментом неробочого ходу $M_0 = 0,3 M_n$ для постійної ($V = \text{const}$) і регульованої ($F_B = \text{const}$) швидкостей стрічки.

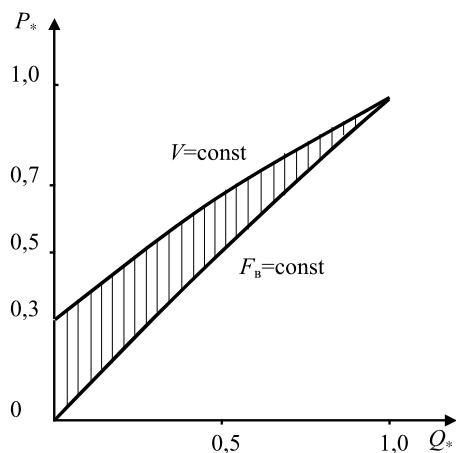


Рис. 4.10

Заштрихована зона відповідає економії потужності, одержуваній за рахунок регулювання швидкості

$$\Delta P_* = P_* - P'_* = M_{0*}(1 - Q_*).$$

Таким чином, ефект від регулювання швидкості тим вище, чим більший момент неробочого ходу і чим значніше знижується продуктивність конвеєра.

2.4. Регулювання швидкості вантажопідійомних машин

Для механізмів вантажопідійомних машин (кранів, ліфтів) застосовуються різні системи асинхронного привода, які можна поділити на дві групи. Перша реалізується на основі релейно-контакторної апаратури з використанням реостатного регулювання, динамічного гальмування, багатошвидкісних двигунів тощо. Друга група виконується з напівпровідниковими пристроями: з перетворювачами напруги, частоти, імпульсними регуляторами. Для кранів і ліфтів масового призначення дотепер в основному знаходять застосування системи електроприводів першої групи, у яких відсутні керовані напівпровідникові пере-

творювачі. Однак релейно-контакторні системи керування часто не забезпечують бажаних енергетичних показників і якості регулювання координат в електроприводах розглянутого класу. Тому є потреба розробки більш досконалих електроприводів другої групи.

Вибір системи електропривода для даних механізмів залежить від вартості, масогабаритних, енергетичних показників, надійності устаткування й істотно визначається умовами і рівнем експлуатації. Оскільки вантажопідйомні машини мають масове застосування, то для них часто вимагаються максимально прості й дешеві електроприводи, що мали б за можливості просте схемне виконання і разом з тим необхідні технічні показники. Однією з таких систем є система перетворювач напруги — асинхронний двигун.

Приводні двигуни кранових і ліфтових механізмів працюють у повторно-кратковчасному режимі. При цьому основну частину робочого часу (60-70% і більше) приводний двигун обертається з високою частотою близькою до номінальної і приблизно до 15% — зі зниженою частотою. У процесі роботи на високій частоті АД найкраще підключати безпосередньо до мережі. Отже, протягом більшої частини робочого часу між мережею живлення і статором АД ніякий перетворювач не потрібний. Протягом же невеликої частини робочого часу керований перетворювач електричної енергії необхідний як для забезпечення зниженої частоти обертання ротора, так і для належного формування перехідних процесів пуску і гальмування.

Як керований перетворювач найкраще підходить ПЧ, оскільки він забезпечує вищу якість регулювання координат АД (швидкість, момент, струм). При роботі на високій швидкості більше підходить ТРН, тому що при нульовому куті керування тиристори повністю відкриті, і мережа не завантажується вищими гармоніками. У випадку ж використання ПЧ при роботі на високій швидкості (і номінальній частоті) виникають певні проблеми, пов'язані або з відомими труднощами щодо забезпечення генераторного режиму з рекуперацією енергії в мережу (такий режим є характерною рисою для розглянутого класу механізмів) за наявності інвертора напруги, або з погіршенням коефіцієнта потужності при наявності інвертора струму.

Основним режимом роботи системи ТРН-АД є фазовий. Дослідження показують, що технічні можливості цієї системи можна значно розширити за рахунок спеціальних режимів АД: квазі-частотного і крокового.

При здійсненні квазічастотного керування частоти значимих гармонік виражаються у вигляді:

$$f_n = \frac{f_{n1}(m_1 + l_1)q_1 + f_{n2}(m_2 + l_2)q_2}{(m_1 + l_1)q_1 + (m_2 + l_2)q_2},$$

$$\text{де } f_{n1} = f_m \left[1 - \frac{T_m}{t_r} \frac{k_1}{(m_1 + l_1)} \right]; \quad f_{n2} = f_m \left[1 - \frac{T_m}{t_r} \frac{k_2}{(m_2 + l_2)} \right].$$

Тут: $m_1, l_1, q_1, m_2, l_2, q_2$ – параметри квазічастотного керування; f_m – частота мережі; t_r – мінімальний час такту перемикання; $k_1, k_2 = 0, 1, 2, \dots$ – цілі числа, що задовольняють нерівності, T_m – період мережі:

$$k_1 q_1 + k_2 q_2 \leq 2[(m_1 + l_1)q_1 + (m_2 + l_2)q_2] \frac{t_r}{T_m}.$$

Частоту f_n значимої гармоніки напруги можна наблизити до будь-якої заданої частоти в зоні між f_{n1} і f_{n2} . Отже, змінивши параметри квазічастотного керування, можна здійснити в широкому діапазоні плавне регулювання частоти значимої гармоніки.

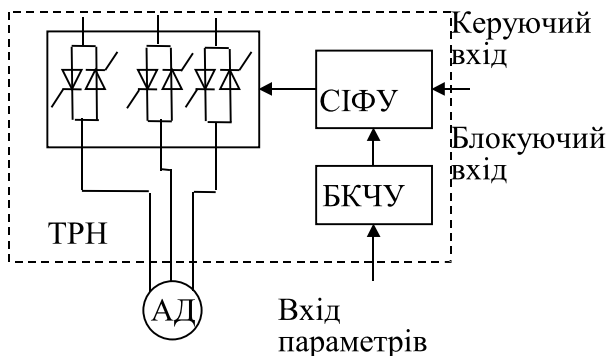


Рис. 4.11

На рис. 4.11 наведена схема керування АД, у якій забезпечується як квазічастотний, так і фазовий режим керування. Система

імпульсно-фазового керування СІФУ має два входи: вхід керування і релейний вхід блокування, до якого приєднаний блок квазі-частотного керування БКЧУ. При зміні U_k здійснюється регулювання амплітуд значимих гармонік напруги на статорі АД, а при зміні параметрів квазічастотного керування – регулювання частоти цих гармонік.

На рис. 4.12 зображені два сімейства експериментальних механічних характеристик 1-5 і 6-8, що отримані при здійсненні зазначеного способу. На рисунку: 1 – $m_1=2, l_1=6$; 2 – $m_1=2, l_1=6, q_1=3, m_2=3, l_2=6, q_2=1$; 3 – $m_1=2, l_1=6, q_1=1, m_2=3, l_2=6, q_2=1$; 4 – $m_1=2, l_1=6, q_1=1, m_2=3, l_2=6, q_2=3$; 5 – $m_2=3, l_2=6$; 6 – $m_1=4, l_1=12$; 7 – $m_1=4, l_1=12, q_1=2, m_2=5, l_2=12, q_2=1$; 8 – $m_2=5, l_2=12$; 9 – природна характеристика.

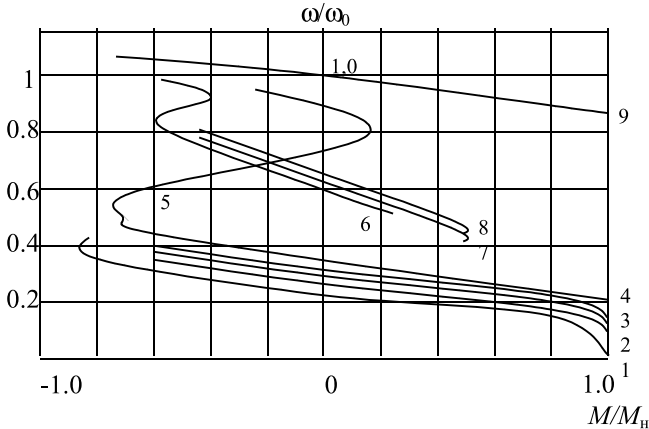


Рис. 4.12

У кожному з цих сімейств механічні характеристики розташовані близько одна до одної, що говорить про високу плавність регулювання швидкості.

Квазічастотне керування має такі переваги: забезпечення стабільної зниженої швидкості в розімкнутій системі керування, регулювання моменту в широкому діапазоні з плавним переходом з рушійного режиму АД в гальмівний, здійснення електричного гальмування у визначеній зоні швидкостей.

Крім переваг таке керування має і недоліки: труднощі забезпечення гальмування поблизу синхронної швидкості, а також наявність шуму і вібрацій АД. Останній недолік є найбільш істотним.

Разом з тим, квазічастотне керування становить значний інтерес для віброприводів, у яких робочий орган робить коливальний рух. Квазічастотний режим становить інтерес і як спеціальний режим роботи електропривода, виконаного за системою ТРН-АД. Рациональне поєднання квазічастотного, крокового і фазового режимів значно розширює функціональні можливості цієї системи. На базі системи ТРН-АД розроблені електроприводи механізму пересування однобалкових мостових кранів і тельферів.

Значний інтерес становить використання ТРН для керування низькошвидкісними лінійними асинхронними двигунами (ЛАД), що, на відміну від АД, мають ряд особливостей. Через підвищений повітряний зазор у ЛАД великий намагнічувальний струм, а струм індуктора мало залежить від швидкості (ковзання). Тому електричні втрати в первинних обмотках ЛАД при живленні від ПЧ чи ТРН не так різко відрізняються між собою, як у АД. Також через підвищений повітряний зазор швидше згасають електромагнітні перехідні процеси, і має місце більш висока стійкість роботи електропривода в замкнутих системах регулювання. У системах ТРН-ЛАД при фазовому керуванні зі зворотним зв'язком по швидкості забезпечується без коригувальних пристроїв регулювання в діапазоні до (150-200):1, а при квазічастотному — керуванні в розімкнутій системі регулювання швидкості здійснюється в діапазоні (10-15):1 і вище при плавному переході з рушійного режиму в гальмівний. Система ТРН-ЛАД, зокрема, може бути використана для реалізації безредукторного електропривода кабіни ліфта.

З ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЗАЛЕЖНО ВІД ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ НАВАНТАЖЕННЯ

3.1. Вибір способу регулювання швидкості при постійному навантаженні двигуна

У регульованому електроприводі при зміні швидкості має місце зміна навантаження двигуна. У той же час для повного використання двигуна його потужність повинна бути вибрана так, щоб навантаження при роботі на новій швидкості не перевищували припустимої за умовами нагрівання. Досягається це вибором

відповідного способу регулювання, при якому виконується дана умова.

Способи регулювання швидкості за умовою припустимого навантаження поділяються на дві групи:

- регулювання при постійному моменті (зміна напруги на якорі ДПС чи статорі СД, зміна опору в роторі АД чи в колі якоря ДПС, у деяких каскадних схемах, у вентильному двигуні);

- регулювання при постійній потужності (ослаблення магнітного потоку ДПС, зміна числа пар полюсів АД, у деяких каскадних схемах).

Регулювання швидкості при постійному моменті забезпечує регулювання швидкості униз від номінальної, тобто $\omega_n = \omega_{\max}$. Номінальний момент двигуна дорівнює моменту навантаження, тобто $M_n = M_c$ і номінальна потужність дорівнює:

$$P_n = M_n \omega_n = M_m \omega_{\max} = P_{m \max}.$$

Таким чином, номінальна потужність двигуна дорівнює максимально можливій, і при цьому на всіх швидкостях двигун завантажений повністю і працює в нормальному тепловому режимі, тобто спосіб регулювання швидкості є раціональним.

Для регулювання швидкості при постійній потужності характерне регулювання швидкості вгору від номінальної, тому за номінальну швидкість двигуна приймають мінімальну швидкість у діапазоні, тобто $\omega_n = \omega_{\min}$. Оскільки номінальна потужність двигуна дорівнює максимальній потужності навантаження $P_{m \max} = M_m \omega_{\max}$, то номінальний момент двигуна

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_{m \max}}{\omega_{\min}} = \frac{M_m \omega_{\max}}{\omega_{\min}} = M_m D,$$

де $D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ — діапазон регулювання.

З виразу видно, що номінальний момент двигуна повинен у D раз перевищувати момент навантаження. Двигун завантажений повністю тільки на максимальній швидкості $\omega_{\max}$, коли по якорі протікає номінальний струм, а магнітний потік мінімальний. При інших, менших швидкостях потік двигуна збільшується, струм у якорі зменшується, і тим самим двигун є недовикористаним за умовами нагрівання. Виявляється завищеним габарит двигуна, що визначається номінальним моментом.

Таким чином, при сталому навантаженні використання способів регулювання швидкості при постійній потужності є нерациональним оскільки вимагає завищення габаритів двигуна.

3.2. Вибір способу регулювання швидкості при постійній статичній потужності

Регулювання швидкості при постійному моменті можливо тільки вниз від номінальної. За номінальну швидкість двигуна приймаємо максимальну швидкість у діапазоні, тобто $\omega_n = \omega_{\max}$. Максимальний момент двигуна, на який він повинний бути вибраний при $P_c = \text{const}$, відповідає мінімальній швидкості:

$$M_{\max} = \frac{P_m}{\omega_{\min}} = M_n.$$

Отже, номінальна потужність двигуна:

$$P_n = M_n \omega_n = \frac{P_m \omega_{\max}}{\omega_{\min}} = P_m D,$$

тобто вона повинна бути в D раз більше потужності навантаження P_m . Це означає, що при роботі двигуна на всіх швидкостях, крім мінімальної, він буде недовантажений і недовикористаний по нагріванню.

Регулювання швидкості при постійній потужності забезпечує регулювання швидкості вгору від номінальної. Тоді як номінальна повинна бути прийнята мінімальна швидкість у заданому діапазоні, тобто $\omega_n = \omega_{\min}$, а номінальний момент:

$$M_n = \frac{P_m}{\omega_{\min}} = \frac{P_m}{\omega_n}.$$

Тоді номінальна потужність вибраного двигуна:

$$P_n = M_n \omega_n = \frac{P_m \omega_n}{\omega_n} = P_m,$$

тобто дорівнює потужності навантаження. Двигун при цьому завантажений цілком на всіх швидкостях і буде працювати в нормальному тепловому режимі.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок — для вибору мінімального за габаритом двигуна і забезпечення його повного використання по нагріванню необхідно, щоб спосіб регулювання швидкості за показником припустимого навантаження цього двигуна відповідав залежності навантаження від швидкості. При навантаженні виду $M_m = \text{const}$ доцільне використання способів регулювання при постійному моменті, а при $P_m = \text{const}$ — при постійній потужності.

4. ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА. ВИКЛЮЧЕННЯ РЕЖИМУ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

Підвищення завантаження електропривода до номінального значення і максимально можливе виключення режиму неробочого ходу дозволяє знизити енергоспоживання за рахунок збільшення ККД і коефіцієнта потужності привода.

При коефіцієнті навантаження, меншому 0,4...0,5, необхідна заміна на двигун меншої потужності. Якщо $(0,4...0,5) \leq k_3 \leq (0,7...0,75)$, доцільність заміни повинна бути підтверджена зменшенням сумарних втрат енергії в двигуні й у мережі:

$$\frac{1-\eta_1}{\eta_1} + k_e \frac{\text{tg}\varphi_1}{\eta_1} > \frac{1-\eta_2}{\eta_2} + \frac{\text{tg}\varphi_2}{\eta_2},$$

де η_1, η_2 — ККД порівнюваних двигунів при заданому навантаженні; $\text{tg}\varphi_1, \text{tg}\varphi_2$ — тангенси кутів φ_1 і φ_2 , що відповідають значенням коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1$ і $\cos\varphi_2$; k_e — коефіцієнт підвищення втрат, кВт/квар, що визначає втрати активної потужності, що приходяться на передачу 1 квар у даній системі електропостачання.

Величина коефіцієнта підвищення втрат k_e може бути визначена з табл.4.1, а якщо він не заданий, його приймають рівним 0,07 кВт/квар для високовольтних споживачів, чи 0,125 кВт/квар для низьковольтних споживачів.

Таблиця 4.1

Характеристика трансформатора і системи електропостачання, від якої живиться двигун	k_e , кВт/квар	
	у години максимуму	у години мінімуму
Трансформатори, що живляться безпосередньо від шин електростанцій	0,02	0,02
Трансформатори мережі, що живляться від електростанцій на генераторній напрузі	0,07	0,04
Знижувачі трансформатори 110/35/10 кВ, що живляться від районних мереж	0,1	0,06
Знижувачі трансформатори 10/6/0,4 кВ, що живляться від районних мереж	0,15	0,1

Режим неробочого ходу привода є економічно недоцільним, оскільки призводить до необґрунтованого споживання активної енергії:

$$W = P_0 t_0$$

де P_0 — потужність, споживана з мережі на неробочому ходу за час t_0

Крім того, збільшуються втрати енергії при передачі зайвої реактивної потужності. Орієнтовне споживання реактивної енергії Q у функції коефіцієнта завантаження при $Q_0 = 0,4 P_n$ зображено на рис. 4.13

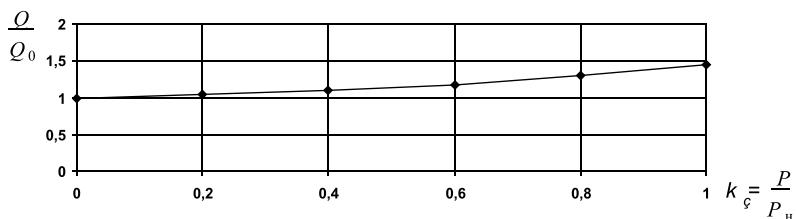


Рис. 4.13

Втрати активної потужності $\Delta P_{\text{л}}$ і енергії $\Delta W_{\text{л}}$ у трифазних лініях

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} r \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л}} t_{\text{п}},$$

де $r = \frac{\rho L}{S}$ – активний опір проводу чи шини, кабелю, Ом; ρ – питомий опір матеріалу проводу при 20°C (для алюмінію 0,026...0,029; для міді 0,0175...0,018; для сталі 0,1...0,14 Ом·мм²/м); L – довжина лінії, м; S – перетин провідника, мм²; P , Q – відповідно, розрахункова активна і реактивна потужності, передані через лінію, кВт, квар; U – лінійна напруга, кВ; t – тривалість роботи за розрахунковий період, год.

Втрати активної потужності в двообмоточному трансформаторі

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P'_0 + \Delta P_{\text{по}} + k_{\text{зт}}^2 \Delta P'_\kappa,$$

де $\Delta P_{\text{по}}$ – втрати на примусове охолодження (враховуються тільки для потужних трансформаторів, що мають систему примусового охолодження); $\Delta P'_0 = \Delta P_0 + k_{\text{е}} \Delta Q_0$ – наведені втрати потужності неробочого ходу; $\Delta P'_\kappa = \Delta P_\kappa + k_{\text{е}} \Delta Q_\kappa$ – наведені втрати потужності короткого замикання; ΔP_0 – втрати неробочого ходу при номінальній напрузі (за паспортом); ΔP_κ – втрати короткого зами-

кання при номінальному навантаженні (за паспортом); $k_{\text{зт}} = \frac{S_\phi}{S_\text{н}}$ –

коефіцієнт завантаження трансформатора, дорівнює відношенню фактичного навантаження трансформатора S_ϕ до його номіналь-

ної потужності $S_\text{н}$; $\Delta Q_0 = S_\text{н} \frac{I_0}{100}$ – реактивні втрати неробочого ходу трансформатора; I_0 – струм неробочого ходу трансформатора (за

паспортом); $\Delta Q_\kappa = S_\text{н} \frac{U_\kappa}{100}$ – реактивні втрати короткого замикання трансформатора; U_κ – напруга короткого замикання трансформатора (за паспортом).

При розрахунку економічного ефекту від заміни незавантажених двигунів більшої потужності на двигуни меншої потужності необхідно знати сумарні втрати активної потужності:

$$\Delta P = [Q_0 (-k_3^2) + k_3^2 Q_\text{н}] k_\text{е} + \Delta P_0 + k_3^2 P_\text{н},$$

де $Q_0 = \sqrt{3} U_\text{н} I_0$ – реактивна потужність, споживана електро-двигуном з мережі при неробочому ході; I_0 – струм неробочого ходу

електродвигуна; $k_z = \frac{P_{cp}}{P_n}$ – коефіцієнт завантаження електродвигуна; P_{cp} – середнє навантаження електродвигуна; $Q_n = \frac{P_n \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta_n}$ – реактивна потужність електродвигуна при номінальному навантаженні; $\operatorname{tg} \varphi_n = \operatorname{tg}(\arccos \varphi_n)$; $\Delta P_0 = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \frac{k_p}{1 + k_p}$ – втрати активної потужності при неробочому ході двигуна; $\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \frac{1}{1 + k_p}$ – приріст втрат активної потужності в двигуні при номінальному (100%) навантаженні; $k_p = \frac{\Delta P_0}{\Delta P_n}$ – розрахунковий коефіцієнт, що залежить від конструкції двигуна і визначається з формули $k_p = \frac{\Delta P_0^*}{(1 - \eta_n) - \Delta P_0^*}$; ΔP_0^* – втрати неробочого ходу, віднесені до номінальної потужності двигуна.

Коефіцієнт k_p має такі значення для різних типів двигунів:

$0,5 \leq k_p \leq 1$ – ДПС послідовного збудження;

$1 \leq k_p \leq 2$ – ДПС незалежного збудження;

$0,5 \leq k_p \leq 1$ – асинхронні.

Нижні значення коефіцієнта відповідають тихохідним двигунам, верхні – швидкохідним.

5. ЗНИЖЕННЯ НАПРУГИ НА ЗАТИСКАЧАХ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

При неможливості заміни малоавантажених двигунів варто перевірити доцільність зниження напруги на його затискачах. Зниження напруги живлення АД призводить до зменшення споживання реактивної потужності (за рахунок зниження струму намагнічування) і, тим самим, до підвищення $\cos \varphi$. При цьому одночасно зменшуються втрати активної потужності, тобто збільшується ККД двигуна.

Можливі такі методи зниження напруги малоавантажених асинхронних двигунів:

- перемикавання статорної обмотки з «трикутника» на «зірку»;
- секціювання статорних обмоток;
- зниження напруги в силових колах підприємств перемиканням відгалуджень знижуючих трансформаторів;
- застосування найпростішого регульованого електропривода за схемою ТРН-АД.

Перемикавання статорної обмотки АД з «трикутника» на «зірку» звичайно рекомендують для двигунів напругою до 1000 В, завантажених менше 30%. Ефективність заходів пояснюється рис. 4.14 (тут наведені графіки для значень $\cos \varphi_n = 0,78; 0,82; 0,86; 0,9$) і рис. 4.15.

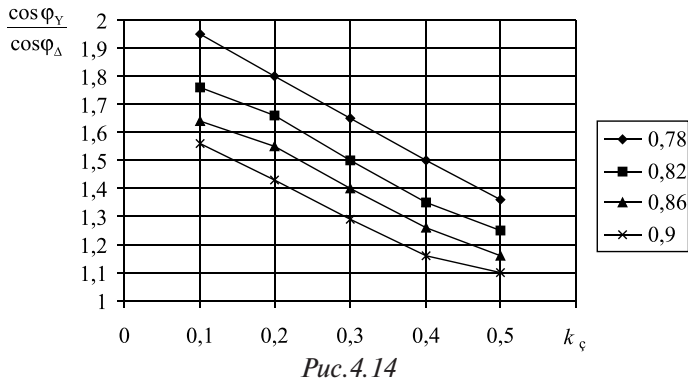


Рис. 4.14

Величина моменту, що розвивається асинхронним двигуном, пропорційна квадрату напруги мережі живлення. Тому при перемиканні обмоток статора з «трикутника» на «зірку» внаслідок зниження моменту необхідно виконувати перевірку за перевантажувальною спроможністю і величиною пускового моменту.

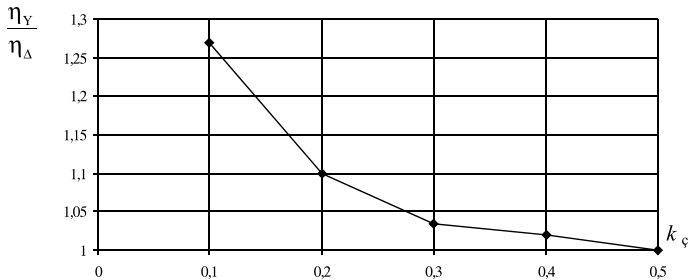


Рис. 4.15

Секціювання рекомендується коли неможливо скористатися попереднім способом. Якщо двигуни виготовлені з паралельними секціями в статорній обмотці, то секціювання здійснюють шляхом перепайки лобових з'єднань обмотки. Якщо ж обмотка виконана одиночним проводом, то перемикання секцій обмотки можливе лише при капітальному ремонті.

Перемикання відгалуджень знижуючого трансформатора часто застосовують на практиці. Цей захід раціональний, якщо трансформатор не живить одночасно інші приймачі, що не допускають зниження напруги на їх затискачах. Знижуючи напругу мережі живлення, варто пам'ятати, що при цьому зростають втрати й у самій мережі. А в трансформаторах сумарні втрати активної потужності при зміні напруги в більшості випадків не змінюються.

Зниження напруги впливає і на тепловий режим асинхронних двигунів. Так, при номінальному навантаженні і номінальній частоті мережі живлення зниження напруги на 10% призводить до зростання перегріву двигуна також на 10%. Однак варто враховувати, що при завантаженні двигуна, що складає 90%, припустимо знижувати напругу на 13%, а при $k_3 = 0,8$ — напруга може знижуватись на 22%, без небезпеки перегріву двигуна понад припустимий.

На практиці використовують відімкнення частини приводних двигунів при недовантаженні, наприклад, багатодвигунового конвеєра. Але це недоцільно, оскільки через обертання працюючими двигунами непрацюючих приводних блоків втрати потужності майже не зменшуються. А знос редукторів, зв'язаних з непрацюючими двигунами, може бути не менше, ніж у працюючих.

Аналіз показує, що електроприводи великого числа виробничих механізмів мають завищену потужність, що у 1,5-2,5 рази перевищує необхідну. Крім того, електроприводи деяких механізмів (пресів, ковальського устаткування, верстатів) частину часу працюють з недовантаженням.

Зазначені особливості дозволяють знизити електроспоживання недовантаженого асинхронного двигуна при роботі в зоні номінальної швидкості, забезпечивши його роботу за рахунок ТРН на регульованій $U_1 < U_n$, а не на природній характеристиці, де U_1 — діюче значення першої гармоніки напруги, прикладене до двигуна; U_n — діюче значення номінальної напруги мережі. Цей режим роботи ілюструє рис. 4.16, де цифрою «1» позначена природна, цифрою «2» — регульовальна механічна характеристика при керуванні від ТРН; s_1 і s_2 — ковзання на природній і регульовальній характеристиках при заданому M_c

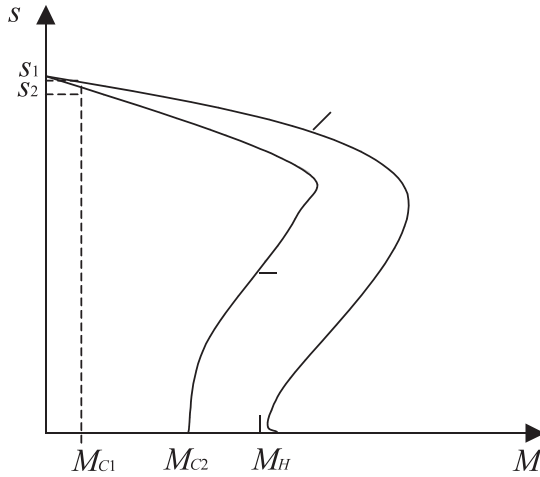


Рис. 4.16

Електромагнітні втрати в двигуні:

$$\Delta P = V_1 + V_2 + K_{c1}.$$

При роботі на природній характеристиці:

$$V_1 = [A + (1 - A)\mu_c^2]V_{1н};$$

$$V_2 = \mu_c^2 V_{2н};$$

$$K_{c1} = [B + (1 - B)\mu_c^2]K_{c1н},$$

де $V_{1н}$, $V_{2н}$, $K_{c1н}$ — номінальні втрати в міді статора, обмотці ротора, сталі статора; $\mu_c = \frac{M_c}{M_H}$ — відносне значення моменту статичного навантаження; $A \approx (I_0/I_H)^2$; I_0 — струм неробочого ходу двигуна при живленні номінальною напругою; V — конструктивний коефіцієнт ($V = 0,96 \div 0,98$ для двигунів єдиної серії, $B = 0,94 \div 0,97$ для двигунів краново-металургійних серій).

При роботі на регульовальній характеристиці 2, реалізованій за рахунок ТРН,

$$V_1 = 1,1\mu_c \left[A \frac{s_n}{s} + (1-A) \frac{s}{s_n} \right] V_{1n};$$

$$V_2 \cong 1,1\mu_c \frac{s}{s_n} V_{2n};$$

$$K_{c1} = \mu_c \left[B \frac{s}{s_n} + (1-B) \frac{s}{s_n} \right] K_{c1n}.$$

При роботі зі зниженою напругою, коли $U_1 < U_n$, дещо падає швидкість двигуна, збільшуються втрати V_2 , зменшуються втрати V_1 і K_{c1} , але їх перерозподіл такий, що значення ΔP при роботі на характеристиці 2 виявляється менше, ніж при роботі на природній характеристиці. Існують методики вибору оптимального значення s_2 , при якому забезпечується мінімальне значення електромагнітних втрат. У цьому випадку вдається знизити споживання енергії в 1,5 – 2 рази. Економія електроенергії буде тим більше, чим менше момент двигуна в порівнянні з номінальним і чим більше тривалість роботи двигуна з недовантаженням.

Ефект підсилюється при використанні асинхронних двигунів з відносно високим значенням струму неробочого ходу статора. Так, якщо асинхронний двигун МТКФ012-6 ($P_n = 2,2$ кВт) забезпечує, працюючи в повторно-короткочасному режимі, 60 включень за годину при часі роботи на сталій швидкості $t_y = 30$ с і річному числі годин роботи $T = 6000$ год/рік, то при роботі на регульовальній характеристиці з ковзанням s_2 вдається заощадити за рік 210 кВтЧгод – при $M_c = 0,5M_n$,

660 кВтЧгод – при $M_c = 0,25M_n$, 1150 кВтЧгод – при $M_c = 0,05M_n$ у порівнянні з роботою на природній характеристиці при s_1 .

6. ВИКОРИСТАННЯ СИНХРОННОЇ МАШИНИ ЯК КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Робота системи електропостачання характеризується споживанням електроприймачами реактивної потужності. Це викликає:

- додаткові втрати енергії в системі;
- зниження рівня напруги і необхідність мати підвищену пропускну здатність підстанцій і розподільних мереж, що знижує економічність роботи системи.

У зв'язку з цим необхідно проводити компенсацію реактивної потужності. Одним з ефективних способів компенсації є викори-

стання синхронної машини, що за рахунок регулювання струму збудження може здійснювати генерацію реактивної потужності в електричну мережу. У цьому випадку СД працює з випереджуючим $\cos\varphi$.

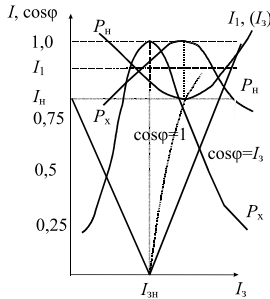


Рис. 4.17

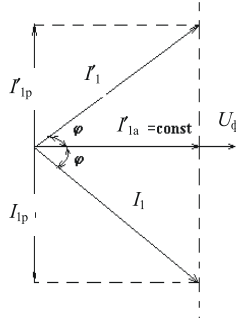


Рис. 4.18

Можливість роботи СД як джерела (компенсатора) реактивної потужності ілюструють V – подібні характеристики (рис. 4.17), що становлять залежності струму статора двигуна I_1 і його $\cos\varphi$ від струму збудження I_3 при $U_\phi = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ і $P_1 = \text{const}$. Залежності струму $I_1(I_3)$ мають мінімум, якому відповідає максимум коефіцієнта потужності $\cos\varphi = 1$, що пояснюється за допомогою векторної діаграми СД (мал.4.18).

При невеликих струмах збудження струм статора I_1 відстає від напруги U_ϕ на кут φ , що відповідає роботі СД із відстаючим $\cos\varphi$ і споживанню ним реактивної потужності з мережі живлення. Активна складова повного струму $I_{1a} = I_1 \cos\varphi$ збігається за напрямком з вектором напруги мережі U_ϕ , а реактивна складова I_{1p} відстає від нього на 90° , що і визначає споживання реактивної потужності.

Нехай СД працює при постійному навантаженні і споживає з мережі активну потужність:

$$P_1 = 3 U_\phi I_1 \cos\varphi = 3 U_\phi I_{1a}.$$

З виразу видно, що при $P_1 = \text{const}$ і струм $I_{1a} = \text{const}$. Тому при зростанні струму збудження СД кінець вектора повного струму I_1 буде переміщуватися вгору по штриховій вертикальній лінії (рис. 4.18), що означає зменшення реактивної складової струму. При деякому струмі збудження, близьке до номінального, реак-

тивна складова струму стане дорівнювати нулю, тобто струм статора дорівнюватиме активній складовій I_{1a} . Цьому режиму і буде відповідати точка мінімуму кривих струмів $I_1(I_3)$ і максимально можливе значення $\cos\varphi=1$.

При подальшому збільшенні струму збудження (перезбудження СД) знову з'явиться реактивна складова струму I'_{1p} , але уже випереджуюча напругу мережі на 90° . Струм статора I'_1 також буде випереджати напругу мережі, і СД буде працювати з випереджувачим $\cos\varphi$, віддаючи реактивну енергію в мережу живлення.

На рис. 4.17 показані залежності при двох рівнях навантаження — номінальному (P_n) і при неробочому ході (P_x). Зона характеристик праворуч від штрих-пунктирної лінії $\cos\varphi=1$ відповідає роботі СД із випереджувачим $\cos\varphi$, а ліворуч — з відстаючим. З рисунка видно, що з ростом потужності навантаження зона генерації реактивної потужності випереджувачого $\cos\varphi$ зміщується у бік великих струмів збудження. Таким чином, якщо СД працює зі змінним навантаженням на валу, то для повного використання його компенсаційних властивостей, потрібна відповідна зміна його струму збудження, що призводить до збільшення габаритної потужності двигуна.

Відношення повної (габаритної) потужності до активної:

$$\frac{S}{P} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{P} = \sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}.$$

Нехай необхідна реактивна випереджальна потужність складає 40% активної потужності, тобто $Q/P=0,4$. Розрахунок за формулою показує, що при цьому відношення S/P складе 1,08, тобто генерування зазначеної реактивної потужності вимагає збільшення габаритної потужності лише на 8%.

Споживана реактивна потужність СД:

$$Q = 3 U_\phi I_1 \sin\varphi.$$

Зручніший вираз можна одержати з векторних діаграм. Для полюсного двигуна:

$$Q = 3U_\phi \left[\frac{E \cos\theta}{X_d} - U_\phi \left(\frac{\cos^2\theta}{X_d} + \frac{\sin^2\theta}{X_q} \right) \right],$$

де $X_d i X_q$ – індуктивні опори СД відповідно по поздовжній і поперечній осях.

Для неполюсного двигуна $X_d = X_q = X_1$;

$$Q = \frac{3U_\phi}{X_1} (E \cos \theta - U_\phi).$$

Наведені вирази підтверджують, що зі збільшенням струму збудження і тим самим ЕРС зростає генерована двигуном реактивна потужність, значення якої при цьому залежить від навантаження, що визначає кут навантаження θ .

7. ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ

Поряд зі зростанням кількісних показників енергозабезпеченості промисловості, транспорту, сільського господарства, побуту усе більшу роль починають відігравати показники якості енергії, що пов'язано з раціональним узгодженням параметрів енергії на різних стадіях її перетворення. Значне місце в розв'язанні проблем, що виникають при цьому, приділяється акумуляторам енергії, що є важливою проміжною ланкою між системами генерування і системами розподілу та споживання енергії.

Для сучасної енергетики, як стаціонарної, так і автономної, важливого значення набувають інтенсивні форми розвитку, що висувають підвищені вимоги до якісних показників енергетичних установок. Зростає роль акумуляторів енергії, що забезпечують вирішення ряду проблем нагромадження, збереження, перетворення енергії, реалізацію оптимальних режимів роботи устаткування, живлення споживачів з нестандартними параметрами.

Акумулятори енергії знаходять усе ширше застосування в електроенергетичних системах, автономних енергетичних установках, транспортних системах, бортовому устаткуванні, технологічній апаратурі, електрофізичних стендах тощо.

У загальному вигляді під акумулятором енергії розуміється пристрій, що дозволяє накопичувати в ньому енергію якого-небудь виду протягом періоду заряду t_z , а потім передавати істотну частину цієї енергії навантаженню упродовж періоду розряду t_p . Взаємозв'язок параметрів акумулятора при заряді і розряді визна-

чається законом збереження енергії, що виражається співвідношенням:

$$P_3 t_3 \eta = P_p t_p,$$

де P_3 і P_p — середні значення потужностей зарядного і розрядного процесів; η — ККД акумулятора.

Значення t_3 і t_p , а також енергетичні показники при заряді і розряді можуть значно відрізнятися. Відповідно, існує кілька основних напрямків використання акумуляторів.

По-перше, їх основна роль може зводитися до акумуляування надлишкової енергії при відключенні значної частини споживачів і наступному використанню накопиченої енергії в періоди інтенсивного енергоспоживання. При цьому значення t_3 і t_p мають приблизно однаковий порядок, а показники енергії при заряді і розряді досить близькі. Прикладом такого акумулятора є гідроакумуляуюча електростанція. У нічні години надлишкова електроенергія направляється в гідротурбінні агрегати, що працюють у зворотному режимі: генератор переходить у режим електродвигуна, який обертає турбіну, що виконує роль насоса, що подає воду у верхній резервуар. Відбувається нагромадження потенційної енергії води, піднятої на необхідну висоту. У денні години вода з верхнього резервуара природним шляхом опускається в нижній резервуар, забезпечуючи обертання турбоагрегатів у генераторному режимі для одержання додаткової електроенергії.

Такого ж роду пристрої, але з меншими діапазонами робочих циклів, можуть використовуватися для поліпшення показників енергосистем при короткочасному вмиканні споживачів підвищеної потужності (компенсація пікових навантажень) і поліпшувати стійкість роботи енергоустановок і систем. Акумулятори в цьому випадку є демпферними елементами між генеруючими установками і споживачами, що працюють у нестационарних режимах.

По-друге, основним призначенням акумуляторів може бути перетворення енергії різного виду. Так, наприклад, енергоустановки космічного літального апарата з паливними елементами на стадії нагромадження енергії перетворюють електричну енергію від сонячних батарей у хімічну за рахунок розкладання робочої речовини (наприклад, електролізу води) на відповідні компоненти (кисень і водень), а на стадії виводу енергії реакція взаємодії цих же компонентів створює електричну енергію.

По-третє, акумулятори у відповідних режимах забезпечують перетворення необхідних показників визначеного виду енергії. Якщо, наприклад, у акумуляторі будь-якого типу $t_p \ll t_z$, то $P_p \gg P_z$, тобто потужність, що віддається акумулятором навантаженню, у багато разів перевищує потужність, споживану ним при заряді від первинного джерела енергії, тобто акумулятор виконує функцію трансформатора потужності. Ємнісний акумулятор дозволяє виводити в навантаження струми, у багато разів більші, ніж при його заряді, а в індуктивному акумуляторі за рахунок ЕРС самоіндукції кола можна одержати напруги, що значно перевищують напруги джерела живлення. Акумулятори механічної енергії допускають взаємне перетворення кінетичної і потенціальної форм енергії тощо. Акумулятори можуть працювати в режимі тривалого збереження енергії (хімічні, механічні компресійні тощо).

По-четверте, доведення параметрів енергії до необхідних величин з метою наступного використання. Так, наприклад, вітрова установка в години слабого вітру виробляє електричну енергію, яку безпосередньо не можна використовувати силовими електричними споживачами. Заряджаючи акумулятори цією енергією, одержуємо джерело енергії необхідного рівня.

Таким чином, акумулятори енергії утворюють великий клас енергетичних пристроїв із широким спектром функціональних можливостей. Кожний з типів акумуляторів енергії має свої специфічні особливості. Так, наприклад, для паливних елементів і акумуляторних батарей головні проблеми пов'язані з забезпеченням збалансованих фізико-хімічних реакцій, вирішенням технологічних і матеріалознавчих задач. Індуктивні акумулятори повинні розглядатися з урахуванням динаміки електромагнітних процесів, оптимізації геометрії котушок, стійкості характеристик, реалізації раціональних теплових режимів. При описі ємнісних акумуляторів, що використовують стандартні конденсатори, акценти зміщуються на проблеми оптимальних режимів заряду конденсаторів і раціонального узгодження характеристик елементів систем з акумуляторами в динамічних режимах. Особливе значення при вивченні акумуляторів магнітної й електричної енергії набувають питання комутації кіл при великих струмах і напругах, що, як правило, не може забезпечуватися стандартною апаратурою і вимагає розробки спеціальних швидкодіючих замикачів і розмикачів. Аналіз механічних акумуляторів припускає пріоритетну роль питань динаміки механічних процесів і міцнісних задач, а при описі електро-механічних і електродинамічних акумуляторів не менш важливе

значення повинно приділятися електричним перехідним процесам і тепловим режимам.

Особливе значення для акумуляторів усіх типів має узгодження їх характеристик з параметрами первинних джерел енергії, навантажувальних елементів, комутаційної апаратури. Усі типи акумуляторів енергії мають свої характерні енергетичні показники, режими роботи, особливості конструктивного і схематичного виконання, що визначають раціональні зони їх використання.

У табл. 4.2 наведені типові значення питомої енергії, тобто енергії, що приходить на одиницю маси, і часу виводу енергії для розглянутих типів акумуляторів. Порядок їх розташування у табл.4.2 визначається, по-перше, видом активної зони, у якій накопичується енергія, і, по-друге, часом виводу енергії, що зменшується (швидкодією).

Таблиця 4.2

Акумулятор		Питома енергія, Дж/м ³	Час виведення енергії, с
Зі статичною активною зоною	Хімічний	10І – 10і	1 – 10 ⁵
	Індуктивний	1 – 10	10 ⁻³ – 10
	Смнісний	0,1 – 0,5	10 ⁻⁶ – 10 ⁻²
З динамічною активною зоною	Механічний	10 – 10і	1 – 10і
	Електромеханічний	1 – 10	10 ⁻² – 10
	Електродинамічний	0,05 – 1	10 ⁻³ – 10 ⁻²

Електрохімічні акумулятори (ЕХА) запасують і віддають енергію в результаті хімічної реакції. До ЕХА належать електрохімічні генератори (ЕХГ), тобто два чи більше паливних елементи ПЕ в комплексі із системами, що забезпечують їх функціонування; хімічні акумуляторні батареї АБ, тобто хімічні джерела струму, що складаються з двох чи більше акумуляторів, сполучених між собою електрично для спільного виробництва електроенергії.

Паливним елементом називається хімічне джерело струму, в якому активні речовини надходять до електродів ззовні; це прямий перетворювач хімічної енергії в електричну, у якому реакція електрохімічного окислювання протікає без витрати речовини електродів, а також без витрати електроліту. Вихідними реагентами служать компоненти хімічного палива – пальне й окислювач, що володіють запасом енергії хімічних зв'язків, яка перетворюється в енергію постійного електричного струму. У оберненому (регенераторному) режимі роботи ПЕ підведена до нього

електроенергія перетворюється в хімічну енергію компонентів палива.

Елемент АБ, чи електрохімічний акумулятор — хімічне джерело струму, що складається з одного гальванічного елемента, або акумулятор електричної енергії, у якому відбувається її перетворення в хімічну енергію. Також здійснюється зворотнє перетворення хімічної енергії в електричну при зміні складу речовини електродів і витрати електроліту в процесі струмоутворюючої реакції.

Як і для інших видів акумуляторів енергії, для ЕХА основними режимами роботи є заряд і розряд. Проміжним служить режим збереження енергії, тривалість якого може бути набагато більшою, ніж в інших типів акумуляторів (порядку 10^4 год). Стосовно до ЕХА як зарядну потужність P_z приймають середню потужність, витрачену на одержання пального й окислювача, наприклад водню і кисню при електролізі води. Значення P_z для АБ визначається середньою потужністю, споживаною батареєю від джерела електроживлення за час заряду. Для ЕХА, виконаних на основі ПЕ чи акумуляторних елементів, розрядною потужністю P_p є електрична потужність, що надходить від акумулятора в коло навантаження.

В індуктивних акумуляторах енергія акумулюється у вигляді енергії магнітного поля. Акумулятор — це котушка з індуктивністю L , по якій тече струм, i завдяки чому створюється магнітне поле з енергією:

$$W = 0,5 L i^2.$$

Крім індуктивної котушки енергоустановка містить джерело живлення ЗП (зарядний пристрій), комутатори К1 і К2, навантаження Н, (рис. 4.19а).

При підмиканні акумулятора до живлення за допомогою К1 здійснюється режим заряду протягом часу t_z (мал.4.19б). При замиканні К2 і розмиканні К1 струм тече через навантаження, й основна частина накопиченої енергії передається навантаженню упродовж часу розряду t_p . Звичайно реалізуються режими з $t_p < t_z$, завдяки чому потужність акумулятора при розряді істотно більша потужності зарядного циклу. Тому індуктивний акумулятор може використовуватися як трансформатор потужності — він забезпечує короткочасне живлення потужних споживачів електроенергії при розряді після відносно тривалого періоду запасання енергії при заряді.

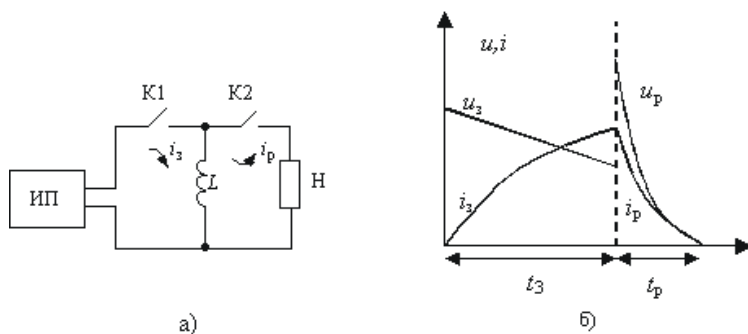


Рис. 4.19

Особливість індуктивного акумулятора полягає також у тому, що в момент замикання K2 і розмикання K1 він може розглядатися як джерело струму, оскільки при перемиканні акумулятора на активне навантаження струм у ньому повинен зберігатися безперервним незалежно від структури зовнішнього кола. Якщо опір кола навантаження великий, то завдяки сталості струму в момент перемикання напруга на затискачах акумулятора досягає великих значень, що багаторазово перевищують напругу джерела живлення, яке заряджає акумулятор. Таким чином, за допомогою індуктивних акумуляторів можна забезпечити перетворення електричної енергії з істотним перевищенням потужності і напруги.

Ємнісні акумулятори запасують енергію електричного поля. Режим роботи акумулятора пояснюється функціональною схемою (рис. 4.20).

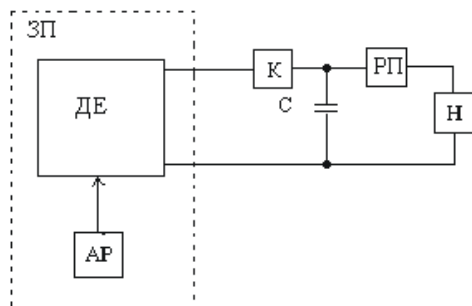


Рис. 4.20

Джерело електроживлення ДЕ з автоматичним регулятором АР складають зарядний пристрій ЗП ємнісного акумулятора. Джерело живлення може бути як постійного, так і змінного струму у вигляді електромашинних генераторів чи статичних пристроїв. При замиканні комутатора зарядного кола К і розімкненому комутаторі розрядного пристрою РП заряджається батарея конденсаторів С, у якій за час зарядного процесу t_3 накопичується енергія:

$$W_n = 0,5u_c^2(t_3)C.$$

Від джерела живлення за час t_3 споживається середня потужність $P_{срз} = W_n t_3^{-1}$. Розряд відбувається за час $t_p \ll t_3$ при замиканні розрядного пристрою. У навантаженні виділяється розрядна потужність $P_p = W_n t_p^{-1} \eta_p$, де η_p — ККД розрядного контуру. При $t_p \ll t_3$ на інтервалі часу розряду відбувається багаторазове збільшення потужності відносно середньої, споживаної від джерела живлення на інтервалі часу зарядного процесу t_3 . Замикання розрядного пристрою може відбуватися як при розімкненому, так і при замкненому комутаторі.

Індуктивні і ємнісні акумулятори енергії застосовуються в силових схемах статичних перетворювачів електропривода як пристрої штучної комутації вентилів, різних фільтрів тощо.

Механічний акумулятор призначений для запасаання і збереження кінетичної чи потенційної енергії з наступною віддачею її для здійснення корисної роботи. Характерними режимами роботи акумулятора є заряд (накопичення) і розряд (віддача енергії). Збереження енергії є проміжним режимом. У зарядному режимі до акумулятора підводиться механічна енергія від зовнішнього джерела. При розряді основна частина накопиченої акумулятором енергії передається споживачу. Деяка частина накопиченої енергії витрачається на компенсацію втрат, що мають місце в розрядному режимі й у режимах збереження.

Оскільки в ряді акумуляючих установок час заряду може набагато перевищувати час розряду ($t_p \ll t_3$), то можливе істотне перевищення середньорозрядної потужності P_p над середньою потужністю P_3 заряду. Таким чином, у механічних акумуляторах накопичувати енергію можливо за допомогою відносно малопотужних джерел. Основні різновиди механічних акумуляторів підрозділяються на статичні, динамічні і комбіновані пристрої.

Статичні акумулятори накопичують потенційну енергію за допомогою пружної зміни форми або об'єму робочого тіла, чи при його переміщенні проти напрямку сили ваги в гравітаційному полі. Тверде, рідке чи газоподібне робоче тіло цих акумуляторів має статичний стан у режимі збереження енергії, а заряд і розряд супроводжуються рухом робочого тіла.

Динамічні акумулятори нагромаджують кінетичну енергію переважно в обертових масах твердих тіл. До динамічного можна віднести також накопичувальні пристрої прискорювачів заряджених елементарних часток, у яких запасається кінетична енергія електронів чи протонів, що циклічно рухаються по замкнених траєкторіях.

Комбіновані акумулятори запасують одночасно кінетичну і потенціальну енергію. Прикладом комбінованого акумулятора служить маховик з високоміцного волокнистого матеріалу, що має відносно малий модуль пружності. При обертанні маховика в ньому поряд з кінетичною енергією запасається потенційна енергія пружної деформації. Під час витягу накопиченої енергії з такого акумулятора досягається використання обох її видів.

За рівнем питомої накопиченої енергії, що приходить на одиницю маси чи об'єму акумулюючого елемента, динамічні інерційні акумулятори істотно перевершують індуктивні і ємнісні.

Для інерційних механічних акумуляторів характерні короточасні розрядні режими. Відбір енергії від акумулятора супроводжується зменшенням кутової швидкості маховика до припустимого рівня. В окремих випадках гальмування може відбуватися аж до повної зупинки маховика. Можливі «ударні» розряди, що відрізняються одноразовим чи циклічним відбором акумульованої енергії, причому внаслідок великого кінетичного моменту і малого часу розряду зниження кутової швидкості ротора відносно невелике, хоча потужність, що віддається, може досягати високих значень. Під впливом моменту, що крутить, у валі виникають небезпечні дотичні напруження, частина кінетичної енергії ротора переходить у потенційну енергію пружних деформацій крутіння вала. Для подолання цих явищ в окремих конструкціях передбачаються пружні чи фрикційні муфти.

Статичні механічні акумулятори зберігають запасену енергію, знаходячись у нерухомому стані. Носіями потенційної енергії в них служать пружно деформовані тверді тіла чи стиснуті гази, що знаходяться під надлишковим тиском, а також маси, підняті на деяку висоту відносно земної поверхні. Типовими прикладами статич-

них носіїв є: розтягнуті чи стиснуті пружини, гуми; акумулятори і пневмоакумулятори; ударні пристрої копрів для забивання паль, що використовують енергію мас у піднятому стані; водоймища гідроакумулюючих електростанцій, баки водонапірних установок.

Електромеханічний акумулятор служить для запасаання і збереження механічної енергії з наступним її перетворенням і віддачею у формі електричної енергії для подальшого використання. Запасається, як правило, кінетична енергія обертального руху маховика, що при заряді акумулятора розкручується за допомогою механічного чи електричного привода: пружини; турбіни, що використовує енергію стиснутих газів, згоряння палива чи порохового заряду тощо; електричної машини, що працює в режимі двигуна. В електромеханічних пристроях може бути відсутнім маховик як самостійний елемент, з'єднаний за допомогою твердого чи пружного зв'язку з електричною машиною. У цьому випадку інерційним накопичувальним елементом служить ротор електричної машини. Ротор може бути конструктивно сполучений з додатковим маховиком. При розряді акумулятора механічна енергія перетворюється в електричну за допомогою електричної машини, що працює в режимі генератора. Як генератор застосовується та ж машина, що служить електродвигуном для розгону маховика, чи інша, також установлена на валу акумулятора.

Для електричного акумулятора справедливе рівняння енергетичного балансу, відповідно до якого акумулятор можна розглядати як підсилювач електричної потужності. При заряджанні акумулятора двигун споживає відносно невелику усереднену потужність P_3 від джерела живлення протягом часу t_3 . У режимі розряду генератор віддає усереднену потужність $P_p > P_3$ за час $t_p < t_3$.

Залежно від виду і призначення акумулятора до його складу входять різні електричні машини. Відповідно до загальної класифікації можна виділити акумулятори на основі машин змінного струму (синхронних чи асинхронних) і машин постійного струму.

Структурна схема електроенергетичної установки з електромеханічним акумулятором зображена на рис. 4.21.

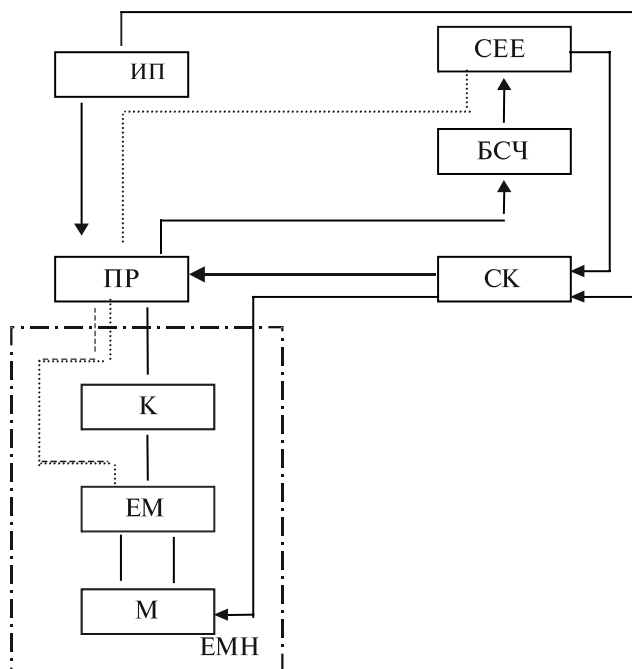


Рис. 4.21

У режимі заряду електрична машина працює як двигун, одержуючи електроенергію від джерела живлення (постійний чи змінний струм), і розкручує маховик М. Після досягнення ротором агрегату заданої швидкості акумулятор може працювати в режимі збереження енергії. За сигналом системи керування СК спрацьовує перемикач режимів ПР, і акумулятор переводиться в розрядний режим, у якому електрична машина працює як генератор і живить споживач електроенергії СЧБ. Наявність оборотного комутатора К характерна для акумулятора з двигуном постійного струму. У машинах класичної конструкції комутатор виконаний як електро механічний щітково-колекторний вузол електричної машини, а в безконтактних вентильних — це керований напівпровідниковий перетворювач. Останній діє як інвертор при роботі електричної машини в режимі двигуна і як випрямляч при генераторному режимі роботи. Коли як двигун генератора використовується машина змінного струму, то комутатор може бути відсутнім

(цьому випадку відповідає штрихова лінія зв'язку на схемі). Для такого варіанта характерний блок стабілізації частоти БСЧ, що виключається в установках постійного струму.

Установки з електромеханічними акумуляторами можуть містити деякі додаткові елементи, наприклад, пускові пристрої електродвигунів, блоки для стабілізації і регулювання частоти і напруги генераторів. У цілому вибір структури акумулятора і типу машини визначається технічними вимогами до установки щодо номінальних параметрів, швидкодії, показників якості електроенергії, особливостей зарядно-розрядних режимів, масогабаритних обмежень, ресурсу, апаратурної надійності.

Для мобільної техніки практично єдиною альтернативою застосуванню електрохімічних акумуляторів може вважатися інерційне акумулювання енергії. Гіросистеми мають кращі технологічні показники (питому потужність, термін служби, надійність), а також екологічно більш чисті, ніж свинцево-кислотні акумулятори.

Несприятливі економічні показники гіросистем обумовлені малим поширенням супермаховиків, оскільки не відпрацьовані технології серійного їх виробництва.

Відомі приклади застосування гіросистем. Наприклад, для роботи у вибухонебезпечних умовах вугільних шахт Дружковський завод у Донбасі випускає гіролокомотиви. У країні розроблений і випробуваний кар'єрний електровоз-самоскид вантажопідйомністю 25 т і повною масою 55 т. Для забезпечення вільного маневрування, коли застосування повітряної контактної мережі неприпустиме, він оснащений гіроприводом, що забезпечує автономний пробіг до 400 м.

За рубежом (США) випробуваний легковий автомобіль, обладнаний тільки гіродвигуном із пробігом до 55 км. Останні моделі гіротролейбусів мають пробіг до 15 км.

Електродинамічні акумулятори в загальному випадку містять акумулятор кінетичної енергії й електромеханічний генератор. Вони поєднують у собі переваги механічних акумуляторів енергії, зв'язані з високою густиною енергії, що запасасться, при малих втратах на її утримання, і електромеханічних генераторів, що відрізняються високим ККД процесу перетворення механічної енергії в електричну. Конструктивно ці два вузли сполучають в одне ціле, і тоді рухлива частина пристрою є акумулятором кінетичної енергії і ротором електромеханічного генератора. Створені на базі ударних генераторів синхронного типу електродинамічні акумулятори одержали розвиток завдяки здатності генерувати пе-

ріодичний односпрямований струм без додаткового перетворення електроенергії.

Електромеханічні акумулятори поєднують у собі різні типи однофазних і багатофазних генераторів, дія яких заснована на циклічному стисканні (компресії) магнітного потоку рухомими один відносно одного замкнутими контурами зі струмом. У них перетворення механічної енергії ротора в електромагнітну енергію стиснутого поля відбувається одночасно з виділенням частини енергії в навантаженні.

Розрізняють електродинамічні акумулятори лінійного й обертального руху (рис. 4.22), хоча немає принципових обмежень на форму траєкторії руху ротора.

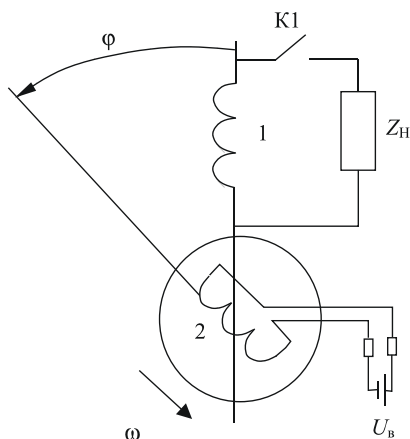


Рис. 4.22

У типовому випадку пристрій містить дві однофазні обмотки, розташовані на статорі 1 і роторі 2 відповідно. Магнітний потік збудження створюється обмоткою статора чи ротора, або обома обмотками одночасно. Кожна з обмоток має потокозчеплення:

$$\Psi_{1,2} = w_{1,2} \Phi_{1,2},$$

де: w_1 та w_2 — ефективне число витків в обмотці статора і ротора;
 $\Phi_{1,2}$ — магнітний потік, зчеплений з обмоткою статора і ротора.

У процесі взаємного переміщення обмоток у загальному випадку змінюються величина і напрямки потоків $\Phi_{1,2}$. Відповідно до закону Ленца це призведе до виникнення чи зміни вже протікаючих в обмотках струмів i_1 та i_2 за умови замикання обмоток на навантаження чи накоротко. Струми прагнуть зберегти потокозчеплення обмоток незмінним. Протікання струму по навантаженню пов'язане з виділенням у ньому енергії.

5 ■ ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО ТИПУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1. АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Вибір раціонального типу електропривода для конкретної технологічної установки містить у собі також:

- аналіз умов експлуатації і розробку технічних вимог до електропривода;
- аналіз перспективних варіантів систем електроприводів, їх техніко-економічне порівняння і вибір раціонального типу привода.

Під умовами експлуатації розуміють сукупність зовнішніх факторів, що істотно впливають на працездатність електропривода. До них належать температура навколишнього середовища, вологість, тиск, вібрації, удари тощо. Усю сукупність зовнішніх впливів ДСТ 16.962-71 поділяє на механічні і кліматичні.

У результаті механічних впливів можливі руйнування окремих елементів пристроїв і неякісних пайок, порушення контактів реле і перемикачів, замикання проводів з ушкодженою ізоляцією, самовідгвинчування болтів, гайок тощо.

Апаратура, що використовується в нормальних умовах, піддається механічним перевантаженням в основному при транспортуванні. Апаратура, встановлена на рухомих об'єктах, сприймає вплив вібрацій, ударів і лінійних прискорень, у результаті чого можлива зміна параметрів пристрою і навіть його руйнування. Найбільш небезпечним є механічний резонанс, що, як правило, веде до руйнування конструкції. Відношення сили механічного впливу F до сили ваги G пристрою називають перевантаженням:

$$\rho = \frac{F}{G}.$$

Відповідно до ДСТ 16963-71 види деяких механічних факторів і їх значень представлені в табл.5.1.

Таблиця 5.1

Фактори впливу		Діапазон частот, Гц	Максимальне прискорення, м/с²	Тривалість удару, мс
Вібраційні навантаження		1–5000 100–5000	4,91 – 392 (0,5g – 40g) 392 (40g)	– –
Ударні навантаження	багаторазові	–	147 – 1471 (15g – 150g)	2 – 15
	поодинокі	–	39,2 – 29400 (4g – 3000g)	0,2 – 60

Електричні виводи повинні витримувати без механічних ушкоджень вплив розтягуючої сили, спрямованої уздовж осі, відповідно до даних, що наведені в табл.5.2.

Таблиця 5.2

Переріз виводів, кв.мм	Допустима сила розтягу, Н
0,1 – 0,2	4,9
0,2 – 0,5	9,8
0,5 – 2,0	19,81

Різьбові виводи повинні витримувати без механічних ушкоджень вплив моменту, що крутить, (табл.5.3).

Таблиця 5.3

Діаметр різьби, мм	Допустимий момент, Н·м
M2	0,14
M3	0,49
M4	1,17
M5	1,76

Апаратура, що нормально працює при впливі вібрації, називається вібростійкою. Апаратура, що витримує тривалі вібрації і прискорення, а також дію ударів без зміни параметрів, називається віброміцною і удароміцною. Щоб зберегти апаратуру від руйнівної дії механічних перевантажень застосовують амортизатори або забезпечують працездатність пристрою за рахунок його конструкції. Апаратуру на механічні перевантаження перевіряють на спеціальних випробувальних стендах.

ДСТ 15150-69 встановлює кліматичні виконання виробів і категорії кліматичних виконань залежно від місць розташування при експлуатації.

Умовні позначення кліматичних виконань виробів містять у собі три категорії — вироби, призначені для макрокліматичних районів для експлуатації на суші, ріках і озерах; для макрокліматичних районів з морським кліматом; для всіх макрокліматичних районів на суші і на морі. Наприклад, перша категорія має наступні позначення:

- з помірним кліматом, П;
- з помірним і холодним кліматом, ПХК тощо.

Умовні позначення категорій розміщення виробів містять у собі 5 категорій, наприклад:

- для експлуатації на відкритому повітрі, 1;
- для експлуатації в закритих приміщеннях із природною вентиляцією, 3 тощо.

ДСТ 15150-69 регламентує також значення температури і відносної вологості повітря.

Виконання елементів систем електропривода за ступенем захисту від впливу навколишнього середовища визначаються ДСТ 14254-80, згідно з яким літерно-цифрове позначення складається з латинських літер IP і двох цифр. Перша цифра (0–6) визначає ступінь захисту персоналу від дотику до струмопровідних та обертових частин, що знаходяться всередині виробу, а також ступінь захисту самого виробу від потрапляння в нього твердих сторонніх тіл. Друга цифра (0 – 8) визначає ступінь захисту від проникнення вологи всередину виробу.

ДСТ 24682-81 регламентує загальні технічні вимоги в частині стійкості до впливу спеціальних середовищ (категорії хімічно стійкого виконання, пожежонебезпечних і вибухонебезпечних зон). Наприклад, до експлуатації в пожежонебезпечних зонах будь-якого класу допускаються електротехнічні вироби на напруги до 10 кВ за умови, що їх оболонки мають ступінь захисту не нижче IP44.

Як приклад нижче наведені вимоги до конструкції сучасного регульованого електропривода змінного струму, обумовлені специфікою параметрів і характеристик IGBT модулів:

- основний модуль усіх виконань електропривода є навісною шафою однобічного обслуговування блокової конструкції. Охолодження силових напівпровідникових модулів — повітряне примусове;
- застосовано спільний охолоджувач для розміщення усіх вентильних модулів перетворювача, що є несучим елементом шафи. Геометрія охолоджувача повинна бути оптимізована за результатами теплофізичних розрахунків і досліджень;

- мінімізовано індуктивність монтажу між модулями інвертора і конденсаторами силового фільтра за рахунок їх взаємного розташування і сполучення плоскопаралельними (з ізоляцією) шинами або пластинами мінімально можливих розмірів;

- драйвери розміщені в безпосередній близькості від IGBT модулів і сполучені з ними провідниками мінімально можливої довжини;

- монтаж силових кіл і кіл керування виконаний роздільними джгутами, розташованими переважно у взаємноперпендикулярних площинах, для зниження рівня перешкод у мікроконтролерній системі керування.

З урахуванням вказаних обставин технічного й економічного характеру очевидно, що парк електричних машин на підприємствах складають раніше ремонтвані агрегати. Характеристики таких машин істотно відрізняються від тих, котрі щойно випущені заводом-виготовлювачем. Зміна характеристик відбувається через те, що в результаті експлуатації, передремонтної підготовки й у ході ремонту змінюються характеристики конструкційних матеріалів і насамперед – електротехнічної сталі. Цей процес супроводжується зниженням індукції, при якій спостерігається насичення сталі, і зростанням струму намагнічування. Характерно, що струм намагнічування стає несинусоїдальним, тому що містить крім першої, ще непарні гармоніки 5;7;11;... порядків.

Варто мати на увазі, що реальні втрати в сталі двигуна істотно залежать від рівня напруги живлення. Збільшення напруги веде до зростання споживаної потужності на намагнічування, що призводить до збільшення втрат, що нагрівають ізоляцію. При цьому припустиме навантаження на асинхронний привод повинно бути зменшене.

Аналіз показує, що рівень напруги живлення є одним з найважливіших параметрів, що визначає працездатність устаткування. Крім цього, на надійність електроустаткування впливають будь-які форми неякісної енергії з боку джерела живлення, а також споживаною електричною машиною енергії. З цієї причини необхідно зупинитися на проблемі комплексної поточної діагностики і моніторингу устаткування. Рішення проблеми лежить в таких напрямках:

- введення в практику періодичного діагностичного обстеження працюючого устаткування з метою виявлення несправностей, що розвиваються, до формування аварійної ситуації;

- застосування діагностичних спостережень з метою безперервного контролю найбільш відповідальних вузлів агрегату;

- створення і застосування мобільного діагностичного устаткування з метою визначення реальних параметрів електричних машин і залишкового ресурсу працездатності в конкретних виробничих умовах. Виконання нового виду робіт доцільно поєднувати з капітальними ремонтами технологічних агрегатів.

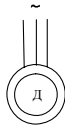
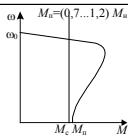
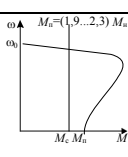
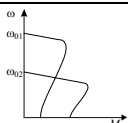
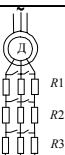
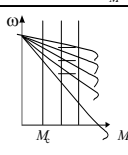
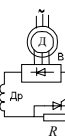
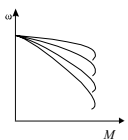
Вимоги до електропривода розробляються на основі вимог технологічного процесу з урахуванням умов експлуатації, при цьому необхідно:

- визначити можливість використання нерегульованих систем привода, як найбільш простих, надійних, економічних і дешевих;
- розглянути можливість створення безредукторного привода, а в перспективі — об'єднання виконавчого органу з приводним двигуном у єдину конструкцію;
- визначити режими пуску, гальмування і зупинки (плавний, ступінчастий чи прямий пуск, вид гальмівного режиму тощо);
- у випадку вимоги технологічного регулювання швидкості варто з'ясувати необхідний діапазон регулювання;
- за навантажувальною діаграмою визначити тип теплового режиму експлуатації (S1...S8);
- встановити доцільність використання багатодвигунового привода для механізмів з неповним навантаженням і механізмів, у яких з часом продуктивність чи потужність машини буде зростати;
- сформулювати вимоги до системи захистів і блокувань;
- установити термін служби електропривода, вимоги до надійності роботи устаткування, необхідність резервування тощо.

2. ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

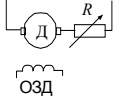
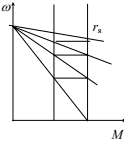
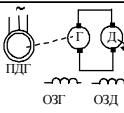
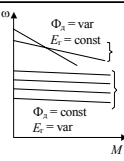
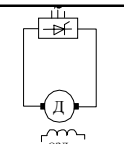
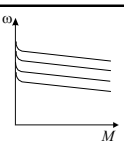
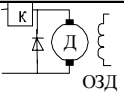
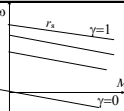
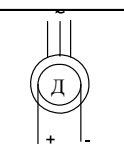
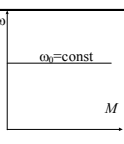
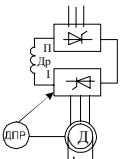
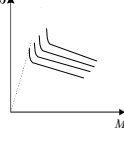
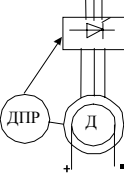
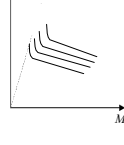
У табл. 5.4 представлені основні характеристики систем електропривода. Остаточне рішення про вибір системи електропривода приймається на основі їх техніко-економічного порівняння. При цьому, у випадку, якщо приведені витрати різних варіантів приблизно однакові, перевагу варто віддавати варіанту з меншими капітальними витратами, тобто з меншим первісним вкладенням засобів.

Таблиця 5.4

Тип системи електропривода		Характеристики систем електропривода		Механічна характеристика $\omega=f(M)$	ККД	Коефіцієнт потужності	Пуск		діапазон регулювання швидкості	економічне регулювання швидкості
№	Найменування системи електроприводу	Позначення					ступінчастий	плавний		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором загального призначення	АД			0,8...0,9	0,8...0,9	—	—	1:1	—
2	Асинхронний двигун з коротко замкненим ротором з підвищеним пусковим моментом	АД			0,75...0,87	0,75...0,87	—	—	1:1	—
3	Двошвидкісний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором	АД			0,75...0,85	0,75...0,85	+	—	2:1	+
4	Асинхронний двигун з реостатом у колі фазного ротора	АД			0,8...0,9	0,8...0,9	+	—	4:1	—
5	Асинхронний двигун з тиристорним комутатором у колі фазного ротора	АД			0,8...0,9	0,8...0,9	+	+	10:1	—

Продовження табл. 5.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	Вентильно-машинний каскад	ВМК			0,4...0,9	0,4...0,9	+	+	10:1	+
7	Асинхронно-вентильний каскад	АВК			0,4...0,9	0,4...0,9	+	+	10:1	+
8	Частотно-регулюваний привод (перетворювач частоти - асинхронний (синхронний) двигун)	ПЧ-АД (ПЧ-СД)			0,7...0,9	0,5...0,9	+	+	10:1	+
					0,7...0,9	≥ 1,0	+	+	10:1	+
9	Частотно-регулюваний привод (перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком-АД)	НПЧ-АД			0,7...0,9	0,5...0,9	+	+	10:1	+
10	Система векторного управління	ВУ			0,7...0,9	0,5...0,9	+	+	10:1	+

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	Двигун постійного струму з реостатним регулюванням швидкості	ДПС			0,5...0,9	—	+	+	4:1	+
12	Генератор-двигун постійного струму	Г-Д			0,4...0,75	—	+	+	10:1	+
13	Тристорний перетворювач-двигун постійного струму	ТП-Д			0,4...0,9	0,5...0,9	+	+	10:1	+
14	Імпульсне регулювання двигуна постійного струму	ДПС			0,4...0,9	? 1,0	+	+	10:1	+
15	Синхронний двигун	СД			0,8...0,95	1	—	—	1:1	—
16	Вентильний двигун з ланкою постійного струму	ВД			0,7...0,95	1	+	+	10:1	+
17	Вентильний двигун із перетворювачем з безпосереднім зв'язком	ВД			0,7...0,95	0,5...0,9	+	+	10:1	+

На практиці часто виникає завдання модернізації наявного устаткування. Вона виникає в тих випадках, коли:

- вийшло з ладу застаріле обладнання, що більше не випускається, не задовольняє технологічним вимогам;
- мають місце часті аварії механізмів;
- планується реконструкція всього технологічного ланцюжка, у який входить дана установка.

При проведенні робіт з модернізації діючого устаткування необхідне дотримання таких вимог:

- максимальне використання діючого устаткування;
- мінімальні зміни в діючій схемі.

Типи основних регульованих електроприводів з короткою їх характеристикою наведені в табл. 5.5. МПЖ-машина подвійного живлення.

Таблиця 5.5

	Тип електропривода									
	ВП (ТП-Д)	Частотно-регульований електропривод (ПЧ-АД)			ВД		АВК	МПЖ	Фазове керування (ТРН-АД)	Привод з електромагніт- ними муфтами
1. Тип двигуна	ДПС	АД з короткозамкненим ротором			СД		АД з фазним ротором		АД з короткозамкненим ротором	
2. Щітки, чи колектор контактні кіляця	+	—			— (+)		+		—	—
3. Керування з боку	якоря	статора			статора		статора		статора	—
4. Регульований параметр	напруга	частота і напруга			напруга		напруга		напруга	напруга зб. ел маг. муфти
5. Структура перетворювача	КВ	КВ-ІН	КВ-ІС	ІІМ	КВ-ІС	БПЧ	І	БПЧ		
6. Режим роботи:										
руховий	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
гальмівний	+	+	—	+	+	+	—	—	+	—
чотири квадранти	+	+	—	+	+	+	—	—	—	—
часті пуски	+	+	+	+	+	+	—	—	—	—
часті реверси	+	—	—	—	+	+	—	—	—	—
7. Можливий діапазон робочих частот	Зі збільшенням частоти зменшується гранична потужність	Верхня межа обмежена механічною міцністю машини			Верхня межа обмежена механічною міцністю машини. Усталена робота при низьких швидкостях.		0–50 Гц	30–70 Гц	40–50 Гц	0–50 Гц

Системи регулювання швидкості на змінному струмі можна класифікувати за енергетичним принципом:

- системи з регулюванням кількості підведеної до електродвигуна енергії;
- системи з втратою енергії ковзання;
- системи з рекуперацією енергії ковзання.

До першого класу відносять системи з регулюванням поданої на статор напруги і регулюванням частоти. Ці методи порівняно прості й економічні. Їх недолік — перетворення всієї підведеної енергії. Крім того, пристрої плавного регулювання високої напруги у великому діапазоні є самим складним і дорогим типом перетворювача.

До систем другого класу належать реостатна система, привод з поворотним статором, з асинхронною муфтою ковзання, гідромуфтою тощо. Багато з цих систем важко реалізувати при великих потужностях, усі вони низькоекономічні.

До систем третього класу — з рекуперацією енергії ковзання належать різні каскадні схеми ввімкнення асинхронного двигуна, при яких у роторне коло асинхронного електродвигуна подається регульована напруга. З них зараз застосовується асинхронно-вентильний каскад (АВК). Основним недоліком цієї системи є істотне зниження коефіцієнта потужності при збільшенні глибини регулювання. Також при роботі двигуна за схемою АВК максимальна швидкість асинхронного електродвигуна менша номінальної, що зменшує, наприклад, зону економічної роботи вентилятора.

Відомі машини подвійного живлення. Основна перевага активних каскадів у можливості регулювання швидкості вгору і вниз від синхронного значення, що дозволяє знизити потужність перетворювальних пристроїв. Основний недолік — неповний діапазон регулювання.

При виборі типу електропривода перевагу варто віддавати системам електропривода змінного струму з таких причин:

- електроенергія виробляється і передається споживачам в основному на змінному струмі;
- електродвигуни постійного струму по габаритах, масі і вартості в 1,5...2,5 рази перевищують двигуни змінного струму тієї ж потужності і частоти обертання;
- надійність ДПС через наявність колекторно-щіткового вузла і майже повної відсутності закритого виконання значно нижче, ніж у двигунів змінного струму;
- момент інерції ДПС у 1,5...1,7 рази вище, ніж у АД з короткозамкненим ротором, що обумовлює більш високу швидкодію систем привода змінного струму;
- енергетичні показники і регульовальні властивості систем змінного струму з тиристорними перетворювачами не гірше, ніж у приводів постійного струму. Наприклад, перевантажувальна

здатність у приводів із синхронними двигунами вище, ніж у двигуна постійного струму;

- вартість статичних перетворювачів для ДПС приблизно дорівнює вартості перетворювачів для приводів змінного струму, а система генератор-двигун постійного струму за масою і вартістю в 1,5...2,0 рази перевищує масу і вартість перетворювачів тієї ж потужності, причому ККД системи Г-Д на 10...20% нижче.

Використання приводів постійного струму може бути виправдано тільки для:

- випадків, коли в місці установки привода вже є регульоване джерело постійного струму;

- випадків, коли відсутні системи привода, що випускаються серійно. Наприклад, альтернативою безредукторного тихохідного привода постійного струму є вентильний двигун із синхронною машиною, що, однак, серійно в достатньому діапазоні потужностей не випускається;

- машин і механізмів, де за умовами експлуатації (через підвищений рівень вібрації) електроприводи зі статичними перетворювачами надійністю поступаються системі Г-Д (наприклад, екскаватори);

- у підйомно-транспортних машинах з потенційним характером навантаження, коли з метою економії енергії двигун тривалий час працює в режимі рекуперативного гальмування (кранові механізми, підйомні лебідки тощо).

З табл. 5.5 видно, що вентильний двигун і частотно-регульований асинхронний привод є найбільш універсальними типами регульованого привода з найкращими технічними даними. Так, за режимами роботи ВД не поступається приводу постійного струму, вигідно відрізняючись від нього практично необмеженим діапазоном потужностей і частот обертання, більшою надійністю і простотою.

Використання ВД відкриває нові можливості в галузі пуску надпотужних синхронних машин (Київська ГАЕС має 5 синхронних генераторів потужністю по 45 МВт кожний, пуск здійснюється за схемою ВД) і створення низько і високошвидкісних безредукторних регульованих приводів великої потужності.

Основною складовою частиною ВД є синхронна машина, що має більш високі енергетичні показники, ніж інші машини. Вона характеризується високим ККД, можливістю роботи з випереджаючим коефіцієнтом потужності, високою надійністю внаслідок більшої величини повітряного зазору, пропорційною залежністю статичної переважувальної здатності від напруги живлення.

Надійність звичайного СД вище надійності будь-якої іншої машини, а за вартістю вона поступається тільки асинхронній з короткозамкненим ротором. Безконтактність СД забезпечується як звичайним способом (за допомогою безщіткових систем збудження з обертовими випрямлячами), так і новими (застосуванням постійних магнітів на роторі, а також застосуванням кігтеподібного ротора й обмотки збудження на статорі тощо).

У перетворювачах ВД не ставиться особливих вимог до динамічних властивостей тиристорів. Використання машинної комутації (за рахунок ЕРС синхронного двигуна) дозволяє підвищити граничну потужність комутатора, його надійність, спростити силові кола і систему керування, знизити вартість.

Частотний перетворювач у комплекті з асинхронним електродвигуном може застосовуватися для заміни приводів постійного струму. У цьому випадку значно знижуються експлуатаційні витрати, підвищується перевантажувальна здатність, а відповідно і надійність системи. Застосування регульованого частотного електропривода дозволяє зберігати енергію шляхом усунення непродуктивних витрат енергії в дросельних заслінках, механічних муфтах та інших регулюючих пристроях. При цьому економія прямо пропорційна непродуктивним витратам і може досягати 80%.

Частотно-регульований привод дозволяє заощаджувати на непродуктивних витратах енергії, крім того він має функцію енергозбереження. Ця функція дозволяє при виконанні тієї ж роботи заощаджувати ще від 5 до 30% електроенергії шляхом підтримання електродвигуна в режимі оптимального ККД. У режимі енергозбереження перетворювач автоматично відстежує споживання струму, розраховує навантаження і знижує вихідну напругу. Таким чином, знижуються втрати в обмотках двигуна і збільшується його ККД.

Режим енергозбереження добре підходить для розв'язання таких задач:

- керування швидкістю обертання вентиляторів і насосів;
- керування устаткуванням зі змінним навантаженням;
- керування машинами, що значну частину часу працюють з малим навантаженням.

Одним з головних об'єктів роботи з енергозбереження є системи водо і теплопостачання. Основні напрямки економії:

- скорочення витрати електроенергії на роботу устаткування;
- скорочення невиробничих витрат теплоти і води.

Технічний і економічний ефект при використанні частотно-регульованого електропривода досягається:

- за рахунок введення зворотного зв'язку по регульованому параметрі (тиску, температурі, частоті обертання, зусиллю). При цьому привод дозволяє автоматично регулювати потужність, споживану електродвигуном залежно від заданої користувачем програми;

- за рахунок використання режимів «м'якого» пуску і зупинки двигуна;

- за рахунок зниження витрат на установку додаткової регулюючої арматури;

- за рахунок скорочення експлуатаційних витрат.

Частотно-регульований електропривод, у порівнянні з іншими традиційними приводами, має багато переваг. Ці переваги стають особливо помітними в застосуваннях, коли об'єм, швидкість, тиск тощо. регулюються, а устаткування оснащене двигунами з постійною швидкістю. Переваги частотно-регульованого електропривода такі:

- заощадження енергії;
- краща керованість (великий діапазон регулювання, висока швидкодія, великі прискорення і гальмування, можливість керування кількома приводами, добра сумісність, плавний пуск);

- поліпшена якість продукції;
- підвищена якість устаткування;
- зменшення витрат на обслуговування;
- можливість удосконалення;
- менший час простоїв;
- пристосованість до агресивного середовища.

Однак є також і недоліки:

- високі капітальні витрати;
- значні величини гармонік струму і напруги;
- необхідність застосування спеціальної фільтрації й ізолюючих трансформаторів;

- велика складність;
- необхідність додаткового простору для електроніки;
- скорочується термін служби двигуна.

Отже, є кілька пунктів, що сприяють чи заважають застосуванню традиційного або частотно-регульованого електропривода. Якщо переважають недоліки традиційного привода, вони можуть бути зменшені шляхом заміни його частотно-регульованим електродвигуном. Однак недоліки можуть з'явитися і після установки частотно-регульованого електропривода, хоча раніш були непомітні. Характерніші з них вібрація і шум.

Вібрація може бути серйозною проблемою. Частотно-регульований електропривод збуджує небажані вібрації на різних частотах. Для їх усунення встановлюються фільтри на вході і виході перетворювача.

Шум може мати місце з двох джерел. Шум у традиційному приводі звичайно створюють механічні частини, зокрема муфти, редуктори тощо. Ці шуми зменшуються при застосуванні частотно-регульованого електропривода. Вентилятори, що працюють на малих швидкостях з частотно-регульованим електроприводом протягом тривалих періодів часу, створюють мало шуму. Однак електроніка частотно-регульованого електропривода також може бути гучною. Таким чином, якщо традиційний привод був безшумним, рівень шуму може збільшитися після переустаткування.

Прийнято залишати старий пускач і вимикач після установки частотно-регульованого електропривода. Схема звичайно складається так, щоб електроніку можна було замінити у випадку виникнення проблем. Хоча це записують у число переваг частотно-регульованого електропривода, але в більшому ступені це є наслідком переустаткування.

Небажані явища можуть виникати й у традиційному, і в частотно-керованому приводі. Однак з ними набагато легше справлятися за допомогою частотно-регульованого електропривода.

Сфера застосування частотно-регульованого електропривода:

- насоси холодної і гарячої води (від підкачувань до магістральних);
- компресори, повітродувки, вентилятори систем охолодження, тягодуттєві вентилятори котлів;
- рольганги, конвеєри, транспортери й інші транспортувальні пристрої;
- дробильне устаткування, мішалки, екструдери;
- центрифуги різних типів;
- лінії виробництва металевого листа, плівки, картону, паперу й інших стрічкових матеріалів;
- бурове устаткування (насосне, підйомне);
- пристрої відкачки нафти зі свердловин (станки-качалки, заглиблювальні насоси тощо);
- електрорушійні та допоміжні механізми річкового і морського транспорту;
- крани (від тельферів до мостових);
- металообробні верстати, пилки, преси й інше технологічне устаткування;

- високообертові (до 90000 об/хв) механізми: шпинделі шліфувальних верстатів тощо.

3. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Знання типу механічних характеристик необхідно для оцінки можливостей частотно-регульованого електропривода в заощадженні енергії. З механічної характеристики залежність потужності може бути розрахована за допомогою відомої формули. Також можна оцінити необхідну енергію, використовуючи вираз

$$W = \frac{1}{\eta_d} M \omega T_{\text{роботи}}.$$

Для попередньої оцінки ККД варто приймати рівним 80-85%, якщо задіяні двигуни потужністю менше ніж 7,5 кВт, і 90-95% для частотно-регульованого електропривода і двигунів потужністю 75 кВт і більше.

Розглянемо два приклади, щоб показати економію енергії, отриману при застосуванні частотно-регульованого електропривода. Перший приклад — підйомний кран, де традиційне керування замінене частотно-регульованим електроприводом. В другому прикладі відцентровий насос із дросельним керуванням буде замінений насосом з регульованою швидкістю за допомогою установки частотно — регульованого електропривода.

На рис. 5.1 показане заощадження енергії в підйомному крані. Це навантаження з постійним моментом (рис. 3.3). У випадку традиційного керування (рис. 1.13, 1.17 чи 1.16), електрична потужність відносно стала у всьому діапазоні зміни швидкості. Різницю між електричною і механічною потужністю складають втрати. Ці втрати можуть виявлятися в редукторі, дія якого заснована на терті, гідравлічній муфті (індукційній муфті чи в реостаті). Навпаки, необхідна електрична потужність при використанні частотно-регульованого електропривода практично пропорційна потужності на валу двигуна. Різниця між двома кривими потужності, помножена на час на кожному рівні швидкості і підсумована за

увесь час роботи — це і буде значення енергії, що може бути зекономлена.

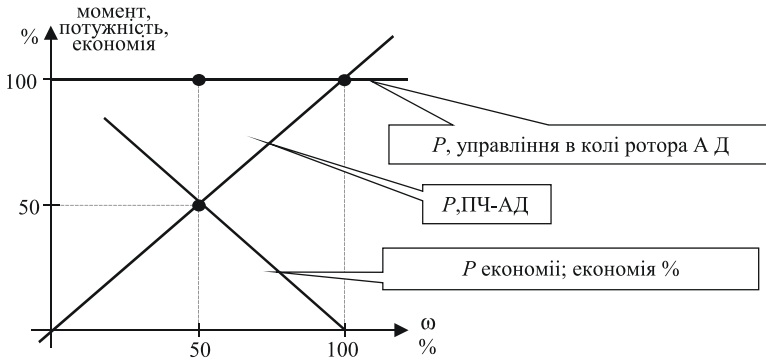


Рис. 5.1

Криві на рис. 5.2 зв'язані з відцентровим насосом, звичайно використовуваним при зрошенні й у інших випадках, коли необхідне перекачування води. На малюнку представлено кілька кривих. Це залежності моменту від кількості рідини, що перекачується, (y м³ за хвилину) для насоса, що працює при постійній швидкості і регулюванні потоку за допомогою дроселя (рис. 1.14), та необхідної потужності насоса. Також показана необхідна потужність при регульованій швидкості й цілком відкритому дроселі (рис. 3.5). Сумарна економія енергії є різницею між необхідною потужністю при постійній швидкості і при її регулюванні. Ця різниця показана у відсотках від енергії, що використовують при регулюванні за допомогою дроселя.

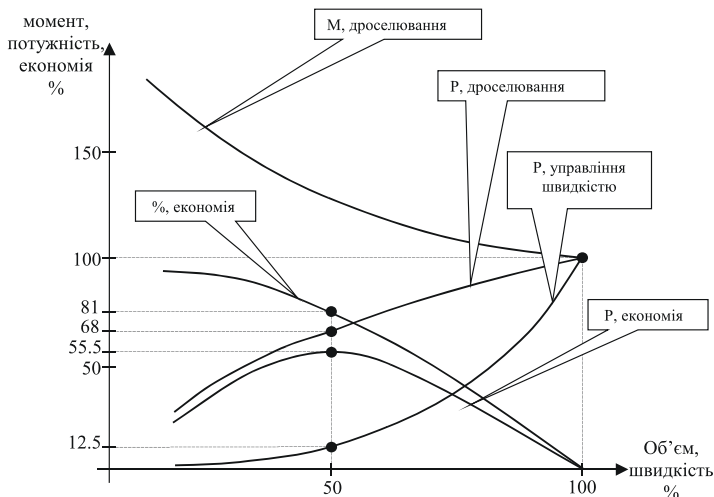


Рис. 5.2

На рис. 5.3 представлені механічні характеристики вентилятора з використанням регулювання дроселюванням. Показано залежність внутрішнього тиску вентилятора від об'єму повітря, що перекачується, при постійній швидкості. Також показані дві характеристики системи, на яку працює даний вентилятор. Одна — характеристика для відкритого дроселя, коли вентилятор подає максимально можливу кількість повітря, а друга показує системну криву, коли дросель закритий, що відповідає 70% поданого повітря. Робочі точки — точки перетину системних кривих з характеристикою насоса. Відмітимо, що хоч обсяг переданого повітря менше, коли дросель закритий, тиск усередині вентилятора збільшується. Також показана необхідна потужність привода. Вона досить стала в розглянутому діапазоні.

При використанні частотно-регульованого електропривода, дросель завжди цілком відкритий (якщо він узагалі є). Існує тільки одна системна крива, але дві характеристики вентилятора, як показано на рис.5.4. Робочі точки — перетин системної кривої з характеристиками вентилятора. У цьому випадку, однак, внутрішній тиск вентилятора низький при малій швидкості, тому що повітря може безперешкодно переміщуватися. Отже, необхідна споживана потужність вентилятора зменшується зі зменшенням потоку повітря. Залежність потужності від об'єму повітря також показана на малюнку. Рисунок 5.5 показує необхідну потужність вентилятора, що використовує три технології регулювання потоку повітря, а саме: дроселюван-

ням, положенням лопаток турбіни і з використанням частотно-регульованого електропривода. Видно, що привод з регулюванням положення лопаток вимагає менших витрат потужності, ніж при регулюванні дроселюванням. Однак він усе-таки споживає більшу потужність, ніж привод з частотним регулюванням швидкості.

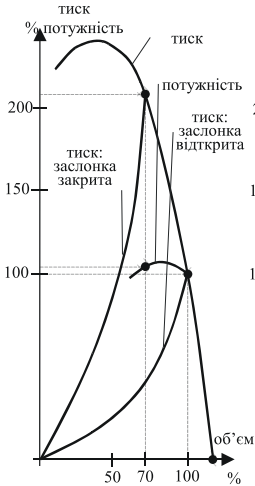


Рис. 5.3



Рис. 5.4

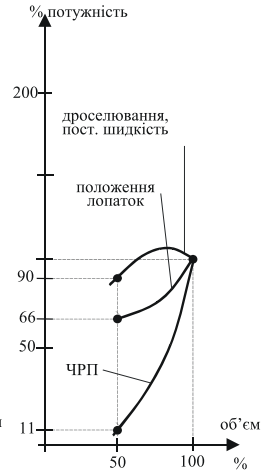
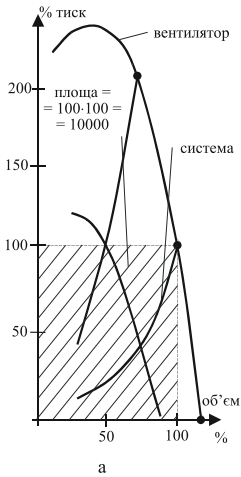
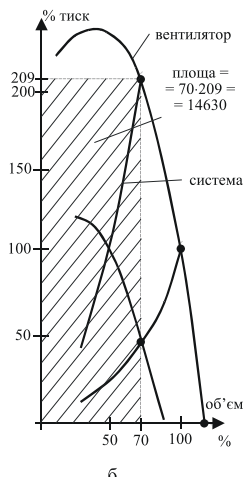


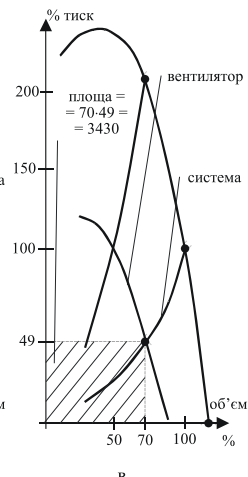
Рис. 5.5



а



б



в

Рис. 5.6

На рис.5.6 представлені механічні характеристики вентилятора за умови, що: а – дросель відкритий, 100% об'єм; б – дросель закритий, 70% об'єм; в – дросель відкритий, 70% швидкості, 70% об'єм. Тиск, помножений на об'єм потоку, – це потужність. Таким чином, площа заштрихованої зони на малюнку пропорційна необхідній потужності. Але це правильно тільки почасти. Особливістю роботи турбомеханізмів є те, що споживана потужність вентилятора може значно змінюватись залежно від його робочої точки. Табл. 5.6 ілюструє це положення.

Таблиця 5.6

Рисунок	5.6 а	5.6 б	5.6 в
Площа	10000	14630	3430
Відповідна потужність	100	102	32
Площа у. о.	1,0	1,46	0,34
Потужність у. о.	1,0	1,02	0,32
ККД вентилятора	56	79	56

Зауваження: у. о. дані стосовно варіанта 5.6а.

З табл. 5.6 можна визначити, що тоді як у випадку 5.6а зв'язок між площею тиск-об'єм і дійсна потужність досить ясна, то це зовсім не так у випадку 5.6б. Якщо, у випадку 5.6б, площа буде використана як основа для вибору приводного двигуна, то потужність буде завищена. Причина невідповідності лежить у значній зміні ККД вентилятора.

Наведені вище приклади показують принципи, на яких засноване енергозбереження при використанні частотно-регульованого електропривода. Важливо знати, що кожен привод вимагає окремого аналізу, і що заощадження енергії за допомогою частотно-регульованого електропривода зростає, коли привод працює на низьких швидкостях великі періоди часу.

4. ПРИКЛАДИ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

4.1. Керування потоком рідини і газу

Асинхронні двигуни звичайно використовуються для привода вентиляторів і насосів для транспортування потоків рідин і газів.

Вони знаходять застосування у всіх галузях комерційної і промислової діяльності. Прикладами можуть служити вентилятори, піддувала, вентилятори парових котлів, насоси для перекачування грузлих рідин і вентилятори підживлювачів котлів. Звичайно ці двигуни працюють при будь-яких навантаженнях з постійною швидкістю. Керування потоком здійснюється з використанням механічних дроселів, клапанів і вентилів.

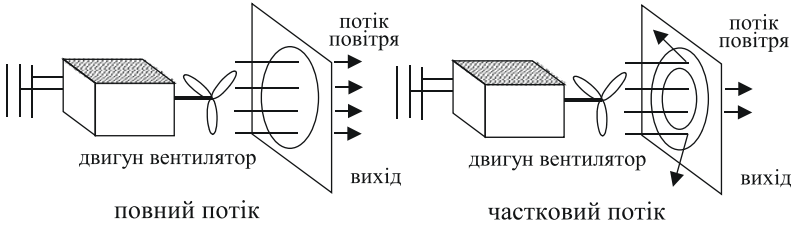


Рис. 5.7

Типовий приклад показаний на рис. 5.7, де двигун змінного струму приводить вентилятор охолодження. Двигун розрахований за критерієм максимального навантаження; повітря, що перекачується, задовольняє максимальним технологічним вимогам. Якщо процес вимагає меншої кількості повітря, його потік зменшують підстроюванням вихідних дроселів, що обмежують потік. Однак, при обмеженні потоку повітря, споживана потужність двигуна залишається близькою до її номінального значення, хоча потік за вимогами технології набагато менше максимального його значення. Таким чином, при регулюванні потоку механічні дроселі і клапани розсіюють енергію, споживану двигуном, який обертається з постійною швидкістю.

Важливою характеристикою вентиляторів і насосів є те, що потік пропорційний швидкості вентилятора чи насоса. Ця властивість була застосована розробниками в минулому для конструювання ремінних чи редукторних передач, які використовувались для двигунів з постійною швидкістю обертання. Тепер потік може бути змінений регулюванням швидкості обертання двигуна чи насоса вентилятора, як показано на рис. 5.8.

При низьких швидкостях, зі зменшеним потоком, споживання потужності є лише малою часткою номінальної потужності (рис. 3.5). Енергія, що розсіюється традиційними елементами регулювання при досягненні малих потоків, може бути зекономлена змен-

шенням швидкості обертання вентилятора чи насоса. З використанням частотно-регульованого привода швидкість обертання вентилятора чи насоса може регулюватися для задоволення вимог процесу без розсіювання енергії (рис. 5.2).

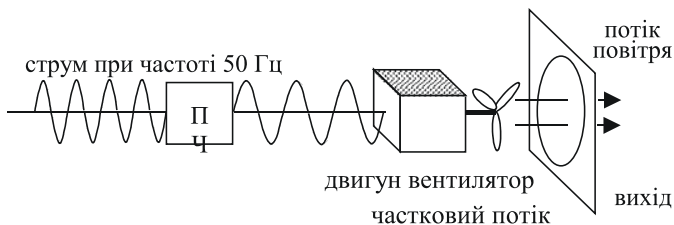


Рис. 5.8

Якщо вентилятор або насос працює на малій швидкості більшу частину робочого циклу, то застосування частотно-регульованого привода дасть відчутний економічний ефект.

Деякі турбомеханізми, що працюють при навантаженні близькому до номінального можуть використовуватися разом з частотно-регульованим приводом, хоча це і не призведе до істотного заощадження енергії. Такі режими, як керований розгін і гальмування, особливо коли мова йде про вентилятори і насоси з великою інерцією, роблять частотне керування виправданим.

Необхідно також взяти до уваги обмеження моменту і швидкості, що повинні бути покладені при використанні частотно-регульованого привода в турбомеханізмах. При навантаженнях з великою інерцією, потрібно подбати про обмеження роботи на кривій моменту-швидкості подалі від області зриву моменту. Також повинна бути прийнята до уваги сумісність окремих видів частотно-регульованого привода для підтримки роботи на низьких швидкостях (нижче 20% від максимальної швидкості).

4.2. Переміщення матеріалів

Машини для переміщення матеріалів використовуються для навантажувальних, розвантажувальних і транспортних операцій. Прикладами можуть служити конвеєри, підйомні крани, автотранспортери, елеватори. Ці установки вимагають спеціальних приводів для забезпечення вимог безпеки, захищеності і портатив-

ності. Часто використовуються двигуни постійного струму для задоволення вимог регулювання швидкості і великого моменту.

На рис. 5.9 показаний електрозавантажувач. Тут через вимоги великого моменту при низькій швидкості використовується привод постійного струму із серієсною обмоткою. У такого двигуна м'яка статична характеристика, чим забезпечується максимальний момент при великих навантаженнях. Швидкість може регулюватися за допомогою реостата, встановленого послідовно з двигуном. Цей двигун для мобільності добре поєднати з електричними батареями, від яких він живиться. Однак існує кілька недоліків, включаючи технічне обслуговування колектора, чутливість до вологи і бруду, низьку ефективність. Колекторний двигун постійного струму вимагає частих оглядів і технічного обслуговування, що збільшує час простоїв.

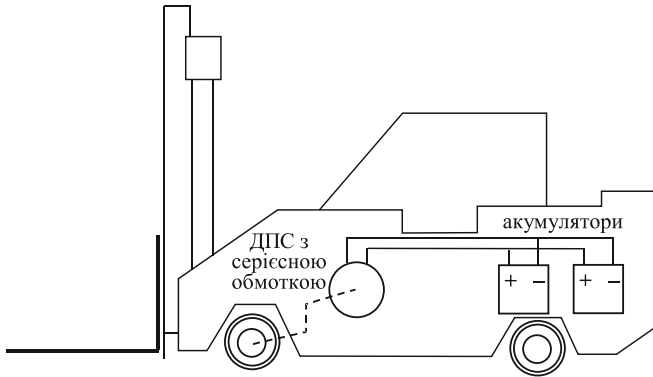


Рис. 5.9

Асинхронні двигуни можуть широко використовуватися в механізмах для переміщення матеріалів. При цьому не потрібно техобслуговування колектора, немає електромеханічних контакторів і комутаційних апаратів, розсіювання енергії в додаткових опорах. Асинхронний двигун для мобільного устаткування також має меншу вагу в порівнянні з ДПС тієї ж потужності. Момент може регулюватися одночасною зміною напруги і частоти для точного керування швидкістю.

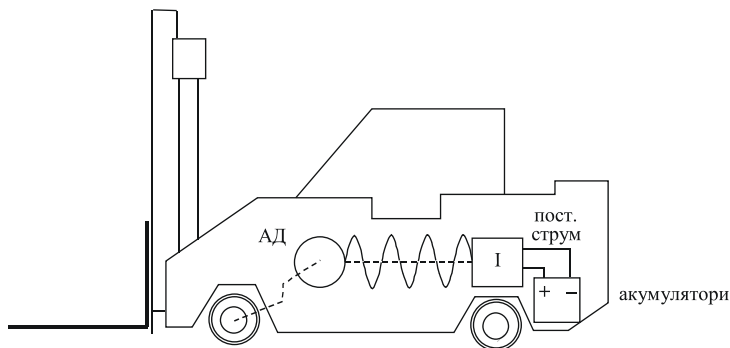


Рис. 5.10

Розглянемо застосування частотно-регульованого електропривода на прикладі електрозавантажувача (рис. 5.10). Тут ми бачимо, що інвертор (І) використовується для перетворення енергії постійного струму батарей в енергію змінного струму змінної напруги і змінної частоти. На трифазному виході інвертора момент поступово збільшується під час пуску АД і залишається постійним для розгону. Коли досягається необхідна потужність, частота на виході інвертора збільшується для досягнення високої швидкості.

Швидкість двигуна може бути швидко знижена за допомогою гальмування в генераторному режимі, що є важливою характеристикою для приводів мобільного устаткування. Рекуперативне гальмування в частотно-регульованому приводі досягається зменшенням частоти інвертора до такого ступеня, щоб відповідна їй синхронна швидкість була нижче, ніж швидкість двигуна. Це змушує двигун працювати в генераторному режимі і перетворювати механічну енергію руху в електричну, яка подається назад на батареї. Частотно-регульований привод із широтно-імпульсною модуляцією найкраще відповідає цьому призначенню, тому що в ньому немає лінії змінного струму, по якій би відбувалася віддача реактивної енергії в мережу. Крім того, немає додаткових інверторних, випрямних кіл і скільки-небудь значної фільтрації. Це робить конструкцію частотно-регульованого привода гранично простою.

Використання частотно-регульованого привода в перевезенні матеріалів дає в результаті поліпшене виконання при підвищеній ефективності. При цьому зменшуються витрати на обслуговування і, завдяки рекуперації, потребуються менші батареї для мобільних установок у порівнянні з приводом постійного струму.

4.3. Керування часом затримки в хімічних процесах

Керування часом затримки є необхідним елементом у хімічних процесах. Час затримки обумовлює досягнення визначеного ступеня реакції, відстою, подрібнення тощо. Процес може регулюватися контролюванням вхідних значень, класифікатором вихідних значень чи їх комбінацією. У промисловості це такі процеси: мінералізація, кристалізація, фільтрація, змішування, операції з відходами. У цих процесах традиційно використовуються двигуни з постійною швидкістю. Загальноприйнято, що ці застосування вимагають низькошвидкісних операцій, тому тут використовуються редуктори чи пасові передачі, що знижують швидкість.

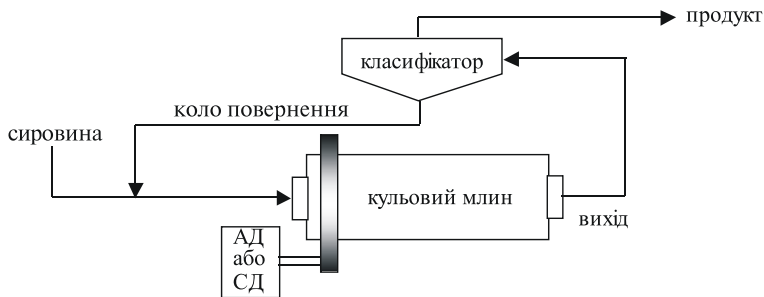


Рис. 5.11

На рис. 5.11 показано кульовий млин із традиційним приводом, що виконує операцію помелу на цементному заводі. Двигун змінного струму приводить млин за допомогою фіксованого комплексу передач. Ступінь подрібнення є функцією швидкості обертання млина і ступеня подрібненості подаваного на вхід матеріалу. У даному випадку процес регулюється колом повернення шляхом класифікації виходу млина і повернення неопрацьованого матеріалу в млин для повторної обробки. Втрати енергії є функцією частки виходу, що повинна бути повернута.

Використання частотно-регульованого привода в даному випадку дозволяє керувати процесом регулювання часу подрібнення матеріалу шляхом зміни швидкості обертання двигуна, а не швидкості подачі матеріалу. Енергія зберігається за рахунок зменшення повторної циркуляції матеріалу.

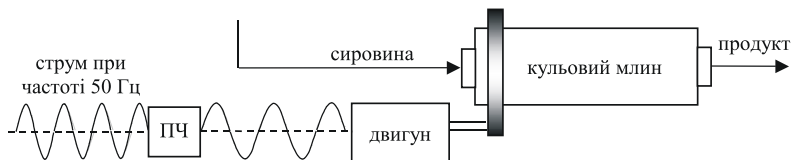


Рис. 5.12

У кульовому млині на рис. 5.12 необхідний ступінь подрібнення може бути досягнутий застосуванням частотно-регульованого привода. Система, що складається з низькошвидкісного синхронного двигуна і перетворювача частоти, є найбільш придатною комбінацією. Такі системи частотно-регульованого привода використовуються у великих цементних кульових млинах. Синхронні двигуни можуть бути сконструйовані для роботи на низьких швидкостях, навіть нижче 120 об/хв.

У цьому прикладі використання частотного керування виключає редуктори і реверс матеріалу. У результаті одержуємо більш високу ефективність, менші витрати і поліпшену якість продукції.

Спеціальний клас перетворювачів для низькошвидкісних частотно-регульованих приводів називається циклоконверторами. Вони кращі, коли максимальна необхідна швидкість є часткою номінальної швидкості великих синхронних двигунів. Циклоконвертори змінюють вхідні напругу і частоту без використання випрямляча й інвертора.

4.4 Модернізація верстатної обробки на виробництві

У деяких верстатах використовуються двигуни з постійною швидкістю обертання. Представниками такого устаткування можуть бути токарні та різальні верстати, різальні верстати, електропилки, стрічково-шліфувальні верстати. Процеси обробки вимагають визначеного діапазону робочих швидкостей у залежності від типу оброблюваного матеріалу. Регулювання швидкості здійснюється за допомогою пасової передачі чи редуктора.

Якщо потрібно більш точне керування швидкістю, може застосовуватися векторний метод. Цей метод дозволяє контролювати швидкість у межах $\pm 1\%$. При додаванні тахогенератора можливе збільшити точність до $\pm 0,1\%$.

На рис. 5.13 показаний токарний верстат із двигуном змінного струму з постійною швидкістю обертання. Регулювання швидкості здійснюється за допомогою ступінчатої пасової передачі. Переміщення приводного ремня з одного колеса на інше дозволяє змінювати передаточне число передач. Найбільше колесо на валу двигуна відповідає найменшому колесу на валу шпинделя і навпаки, для підтримки натягу ремня.

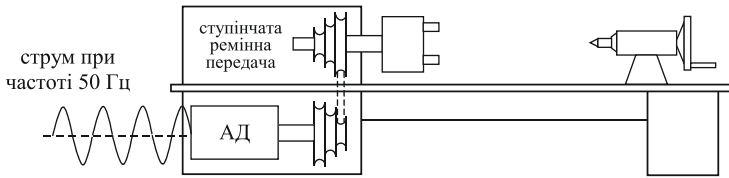


Рис. 5.13

Хоч такий пристрій є простим і енергетично ефективним, швидкості при цьому фіксовані й обмежені числом ступенів пасової передачі чи редуктора. Крім того, переключення ступенів швидкості обтяжливе і займає якийсь час. Звичайно це робиться з відключенням устаткування від мережі.

З метою збереження тривалого терміну служби інструментів і високої якості продукту, необхідно підтримувати постійну швидкість різця і постійний різальний момент. Це, у свою чергу, означає, що повинна підтримуватися постійна потужність, у той час як швидкість підстроюється під діаметр, що змінюється в ході процесу. У випадку фрезерування, швидкість повинна змінюватися відповідно до діаметра обробного інструмента і товщини шару, що знімається.

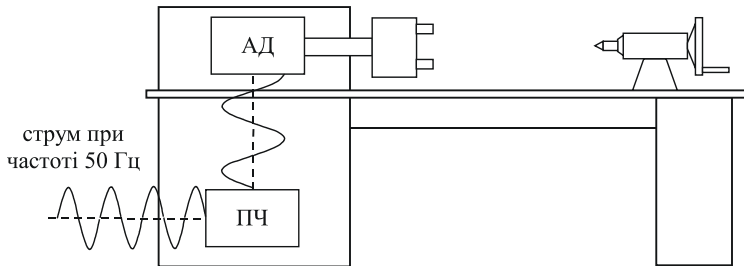


Рис. 5.14

Частотно-регульовані приводи добре пристосовані для використання у верстатній обробці, тому що вони дозволяють змінювати швидкість з великою точністю і на тривалий проміжок часу. Рис. 5.14 ілюструє цей приклад. Частотно-регульований привод нормально працює в діапазоні частот від 50 до 100 Гц. Це гарантує тривалий термін служби інструментів і кращу якість продукту на додачу до гнучкості, що досягається без застосування ременів чи редукторів. Більш того, частотно-регульовані приводи легко сумісні з програмованими контролерами, міні – і мікрокомп'ютерами для автоматизації і впровадження цифрових систем.

Слід відмітити, що використання частотно-регульованого привода нижче 50 Гц у випадках, що вимагають постійної потужності на низьких швидкостях, може бути технічно недоцільним. У цих випадках потужність частотно-регульованого привода зменшується нижче потужності двигуна, і результатом може бути недостатній момент.

4.5. Керування часом нагрівання для екструзії і молдингу

Процеси екструзії і молдингу знаходять застосування при обробці металів, пластику, у керамічній промисловості. Деякі традиційні пристрої для контролю теплоти/часу – міксери, збуджувачі і екструдери. Температура і час є критичними в цих процесах, тому що ці параметри підвищують якість матеріалу і підтримують необхідне ковзання між частинами, що рухаються. Двигуни змінного струму звичайно використовуються разом з яким-небудь типом електричного чи гідравлічного сполучення для керування швидкістю.

Гвинтовий екструдер пластику з традиційним керуванням показаний на рис. 5.15. Двигун змінного струму з постійною швидкістю обертає лопаті усередині труби машини для просування пластику через вихідний отвір. Індукційна муфта регулює швидкість обертання лопатів, щоб погодити зміни температури і складу пластику.

Зовнішня частина (статор) індукційної муфти подібна за конструкцією з обмоткою двигуна постійного струму. Внутрішня частина (ротор) схожа на ту ж частину асинхронного двигуна, однак, і статор, і ротор обертаються. Статор з'єднаний з вихідним

валом двигуна, а ротор сполучений із приводним валом екструдера. Коли до обмоток статора прикладають струм, створюється магнітне поле, що проникає в ротор і індукує в ньому струм. Цей струм забезпечує магнітне сполучення між двома валами. Ковзання між ними обернено пропорційне величині струму, прикладеного до котушок статора. При високому ступені екструзії по котушках протікає максимальний струм. При низьких рівнях струм зменшується для забезпечення ефективного ковзання.

Індукційна муфта має прийнятну ефективність поблизу номінальної швидкості. Вона стає неефективною при зменшенні швидкості, особливо у випадках роботи протягом тривалих періодів часу і при менше 90% номінальної швидкості. Втрати ковзання індукційної муфти розсіюються як теплова енергія. У випадках великих розмірів потрібно водяне охолодження. Ці муфти також вимагають обережного обслуговування через малі повітряні зазори між статором і ротором.

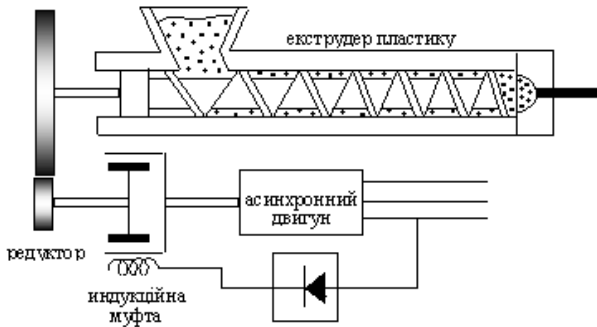


Рис. 5.15

Частотно-регульований привод забезпечує високу якість керування швидкістю без використання тахогенератора, застосовуваного для контролю швидкості індукційної муфти. Рівень екструзії підстроюється регулюванням швидкості обертання гвинта екструдера.

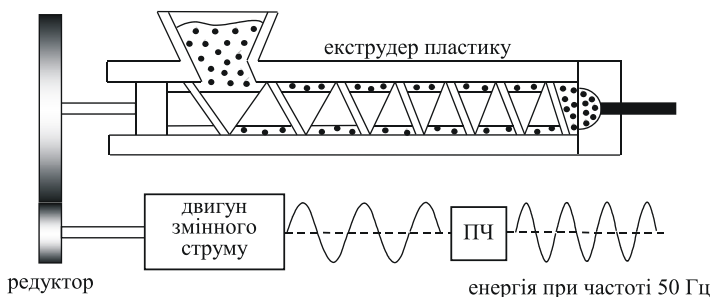


Рис. 5.16

На рис. 5.16 замість традиційного привода (двигун та індукційна муфта) застосовано частотне керування. Частотно-регульований привод керує швидкістю гвинта екструдера, відповідно до змін у температурі чи пластику рівнем продуктивності. З використанням частотного керування можна уникнути великих втрат ковзання в індукційній муфті, що призведе до більшої ефективності процесу. Також зникають вимоги до обслуговування індукційної муфти.

4.6. Регулювання швидкості для підвищення якості і точності при механічній обробці матеріалів

Якість і точність доволі важливі при опоряджувальних роботах у таких процесах, як заточування, полірування тощо. Звичайно використовуване для цієї мети устаткування — це круглі і безцентрові шліфувальники. Керування швидкістю необхідно для регулювання рівня заточування в сполученні зі швидкістю подачі. Звичайно використовуються шунтові двигуни постійного струму, тому що їхня швидкість регулюється і мало змінюється залежно від навантаження. Регулювання швидкості в такому двигуні здійснюється зміною струму збудження.

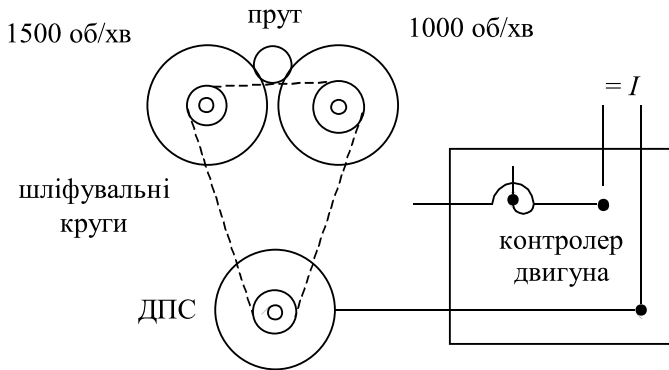


Рис. 5.17

На рис. 5.17 показаний круглий шліфувальник із традиційним приводом, що обробляє довгу сталеву заготовку. ДПС із шунтовою обмоткою приводить два точильних колеса з відповідною кожному з них швидкістю. Регулювання струму шунтової обмотки призводить до зміни швидкості. Струм поля збільшують для зменшення швидкості двигуна і зменшують для її збільшення. Недоліками такого привода є: обслуговування двигуна, особливо комутатора і щіток, висока первинна вартість контролера швидкості.

Необхідність підвищення якості і точності процесу механічної обробки матеріалів вимагає застосування частотно-регульованого привода, що підходить для оздоблювальних операцій, особливо коли здійснюється регулювання багатодвигунових приводів.

Для круглого шліфувальника на рис.5.18 точне регулювання швидкості може бути досягнуто використанням системи частотно-регульованого привода, що складається з окремих двигунів для кожного точильного колеса, які живляться від спільного перетворювача частоти. Двигуни можуть бути асинхронними двигунами з низьким ковзанням. Синхронні двигуни використовуються, коли точність є основною вимогою. Оскільки швидкість кожного точильного колеса пропорційна частоті напруги живлення двигуна, обоє точильних коліс можуть керуватися одночасно регулюванням частоти спільного перетворювача.

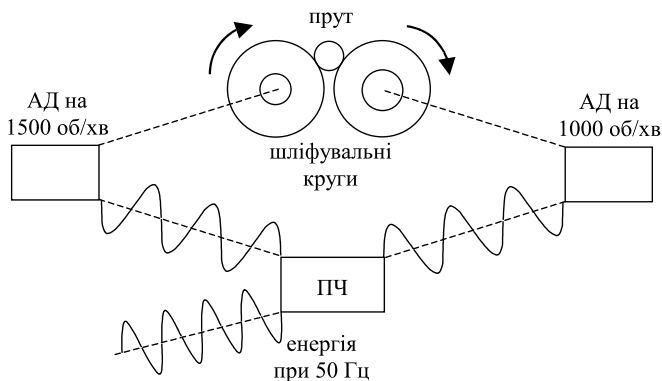


Рис. 5.18

Особливу увагу необхідно приділити двигунам, що живляться від спільного перетворювача. Важливо взяти до уваги відносні зміни швидкості при різних моментах навантаження на валах двигунів. У таких випадках необхідно використовувати асинхронні двигуни з низьким ковзанням. Нерівномірно розподілене навантаження може призвести до критичного значення моменту окремих двигунів. З цієї причини необхідний індивідуальний захист від перевантаження кожного двигуна.

4.7. Керування рівнями потоків мас

Потоки мас знаходять своє застосування в харчовій промисловості, вугільних дворах, хімічних заводах тощо. Застосовується таке устаткування, як фідери, гвинтові насоси, ковшові підйомники. Традиційно використовується двигун змінного струму з постійною швидкістю обертання з яким-небудь типом механічного регулятора швидкості. Власна швидкість механізму повинна бути такою, щоб наступний ступінь потоку, як наприклад конвеєр, одержувала безперервну і рівну кількість матеріалу.

Зворотним зв'язком для потоку в цій ситуації є в основному затримка часу. Маса вихідного конвеєра приблизно пропорційна масі потоку. Однак, існує великий усереднюючий ефект завдяки довжині конвеєра. Таким чином, вихідний конвеєр повинний бути якомога коротшим для зменшення усереднюючого ефекту. Дія

регулятора швидкості повинна бути уповільнена для узгодження похибок зворотного зв'язку і для недопущення поломки регулятора. За таких умов установка більш стабільна без якої-небудь компенсації ковзання. Така система має меншу тенденцію до «перекидання» через похибки в потоці мас.

На рис. 5.19 показаний фідер у вигляді обертової пластини з традиційним керуванням. Двигун змінного струму з постійною швидкістю обертання приводить фідер за допомогою пасової передачі з регульованим зазором барабанів. Переміщенням пари ближче — далі, одночасно переміщуючи іншу пару «далі — ближче», можна змінювати передаточне число. Передача розроблена з таким розрахунком, щоб підтримувати постійним натяг V-ремня. Конструкція з пасовою передачею такого типу, хоч і дозволяє регулювати швидкість безступінчато, вимагає істотного механічного обслуговування.

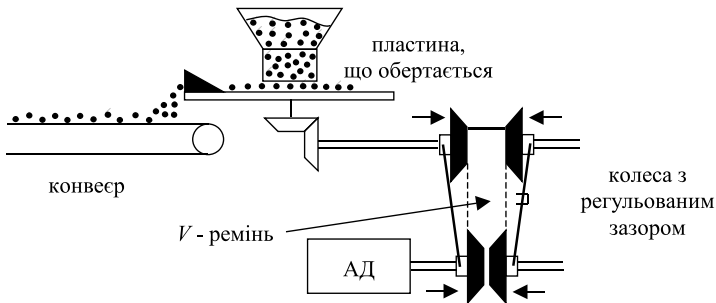


Рис. 5.19

Використання систем частотно-регульованого привода в конструкціях для переміщення мас дозволяє регулювати швидкість без використання пристроїв для механічного керування швидкістю.

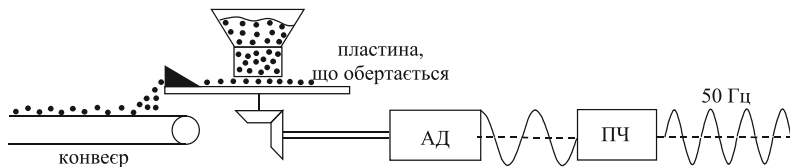


Рис. 5.20

На рис. 5.20 показана та ж конструкція, але з частотно-регульованим приводом з низькошвидкісним асинхронним двигуном, прямо сполученим з валом пластини фідера. Рівень подачі може регулюватися шляхом підбору швидкості двигуна. Процес має більшу ефективність завдяки виключенню втрат тертя в пасовій передачі. Крім того, на систему менше впливають перевантаження чи недовантаження. Також виключається часте обслуговування пасової передачі, описаної вище конструкції.

4.8. Керування рівнями виробництва

Керування рівнями виробництва має величезне значення в операціях складання. Оскільки рівні залежать від робочого розкладу і доступної робочої сили, то необхідно їх регулювати. Приклади виробничих ліній – автомобільна чи електронна складальні лінії, лінії готування їжі чи лінії пакування. Звичайно використовуються двигуни з постійною швидкістю для привода таких ліній. Коробки передач чи пасові передачі застосовуються для забезпечення керування швидкістю.

На рис. 5.21 показана автомобільна складальна лінія з традиційним керуванням. Двигуни з постійною швидкістю сполучені з коробками передач для приведення в рух великої конвеєрної системи. У міру того як робоча сила додається чи зменшується, швидкість підстроюється для підтримки належної ефективності. Недоліком цієї конструкції є те, що кожен двигун вимагає коробки передач для перемикання швидкостей, а перемикання можуть виконуватись тільки при вимкненій виробничій лінії.

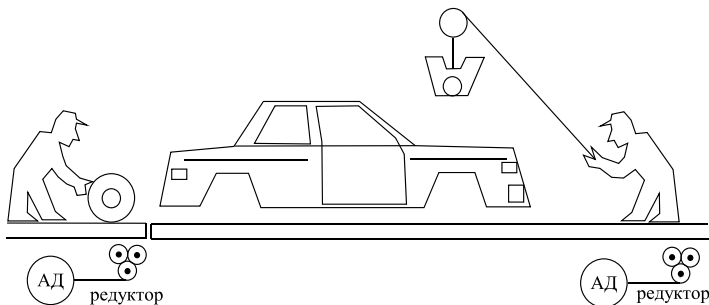


Рис. 5.21

Двигуни, вибрані для установки на такий лінії, повинні мати подібні механічні характеристики. Асинхронні двигуни з малим ковзанням підвищують щільність операцій. Також необхідно подбати про те, щоб двигуни працювали нижче рівня зриву моменту у всіх режимах.

Багатодвигунова конструкція з асинхронними двигунами має двійника з двигунами постійного струму. Однак, система з асинхронними двигунами дешевша і перевершує іншу за критерієм витрат на обслуговування.

З метою відповідності різним рівням виробництва, частотно-регульований привод може використовуватися для зміни швидкості виробничої лінії.

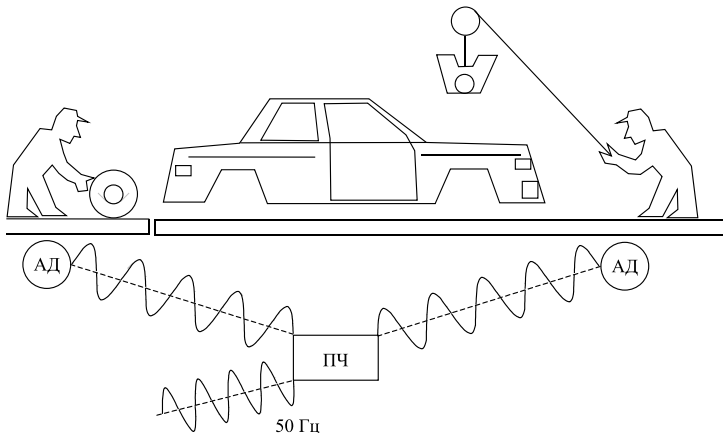


Рис. 5.22

На автомобільній складальній лінії (рис. 5.22) використані частотно-регульовані приводи замість двигунів з постійною швидкістю. У цьому випадку привод складається з необхідного числа асинхронних двигунів, що живляться від одного перетворювача. З використанням такого привода швидкість виробничої лінії може бути змінена без зупинки. На додачу, швидкість усіх секцій лінії може бути змінена одночасно шляхом зміни вихідної частоти спільного перетворювача.

4.9. Керування операціями намотування

Операції намотування знаходять своє застосування переважно в паперовій, сталеливарній і алюмінієвій промисловості. Регулювання швидкості, що є необхідним для підтримки відповідного натягу матеріалу, часто конструктивно представлено гальмом на ролик, що розмотує. Традиційні способи регулювання швидкості — це гідравлічні гальма і рекуперативні двигуни постійного струму, що діють як гальма.

Намотування і розмотування в основному здійснюються з постійною потужністю. Оскільки натяг залишається однаковим при діаметрі котушки, що змінюється, то момент зменшується в міру збільшення діаметра. Для точного керування натягом необхідно безперервно змінювати швидкість.

Привод намотування має зворотний зв'язок по швидкості. Коли смуга починає намотуватися, схема керування перемикається на керування натягом, і значення швидкості не враховується. У міру того як діаметр котушки збільшується, поправка на натяг зменшується, тому що необхідний менший момент для тієї ж сили протягання. Зміна швидкості машини здійснюється поправкою значення основної швидкості у всіх приводах. Під час зростання діаметра продукту його інерція зростає. Схема керування також повинна враховувати цю зміну. Розмотування подібне до намотування за винятком того, що значення сигналу натягу від'ємне, що еквівалентно гальмуванню.

Рис. 5.23 ілюструє операцію намотування паперу. Наприкінці ланцюга знаходиться намотувальний ролик, що приводиться в рух двигуном постійного струму. Двигун намотує папір при постійній чи близькій до постійної швидкості. Зворотний натяг підтримується гідравлічним гальмом, механічно з'єднаним з валом ролика, що розмотує.

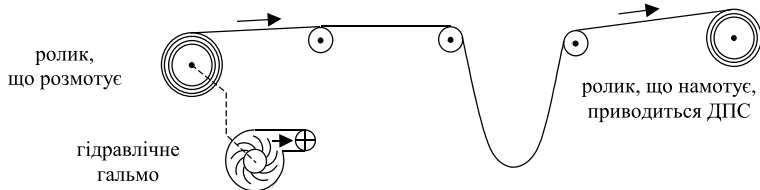


Рис. 5.23

Діючи як неефективний відцентровий насос, гідравлічне гальмо перетворює енергію в непотрібну теплоту. Теплота потім видається за допомогою теплообмінника. Опір насосній дії визначається положенням клапана, що контролюється автоматично.

За допомогою частотно-регульованого привода необхідний натяг може підтримуватися зміною швидкості ролика, що намотує, чи обох роликів.

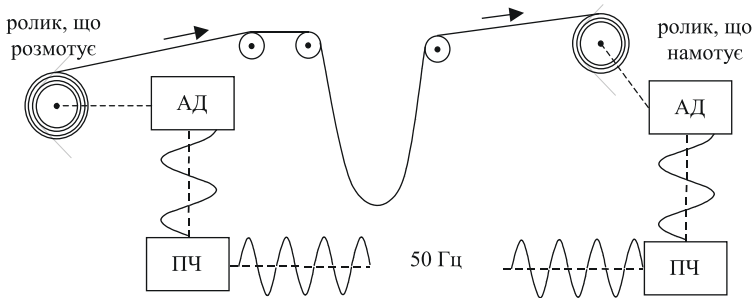


Рис. 5.24

У показаній на рис. 5.24 операції намотування паперу частотно-регульований привод використовується замість ДПС із постійною швидкістю і постійним моментом. Необхідний натяг підтримується зміною швидкості і моменту двигуна постійно. З керуванням частотно-регульованим приводом намотуванням, використання гідравлічного гальма виключається, як виключаються і теплові втрати, і вимоги до охолодження. Це призводить до більш високої ефективності, менших витрат на обслуговування і більшої точності.

5. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Основна маса промислових перетворювачів енергії будується за схемою трифазний випрямляч – трифазний автономний інвертор напруги. Вимоги до впливу споживача на мережу живлення постійно зростають, вводяться стандарти, що дозволяють використання простих схем випрямлення на вході перетворювача (стандарті IEEE-519, МЭК 555, ДСТ 13109). Для поліпшення якості

енергоспоживання, підвищення коефіцієнта потужності, зниження встановленої потужності і вартості перетворювача застосовують випрямлячі на некерованих ключах, системи стабілізації напруги ланки постійного струму, схеми з додатковою індуктивністю і додатковим ключем для високочастотного імпульсного регулювання вхідного струму. Силова схема при цьому має вбудований «інтелект» (SMART технологія). У перетворювачах енергії використовуються сучасні силові прилади (MOSFET, IGBT, IGCT), що мають дуже малі динамічні втрати. Характерним режимом використання силового перетворювача стає режим високочастотної широтно-імпульсної модуляції ШІМ. Частота ШІМ 10-20 кГц може виявитися цілком не зайвою при підвищенні частоти живлення нових розроблюваних електродвигунів.

Перспективні безпосередні перетворювачі частоти на повністю керованих силових ключах (матричні перетворювачі), при цьому виключаються додаткові реактивні елементи в основній силовій схемі (як індуктивності, так і конденсатори). Матричний перетворювач дозволяє одночасно синтезувати необхідну для живлення двигуна вихідну напругу (струм) і забезпечити бажаний характер енергоспоживання від мережі живлення (аж до випереджаючого $\cos\varphi$).

Як первинні перетворювачі використовуються датчики струму, що випускаються серійно, напруги, датчики положення Хола, тахогенератори, фотоімпульсні датчики переміщення і кодові датчики положення, синусно-косинусні обертові трансформатори та індуктосини з цифровим зніманням інформації. Обсяг використання нових типів датчиків (п'єзоелектричних, ємнісних, лазерних та інших) дуже малий. Одна з причин стабілізації в галузі розробок первинних вимірювачів криється у використанні нових принципів обробки результатів вимірів – мають на увазі системи непрямого вимірювання. За рахунок їх застосування виявилось можливим вирішити задачі сучасного етапу, а в ряді випадків навіть зменшити кількість датчиків (наприклад, відмовитися від застосування датчика частоти обертання в стежачому приводі) чи зовсім виключити датчики механічного руху («бездатчикові» електроприводи).

Задачі керування електроприводом полягають у забезпеченні необхідної частоти обертання (загальпромисловий регульований привод), а також у регулюванні електромагнітного моменту, потужності, прискорення, положення ротора чи технологічного параметра, обумовленого цими змінними. Розрізняють задачі стабілізації, стеження, позиціювання, забезпечення інваріантності (не-

залежності або слабкої залежності від дії неконтрольованих впливів), автономності (незалежності поводження окремої частини чи окремої змінної об'єкта від інших), оптимального (у змісті обраного критерію) керування.

Методи синтезу керування електроприводом базуються на вихідному припущенні про існування досить умовної моделі (математичного опису) процесів у приводі. Загалом, рівняння електропривода представляють отримані з фізичної картини процесів рівняння Кірхгофа для електромагнітних кіл двигуна і перетворювача (звичайно ці рівняння записуються для еквівалентної двофазної машини — рівняння Парка; для силового перетворювача стали звичними векторні діаграми вихідної напруги); рівняння Ньютона для механічних ланцюгів. У цьому контексті електропривод як об'єкт керування, можливо, є прийним винятком: для багатьох об'єктів одержання рівнянь утруднене у зв'язку зі складністю фізичного опису, а іноді і відсутності адекватного розуміння процесів. Однак і в електроприводі існує проблема одержання моделі процесів. Це стосується врахування насичення магнітного кола двигунів (особливо двигунів зі змінним магнітним потоком — асинхронних, синхронно-реактивних, індукторних). Для індукторних машин в основному використовуються рівняння в частинних похідних, польові моделі, більш придатні для чисельних розрахунків, але не для синтезу керування. Проблемою є врахування гнучких механічних зв'язків, нелінійних зв'язків типу «люфт» тощо.

Специфіка, що впливає з вибору того чи іншого типу двигуна змінного струму полягає в керуванні двома підсистемами: системою змінних механічного руху і системою електромагнітних змінних — реактивним струмом, потокозчепленням тощо. Звичайно задача керування змінними останньої підсистеми не задається явними вимогами до електропривода, а визначається з додаткових вимог: мінімізації енергетичних втрат, забезпечення необхідних ресурсів керування тощо., за умови розв'язання основної задачі керування механічним рухом. Керуючими впливами є компоненти напруг (струмів). Незважаючи на переваги векторного керування, продовжується використання більш простих систем привода, у яких керування зазначеними двома підсистемами заздалегідь зв'язане якою-небудь залежністю, наприклад $U/f = \text{const}$. Ці системи добре відпрацьовані і, очевидно, будуть використовуватися і надалі в розімкнених системах привода з цифровим керуванням, хоча і для останніх почали застосовувати векторні електроприводи.

Аналіз продукції провідних світових виробників систем привода і матеріалів опублікованих наукових досліджень у цій галузі дозволяє відмітити такі тенденції розвитку електропривода.

- Неухильно знижується частка систем привода з двигунами постійного струму і збільшується систем привода з двигунами змінного струму. Це пов'язано з низькою надійністю механічного колектора і вищою вартістю колекторних двигунів постійного струму в порівнянні з двигунами змінного струму. За прогнозами фахівців у перші роки століття на Європейському ринку з загального числа продаваних регульованих приводів електроприводи змінного струму складуть 68%, а електроприводи постійного струму складуть лише 15%. Решта приходить на механічні і гідравлічні приводи.

- Переважне застосування в даний час мають приводи з короткозамкненими асинхронними двигунами. Більшість таких приводів (близько 80%) — нерегульовані. У зв'язку з різким здешевленням статичних перетворювачів частоти частка частотно—регульованих асинхронних електроприводів швидко збільшується.

- Природною альтернативою колекторним електроприводам постійного струму є приводи з вентильними (комутованими) двигунами. Переважне застосування одержали синхронні двигуни зі збудженням від постійних магнітів або з електромагнітним збудженням (для великих потужностей). Цей тип привода найбільш перспективний для глибокорегульованих приводів, однак, є найдорожчим. Деякого зниження вартості можна домогтися при використанні синхронного реактивного двигуна.

- Приводом ХХІ століття за прогнозами більшості фахівців, стане привод на основі вентильно—індукторного двигуна ВІД. Двигуни цього типу прості у виготовленні, технологічні й дешеві. Вони мають пасивний феромагнітний ротор без будь-яких обмоток чи магнітів. Разом з тим, високі споживчі властивості привода можуть бути забезпечені тільки при застосуванні потужної мікропроцесорної системи керування в поєднанні із сучасною силовою електронікою. Для типових застосувань перспективні індукторні двигуни із самозбудженням, а для тягових приводів — індукторні двигуни з незалежним збудженням з боку статора. В останньому випадку з'являється можливість двозонного регулювання швидкості за аналогією зі звичайними приводами постійного струму.

- Для більшості масових застосувань привода (насоси, вентилятори, конвеєри, компресори тощо) потрібний відносно невеликий діапазон регулювання швидкості (до 1:10) і відносно низька

швидкодія. При цьому доцільно використовувати частотно-регульований асинхронний привод із класичною структурою скалярного керування. Перехід до широкодіапазонного (до 1:10000), швидкодійного приводу верстатів, роботів і транспортних засобів, вимагає застосування більш складних структур векторного керування. Частка таких приводів складає зараз близько 5% від загального числа і постійно зростає.

- Останнім часом на базі систем векторного керування розроблений ряд приводів із прямим цифровим керуванням моментом. Відмінною рисою цих рішень є гранично висока швидкодія контурів струму, реалізованих на базі цифрових релейних регуляторів, чи регуляторів, що працюють на принципах нечіткої логіки (фаззі-логіки). Системи прямого цифрового керування моментом орієнтовані, в першу чергу, на транспорт, на використання в підйомних машинах і кранах, ліфтах, робототехніці.

- Ускладнення структур керування приводами зажадало різкого збільшення продуктивності центрального процесора і переходу до спеціалізованих процесорів з об'єктно — орієнтованою системою команд, адаптованою до вирішення задач цифрового регулювання в реальному часі. Ряд фірм (Intel, Texas instruments, Analog devices тощо) випустили на ринок нові мікроконтролери для керування двигунами (із серії Motor Control) на базі процесорів по обробці сигналів — DSP — мікроконтролери. Вони забезпечують необхідну продуктивність центрального процесора (понад 20 млн.оп./с.), і містять ряд вбудованих периферійних пристроїв, призначених для оптимального сполучення контролера з інверторами і датчиками зворотних зв'язків. Серед вбудованої периферії особливе місце займають універсальні генератори періодичних сигналів, що забезпечують найсучасніші алгоритми керування інверторами, зокрема, алгоритми векторної широтно — імпульсної модуляції.

- Зростання обчислювальних можливостей вбудованих систем керування приводами супроводжується розширенням їх функцій. Крім прямого цифрового керування силовим перетворювачем розрізняються додаткові функції підтримки інтерфейсу з користувачем (через пульт оперативного керування), а також керування технологічним процесом.

Рис. 5.25 демонструє додаткові можливості сучасних систем керування перетворювачами частоти для приводів насосів.

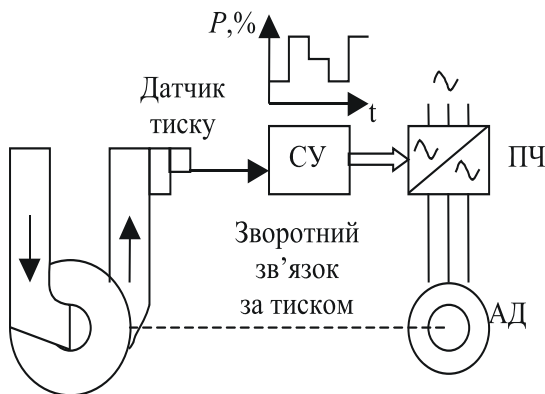


Рис. 5.25

До складу системи керування входять: універсальний регулятор технологічної змінної, а також генератор керуючих впливів на базі годин реального часу. Таке рішення дозволяє підтримувати тиск у трубопроводі на заданому відповідно добовій циклограмі рівні винятково засобами електропривода, без використання промконтролерів.

Перспективні системи керування електроприводами розробляються з орієнтацією на комплексну автоматизацію технологічних процесів і погоджену роботу кількох приводів у складі промислової мережі. Керування мережею бере на себе промконтролер чи керуюча ЕОМ (рис. 5.26).

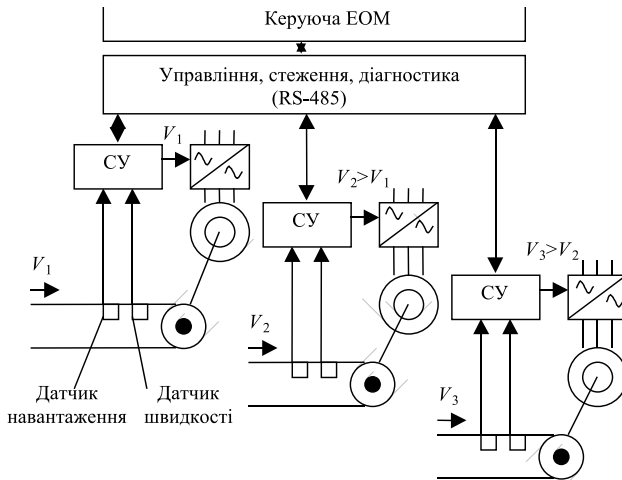


Рис. 5.26

Найбільш перспективні типи інтерфейсів: RS – 485 і CAN. CAN – інтерфейс поступово стає стандартом для розподілених систем керування на електричному транспорті і робототехніці.

- Прагнення гранично здешевити привод, особливо в масових застосуваннях у побутовій техніці (пилососи, пральні машини, холодильники, кондиціонери тощо) призвело до відмовлення від датчиків механічних змінних і переходу до систем бездатчикового керування. У цих системах для оцінки механічних координат привода (положення, швидкості, прискорення) використовуються спеціальні цифрові спостерігачі. Останнє можливо тільки при високій продуктивності центрального процесора, коли система диференційних рівнянь, що описують поведінку привода, може бути вирішена в реальному часі.

- Зрослі можливості мікропроцесорної техніки призвели до того, що при масовому виробництві виробів з обсягом випуску не менш 10000 штук на рік, виявляється можливим і економічно доцільним створення потужних однокристальних систем керування приводами на базі DSP – мікроконтролерів. Їх вартість при обмежених інтерфейсних функціях не буде перевищувати 10 – 20 дол. США.

Основні витрати при розробці систем керування приводами приходяться не на створення апаратної частини, а на розробку алгоритмічного і програмного забезпечення.

6 ■ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ СИСТЕМИ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗМІННОГО СТРУМУ

1. ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

Зростаючі технологічні вимоги, жорсткість показників якості виробничих процесів, необхідність швидкого перенастроювання промислового устаткування, обумовлює останніми роками стійку тенденцію впровадження в різні галузі народного господарства регульованих електроприводів.

Розвиток математичної теорії машин змінного струму, створення удосконалених напівпровідникових приладів, використання сучасних засобів керування, включаючи мікроконтролерні, дозволили створити високоякісні і надійні системи регульованих асинхронних електроприводів, що стають основним видом регульованого електропривода.

З іншого боку, у зв'язку зі зростанням цін на електроенергію й обмежені можливості збільшення потужності енергогенеруючих установок проблема енергозбереження, у тому числі зниження енергоспоживання, набуває останнім часом особливої актуальності.

Основними типами регульованих асинхронних електроприводів з двигунами з короткозамкненим ротором є:

- частотно – регульований електропривод, що дозволяє задовольнити найвищі вимоги по діапазону і якості регулювання швидкості та відпрацьовуванню складних законів руху;
- система з реалізацією енергії ковзання – асинхронно-вентильний каскад АВК;

- система тиристорний регулятор напруги — асинхронний двигун ТРН-АД, призначена для масових електроприводів з керованими пускогальмівними режимами та режимами короткочасного зниження швидкості.

Швидкість асинхронних двигунів практично пропорційна частоті напруги мережі живлення. Таким чином, зміна швидкості обертання двигуна може бути досягнута шляхом зміни частоти споживаної напруги. З іншого боку, момент двигуна пропорційний магнітному потоку в повітряному зазорі двигуна. Останній, у свою чергу, прямо пропорційний напрузі живлення і обернено пропорційний частоті напруги живлення. Таким чином, момент двигуна може бути змінений шляхом підстроювання напруги живлення під будь-яку необхідну частоту.

Відповідно, використовуючи двигун змінного струму для одержання постійного моменту при швидкостях, що змінюються, необхідно мати джерело енергії з регульованими напругою і частотою, що буде підтримувати постійним відношення:

$$U/f = \text{const},$$

де U — напруга мережі живлення; f — частота.

Найвідоміший спосіб одержання цього типу енергії — це перетворення змінного струму промислової частоти 50 Гц у постійний струм за допомогою випрямляча, а потім зворотний перехід до змінного струму за допомогою інвертора. У цій схемі напруга регулюється випрямлячем, а частота — інвертором.

Основними елементами частотно-регульованого приводу є випрямляч, інвертор, асинхронний чи синхронний двигун, програмований мікроконтролер. Крім цього використовуються індуктивності і (або) ємності для стабілізації виходу випрямляча від зменшення рівня вищих гармонік.

Коли велика індуктивність сполучена послідовно з виходом випрямляча, він називається стабілізатором або «джерелом» струму. Така система називається інвертор із джерелом струму (current-source inverter — CSI). Коли ж велика ємність сполучена паралельно з виходом випрямляча — інвертор із джерелом напруги (VSI).

Узагальнена функціональна схема частотно-регульованого електропривода зображена на рис. 6.1.

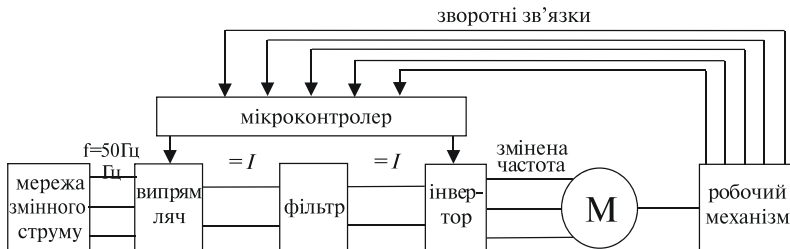


Рис. 6.1

Системи частотно-регульованого електропривода можуть бути класифіковані за типом двигуна і перетворювача.

Частотно-регульований електропривод з асинхронним двигуном:

- з інвертором струму;
- з інвертором напруги.

Частотно-регульований електропривод із синхронним двигуном:

- з інвертором струму, часто вживається термін інвертор з навантаженням, що комутується, (load-commutated inverter – LCI);
- з інвертором напруги.

Крім цього використовується техніка, відома як широтно-імпульсна модуляція ШІМ (PWM). У цій схемі застосовується некерований випрямляч, а змінний струм з регульованою частотою і регульованим рівнем напруги формується інвертором. ШІМ зменшує вміст гармонік на виході інвертора шляхом поліпшення форми кривої струму інвертора струму чи форми напруги на виході інвертора напруги. ШІМ донедавна використовувалася при малих потужностях, але зараз використовується й у потужних частотно-регульованих електроприводах. Можна впевнено сказати, що ШІМ стає домінуючою технологією в частотно-регульованому електроприводі.

Сукупність властивостей, включаючи деякі переваги і недоліки трьох типів частотно-регульованих електроприводів, показані в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

	Інвертор напруги	Інвертор струму	ШІМ
Сумісність	є	немає	є
Плавний старт	є	є	є
Настроювання	на вибір	вбудовано	на вибір
Ступінь нагрівання двигуна	низький	низький	високий
Шум двигуна	низький	низький	високий
Часткове навантаження	є	нестійке	є
Робота на низьких швидкостях	немає	немає	плавна
Низькошвидкісні пульсації моменту	є	є	немає
Частота вище 50 Гц	є	немає	є
Захист від розриву кола	вбудовано	потрібно	вбудовано
Захист від короткого замикання кола	потрібний	вбудовано	потрібний
Захист від перевантаження	потрібний	вбудовано	потрібний
Багатодвигуновий привід	є	на вибір	є
Контролер і логіка	проста	більш складна	складна
50 Гц коефіцієнт потужності	низький	низький	високий
50 Гц гармоніки	високі	високі	низькі
Гармоніки двигуна	помірні	помірні	високі
Сплески напруги	немає	є	є
Розміри фільтра постійного струму	великі	великі	малі
Шум інвертора	середній	середній	високий
Транзисторна технологія	є	немає	є
Комутація інвертора	низька частота	низька частота	висока частота
Розміри і вага	середні	великі	малі
Зауваження: на вибір - означає, що властивість забезпечується за окрему плату; потрібно - означає, що властивість забезпечується в основній конструкції.			

Частотно-регульований електропривод із синхронними двигунами найекономічніший при потужностях понад 1000 кВт. У таких системах звичайно використовується інвертор струму з навантаженням, що комутується. Використання синхронних двигунів з постійними магнітами, в системах частотного керування постійно зростає.

Ізолюючі трансформатори практично завжди встановлюються для частотно-регульованого електропривода потужністю 750 кВт і вище. Трансформатори служать як проміжна ланка між зовнішнім джерелом енергії і частотно-регульованим електроприводом. Вони зменшують вищі гармоніки й обмежують перенапруги. Ізолюючі трансформатори повинні використовуватися навіть з малими частотно-регульованими електроприводами, якщо вищі гармоніки впливають на лінії зв'язку і комп'ютерне керування, включаючи персональні комп'ютери. Крім цього вони виконують ще кілька функцій, а саме: захист двигунів від перенапруг, ізоляція електричної мережі будинку від електричних перешкод і забезпечення фактора надійності як для приводу, так і для двигунів.

Для керування не тільки швидкістю, а й моментом на валу двигуна необхідно мати в системі електропривода перетворювач час-

тоти з регульованою напругою по частоті й амплітуді. При цьому звичайно використовується закон керування, що забезпечує певне співвідношення напруги і частоти U/f , що визначає значення потоку в машині. Однак таке керування не дозволяє одержати значну швидкодію реакції двигуна в перехідних процесах, що обмежує застосування асинхронних двигунів з таким регулюванням як виконавчих механізмів з позиційним керуванням.

Для забезпечення достатньої швидкодії електропривода в перехідних процесах розроблений метод просторового векторного керування, названий також керуванням з орієнтацією магнітного поля. Цей метод заснований на керуванні двома складовими статорного поля, одна з яких забезпечує потік у повітряному зазорі двигуна, а інша — момент на його валу. У результаті стає можливим швидко змінювати значення моменту в широкому діапазоні швидкостей. Індукційний двигун при такому способі керування стає подібний двигуну постійного струму з незалежним збудженням.

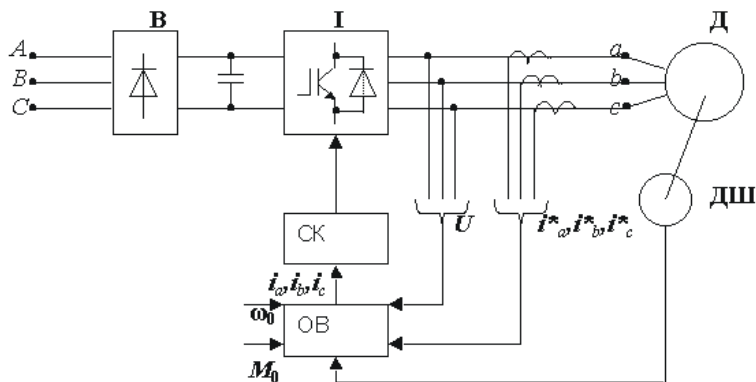


Рис. 6.2

Керованими компонентами при реалізації методу є складові струму статора в системі обертових координат. При цьому розрізняють пряме і непряме векторне керування. Існують багато модифікацій систем векторного керування. Зокрема, просторовий вектор обчислюється мікроконтролером з використанням моделі, що враховує параметри конкретного типу двигуна, наприклад, активних опорів ротора, статора, індуктивності розсіювання тощо. Одночасно враховується інформація, що надходить з датчика швид-

кості двигуна. На рис. 6.2 наведена узагальнена схема векторного керування. Тут: СК — система керування інвертором; ОВ — обчислювач вектора керування; ДШ — датчик швидкості; Д — двигун; В — випрямляч; І — інвертор.

За будь-якого способу керування за допомогою значення і частоти напруги живлення в системі електропривода необхідно мати перетворювач частоти, що може бути виконаний на основі різних схем. До появи нового покоління приладів силової електроніки з цією метою переважно використовувалися тиристорні перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком з мережею електроживлення (циклоконвертори) і рідше — перетворювачі з вираженою ланкою постійного струму зі структурою випрямляч-інвертор.

При використанні звичайних тиристорів інвертор напруги виконується за схемою з примусовою комутацією. Тиристорні перетворювачі мають ряд значних недоліків, що істотно знижують техніко-економічні показники електропривода в цілому. До таких недоліків слід віднести, насамперед, вкрай низькі масогабаритні питомі показники і наявність вищих гармонік у вихідній напрузі, зниження яких методами ШІМ утруднюється частотними характеристиками тиристорів. Тому для ефективного керування асинхронним електроприводом малої і середньої потужності використовують інвертори напруги на IGBT — транзисторах з робочою частотою, що лежить за межами звукового діапазону.

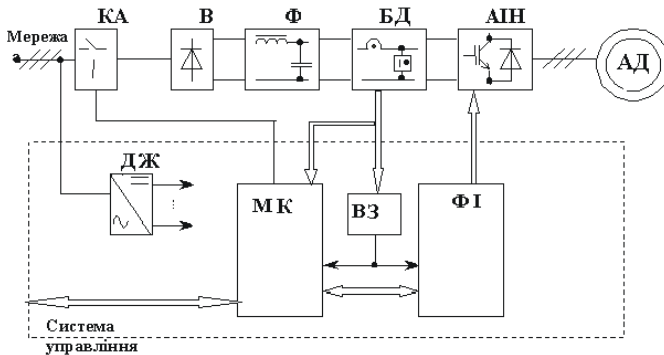


Рис. 6.3

Масове виробництво перетворювачів для електропривода на основі сучасних двоопераційних приладів освоєно практично всіма провідними електротехнічними компаніями світу. При всьому розмаїтті існуючих перетворювачів їм властиве використання як силової схеми однієї і тієї ж класичної структури (рис. 6.3.): трифазний мостовий некерований (нерегульований) випрямляч В, LC – фільтр Ф ланки постійного струму, трифазний мостовий автономний інвертор напруги АІН із широтно – імпульсною модуляцією ШІМ.

У силовому каналі: КА – комутаційний апарат системи управління; БД – блок датчиків. У системі керування: ДЖ – джерело живлення; МК – мікроконтролер; ВЗ – вузол захисту; ФІ – формувач керуючих імпульсів.

Некерований режим роботи випрямляча і властивості силових керованих ключів інвертора знімають питання обмеження di/dt і du/dt у колах вентилів, застосування громіздких снабберів для захисту від перенапруг тощо.

Розмаїття силових схем зводиться лише до розходження типів і способів ввімкнення комутаційних і захисних апаратів (електромагнітні пускачі, автоматичні вимикачі, запобіжники, струмообмежуючі реактори), датчиків струму і напруги, пристроїв гальмування (інвертор мережі для рекуперації, ключ електродинамічного гальмування). Акцент розробки силової частини перетворювачів змістився з області схемотехніки (істотної для тиристорних пристроїв) в область оптимізації конструкторсько-компонувальних рішень і теплофізичних розрахунків, підвищення стійкості до аварійних режимів.

Основний вплив на споживчі властивості перетворювачів і електроприводів спричиняє їх інформаційний канал – використовувані алгоритми керування і регулювання та реалізуючі їх мікроконтролерні системи управління (МСУ). Саме останні визначають регульовальні властивості і динамічні характеристики електропривода, його функціональність і адаптивність до складних систем автоматичного керування різними технологічними процесами.

Ефективність застосування частотно-регульованих асинхронних електроприводів на основі IGBT – інверторів із МСУ включає:

- енерго- і ресурсозбереження;
- істотне зниження споживання реактивної потужності з мережі;

- збільшення ресурсу роботи електричного, механічного і гідравлічного устаткування;
- автоматизацію й оптимізацію керування технологічними процесами.

Крім власне двоступеневого перетворення електричної енергії — випрямлення й інвертування, силовий канал вирішує такі задачі:

- керовані зв'язки з мережею — оперативні вмикання і вимикання електропривода;
- аварійні відключення електропривода від мережі й автоматичні повторні ввімкнення;
- електромагнітну сумісність ЕМС електропривода з мережею, у тому числі в частині індустриальних радіоперешкод;
- захист елементів перетворювача й електродвигуна від неприпустимих струмів і напруг;
- реалізація гальмівних режимів електропривода.

Кожна з перерахованих задач має, як правило, кілька варіантів розв'язання, що відрізняються схемним і апаратним виконанням відповідних вузлів силового каналу. Керований зв'язок з мережею може бути реалізовано двома способами:

- використанням контактного дистанційно керованого електромагнітного апарату в сполученні з некерованим діодним випрямлячем В;
- використанням напівкерованого діод-тиристорного випрямляча КВ без апарату КА.

Оперативне й аварійне керування КА або КВ здійснює МСУ. Застосування тієї чи іншої схеми ввімкнення визначається системою електропостачання електропривода на об'єкті експлуатації: характеристиками мережі, складом і характеристиками комутаційного устаткування.

Електромагнітна сумісність електропривода з мережею живлення повинна забезпечуватися зарядкою ємності фільтрів при підключенні до мережі живлення без небезпечних для випрямляча екстраструмів і перенапруг, режимами споживання активної потужності з мережі і її генерації в мережу живлення, високим значенням вхідного коефіцієнта потужності, обмеженням радіоперешкод, які генеруються у мережу живлення, до встановлених стандартами значень, а також, струмообмеженням при аваріях у випрямлячі і ланці постійного струму.

Найбільш використовуваними варіантами забезпечення неприпустимих значень вхідного коефіцієнта потужності є застосування вхідних реакторів і реакторів у колі заряду фільтруючого кон-

денсатора. Мінімізація коефіцієнта несинусоїдальності сіткових напруг і струмів мережі забезпечується відповідним розрахунком і вибором вхідних дроселів та дроселя фільтра ланки постійного струму. Результати проведених досліджень показали, що для забезпечення прийнятної вхідної коефіцієнта потужності досить установити 1,5 – 5% вхідні реактори залежно від індуктивності мережі живлення.

Основним джерелом генерування індустриальних перешкод є АІН через дуже високі швидкості перемикання IGBT. Вхідні реактори при використанні встановленого перед ними ємнісного фільтра радіоперешкод вирішують проблему обмеження радіоперешкод, що мають без фільтра неприпустиму величину (120–130 дБ). Фільтр зменшення радіоперешкод електроприводів виконується у вигляді окремого силового модуля і містить комбінацію різних видів дроселів і конденсаторів, сполучених за певною схемою.

Захист електропривода від неприпустимих струмів і напруг у робочих режимах, у режимах перевантаження й аварій є однією з найскладніших задач проектування силового каналу (рис. 6.4.). Причому складність полягає в оптимізації способів і засобів захисту за критеріями їх ефективності (достатності) та економічності.

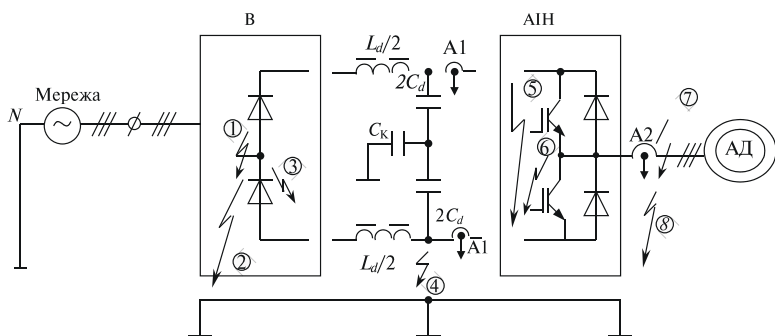


Рис. 6.4

На схемі рис.6.4. цифрами 1 – 8 позначені кола протікання аварійних струмів і відповідні їм аварійні режими. Поява аварійних струмів може бути викликана коротким замиканням кіл перетворювача і двигуна (1,7), виходом з ладу силових напівпровідникових приладів перетворювача (3,6), несанкціонованим включенням транзистора АІН (5), порушенням ізоляції і замиканням на кор-

пус кіл перетворювача і двигуна (2,4,8) при живленні від мереж із заземленою нейтраллю N . Наслідком вимикання аварійних струмів засобами захисту є виникнення неприпустимих перенапруг, що вимагає вживання заходів щодо їх обмеження в колах вентилів випрямляча і, особливо, транзисторів АІН.

Аварійні режими 1 – 4 небезпечні для вентилів випрямляча. Завдяки великим кратностям ударних струмів і значенням інтегралів I^2t цих вентилів (діодів, тиристорів) їх захист може бути забезпечено автоматичним вимикачем або швидкодіючими плавкими запобіжниками у вхідних колах перетворювача. Обмеження неповторюваних комутаційних перенапруг у колах вентилів забезпечено захисними RC – колами або варисторами.

Найважливішими вузлами, що впливають на працездатність і надійність транзисторного АІН, є ємнісний фільтр ланки постійного струму і головне коло розряду ємності фільтра на вихідні транзистори інвертора.

Сучасні напівпровідники IGBT допускають 8 – 10-кратний щодо номінального струм у режимі короткого замикання тривалістю 10–20 мкс. Максимально припустимі напруги, прикладені до переходу IGBT, лежать у межах 1200–3500 В. Типовий час вимикання IGBT складає 1 мкс. Таким чином, при вмиканні інвертора з номінальною напругою в колі постійного струму 514 В з режиму короткого замикання сумарна індуктивність ємнісного фільтра й ошиновки головного кола (у мікроГенрі) повинна знаходитися в межах від $75/I_n$ для приладу 12 класу до $150/I_n$ – для приладу 17 класу. Для приводу потужністю 100 кВт, побудованого на приладах 12 класу, вона повинна бути порядку 0,1 мкГн і зменшуватися з подальшим зростанням потужності.

Для вирішення цієї проблеми застосовуються плоскопаралельна ошиновка головного кола і малоіндуктивні електричні конденсатори європейських виготовлювачів. Точні розрахунки власної індуктивності такої ошиновки утруднені, однак при проектуванні можна використовувати відому залежність погонної індуктивності плоскопаралельної системи однофазних шин прямокутного перерізу від їх геометричних розмірів при високих частотах і відповідні номограми. Таке рішення забезпечує сумарну індуктивність ошиновки головного кола і ємнісного фільтра на рівні 0,08 – 0,1 мкГн. У приводах більшої потужності застосовується паралельне сполучення вхідних інверторів, що підключаються до загальної трифазної вихідної шини через вирівнювальні реактори. При цьому коефіцієнт нерівномірності розподілу вихідних струмів окремих

інверторів складає 1,05 – 1,15 при числі паралельних кіл від 2 до 12.

Елементи силового фільтра ланки постійної напруги – устаткування перетворювача, що займає до 50% його об'єму і складає до 40% його маси. Розрахункова ємність C_d фільтра в стандартних перетворювачах дорівнює приблизно 100 мкФ/кВ. Найпридатнішими для цього є електролітичні конденсатори, які мають велику питому ємність і призначені для роботи в колах постійної та пульсуючої напруги. Оскільки максимальні напруги таких конденсаторів дорівнюють 350 – 400 В, у схемі фільтра вони з'єднуються в паралельно – послідовні групи.

Аварійні струми режимів 5 – 8 протікають у колах транзисторів АІН, істотно більш уразливих до струмових перевантажень. Захистити IGBT апаратними засобами силових кіл практично неможливо. У режимах 5 – 7 ситуація погіршується енергією потужного конденсатора C_d (1000 мкФ) фільтра ланки постійної напруги. Тут можливе лише термінове (1–3 мкс) вимикання транзисторів по колах керування. Для цього у колі силового каналу електропривода включені безінерційні датчики струму. Крім того, аварійне вимикання транзисторів може здійснюватися спеціальними формувачами керуючих сигналів – інтелектуальними драйверами з функціями захисту.

Важлива роль в організації захисту, регулювання і вимірювання робочих параметрів електропривода належить датчикам струму і напруги його силового каналу. Датчики повинні вимірювати постійні, змінні в широкому діапазоні частот та імпульсні струми і напруги в різних колах електропривода. До датчиків ставляться вимоги високої точності вимірювання, лінійності вихідної характеристики, високої швидкодії, гальванічної розв'язки вхідних і вихідних кіл з високим рівнем ізоляції. Усім цим вимогам задовольняють модулі LEM, що працюють за принципом компенсації магнітного потоку за допомогою елемента Хола й електронної вимірювальної схеми і названі іменем фірми – виробника LEM (Швейцарія).

На схемі рис. 6.4. показані два варіанти вмикання датчиків струму: А1 у вхідних колах (постійного струму) або А2 у вихідних колах (змінного струму) АІН. Датчики А1 фіксують аварійні струми всіх режимів 5 – 8. Включення двох датчиків А1 обумовлено режимом 8, у якому аварійний струм протікає лише по одному із двох вхідних кіл АІН. В інших режимах досить одного датчика А1. Датчики А2 фіксують аварійні струми режимів 6 – 8 (у режимі 6

фіксується дисбаланс трьох фазних струмів АД). Режим 5 при цьому виключається системою керування, а також спеціальною схемою ввімкнення і властивостями драйверів. З позицій мінімізації паразитної індуктивності вхідних кіл АІН і відповідного зменшення комутаційних перенапруг на IGBT доцільніше варіант вмикання датчиків А2.

Відзначимо особливість режиму 8: швидкість di/dt наростання аварійного струму обмежена індуктивністю $L_d/2$ і мережі. Час досягнення цим струмом значення уставки спрацювання захисту може виявитися достатнім для теплового пробою IGBT. Ця обставина актуальна при використанні датчиків А1, датчики А2 відразу ж зафіксують дисбаланс трьох струмів. Для збільшення di/dt і форсування спрацювання захисту у виконаннях з датчиками А1 середня точка конденсаторів C_d фільтра через додатковий конденсатор C_k невеликої ємності ($4 - 10$ мкФ) під'єднана до заземленого корпусу. На час заряду конденсатора C_k індуктивність мережі $L_d/2$ виключається з контуру короткого замикання. При цьому необхідно враховувати зростання напруги на конденсаторі C_d у режимах неробочого ходу і переривчастого струму приблизно в 1,21 рази в порівнянні з напругою режиму безперервного струму випрямляча.

Для одержання необхідної індуктивності L_d відповідно до номінального струму фільтра також використовується групове паралельно — послідовне сполучення однотипних дроселів. Дросель, як правило, виконується на витому розрізному осерді з немагнітним зазором.

В електроприводі необхідно захищати обмотки АД від перенапруг, обумовлених проблемою «довгого кабелю» властивою IGBT — інверторам. При цьому можливо застосувати два варіанти блоків вихідного фільтра. Блок паралельного фільтра — модуль узгодження встановлюється на об'єкті експлуатації в безпосередній близькості від АД (1–2 м) і блок послідовного фільтра, що підмикається до вихідних затисків перетворювача в розріз «довгого кабелю». Критична довжина кабелю і необхідність застосування фільтрів визначаються характеристиками і режимом роботи IGBT — модулів, типом і конструктивними особливостями приводних АД, типом самого кабелю.

Для реалізації режиму електродинамічного гальмування електропривода передбачається можливість установки і під'єднання до шин ланки постійної напруги гальмівного транзисторного ключа, що працює в режимі широтно-імпульсного регулятора. Галь-

мівний резистор установлюється поза перетворювачем і підмикається до його відповідних силових затискачів. Потужність гальмівного контуру складає від 0,2 до 0,5 номінальної потужності електропривода, що виявляється достатнім для більшості загальнопромислових застосувань. МСУ електропривода містить канал керування гальмівним регулятором з відповідним програмним забезпеченням. Електроприводи з рекуперативним гальмуванням виконуються на основі реверсивного діод-транзисторного випрямляча.

Мікроконтролер виконує основні функції керування вузлами системи й обробку даних. Вибір мікроконтролера визначається вимогами до системи керування і ціновими обставинами. У структуру системи керування, крім мікроконтролера, входять інші функціональні вузли, що виконують різні допоміжні і захисні функції (датчики напруги і струму, блоки введення-виведення, пульт керування тощо). Обмін даними між цими блоками і мікроконтролером ведеться по локальній гальванічно розв'язаній магістралі RS-485 за допомогою єдиного протоколу, що забезпечує високу уніфікацію окремих вузлів системи керування і можливість заміни будь-якого вузла, у тому числі і мікроконтролера, вузлом іншого типовиконання.

Керування ключами перетворювача здійснюється за допомогою драйверів. Драйвери забезпечують моніторинг спадання напруги на емітерно-колекторному переході транзистора для виявлення його аварійного стану, плавне вимикання його з режиму КЗ із наступним блокуванням імпульсів керування, контроль напруги керування на затворі транзистора. Вихідний підсилювач потужності забезпечує струм, достатній для керування IGBT. Схема також забезпечує можливість налаштування часу вмикання і часу вимикання транзистора з режиму короткого замикання.

Несуча частота ШІМ визначає частоту перемикання транзисторів. Вибір частоти обумовлений оптимізацією двох критеріїв: синусоїдальності струмів двигуна — з ростом частоти підвищується якість кривої струму, і мінімізації динамічних втрат у IGBT — з ростом частоти збільшуються втрати потужності перемикання.

Одним з недоліків таких систем є значні комутаційні втрати в IGBT, пов'язані з комутацією останніх при кінцевих (не нульових) миттєвих значеннях струму і напруги (так звана жорстка комутація). Це обмежує граничну частоту комутації 8 — 10 кГц для звичайних і 16 — 20 кГц — для швидких IGBT. Крім того, при високих швидкостях комутації і довгих провідниках до двигуна в них

виникають значні перенапруги, що, досягаючи подвійних значень, можуть порушити ізоляцію обмоток двигуна або призвести до скорочення терміну його служби.

Одним із способів зниження комутаційних втрат є використання принципів «м'якої» комутації силових ключів інвертора – в нулі струму або напруги. Одна з таких схем з осцилограмою напруги на навантаженні наведена на рис. 6.5.

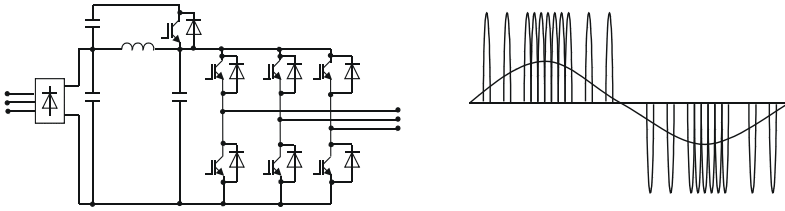


Рис. 6.5

На шині постійного струму формується послідовність однополярних дзвоноподібних імпульсів напруги. Інвертор замість ШІМ використовує принципи числоімпульсної модуляції для формування на виході необхідної форми вихідної напруги. Комутація імпульсів відбувається при нулі напруги на шині постійного струму.

Для масового індукційного електропривода існує велика номенклатура інтелектуальних модулів, що містять звичайно некерований випрямляч і транзистори для утворення трифазної мостової схеми. Крім того, вони мають відповідні елементи захисту, контролю і керування перетворювачем частоти.

Бурхливо розвивається і напрямок інтелектуальних силових модулів IPM, що поєднують в одному корпусі всю чи значну частину схеми перетворювача частоти, систем керування, захистів, діагностики, режимної автоматики, джерел живлення власних потреб. Більшість фірм («Mitsubishi», «Fuji», «Semikron» тощо) випускають серії IPM (одно-, дво- і шестиключових) за технологією багатоповерхових конструкцій з використанням технологій гібридних схем і поверхневого монтажу з граничними параметрами 800 А / 1200 В (одноключові) і 300 А / 1200 В (шестиключові) із включенням функції керування силовими ключами від малопотужних гальванічно розв'язаних сигналів TTL-рівня, захистами від перевантаження по струму (K3), від перенапруги і перегрівання. Фірма «International Rectifier» випускає серію IPM «Powertrain»

(рис. 6.6), що являє собою ремонтпридатні перетворювачі частоти регульованого електропривода з використанням технології поверхневого монтажу як для «інтелектуальної», так і для силової частини.

Усі модулі мають аналогічну структурну побудову і поєднують такі функції:

- випрямлення первинної мережі живлення змінного струму;
- перетворення високовольтної постійної напруги в змінну, керуючу двигуном;
- гальванічну розв'язку силових і керуючих кіл;
- захист від короткого замикання, перенапруг і перевищення припустимої температури;
- формування 5- і 15-вольтової напруг постійного струму, що використовуються для живлення блоків системи, а також зовнішнього мікроконтролера або ШІМ-модулятора; підключення зовнішньої мережі, двигуна і керуючих впливів.

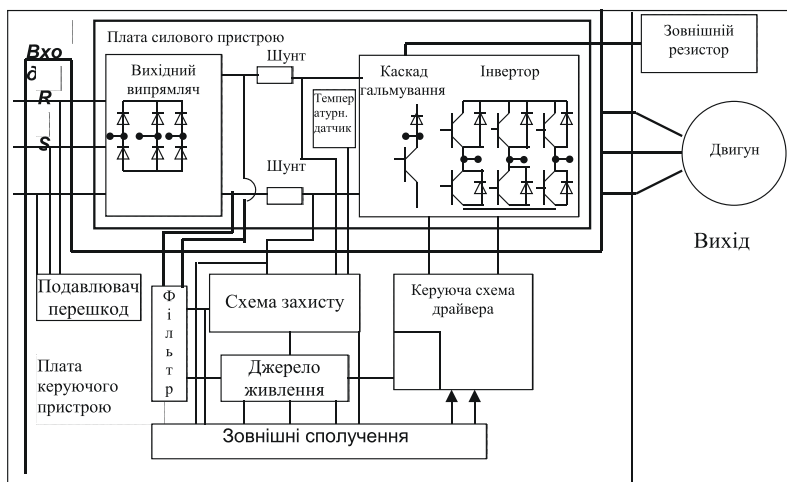


Рис. 6.6

Керування модулем здійснюється шляхом подачі на входи драйвера послідовності сигналів, генерованих задаючим пристроєм користувача, відповідно до алгоритму керування режимами роботи технологічної установки.

Міжнародний консорціум «Енергозбереження» (МКЕ), створений провідними підприємствами електротехнічної промисло-

вості України, Росії і Білорусі в 1995 р., розробив і освоїв серійне виробництво на ряді заводів СНД серії енергозберігаючих електроприводів РЕН потужністю від 3,5 до 1000 кВт, побудованих за схемою автономного інвертора АІН на IGBT транзисторах. В наш час розробляються ПЧ потужністю до 2000 кВт.

Для оптимізації роботи пари ПЧ-насос, наприклад, електропривод Unidrive VTC (керування моментом, що змінюється,) має квадратичну характеристику U/f (напруга/частота). Квадратична форма характеристики дозволяє перетворювачу «підлаштовуватися» під механізм і керувати ним по оптимальній характеристиці, зводячи до мінімуму втрати енергії. При зниженні навантаження на валу двигуна і, відповідно, зменшенні струму статора, перетворювач знижує напругу на статорі двигуна, зберігаючи частоту незмінною. Завдяки зниженню напруги зменшуються втрати енергії в статорі двигуна, а значить і загальні втрати енергії в приводній системі знижуються. При зростанні навантаження на валу двигуна процес протікає в зворотній послідовності, і ПЧ повертається на номінальну характеристику. Динамічний вибір характеристик U/f ілюструє рис. 6.7.



Рис. 6.7

З функцій корисних при керуванні насосами і вентиляторами слід також відмітити можливість «підхоплення» обертового двигуна і можливість автоматичного перезапуску при зникненні живлення. Перетворювач може перезапускатися до 5 разів із затримкою перед ввімкненням до 25 секунд, що достатньо для переважної більшості насосів і вентиляторів.

Слід відмітити також наявність трьох частот, що задаються користувачем і які дозволяють уникнути резонансу в механізмі і двигуні.

Для забезпечення підвищеного пускового моменту в приводах Unidrive VTC передбачена можливість форсування напруги на низьких частотах обертання. Завдяки збільшенню напруги на обмотці статора двигуна момент, що розвивається двигуном, також збільшується, дозволяючи зрушити механізм із підвищеним пусковим моментом.

В енергозберігаючому частотно-регульованому електроприводі підтримка потоку на оптимальному рівні і керування по мінімуму втрат можуть бути реалізовані без складного алгоритму за допомогою простих функціональних перетворювачів.

З умови визначення електромагнітних втрат АД впливає, що в сталому режимі втрати є функцією трьох параметрів: моменту навантаження, потоку АД і частоти керування. Умови, що характеризують режим мінімальних втрат, знаходяться з розв'язання рівнянь у часткових похідних сумарних і електромагнітних втрат АД по потоку, прирівняних до нуля. При цьому знайденому мінімальному значенню втрат відповідає деяке оптимальне значення потоку.

Оптимальні значення потоку $\varphi_{\text{опт}}$ для різних частот f_* можна з достатнім ступенем точності визначити аналітично, не звертаючись до розрахунків і досліджень функції електромагнітних втрат $\Delta P_{\text{Е,Ф}} = \psi(\varphi)$, де $\varphi = \Phi / \Phi_n$ і $f_* = f / f_n$ – відносний потік і частота.

Вважаємо, що квадрат струму статора АД дорівнює сумі квадратів приведенного струму ротора і струму намагнічування:

$$I_{\text{Е,Ф}}^2 \approx I_2'^2 + I_\mu^2,$$

а приведений струм ротора прямо пропорційний навантаженню $\mu = M / M_n$ і обернено пропорційний потоку:

$$I_2' = \frac{P_n \mu}{m_1 E_{\text{ін}} \varphi}.$$

З урахуванням відомого аналітичного виразу квадрат струму намагнічування виразимо через потік у такому вигляді:

$$I_\mu^2 = I_{\text{мін}}^2 \frac{a(1-\varphi)^2 - \varphi^2}{a_1(1-\varphi)^2 + \varphi^2},$$

де a й a_1 — коефіцієнти, які підбираються таким чином, щоб найточніше описати ділянку кривої намагнічування, розташовану в інтервалі зміни $\Phi_{\text{опт.}}$.

Підставивши значення струмів у вираз електромагнітного моменту, одержимо:

$$\Delta P_{r,\varphi} = B_1 \frac{a(1-\varphi)^2 - \varphi^2}{a_1(1-\varphi)^2 + \varphi^2} + B_2 \frac{\mu^2}{\varphi^2} + B_3 \varphi^2 f_*^k,$$

$$\text{де } B_1 = m_1 r_1 I_{\text{лн}}^2; B_2 = \frac{(r_1 + r_2') P_{\text{лн}}}{m_1 E_{\text{лн}}^2}; Y_3 = \Delta P_{\text{лн}}.$$

Узявши похідну останнього виразу по потоку i , прирівнявши її до нуля, після перетворень одержимо:

$$u^8 + b u^6 + c u^4 + d u^2 + l_f = 0$$

$$\text{де } b = \frac{2a_1}{1-a_1}; c_f = \left(\frac{a_1}{a_1-1} \right)^2 + \frac{B_1(a_1-a) - B_2(a_1-1)^2 \mu^2}{B_3(a_1-1)^2 f_*^k}; d_f = \frac{2a_1 B_2 \mu^2}{(a-1) B_3 f_*^k};$$

$$l_f = -\frac{B_2 a_1 \mu^2}{B_3 (a_1-1)^2 f_*^k}; k = 1, 3 \div 1, 5 - \text{коефіцієнт, що залежить від типу сталі АД.}$$

Розв'язавши рівняння, знайдемо в загальному вигляді аналітичний вираз оптимального потоку, при якому втрати АД в системах частотного електропривода будуть мінімальними, а ККД максимальним:

$$\Phi_{\text{опт}} = \sqrt{-\frac{b+A}{4} + \sqrt{\left(\frac{b+A}{4}\right)^2 - y - \frac{by-d_f}{A}}},$$

$$\text{де } A = \sqrt{8y + b^2 - 4c_f}; y = \sqrt{-q + \sqrt{q^2 + p^3}} + \sqrt{-q - \sqrt{q^2 + p^3}} + \frac{c_f}{6}; q = -(c_f/6)^3 + [l_f(4c_f - b^2) - d_f^2/16]; p = -(c/6)^2.$$

Підставивши отримане значення $\Phi_{\text{опт}}$ в аналітичні залежності АД, виражені через потік, можна одержати значення величин і параметрів в оптимальному режимі.

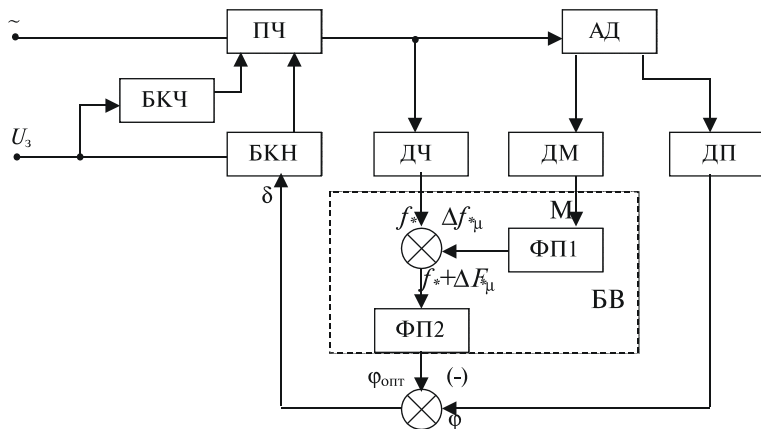


Рис. 6.8

Наведені закономірності зміни оптимального потоку залежно від частоти і навантаження формують вимоги до систем електропривода, що забезпечує енергозберігаючий режим на основі підтримки мінімуму втрат. На рис. 6.8 представлена функціональна схема енергозберігаючого частотно-регульованого електропривода; на рис. 6.9 – вигляд залежностей, реалізованих у першому (а) і другому (б) функціональних перетворювачах для АД серії 4А електроприводи з оптимальним керуванням за мінімумом втрат. Залежності отримані з урахуванням насичення і температурних змін параметрів двигуна і скориговані в результаті ряду експериментів. Параметри на рисунку представлені у відносних одиницях.

Частотно-регульований електропривод містить АД, підключений до виходів перетворювача частоти ПЧ, блок керування частотою БКЧ і блок керування напругою БКН, датчик частоти ДЧ, датчик потоку ДП і датчик моменту ДМ, блок обчислення БВ оптимального потоку. Блок обчислення оптимального потоку з функціональними перетворювачами ФП1 і ФП2. Реалізовані у ФП1 і ФП2 залежності (рис.6.9,б.) мають монотонний характер, що дозволяє забезпечити їх кусочно-лінійну апроксимацію за допомогою простих схем.

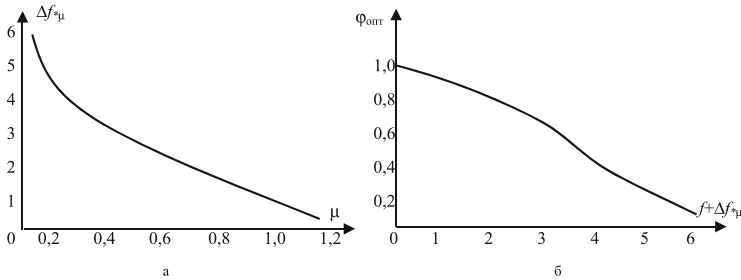


Рис. 6.9

Частотно-регульований електропривод працює в такий спосіб. Сигнал задання U_3 надходить на входи блоків керування частотою і напругою. Коло регулювання частоти розімкнене, а коло регулювання напруги замкнене і містить у зворотному зв'язку блок обчислення оптимального потоку. На його входи надходить інформація про вимірювану частоту f_* і момент μ з виходу датчиків. На виході блоку обчислення формується сигнал $\Phi_{\text{опт}}$, що порівнюється із сигналом дійсного потоку Δ , що надходить з виходу датчика положення. Результати порівняння Φ зазначених сигналів надходять у блок керування напругою.

Оптимальне значення потоку $\Phi_{\text{опт}}$, що відповідає мінімальним втратам двигуна, спадає зі зростанням частоти f_* і зменшенням моменту (навантаження) μ . Це дозволяє поєднати залежності $\Phi_{\text{опт}}$ для різних значень μ в одну головну залежність $\Phi_{\text{опт}}$ від $(f_* + \Delta f_\mu)$, реалізовану одним функціональним перетворювачем ФП2, а залежність Δf_μ від μ реалізується функціональним перетворювачем ФП1. Характер описаних залежностей, отриманих для різних типів двигунів, однаковий.

Енергозберігаючий частотно-регульований електропривод на основі АД з короткозамкненим ротором і екстремальним керуванням по мінімуму втрат може бути використаний у системах і механізмах промислового призначення.

2. АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД З РЕАЛІЗАЦІЄЮ ЕНЕРГІЙ КОВЗАННЯ

Один з найпростіших способів регулювання швидкості асинхронного двигуна з фазним ротором полягає у введенні в коло рото-

ра додаткових резисторів. Однак при цьому істотно погіршується ККД електропривода на регульовальних характеристиках, тому що виділені в роторних резисторах втрати ковзання витрачаються даремно:

$$\Delta P = P_C s = M \omega_0 s.$$

При потужності електропривода в кілька сотень кВт і більше втрати ковзання стають досить відчутними за абсолютним значенням. Ступінь погіршення ККД орієнтовно можна оцінити, якщо не враховувати втрати в обмотках статора й у сталі асинхронного двигуна

$$\eta = \frac{P}{P_C} = \frac{M \omega}{M \omega_0} = \frac{M \omega_0 (1-s)}{M \omega_0} = 1-s = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega^*,$$

тобто ККД знижується пропорційно швидкості. Наприклад, при швидкості, яка дорівнює половині синхронної, $\eta \approx 0,5$. Очевидно, що такий спосіб регулювання швидкості призводить до істотного збільшення витрат енергії.

Безпосередньо використовувати енергію ковзання неможливо, оскільки амплітуда напруги і частота струму ротора не тільки відрізняються від відповідних параметрів мережі живлення, але і змінюються у функції ковзання двигуна. Тому повне використання енергії ковзання неможливе без вмикання в коло ротора перетворювача електроенергії.

Принципово існують дві можливості корисно витрачати енергію ковзання — повернення її на вал АД або в мережу живлення.

В електромеханічному машинно-вентильному каскаді (рис. 6.10) обмотка ротора АД, що приводить у рух робочий механізм РМ, підключається до некерованого випрямляча. ЕРС випрямляча спрямована зустрічно ЕРС допоміжної машини постійного струму ДМ. Асинхронний двигун і машина жорстко сполучені одним валом:

$$\Delta P = P_{M_{dm}}.$$

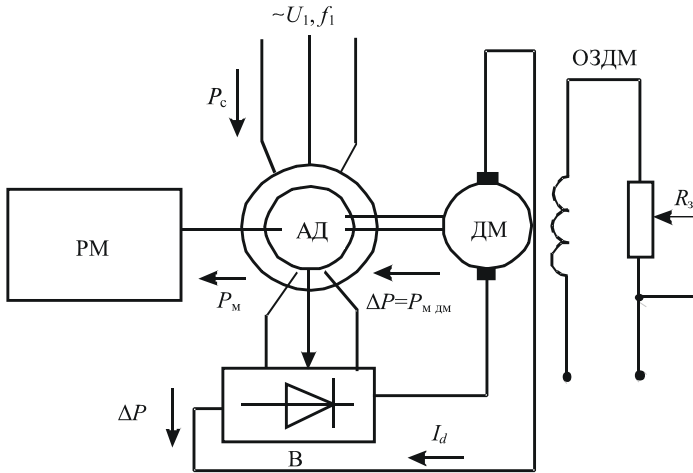


Рис. 6.10

Потужність ковзання в схемі ΔP , за винятком втрат у роторі АД, перетворювачі і допоміжній машині надходить на вал у вигляді механічної потужності від ДМ.

Робочій машині (АД) передається вся електромагнітна потужність (якщо знехтувати втратами в каскадній схемі):

$$P_m = P_c - \Delta P + \Delta P = P_c.$$

Таким чином, потужність, що її створює каскад, незалежно від ковзання (швидкості) підтримується постійною. Ці каскади називаються каскадами постійної потужності.

Повернення потужності ковзання в мережу можливе в електричному вентильно-машинному каскаді (рис. 6.11) і в асинхронно-вентильному каскаді.

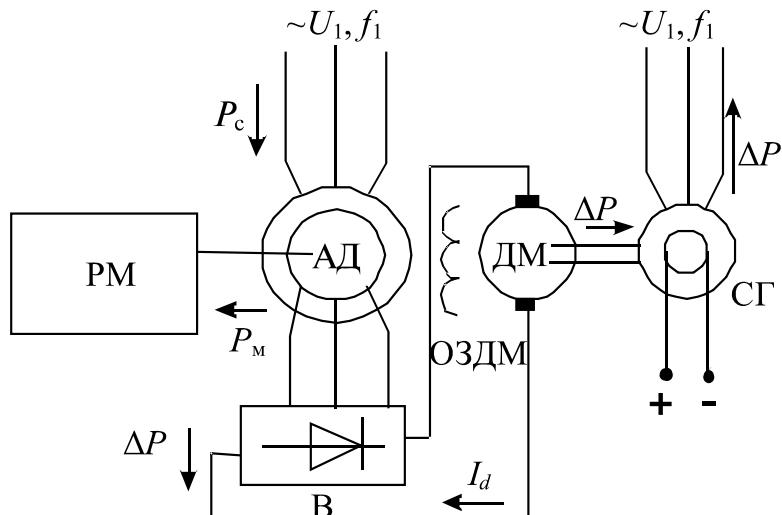


Рис. 6.11

В електричному каскаді допоміжна машина не має механічного зв'язку, а сполучена одним валом із синхронним генератором, підімкненим до мережі змінного струму.

Потужність втрат передається не на вал робочої машини, а за допомогою генератора віддається в мережу:

$$P_m = P_c - \Delta P = P_c - P_c s = P_c(1 - s).$$

Недоліки вентильно-машинних каскадів визначаються наявністю допоміжних машин.

Практичний діапазон регулювання швидкості в машинних каскадах звичайно не перевищує двох. Це визначається тим, що в міру зростання діапазону регулювання швидкості потрібно збільшувати встановлену потужність усіх пристроїв у роторному колі АД. Так, при діапазоні, що дорівнює двом, встановлена потужність електричного АВМК складає 250%, з них: АД – 100%, випрямляч, допоміжна машина і синхронний генератор по 50%.

Найбільше поширення одержали асинхронно-вентильні каскади (рис. 6.12), у яких перетворювач складається з некерованого випрямляча і веденого мережею інвертора. Трансформатор необхідний для узгодження напруги інвертора і мережі.

Однією з основних переваг схеми є те, що при обмеженому діапазоні регулювання швидкості потужність перетворювача в роторному колі двигуна менше потужності самого двигуна:

$$P_n = P_{\text{АД}} \cdot s_{\text{max}},$$

де P_n — потужність перетворювача; s_{max} — ковзання, відповідне мінімальній швидкості АД.

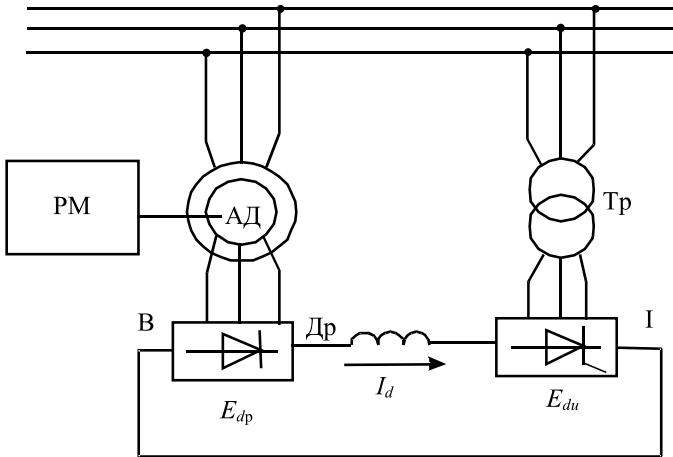


Рис. 6.12

Очевидно, що ефективність вентильного каскаду тим вище, чим менша потужність перетворювача і чим більша кількість енергії рекуперується в мережу. Тому АВК доцільно застосовувати, у першу чергу, для електроприводів великої потужності з тривалим режимом роботи і невеликим діапазоном регулювання швидкості (вентилятори, насоси, компресори тощо).

Рекуперация електроенергії підвищує енергетичну ефективність даного способу регулювання швидкості АД порівняно зі способами, у яких виділена в роторному колі енергія розсіюється у вигляді теплоти. Однак АВК має істотний недолік — низький коефіцієнт потужності, що викликає необхідність застосування компенсуючих пристроїв, наприклад, конденсаторів.

Погіршення коефіцієнта потужності пояснюється тим, що активна потужність, споживана електроприводом, дорівнює різниці

потужностей, підведеної до статора АД і рекуперованої перетворювачем. А реактивна потужність каскаду дорівнює сумі реактивних потужностей АД і перетворювача.

Коефіцієнт потужності АД залежить також і від числа пар полюсів, причому двигуни з меншим числом пар полюсів (з вищими швидкостями) мають вищий номінальний $\cos\varphi$.

Коефіцієнт потужності перетворювача визначається кутом випередження ввімкнення вентилів інвертора, що у свою чергу залежить від режиму роботи електропривода.

Середнє значення випрямленої ЕРС ротора:

$$E_{dp} = E_{dp0} S,$$

де $E_{dp0} = kcx_{2n}$ — максимальне значення випрямленої ЕРС ротора; E_{2n} — ЕРС ротора.

Середнє значення випрямленої ЕРС інвертора:

$$E_{du} = E_{du0} \cos \beta,$$

де $E_{du0} = kcx_{2r}$ — максимальне значення випрямленої ЕРС інвертора; β — кут випередження вмикання вентилів.

При роботі електропривода в робочій зоні частот обертання середнє значення ЕРС перетворювача близьке до нуля, а кут випередження ($\beta \approx \varphi$) дорівнює 90° . Таким чином, асинхронно-вентильний каскад, на відміну від приводу постійного струму чи вентильного двигуна, характеризується найбільшим споживанням реактивної енергії та найбільшим значенням коефіцієнтів спотворення й гармонік саме в зоні робочих швидкостей близьких до номінальної.

Величини коефіцієнтів спотворення і гармонічних складових тим більше, чим більш форма вихідної напруги перетворювача відрізняється від синусоїдальної. При $\beta = 90^\circ$ напруга перетворювача приймає пилкоподібну форму, причому середнє значення ЕРС дорівнює нулю, а амплітуда викидів напруги може досягати двократного значення номінальної ЕРС вторинної обмотки трансформатора.

Тому в реальних схемах при роботі АВК в області номінальних швидкостей перетворювач відключають, а ротор асинхронного двигуна закорочують, що слід віднести до недоліків електропривода.

Реалізація енергозберігаючих переваг АВК визначає вибір керуючої апаратури меншої потужності, ніж установлена потужність електродвигуна. Однак у цьому випадку можливий тільки реостатний пуск АД до половинної швидкості, що спричиняє переключення в силових колах під час руху і підвищення загальних втрат енергії при пуску.

Ще один недолік АВК – відсутність гальмівного режиму електропривода. Для здійснення електродинамічного гальмування необхідно відключити систему АВК, у ротор АД увімкнути трифазний реостат, а в дві фази статора подати постійний струм.

Середнє значення випрямленого струму:

$$I_d = \frac{E_{dp0}s - E_{du0}\cos\beta}{R_{cs}},$$

де R_{cs} – еквівалентний опір кола перетворювача АВК.

При $I_d = 0$ буде режим ідеального неробочого ходу:

$$E_{dp0}s = E_{du0}\cos\beta.$$

Ковзання, що відповідає кутовій швидкості ідеального неробочого ходу при заданому куті випередження β :

$$s_0 = \frac{E_{du0}}{E_{dp0}}\cos\beta.$$

Механічні характеристики в системі АВК (рис. 6.13) будуть лежати нижче природної:

$$I_d = \frac{E_{dp0}s - E_{dp0}s_0}{R_{cs}} = \frac{E_{dp0}}{R_{cs}}(s - s_0),$$

а критичний момент знижується на 15...17% у порівнянні з критичним моментом на природній характеристиці:

$$M = \frac{E_{dp0}^2}{\omega_0 R_{cs}^2} R_{cs0}(s - s_0),$$

де R_{es0} — еквівалентний опір кола перетворювача при ковзанні s_0 .

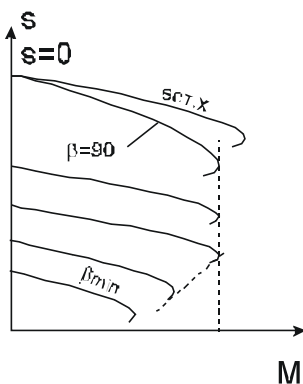


Рис. 6.13

На рис. 6.14 зображена структура асинхронно-вентильного каскаду з поліпшеними енергетичними показниками.

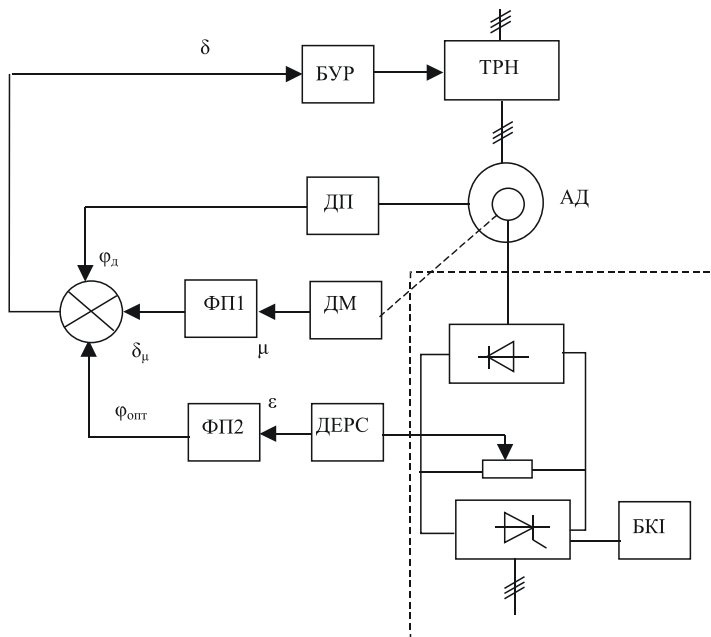


Рис. 6.14

Асинхронно-вентильний каскад містить АД з фазним ротором; регулятор напруги ТРН, керований блоком керування БКР; випрямлювально—інверторний блок із блоком керування БКІ. В асинхронно-вентильний каскад уведені датчики моменту ДМ і потоку ДП, перший функціональний перетворювач ФП1, що реалізує функцію виду:

$$\delta_{\mu} = d e^{\mu f} + g,$$

де d, f, g — постійні величини, датчик протиЕРС — ДЕРС, другий функціональний перетворювач ФП2, що реалізує функцію виду:

$$\Phi_{\text{опт}} = a \varepsilon^b + c,$$

де a, b, c — постійні величини.

Сигнал $\varepsilon = E_2/E_{2н}$ протиЕРС інвертора надходить на ФП2, де формується сигнал $\Phi_{\text{опт}}$ оптимального потоку (рис. 6.15,а), що відповідає номінальному навантаженню на валу АД. З датчика моменту знімається сигнал m моменту навантаження АД і надходить на ФП1, де формується сигнал δ_{μ} поправки до моменту (рис. 6.15б). У суматорі порівнюються сигнали $\Phi_{\text{опт}}$, δ_{μ} і сигнал φ_d потоку, що існує в зазорі АД. На виході суматора формується сигнал:

$$\delta = \Phi_{\text{опт}} + \delta_{\mu} + \varphi_d,$$

що впливає на блок керування регулятора. Напруга на виході ТРН змінюється доти, поки сигнал δ не стане рівним нулю ($\delta=0$), що відповідає оптимальному значенню потоку φ_d у зазорі АД з урахуванням реального навантаження на валу, тобто:

$$\varphi_d = \Phi_{\text{опт}} + \delta_{\mu}.$$

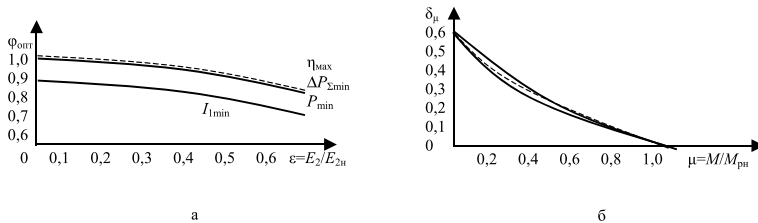


Рис. 6.15

В електроприводі можна забезпечити за допомогою другого нелінійного блоку різні закони керування, зокрема: по мінімуму струму $I_{\min}$ статора (рис. 6.15,а), мінімуму сумарних втрат $\Delta P_{\Sigma \min}$, мінімуму споживаної потужності $P_{\min}$, максимуму ККД – $\eta_{\max}$. У загальному випадку на другому нелінійному блоці набирається залежність між відносною величиною додаткової проти ЕРС інвертора і відносною величиною $\Phi_{\text{опт}}$ оптимального потоку двигуна.

3. АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД З ФАЗОВИМ КЕРУВАННЯМ

Відомо, що найбільшим споживачем електроенергії в основному є електроприводи змінного струму, особливо з асинхронними електродвигунами, що споживають близько половини електроенергії, якщо врахувати, що основна маса цих електродвигунів працює з недовантаженням, то очевидний їх істотний вплив на помітне зниження ККД і $\cos\phi$ як самих електродвигунів, так і електропривода в цілому.

Найпростіші з таких пристроїв виконуються за схемою паралельно ввімкнених тиристорів і використовуються для забезпечення «м'якого» запуску двигуна. Прикладом таких пристроїв можуть служити апарати «м'якого пуску» серії SIKOSTART фірми «Siemens», що забезпечують для двигунів потужністю до 710 кВт на базі мікроконтролерів керування ефективним значенням напруги на клеммах двигуна, чим досягається вплив на момент і струм. Поряд з численними можливостями налаштування для м'якого старту (зростання напруги, обмеження струму, пускового імпульсу тощо), що дозволяють узгодження з різними видами навантаження (насос, вентилятор) в апарат уведені додаткові функції керування після старту і під час відключення (гальмування). У СНД випускаються тиристорні пускові пристрої потужністю 75-400 кВт (УПТ-2), що забезпечують плавний розгін двигуна під навантаженням з обмеженням пускового струму до $4I_{\text{ном}}$, бездугову комутацію асинхронного двигуна до мережі (функція контактора), захист двигуна від перевантаження, обриву фази, короткого замикання, підвищення напруги, перевищення припустимої температури обмоток і підшипників, пуск механізмів з підвищеним моментом рухання (понад $2M_n$), безударне закриття клапанів зворотного ходу в гідравлічних системах (плавна зупинка двигуна насоса),

контроль ізоляції обмоток двигуна, примусове гальмування електродвигуна.

У розробці і проектуванні енергозберігаючих систем автоматизованого електропривода з АД з високими техніко-економічними й енергетичними показниками важливим є визначення умови мінімізації втрат в електродвигуні. Оптимізація керування особливо характерна для механізмів, що працюють у тривалих режимах, де забезпечення високих енергетичних показників має важливе значення.

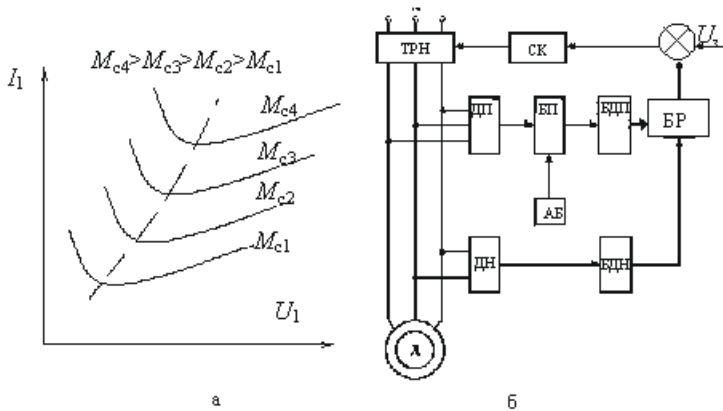


Рис. 6.16

На рис.6.16а наведені залежності струму від напруги при різних моментах навантаження. Як видно, при кожному навантаженні АД є така напруга, при якій споживаний двигуном струм мінімальний. Штрихова лінія, проведена через точки мінімумів струму для кожного навантаження, визначає закон регулювання напруги у функції струму. При реалізації такого закону при будь-якому навантаженні з мережі споживається мінімальний струм. На рис. 6.16б представлена структура енергозберігаючого привода з екстремальним керуванням. До складу входять електродвигун Д; тиристорний регулятор напруги ТРН; система керування СК регулятором; датчик напруги ДН електродвигуна, підімкнений до блоку диференціювання сигналу напруги БДН; датчик потужності ДП електродвигуна, підключений до блоку перемноження БП; арифметичний блок АБ; блок диференціювання сигналу потужностей БДП; блок розподілу БР.

Зменшення втрат електроенергії в асинхронних електроприводах при їх роботі з навантаженням, що змінюється, досягається

регулюванням напруги на статорі АД у функції навантаження або струму.

У робочому режимі електродвигуна на виходах датчиків напруги і моменту виділяються сигнали. Сигнал з датчика напруги надходить у блок диференціювання сигналу напруги. Сигнал, що надходить з датчика моменту, перемножується із сигналом, пропорційним величині $(1-\eta_m)$, що надходить з арифметичного блоку. На його виході формується сигнал, пропорційний ΔP_Σ сумі втрат в електродвигуні, що складаються з електромагнітних і механічних втрат. Продиференційований сигнал $d\Delta P/dt$ втрат потужності в БДМ поділяється на диференційований сигнал d/dt у блоці розподілу. Відповідно, на виході цього блоку одержимо сигнал $(d\Delta P/dt)/(d/dt)=d\Delta P/d$.

Залежно від навантаження сигнал, рівний $d\Delta P/d$, змінює свій знак. Так, для забезпечення екстремального регулювання вихідне значення цього сигналу повинно дорівнювати нулю, у суматорі виконується віднімання чи додавання сигналів, що забезпечує роботу електродвигуна в екстремальній зоні регулювання при різних значеннях навантаження на валу.

Таким чином, система асинхронного електропривода з екстремальним керуванням забезпечує мінімізацію сумарних втрат АД при будь-якому рівні навантаження. Це призводить до істотного підвищення ККД електропривода й ефективного використання встановленої потужності АД.

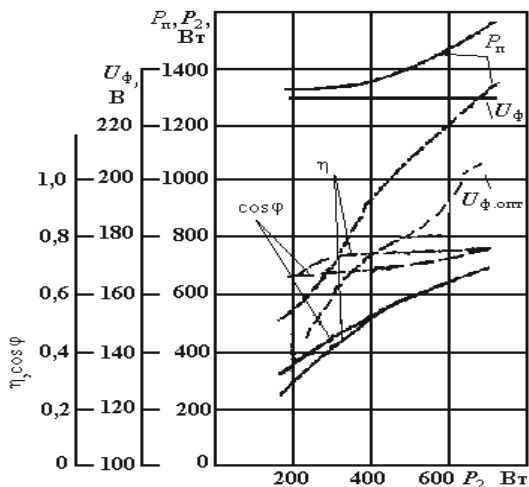


Рис. 6.17

На рис. 6.17 зображені робочі характеристики електропривода зі змінним навантаженням, що живиться від мережі частотою 50 Гц і номінальною напругою 220 В (суцільні лінії) і від енергозберігаючого пристрою (пунктирні).

Як видно з характеристик, при зменшенні навантаження від номінальної ($P_{2н}=750$ Вт) до мінімальної (200 Вт) при живленні АД (4АМ71В) від енергозберігаючого пристрою в порівнянні з нерегульованим електроприводом, споживана двигуном потужність P_n змінюється від 8,7 до 61%, коефіцієнт корисної дії зростає від 7 до 43%, коефіцієнт потужності $\cos\phi$ від 6 до 36%. Рівень оптимальної фазної напруги $U_{ф.опт}$ при тих само діапазонах зміни потужності на валу АД зменшується до 50% номінального $U_{ф.н.}$ Таким чином, застосування енергозберігаючого пристрою істотно поліпшує техніко-економічні й енергетичні показники електропривода з фазовим керуванням.

4. ГЛИБОКОРЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ІЗ СИНХРОННИМИ МАШИНАМИ (ВЕНТИЛЬНИЙ ДВИГУН)

4.1. Способи керування вентильними двигунами

В наш час найбільше поширення одержали вентильні двигуни постійного (рис. 6.18а) і змінного струму (рис. 6.18б) з перетворювачами, що працюють у режимі джерела струму.

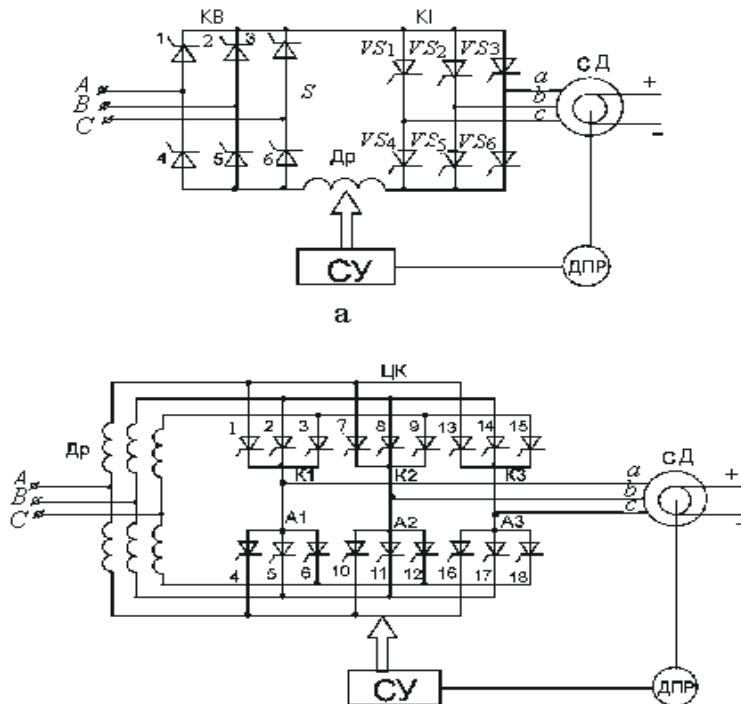


Рис. 6.18

На відміну від частотно-регульованого приводу, у вентильному двигуні комутація тиристорів здійснюється за рахунок ЕРС двигуна (машинна). Машинна комутація дозволяє відмовитися від високовольтних громіздких реактивних елементів у інверторі. Це значно спрощує схему, зменшує її габаритну потужність і в остаточному підсумку поліпшує якість перетворення енергії. Але при пуску і низьких швидкостях відбувається зрив комутації через відсутність чи малу величину ЕРС. У вентильному двигуні постійного струму можливі такі способи пуску:

- асинхронний;
- за схемою ВД зі штучною комутацією;
- за схемою ВД із примусовою комутацією.

Перший спосіб при своїй удаваній простоті має серйозні недоліки — пуск некерований і необхідні перемикання в силових, як правило, високовольтних колах.

Другий спосіб пуску передбачає застосування автономного інвертора, у якому використовується реактивна енергія комутуючих елементів (ємностей і дроселів). У цьому випадку помітно ускладнюється схема, збільшуються вага і вартість інвертора.

Третій спосіб пуску з примусовою комутацією здійснюється відсіченням керуючих імпульсів циклічним переведенням випрямляча в інверторний режим на час комутації тиристорів інвертора. Цей спосіб найкращий, оскільки вимагає мінімальних витрат. Характерними недоліками способу є зменшення пускового моменту і деяке збільшення споживаної реактивної потужності.

Найпростіше проблема пуску вирішується в системі з циклоконвертором (рис. 6.18 б), у якій функції випрямлення й інвертування виконують ті самі тиристири, чим досягається перетворення напруги і частоти джерела безпосередньо в напругу і частоту двигуна. Така система містить більшу кількість тиристорів, ніж перетворювач з ланкою постійного струму, але завдяки відсутності пускових пристроїв, однократному перетворенню енергії і зменшенню еквівалентного струму тиристора вона економічна і надійна.

Трифазний мостовий циклоконвертор складається із шести груп тиристорів. Катодні групи формують позитивні напівхвилі струму навантаження, анодні — негативні. Різнополярні тиристорні групи кожної фази двигуна вмикаються по черзі, чим виключається поява в навантаженні постійної складової зрівнювального струму.

Послідовність вмикання груп визначається датчиком положення ротора і залежить від заданого напрямку обертання і положення ротора двигуна щодо магнітних осей фаз статора.

Тиристири всередині груп відкриваються сигналами, синхронізованими з частотою мережі живлення. Число вмикань кожного тиристора в групі залежить від співвідношення частот мережі й обертання двигуна. Коло протікання струму через статорні обмотки двигуна створюється одночасним вмиканням двох тиристорів у різних фазах мережі і статора.

У схемі з циклоконвертором природна комутація здійснюється у всьому діапазоні швидкостей роботи ВД як між тиристорами в працюючих групах, так і між тиристорами однополярних груп. Останнє відбувається при збігу в часі сигналів на перемикання фаз мережі і двигуна. Машинна комутація виконується за рахунок ЕРС двигуна між тиристорами однополярних груп при частотах вище 0,1...0,15 частоти обертання двигуна.

Вентильний двигун з комутатором струму характеризується двома режимами роботи: міжкомутаційним і комутаційним. У першому режимі струм протікає по двох фазах, у другому — по трьох. Тривалість міжкомутаційного періоду для кожної фази складає $\frac{2\pi}{m} - \gamma$, комутаційного періоду — γ .

Схеми електричних кіл ВД постійного струму зображені на рис. 6.19

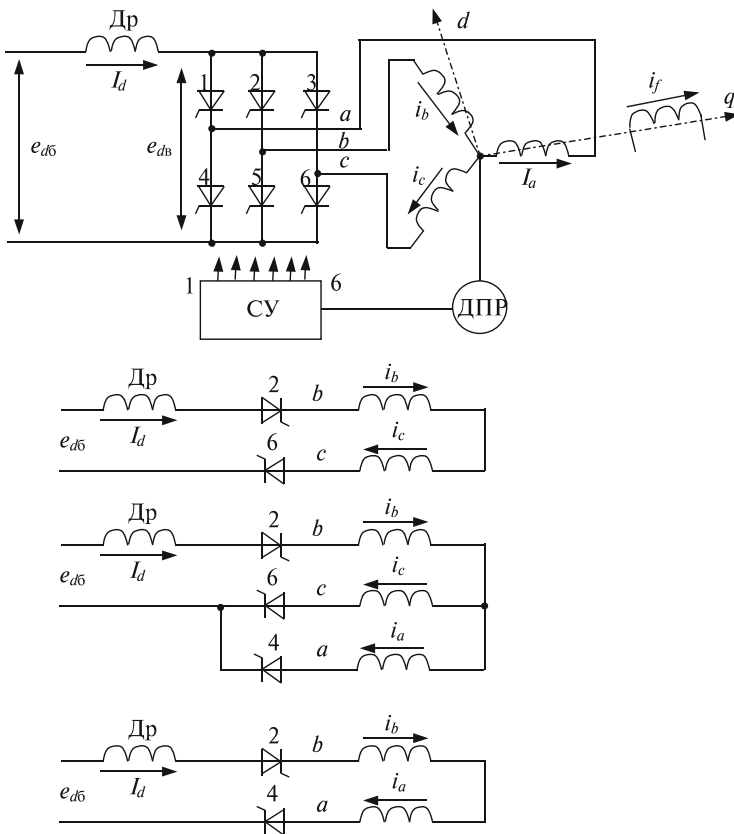


Рис. 6.19

Нехай у довільний момент часу, що відповідає черговому міжкомутаційному періоду, тиристори 2 і 6 відкриті, інші закриті. Синхронна машина навантажена по двох колах:

$$i_a = 0, \quad i_b = I_d, \quad i_c = -I_d,$$

де I_d — середнє значення струму двигуна.

При зміні знака лінійної ЕРС E_{ca} на тиристорі 4 анодна напруга стає позитивною, і після подачі на його керуючий електрод імпульсу починається комутаційний режим:

$$i_a = -i_k, \quad i_b = I_d, \quad i_c = -I_d + i_k,$$

де i_k — струм комутації.

При $i_c = 0$ тиристор 6 закривається, і починається наступний міжкомутаційний період

$$i_a = -I_d, \quad i_b = I_d, \quad i_c = 0.$$

Порівняння виразів показує, що вони відрізняються лише індексами, що циклічно змінюються залежно від положення ротора. Початок комутаційного періоду визначається кутовим положенням ротора стосовно осей фаз статора і задається системою керування інвертором чи датчиком положення ротора. Початок же міжкомутаційного періоду залежить від тривалості процесу комутації і визначається величинами струмів і комутаційних опорів.

Робота синхронної машини разом з вентильним комутатором, керованим за положенням ротора, є циклічною послідовністю нормальної роботи двох фаз і міжфазних коротких замикань. В позакомутаційні інтервали МРС статора залишається нерухомою, а за час комутації вона робить поворот на 60° . У результаті в повітряному зазорі СМ знаходяться два потоки — індуктора і реакції якоря, що обертаються в статичному режимі рівномірно з кутовою частотою ротора. У шестипульсній схемі МРС статора за один оберт валу набуває шістьох дискретних положень.

Формування результуючого магнітного потоку залежно від кута повороту ротора двигуна пояснює рис. 6.20.

Завдяки згладжувальній дії магнітної системи СМ у діапазоні частот машинної комутації магнітний потік наводить в обмотках статора практично синусоїдальні ЕРС.

Фазні напруги, ЕРС і струми вентильного двигуна зображені на рис. 6.21.

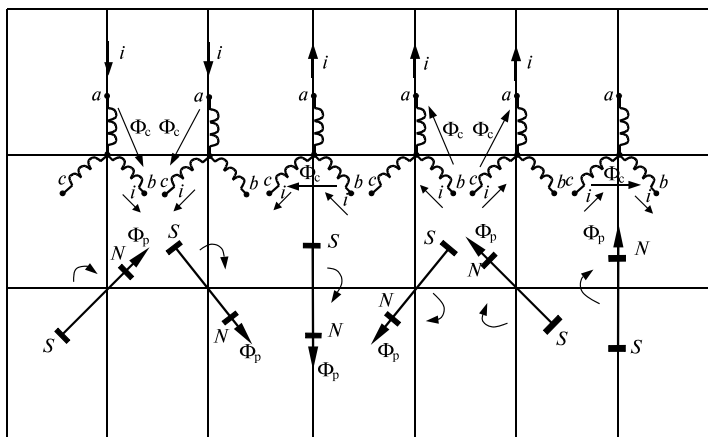


Рис. 6.20

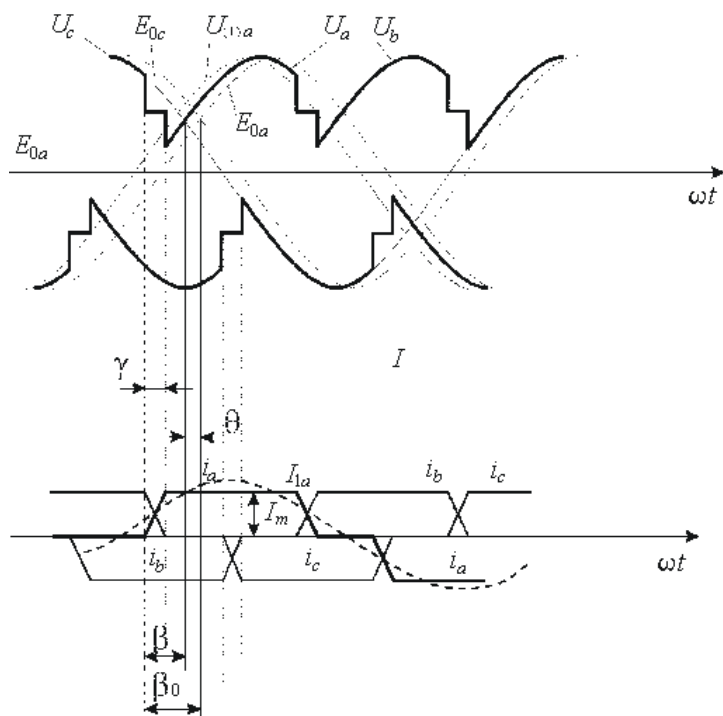


Рис. 6.21

Смуга пропускання комутатора ВД регулюється зміною кута випередження β_0 чи β (кути між струмом і відповідно ЕРС неробочого ходу та напругою машини).

Існують такі способи керування комутатором ВД.

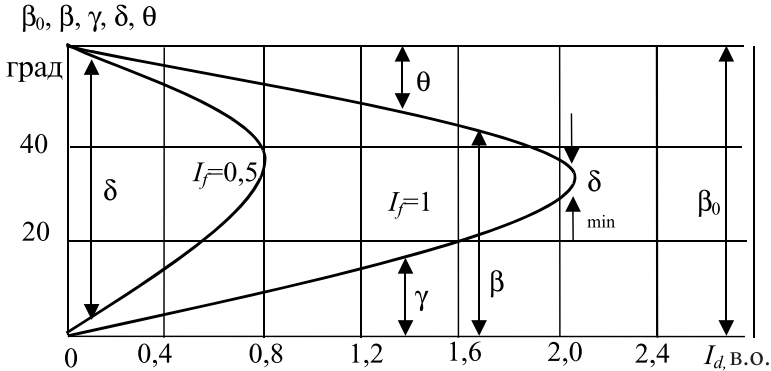


Рис. 6.22

Перший, найпростіший, спосіб керування (рис. 6.22) полягає в підтримці постійного значення кута випередження:

$$\beta_0 = \text{const},$$

де $\beta_0 = \beta + \theta$; θ — кут навантаження синхронної машини; $\beta = \gamma + \delta$; γ — кут комутації (враховує комутаційне перекриття фаз); δ — кут запасу (враховує похибку системи керування і час відновлення замикаючих властивостей тиристорів).

Для реалізації способу необхідний тільки датчик положення ротора, статор якого зрушується на необхідний кут випередження 40...60 ел. град. у напрямку проти обертання машини. Величина кута пропорційна максимальному значенню струму. При цьому кут залишається постійним у всіх режимах роботи двигуна, а процес реверсування швидкості приводу не піддається автоматизації.

При другому способі керування (рис. 6.23) підтримується постійним кут випередження $\beta = \text{const}$. Як джерело напруги синхронізації необхідний датчик напруги статора ДНС, а для задання кута випередження — система імпульсно-фазового керування. Причому частота розгортки змінна 0...50 Гц.

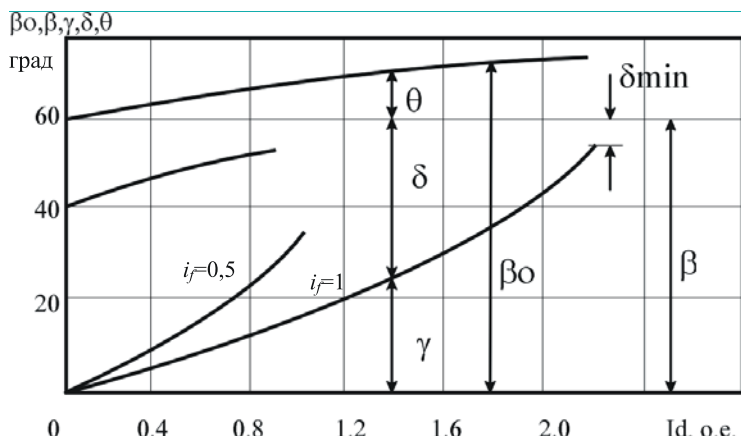


Рис. 6.23

Третій спосіб керування (рис.6.24) полягає в підтримці постійної величини кута запасу на мінімальному рівні:

$$\begin{aligned} \beta_0 = \beta_{\min} = f(\gamma, \theta) & \quad \text{нпу} \quad \delta = \delta_{\min} = \text{const}; \\ \beta = \beta_{\min} = f(\gamma) & \quad \text{нпу} \quad \delta = \delta_{\min} = \text{const}. \end{aligned}$$

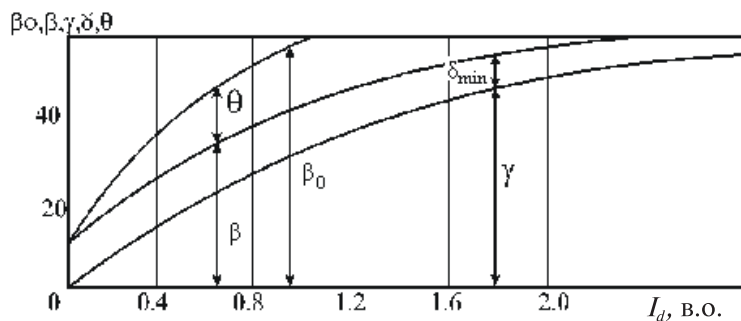


Рис. 6.24

Спосіб вимагає наявності датчиків кутів комутації і навантаження, а також системи імпульсно-фазового керування, синхронізованої від ДПР чи ДНС.

Аналіз кутових характеристик ВД для різних законів керування показує, що жорсткість характеристик і максимальне значення струму, при якому відбувається перекидання комутатора, збільшу-

ються з ростом струму збудження і кута випередження. За переважувальною спроможністю найкращим способом керування є третій спосіб. Мінімальний кут запасу обмежений комутаційною стійкістю перетворювача і лежить у межах 5...10 ел.град. частоти мережі живлення.

Електромеханічні характеристики ВД для першого способу керування зображені на рис. 6.25 і рис. 6.26.

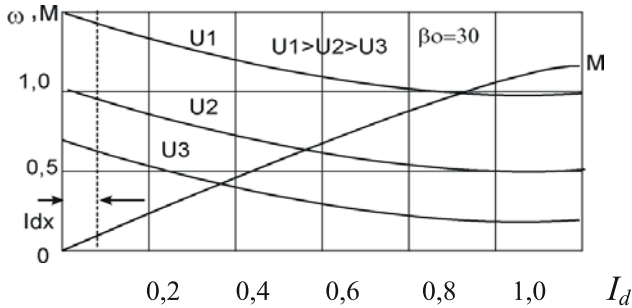


Рис. 6.25

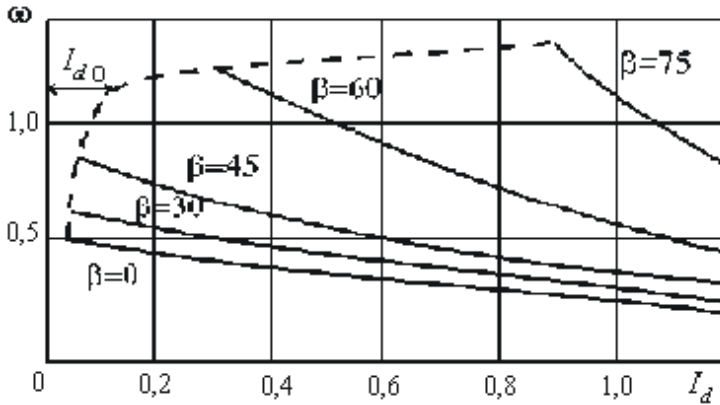


Рис. 6.26

Аналіз кривих показує, що жорсткість характеристик змінна і зростає зі зменшенням кута випередження і збільшенням струму двигуна. При зміні підведеної напруги швидкісні характеристики зберігають свою жорсткість. Статичні характеристики при третьому способі керування аналогічні зображеним, але мають більшу жорсткість і лінійність.

На рис. 6.27 зображена залежність ЕРС вентильного двигуна від кута випередження. З рисунка видно, що в режимі неробочого ходу при тій же напрузі, підведений до комутатора, середнє значення ЕРС дорівнює йому при кутах випередження, близьких до нуля і значно перевищує при зростанні кута β .

Вентильний двигун описується системою нелінійних диференціальних і алгебраїчних рівнянь високого порядку, одержати аналітичне розв'язання яких в загальному виді неможливо. Однак розрахунки й експерименти показують, що при постійних струмі збудження і куті випередження, що лежать у межах

$$I_f \geq 0,8 I_{fн} \text{ і } 20^\circ \leq \beta \leq 60^\circ,$$

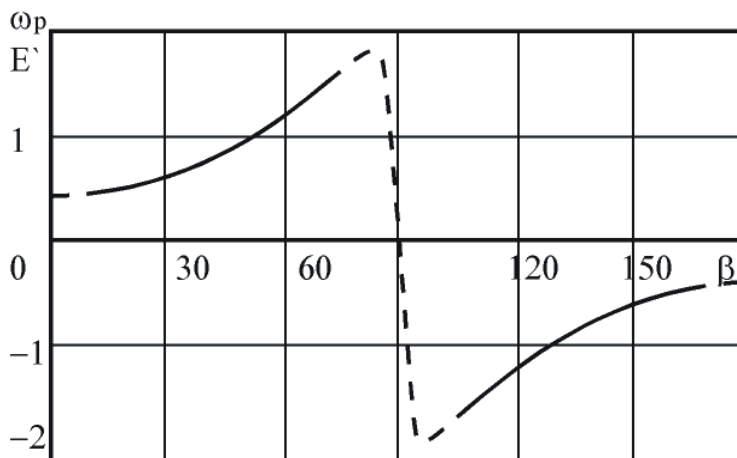


Рис. 6.27

вентильний двигун можна представити лінійним об'єктом (рис. 6.28).

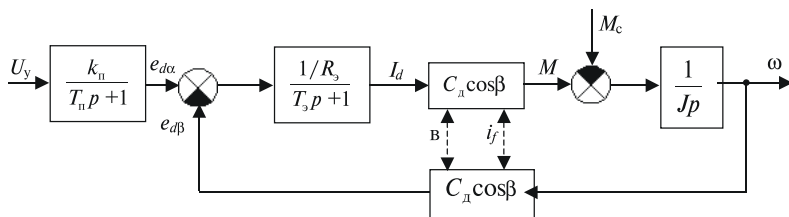


Рис. 6.28

4.2. Оцінка якості перетворення енергії вентильним двигуном

Енергетичний режим роботи електропривода характеризується величинами вихідних струмів і напруг перетворювача, їх гармонічним складом, споживаною реактивною енергією та іншими енергетичними показниками.

Криві струмів і напруг якоря вентильного двигуна мають складну форму, що залежить від співвідношення частот на вході і виході перетворювача, від числа фаз і кутів випередження, комутації і запасу.

Для найвірогіднішої оцінки гармонічного складу електричних величин використовуються електронні гармонічні аналізатори, на вхід яких подаються реальні параметри. Однак з метою виявлення загальних закономірностей проводять аналітичне дослідження вихідних параметрів перетворювача з урахуванням реальних форм кривих струмів і напруг.

Для визначення гармонічного складу струму статора його криву розкладають у ряд Фур'є. Струм статора ВД містить гармоніки порядку:

$$n = 6p \pm 1, \text{ тобто } 1, 5, 7, \dots$$

Коефіцієнт Фур'є для струму ВД:

$$b(6p \pm 1) = I_{m(1)} \frac{\sin(6p \pm 1) \frac{\gamma}{2}}{(6p \pm 1)^2 \sin \frac{\gamma}{2}},$$

де $I_{m(1)} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi\gamma} \sin \frac{\gamma}{2} I_m$ — амплітуда першої гармоніки струму;

I_m — амплітудне значення кривої струму.

На рис. 6.29 зображено криві, що ілюструють ступінь згасання гармонік струму при збільшенні кута комутації. Тут: 1 — перша гармоніка, 2 — п'ята, 3 — сьома, 4 — одинадцята.

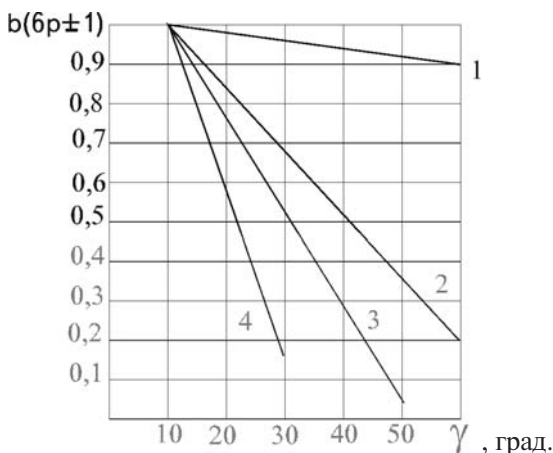


Рис. 6.29

З рисунка видно, що амплітуда першої гармоніки майже не залежить від кута комутації, а амплітуди вищих гармонічних помітно зменшуються зі збільшенням навантаження, причому ступінь згасання збільшується зі зростанням номера гармоніки. У режимі критичних перевантажень приводу форма струму наближається до синусоїдального, і з вищих гармонік залишається лише п'ята. Діюче значення струму двигуна зменшується зі збільшенням кута комутації і при $\gamma=60^\circ$ визначається практично величиною 1-ї гармоніки.

Коефіцієнти Фур'є для кривої напруги громіздкі і не містять парних гармонік. Лінійчатий спектр кривої напруги залежно від способу керування зображений на рис. 6.30 ($\beta=60^\circ$, $\gamma=20$; $\beta_{\min}=f(\gamma)$, $\gamma=20$, $\delta_{\min}=10^\circ$).

Як ми бачимо на рисунку, спосіб керування значно впливає на величини амплітуд гармонічних складових. Так, для $\beta=\text{const}=60^\circ$ амплітуда першої гармоніки зменшується до $0,7 U_m$, а амплітуди вищих гармонічних помітно вище, ніж для $\beta_{\min}=f(\gamma)$. Для способу $\beta_{\min}=f(\gamma)$ амплітудне значення основної гармоніки складає $0,97 U_m$, а найбільшої, сьомої – $0,2 U_{m(1)}$.

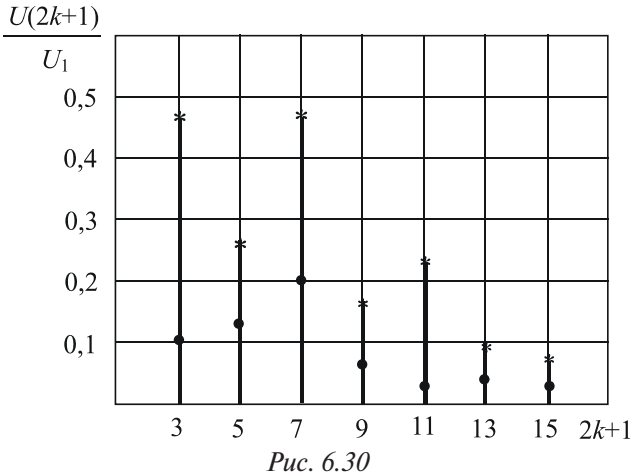


Рис. 6.30

Невиправдане збільшення кута запасу при $\beta = \text{const}$ призводить до різкого зменшення першої гармоніки напруги і збільшення амплітуд вищих гармонічних, що спричиняють шкідливий вплив на джерело енергії й електропривод. З метою зменшення кутів комутації і запасу необхідно проектувати силову установку з найменшими комутаційними індуктивностями і реакцією якоря.

Показники якості перетворення енергії ВД оцінюються показниками струму, напруги і потужності.

Зв'язок між амплітудним I_m , середнім I_d і діючим I значеннями струму за половину періоду визначаються коефіцієнтами форми k_ϕ і амплітуди k_a :

$$k_\phi = \frac{I}{I_d}; \quad k_a = \frac{I_m}{I},$$

$$\text{де } I_d = \frac{2}{3} I_m.$$

Гармонічний склад струму якоря двигуна характеризується коефіцієнтами пульсацій k_n , спотворення k_c і гармонік k_{rp} :

$$k_n = \frac{1}{I_d} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{(6p\pm 1)}^2}, \quad k_c = \frac{I_{(1)}}{I}, \quad k_{rp} = \frac{1}{I_{(1)}} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{(6p\pm 1)}^2},$$

де $I_{(1)}$, $I_{(6p\pm 1)}$ — діючі значення першої і вищої гармонік струму.

Для інженерних розрахунків при орієнтовній оцінці якості перетворення енергії показники струму досить визначити з урахуванням основної і кількох перших гармонік:

$$k_{\phi} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\gamma}, \quad k_a = \frac{\pi\gamma}{2\sqrt{6} \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad k_n = \frac{0,1}{\gamma} \sin 5 \frac{\gamma}{2},$$

$$k_i = \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\sqrt{\sin^2 \frac{\gamma}{2} + 0,01 \sin^2 5 \frac{\gamma}{2}}}, \quad k_{rp} = 0,045 \frac{\sin 5 \frac{\gamma}{2}}{\sin \frac{\gamma}{2}},$$

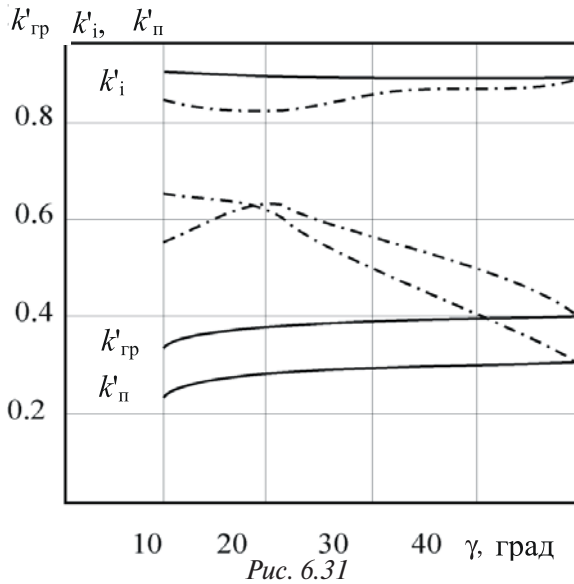
Аналіз числових значень коефіцієнтів показує, що зі збільшенням навантаження двигуна величини коефіцієнтів наближаються до значень характерних для синусоїдального струму.

Показники, що характеризують форму кривої напруги двигуна і її гармонічний склад, знаходяться в складній функціональній залежності від способу керування приводом, а також кутів випередження, комутації і запасу. Одержати аналітичні залежності для них не є можливим. Тому їх розраховують за допомогою ЕОМ за формулами

$$k'_{\phi} = \frac{U}{U_d}, \quad k'_a = \frac{U_m}{U}, \quad k'_n = \frac{1}{U_d} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(2k+1)}^2},$$

$$k'_i = \frac{U_{(1)}}{U}, \quad k'_{rp} = \frac{1}{U_{(1)}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(2k+1)}^2},$$

$$\text{де } U_d = k_{ex} U \cos \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2}.$$



На рис. 6.31 зображено коефіцієнти спотворення, гармонік і пульсацій для способів керування $\beta=60^\circ=\text{const}$ і $\beta_{\min}=f(\gamma)$ при $\delta_{\min}=10^\circ$. Тут: — $\beta_{\min}=f(\gamma)$ при $\delta_{\min}=10^\circ$; --- $\beta=60^\circ=\text{const}$.

Як видно з рисунка, показники якості напруги двигуна значно погіршуються зі збільшенням кутів випередження і запасу. При цьому для способу керування $\beta_{\min}=f(\gamma)$ характерні вищі показники, ніж для $\beta=\text{const}$.

Невиправдане збільшення кута запасу призводить до збільшення коефіцієнтів, що характеризують змінну складову напруги (k_n , K_r) і зменшення коефіцієнта спотворення (його величина повинна наближатися до одиниці).

Несинусоїдальність струмів і напруг істотно впливає на енергетику ВД (додаткові втрати в сталі, міді, ККД, коефіцієнт потужності тощо). Вентильний двигун можна представити у вигляді ряду еквівалентних електричних машин змінного струму зі спільним валом. Для основної гармоніки еквівалентним двигуном є реальний синхронний двигун. Для вищих гармонік еквівалентними будуть асинхронні двигуни, включені на напруги своєї частоти з параметрами, що відповідають частоті вищої гармоніки. Тому корисною потужністю у ВД є не сумарна активна потужність P_Σ , а потужність $P_{(1)}$ від перших гармонік напруги і струму.

Коефіцієнт відносної потужності p^* і коефіцієнт використання споживаної потужності вентильного двигуна:

$$p^* = \frac{P_\Sigma}{P_{(1)}}, \quad k_p = \frac{1}{p^*},$$

$$\text{де } P_\Sigma = k_{cx} U I_m \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \cos \frac{\gamma}{2}, \quad P_{(1)} = 3 U_{(1)} I_{(1)} \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right).$$

Оскільки в кожній фазі машини у ВД за один оберт вала струм протікає протягом:

$$2\left(\frac{2}{3}\pi + \gamma\right),$$

то статорні обмотки використовуються гірше, ніж у звичайному СД. Тому при заданому моменті навантаження фазні обмотки машини будуть нагріватися сильніше, тобто ККД приводу:

$$\eta_{\text{вд}} = \frac{\eta_c C_B}{\eta_c (C_B - 1) + 1},$$

де η_c — ККД синхронного двигуна; $C_B = \frac{\gamma}{2} \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}$ — коефіцієнт використання ВД.

Для того, щоб синхронна машина розвивала таку саму механічну потужність у схемі вентильного двигуна, як і при синусоїдальній напрузі, необхідно вибирати двигун на велику габаритну потужність. Нехтуючи постійними втратами СД, коефіцієнт габаритної потужності визначимо за формулою:

$$C_r = \sqrt{1 + \frac{p^* - \eta_c}{1 - \eta_c}}.$$

Повна потужність синхронного двигуна в схемі ВД визначається трьома складовими:

$$S = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q^2 + P_c^2} = \frac{k_{\text{cx}}}{k_c} UI_m,$$

де $Q = P_{\Sigma} \operatorname{tg}\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)$ — споживана реактивна потужність

СД; $P_c = k_{\text{cx}} UI_m \sqrt{\frac{1}{k_c^2} - 1}$ — потужність спотворень.

Коефіцієнт потужності на затискачах статора СД:

$$k_m = \frac{P_{(I)}}{S} = k_c \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}},$$

де $\frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}}$ — величина, що враховує припущення $U_{(I)} \gg$

$U; \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) = k_s$ — коефіцієнт зсуву.

Залежності ККД, коефіцієнта габаритної потужності, коефіцієнта потужності і коефіцієнта корисного використання споживаної потужності ВД від кутових параметрів і способів керування представлені на рис. 6.32 – 6.35.

З рисунків видно, що показники якості перетворення потужності ВД так само, як і показники напруги, значно вищі для способу керування $\beta_{\min} = f(\gamma)$, ніж для $\beta = \text{const}$.

При способі керування ($\beta = \text{const}$) кут випередження залишається постійним у всіх режимах роботи приводу і розраховується відповідно до максимальної величини навантаження. При цьому струму неробочого ходу відповідає найбільше значення кута запасу (40...50), хоча для відновлення запираючих властивостей тиристорів достатньо 3...5.

Якщо кут випередження підтримувати постійним, то $\cos\varphi$ залежить від навантаження:

$$\cos\varphi = \frac{\gamma}{2},$$

і синхронний двигун працює з найбільшим коефіцієнтом потужності і найкращими енергетичними показниками лише в номінальному режимі. В усіх інших режимах, тобто зі зменшенням навантаження привід працює з погіршеними енергетичними показниками.

Навпаки, виконання способу керування $\beta_{\min}=f(\gamma)$ при $\delta_{\min}$ забезпечує роботу СД із максимальною величиною коефіцієнта потужності:

$$\varphi = \delta_{\min} + \frac{\gamma}{2},$$

тобто з мінімальним споживанням реактивної енергії і найкращими енергетичними показниками при всіх можливих значеннях частот машинної комутації і моментів навантаження. При реальних кутах комутації і малому часі відновлення вентилів коефіцієнт потужності прямує до одиниці, а ККД вентильного двигуна – до ККД синхронного двигуна.

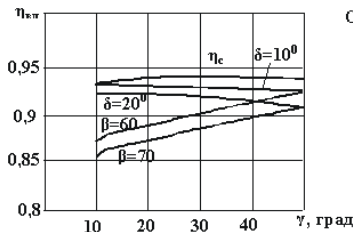


Рис. 6.32

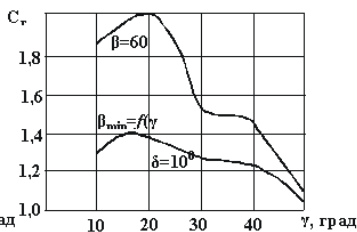


Рис. 6.33

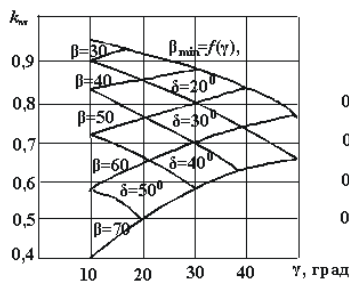


Рис. 6.34

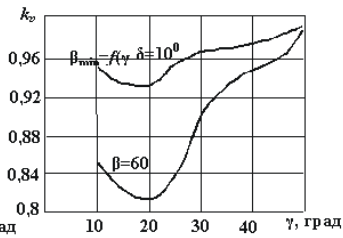


Рис. 6.35

4.3. Оптимізація параметрів електроустаткування приводу з вентильними двигунами

З урахуванням сформованої традиції застосування синхронних машин для потужних вентиляторних і компресорних установок ВД є одним з найбільш раціональних типів регульованого приводу турбомеханізмів. Тому з погляду енергозбереження першорядне значення має спрощення системи і мінімізація встановленої потужності силового устаткування.

Установлена потужність устаткування ВД залежить від технологічних вимог, що визначають в остаточному підсумку структуру (схему) перетворювача, спосіб комутації вентилів, закон керування комутатором і спосіб керування випрямлячем.

Пуск турбомеханізмів звичайно здійснюється зі статичним навантаженням, що не перевищує номінальних значень, тому для турбомеханізмів варто рекомендувати найпростішу схему ВД із ланкою постійного струму. Застосування залежних інверторів струму, вентилялі яких комутуються за рахунок ЕРС двигуна, викликає деяке зниження коефіцієнта використання, але дозволяє значно спростити силову схему і зменшити потужність устаткування. Застосування автономних інверторів зі штучною комутацією, вентилялі яких комутуються за рахунок реактивної енергії, що накопичена в додаткових комутаційних пристроях — ємностях та індуктивностях, — підвищує коефіцієнт використання двигуна. Однак при цьому ускладнюється схема і збільшується встановлена потужність перетворювача.

У табл.6.2 наведені розрахункові дані на вибір синхронної машини і тиристорного перетворювача залежно від способу керування ($\beta=60^\circ=\text{const}$ і $\beta_{\min}=f(\gamma)$ при $\delta_{\min}=10^\circ$) при заданій розрахунковій потужності $P_{\text{розр}}=3000$ кВт. При розрахунку річної витрати електроенергії прийнято, що вентиляторна установка головного провітрювання працює безперервно протягом року.

Таблиця 6.2

Параметр	$\beta=60^\circ$	$\beta_{\min}=f(\gamma)$ при $\delta_{\min}=10^\circ$
$P_{\text{розр.}}$, кВт	3000	3000
$C_{\text{гmax}}$	2	1,4
$P_{\text{розр.ВД}}$, кВт	6000	4200
$U_{\text{н}}$, В	6000	6000
$k_{\text{с}}$	0,67	0,93
$I_{\text{н}}$, А	861	435
$I_{\text{д}}$, А	1076	544
$U_{\text{дmax}}$, В	8100	8100
тип тиристора	T-500-15	T-320-15
$N_{\text{вен}}$, шт.	8	8
$M_{\text{вен}}$, шт.	1	1
$I_{\text{д}} U_{\text{до}}$, кВА	8716	4406
W , кВт· год	52560000	36792000

Потужність синхронної машини у ВД у порівнянні з заданою потужністю при синусоїдальному живленні визначається коефіцієнтом габаритної потужності. Максимум функції:

$$C_r = f(\beta, \gamma)$$

визначає розрахункову потужність машини. Так, для способу керування $\beta=60^\circ$ і $\beta_{\min}=f(\gamma)$ відповідно маємо 2 і 1,4. Розрахункова потужність СД у схемі вентильного двигуна:

$$P_{\text{розр.ВД}} = P_{\text{розр}} C_{\text{гmax}}.$$

За розрахунковою потужністю і максимальною швидкістю з каталогів вибирається двигун:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{розр.ВД}}, n_{\text{н}} \approx n_{\text{max}}.$$

Номинальний струм двигуна визначається з формул:

- для способу керування $\beta = \text{const}$:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos\left(\beta - \frac{\gamma_{\text{н}}}{2}\right)};$$

- для способу керування $\beta_{\min} = f(\gamma)$ при $\delta_{\min} = \text{const}$:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos\left(\delta_{\min} + \frac{\gamma_n}{2}\right)}.$$

Середнє значення струму у вентильному перетворювачі:

$$I_d = \frac{\pi\gamma}{2\sqrt{3} \sin \frac{\gamma}{2}} I_n,$$

$$\text{де } I_d = \sqrt{\frac{3}{2}} I_n.$$

Вибір тиристорного перетворювача при відомій схемі зводиться до вибору типу і параметрів тиристорів. Для мостових трифазних схем максимальна величина середнього значення випрямленої напруги U_{do} , номінальна лінійна напруга двигуна U_n і лінійна напруга мережі U_c пов'язані в такий спосіб:

$$\frac{U_{do}}{U_n} = \frac{U_{do}}{U_c} = 1,35.$$

Кількість послідовно включених вентилів у плечі моста перетворювача:

$$N \geq \frac{U_{do}}{U_T} k_{zu},$$

де U_T — припустима напруга на тиристорі (клас напруги); $k_{zu} = 1,5 \dots 2$ — коефіцієнт запасу по напрузі.

Кількість паралельних гілок:

$$M \geq \frac{I_{d\max}}{3I_{dT}} k_{zi},$$

де I_d — середнє значення струму вентиля; $k_{zi} = 1,5 \dots 2$ -коефіцієнт запасу по струму.

Для першого варіанту можна використовувати тиристри п'ятнадцятого класу Т-500, для другого Т-320.

Габаритна потужність тиристорного перетворювача:

$$P_{\text{тп}} = I_d U_{\text{d0}}, \text{кВА.}$$

Витрати електроенергії за рік, кВт • год/рік:

$$W = k_0 PT,$$

де T — число годин роботи привода за рік, год/рік; k_0 — коефіцієнт, що враховує втрати енергії при зупинці привода.

Аналіз таблиці показує, що потужності електродвигуна і тиристорного перетворювача з машинною комутацією значно нижче для способу керування $\beta_{\min} = f(\gamma)$, ніж при $\beta = \text{const}$.

4.4. Оптимальний за динамічними та енергетичними режимами самонастроюваний електропривод

Встановлено, що тільки при способі керування $\beta_{\min} = f(\gamma)$ синхронна машина в схемі ВД працює з найменшим споживанням реактивної енергії і найкращими енергетичними показниками у всьому діапазоні навантажень і частот обертання. Але при регулюванні кута випередження система стає нелінійною, і її параметри в процесі роботи змінюються в деяких межах. Внаслідок цього неможливо одержати високу динамічну якість системи.

Для досягнення оптимальних динамічного й енергетичного режимів необхідно використовувати адаптивне керування з дискретно змінюваними параметрами регуляторів за законом $\beta_{\min} = f(\gamma)$.

У цьому випадку САУ, наприклад, підпорядкованого типу доповнюється замкненими контурами стеження та самонастроювання. Контур самонастроювання при зміні величини кута випередження комутує певні секції резисторів і ємностей у колах зворотних зв'язків регуляторів.

Метод синтезу самонастроюваної системи керування полягає в тому, що, задаючи вихідні параметри системи, діапазон зміни кута випередження і крок квантування, розраховують числові значення коефіцієнтів передатних функцій, що відповідають дискретному ряду кутів випередження. Потім залежно від технологічних вимог відомими методами синтезують структуру системи підлеглого регулювання і знаходять параметри регуляторів для кожного значення кута випередження. Причому незалежно від типу регу-

лятора (П, ПІ тощо) варіюють опором кола зворотного зв'язку. Такий метод синтезу дозволяє розглядати систему для кожного фіксованого значення кута випередження як лінійну з постійними параметрами.

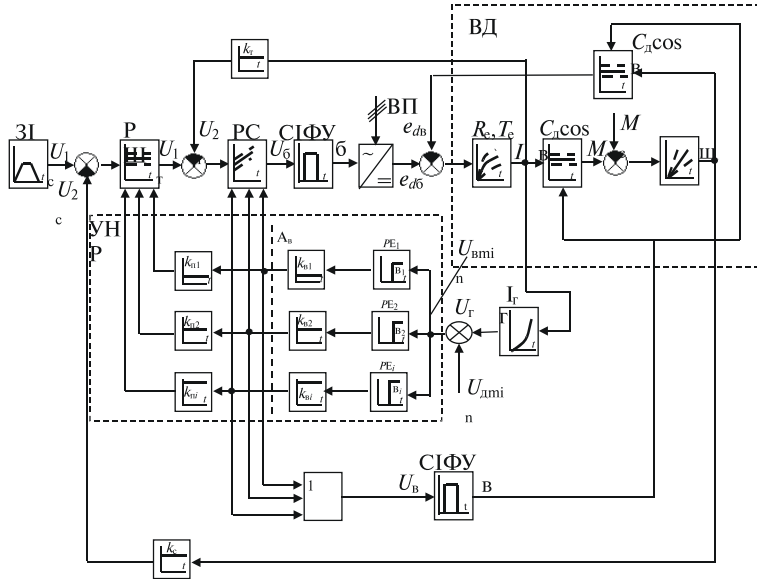


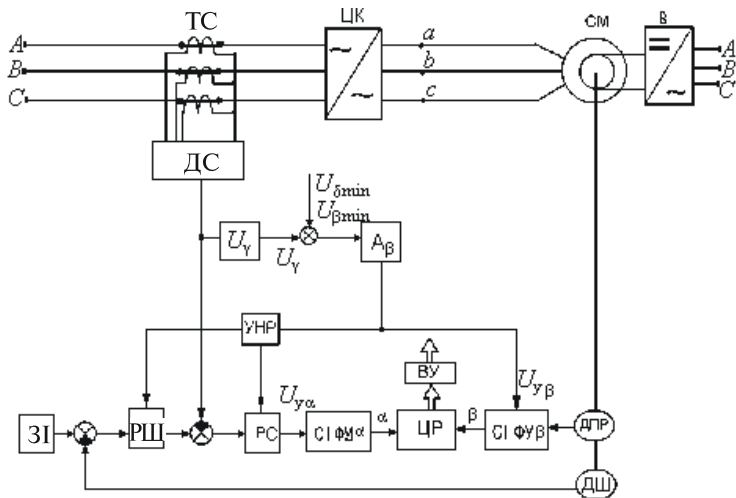
Рис. 6.36

На рис. 6.36 зображена структурна схема самонастроюваної системи підпорядкованого керування швидкістю ВД. Система відпрацьовує задану діаграму швидкості з необхідними швидкодією і перерегулюванням та підтримує найкращі енергетичні показники СМ і комутатора в кожній робочій точці незалежно від навантаження і частоти обертання.

З рисунка видно, що звичайна двоконтурна система підлеглого керування комплектується двома замкнутими контурами: стеження і самонастроювання. У контур стеження входять вимірювач кута комутації U_j (аналізатор кута випередження A_n) і СІФУ_В (самонастроюваний контур складається з вимірювача, аналізатора і пристрою настроювання регуляторів УНР).

Аналізатор за допомогою релейних елементів PE1...PE і визначає поточне мінімальне значення кута випередження і подає

Функціональна схема самонастроюваного приводу з ВД змінного струму зображена на рис. 6.37



Система автоматичного регулювання швидкості побудована за схемою підпорядкованого регулювання з негативними зворотними зв'язками по швидкості і струму. На вході регулятора швидкості задане значення швидкості порівнюється з дійсним, що знімається з датчика швидкості. Як датчик швидкості може бути використаний ДПР. На виході регулятора струму формується напруга керування, залежно від величини і знака якого СІФуа регулює кут

відкривання тиристорів у групах, визначених ДПР. При куті керування $0 < \alpha < 90^\circ$ циклоконвертор працює в режимі прямого перетворення енергії, а при $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ — у режимі зворотного перетворення. Центральний розподільник виконує логічне перемножування сигналів СІФУа і СІФУб, а вихідний підсилювач формує імпульси керування тиристорами.

Розглянемо режими пуску і реверсування швидкості. У момент пуску з виходу задатчика інтенсивності через регулятори швидкості і струму на вхід СІФУа подається напруга пропорційна заданій швидкості. На виході СІФУа генеруються сигнали відповідно до порядку чергування фаз мережі. Одночасно від ДПР через СІФУб на вхід центрального розподільника надходять сигнали на ввімкнення визначених груп циклоконвертора. На виході розподільника формуються імпульси керування двома тиристорами, що відповідають кутовому положенню ротора і робочим фазам мережі живлення. За наявності потоку збудження в двигуні виникає обертаючий момент. З поворотом ротора на кут 60° вмикається наступна група тиристорів, що призводить до подальшого повороту вала тощо. У колі зворотного зв'язку по швидкості з'являється сигнал, і двигун починає розганятися за заданим законом.

Реверсування двигуна можливе двома шляхами:

- збільшенням кута випередження понад 90° ;
- реверсуванням двох фаз вихідних сигналів із ДПР.

Можливі кілька способів керування циклоконвертором. Перший спосіб використовується в циклоконверторах у системі ПЧ-АД. Він полягає в переведенні працюючої групи на час комутації в інверторний режим. За рахунок зменшення часу спадання струму збільшується границя вихідної частоти циклоконвертора, що однак не перевищує одну третину від вхідної. Напруга керування в такій системі модулюється за амплітудою і частотою, що значно ускладнює привод.

Використання машинної комутації дозволяє виключити циклічне переведення груп у інверторний режим і одержати на виході перетворювача напругу з частотою вищою ніж частота джерела. Наприклад, при вихідній частоті 50 Гц, тобто такій що дорівнює вхідній, з 18 тиристорів циклоконвертора працюють лише 6, причому кожен цикл різні. Струм при цьому стає синусоїдальним з малими спотвореннями. Відпадає необхідність в амплітудно-частотній модуляції напруги керування, і як СІФУа може бути прийнята стандартна система, та ж, що і для двигуна постійного струму. При синтезі систем керування кутом випередження необхідно враховувати таке. По-перше, точка перетину фазних ЕРС має дрейф, і її миттєве

положення може бути визначено тільки після завершення процесу комутації. По-друге, частота сигналів синхронізації, що запускають функції розгортки, не постійна, а прямо пропорційна швидкості обертання ротора машини. Перераховані особливості обумовлюють застосування безінерційних цифрових структур керування.

Цифрова СІФУЗ може бути побудована за принципом заповнення вимірюваного інтервалу сталим числом імпульсів, незалежним від зміни частоти обертання двигуна. У цьому випадку необхідний імпульсний датчик швидкості, який жорстко зв'язаний з валом машини і може бути виконаний у вигляді диска з зубцями з розташованим над ним чутливим елементом. Число зубців визначається числом пар полюсів двигуна і дискретністю регулювання

$$Z = \frac{2\pi p}{\Delta\beta},$$

а число імпульсів у вимірюваному інтервалі дорівнює:

$$N = ZT,$$

де T — величина шуканого інтервалу стосовно кутової тривалості одного обертання вала.

Такий алгоритм реалізують за допомогою триканальної синхронної структури (рис. 6.38).

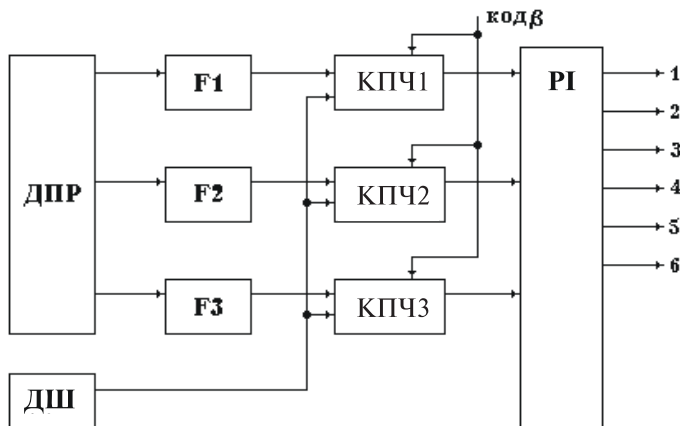


Рис. 6.38

З виходів ДПР на входи формувачів $\Phi 1$ – $\Phi 3$ надходять сигнали, тривалість половини періоду яких складає 180 ел. град. За їх передніми і задніми фронтами диференціюються вузькі імпульси, що встановлюють керовані подільники частоти УДЧ1–УДЧ3 у вихідний стан. При відповідності числа імпульсів, що надходять з датчика швидкості, коду кута випередження на виходах УДЧ формуються сигнали, зсунуті щодо вхідних на необхідний кут. Далі сигнали розподіляються за допомогою розподільника імпульсів РІ на шість каналів за числом груп циклоконвертора.

4.5. Триімпульсний спосіб керування тиристорами циклоконвертора

На рис. 6.39 зображені схеми контурів природної (а) і машинної (б) комутації. Існує кілька способів відкривання тиристорів (рис. 6.40): а – вузькими одиночними імпульсами; б – вузькими здвоєними імпульсами (через 60); в, г – широкими (120) чи строеними імпульсами. На рис. 6.40 затемнені області відсутні при машинній комутації.

Через простоту і мінімальне споживання енергії вихідними формувачем широко використовуються перші два способи. Третій спосіб вимагає великих енерговитрат у системі керування.

Для забезпечення надійної комутації тиристори циклоконвертора повинні відкриватися за сигналами мережі і ДПР. У дограничному режимі, коли частота обертання двигуна мала й відсутня ЕРС, здійснюється тільки мережна комутація. Надходження сигналу з ДПР на чергову групу не призводить до миттєвого відкривання тиристорів, що вмикаються лише з приходом чергового сигналу мережі.

З рис. 6.40 видно, що залежно від способу відкривання вентилів вихідні струми циклоконвертора характеризуються кутовою несиметрією фаз t_n і одночасною роботою трьох фаз t_o .

Однак якщо в дограничному режимі несиметрією й одночасною роботою трьох фаз можна знехтувати, то в режимі машинної комутації їх величини стають сумірними з тривалістю міжкомутаційних інтервалів. Несиметрія струмів не лише погіршує енергетичні показники системи (збільшує спектр і амплітуди вищих гармонік), але і через зменшення величини безструмової паузи чи виключення її зовсім може призвести до наскрізного короткого замикання двох різнополярних груп однієї з фаз двигуна.

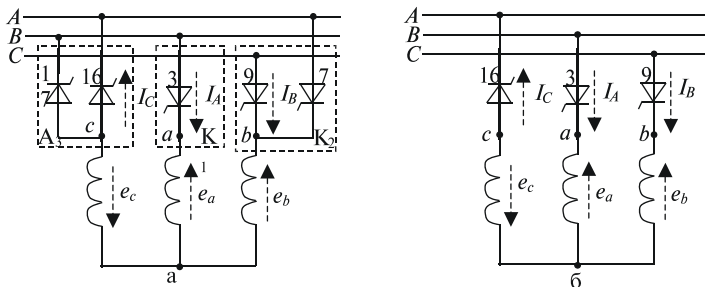


Рис. 6.39

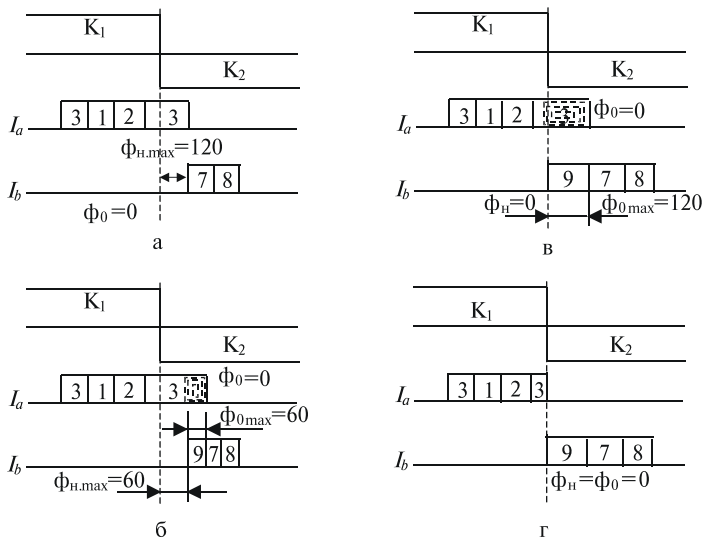


Рис. 6.40

З метою підвищення енергетичних показників і надійності електропривода необхідно використовувати триімпульсний спосіб керування, що виключає несиметрію фаз. Суть триімпульсного способу керування полягає в наступному.

З появою сигналу від ДПР на вмикання чергової групи комутатора вузький імпульс надходить на керуючий електрод того вентилля, що повинен бути ввімкненим згідно з порядком чергування фаз мережі. Під дією комутаційної ЕРС двигуна тиристор, який проводить струм у групі, що вимикається, запирається, а в тій що вмикається, — відкривається.

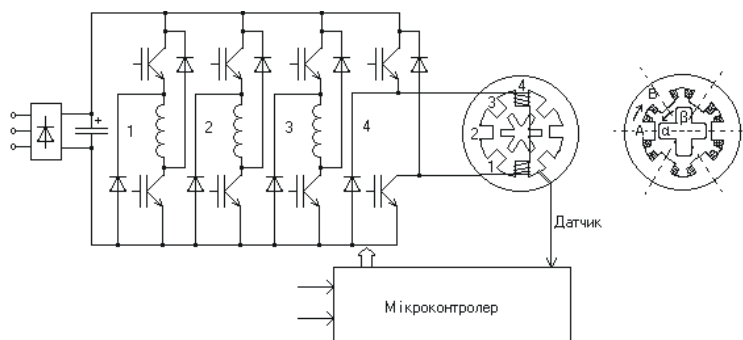
Таким чином, на керуючі електроди комутуючих клапанів циклоконвертора (при сумарному часі їх роботи 120°) подається три імпульси: два зі зсувом у 60° частоти мережі і третій — у будь-якій точці зони провідності. Причому на тиристор, що проводить струм менше 60° частоти мережі, надійде один імпульс, а на тиристор з часом роботи понад 60° — два імпульси.

5. ЕЛЕКТРОПРИВОД З ВЕНТИЛЬНИМИ ІНДУКТОРНИМИ ДВИГУНАМИ

Перехід від нерегульованого електропривода до регульованого — головна тенденція розвитку багатьох сучасних технологій, пов'язаних з електромеханічним перетворенням енергії. Поряд із традиційним шляхом — використанням частотно-регульованого асинхронного електропривода, у світовій практиці в останні роки намітився й інтенсивно реалізується альтернативний шлях — застосування різних типів приводу з клапанними двигунами, зокрема, принципово нового клапанно-індукторного регульованого електропривода (SRD — Switched Reluctance Drive).

Клапанно-індукторний привід, одна з можливих схем якого показана на рис. 6.41а складається зі спеціальної чотирифазної електричної машини, електронного комутатора на силових транзисторних модулях і блоку мікроконтролерного керування.

В індукторній машині (ІМ) магнітна індукція в кожній точці робочого зазору змінюється лише за величиною, а її напрям залишається постійним. Звідси випливає, що індукція в зазорі індукторних машин має пульсуючий характер і містить змінну (робочу) і постійну (неробочу) складові. Зміна в часі магнітного потоку, зчепленого з обмоткою якоря, досягається за рахунок періодичної зміни магнітного опору на шляху робочого потоку при обертанні зубчастого ротора з зубцями. Оскільки число зубців на роторі можна зробити великим, ІМ характеризується підвищеними частотами струму ($f \approx 400 \dots 30000 \text{ Гц}$).



а б

Рис. 6.41

Статор і ротор електричної машини виконані шихтованими явнополюсними, причому число полюсів статора і ротора неоднакове: 6/4, 8/6 тощо. На статорі розташовані зосереджені обмотки (котушки), з'єднані через електронний комутатор із джерелом живлення постійного струму (випрямляч, акумулятор).

Комутатор складається з групи електронних ключів (транзисторних модулів), відкритий чи закритий стан яких диктується положенням пасивного явнополюсного ротора, фіксованих спеціальним датчиком і сигналами мікропроцесорного керування, за рахунок чого формуються потрібні струми в обмотках.

Принцип дії приводу заснований на магнітному притяганні найближчого полюса ротора до активізованого індуктора — полюса статора з котушкою (рис.6.41б). Так, перемикання струму з котушки А статора, до якої був притягнутий полюс а ротора, на котушку В статора (за годинниковою стрілкою) призведе до такого повороту ротора, що до полюса В притягнеться найближчий полюс b ротора (проти годинникової стрілки). Повторення зазначених перемикань, що диктується датчиками фактичного положення ротора, призведе до безперервного обертання з необхідною частотою.

Таким чином, електромеханічне перетворення енергії (створення моменту) у такому приводі засновано на примусовій зміні магнітного опору R_M по кутовій координаті машини q за рахунок перемикання струмів у котушках статора.

Зміна магнітного опору обумовлює створення моменту:

$$M = -\Phi^2 \frac{dR_M}{d\theta},$$

де M — момент; F — магнітний потік.

Формування в кожен момент часу струмів потрібної величини забезпечує плавність руху при досягненні необхідних моментів з малими пульсаціями. Формування струмів відбувається за допомогою широтно— імпульсної модуляції, здійснюваної сигналами мікропроцесорного пристрою, що подаються на основні ключі комутатора. Якісне функціонування приводу при гранично простій машині досягається за рахунок ключів комутатора і розвиненої системи мікропроцесорного керування.

До переваг ВІД належать:

- висока технологічність і за рахунок цього низька трудомісткість виробництва двигуна (проста конфігурація магнітної системи, відсутність колектора, «білячої клітки», постійних магнітів, машинне намотування котушок);
- економія активних матеріалів до 30%, використання лише недефіцитних і недорогих матеріалів (не використовуються дорогі рідкоземельні магніти);
- низька собівартість машини — у 1,7 — 2 рази нижче собівартості найдешевшого асинхронного короткозамкнутого двигуна (за оцінками західних фахівців);
- спрощена і більш надійна в порівнянні з перетворювачем частоти для асинхронного електропривода схема і конструкція силового комутатора за рахунок однополярної комутації;
- широкі функціональні можливості — робота в зоні низьких (десятки — сотні об/хв) чи високих (десятки тисяч об/хв) частот обертання із широким діапазоном регулювання і великих моментів у зоні низьких частот;
- високі енергетичні показники, що не поступаються найближчим аналогам;
- висока надійність приводу в цілому;
- екологічна чистота виробництва (відсутня шкідлива для навколишнього середовища операція просочення статора в цілому, просочуються лише котушки) і утилізації (легко розділяються залізо і мідь, відсутні шкідливі в переробці рідкоземельні магніти).

Добре відомі й основні недоліки ВІД:

- непрацездатність приводу при відмові електронного комутатора; асинхронний і синхронний приводи можуть продовжувати

ти працювати від мережі при повній відмові перетворювача частоти;

- деяке ускладнення конструкції обумовлене необхідністю використання датчиків положення ротора;
- дуже складна і не до кінця відпрацьована методика проектування приводу для досягнення високих технічних показників.

Порівняння переваг і недоліків вентиляльно-індукторного привода дозволяє прогнозувати його швидкий вихід на широкий ринок регульованих електроприводів як сильного конкурента традиційним приводам постійного струму і частотно-регульованим асинхронним та синхронним приводам.

Наведемо за закордонними даними деякі показники трьох типів електроприводів для машини з висотою вала 112 мм (табл.6.3).

Таблиця 6.3

Тип електропривода	Номінальна потужність, кВт	Номінальна потужність до об'єму активних матеріалів	ККД
Постійного струму	7	1	76
Асинхронний	9	1,2	81
Вентильно-індукторний	11	1,7	85

Сукупність властивостей вентиляльно-індукторного привода дозволяє прогнозувати найперспективніші галузі його застосування у найближчі роки:

- електричний транспорт, зокрема автономний, з акумуляторним живленням;
- відцентрові машини — вентилятори, насоси, де ВІД може революційно змінити звичні конструктиви і режими, дати помітний ефект у сфері енерго- і ресурсозбереження;
- верстати, інші обробні машини;
- побутова техніка.

Дуже цікаві перспективи вбудовування елементів ВІД у технологічні машини — мотор-колесо, крильчатка вентилятора, сполучена з ротором оберненої машини тощо.

Освоєння у виробництві сучасних ефективних вентиляльно — індукторних електроприводів, крім основного результату — підвищення якості технологічних процесів, що обслуговуються ними, при одночасному різкому (до 50%) зниженні енергетичних витрат, дозволить істотно знизити затрати праці при виробництві й експлуатації, позбутися імпорту дорогих виробів, призведе до по-

мітного збільшення числа робочих місць у сфері виробництва елементів електроніки й імпортованих ними пристроїв, дозволить розширити експорт високих технологій.

Водночас, новий привод – продукт високих технологій – вимагатиме помітних зусиль проектувальників, дослідників, конструкторів для повної реалізації всіх його потенційних переваг.

6. ЕЛЕКТРОПРИВОД З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ

На рис. 6.42 показана структура приводу змінного струму з векторним керуванням. Як робоча машина може застосовуватися або синхронний двигун з активним магнітоелектричним ротором, або синхронний реактивний двигун. Можливе використання цієї структури і для керування трифазними вентильно-індукторними двигунами з різнополярним живленням, а також кроковими двигунами в режимі безколекторних двигунів постійного струму.

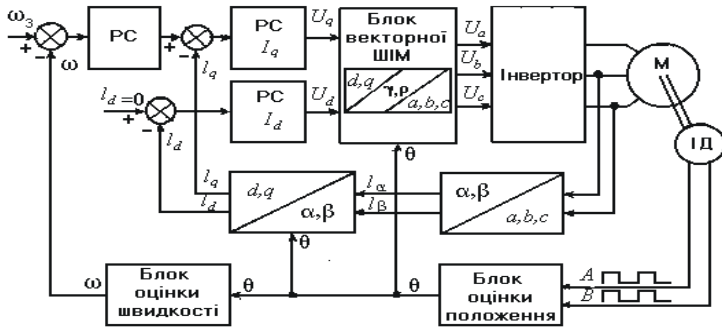


Рис. 6.42

Як силовий перетворювач використовується інвертор на IGBT-ключачах чи інтелектуальних силових модулях. Драйвери ключів інвертора підключені безпосередньо до виходів ШІМ-генератора мікроконтролера (А, А/, У, У/, 3, 3/), працюючого в режимі широтно-імпульсної модуляції базових векторів (векторної ШІМ-модуляції). Це забезпечує максимально високий ступінь використання напруги ланки постійного струму і мінімізацію динамічних втрат в інверторі.

Структура на рис.6.42 припускає використання імпульсного датчика положення ротора двигуна. Сигнали з датчика вводяться безпосередньо в контролер і обробляються в блоці оцінки положення, що може бути реалізований на основі спеціального периферійного пристрою — таймера з «квадратурним» режимом роботи. Код механічного положення ротора програмно перетвориться в код електричного положення ротора всередині полюсного розподілу машини q . Для реалізації блоку оцінки швидкості можуть застосовуватися або спеціальні периферійні пристрої мікроконтролера, принцип дії яких заснований на вимірюванні часового інтервалу відпрацьовування двигуном заданого відрізка шляху (естиматори швидкості), або периферійні пристрої загального призначення, як, наприклад, процесори подій. В останньому випадку таймер, що працює в «квадратурному» режимі, є базовим для одного з каналів порівняння.

При відпрацьовуванні двигуном заданого відрізка шляху, виникне переривання в порівнянні. У процедурі обслуговування цього переривання центральний процесор визначає часовий інтервал з моменту попереднього переривання і виконує розрахунок поточної швидкості приводу. *Бажано, щоб таймер, що працює в «квадратурному» режимі, допускав початкову ініціалізацію відповідно до числа міток на оберт імпульсного датчика положення, а також мав режим автоматичної корекції свого стану за реперним датчиком. Естиматор швидкості повинен працювати з регульованим розділенням як за числом імпульсів на період вимірювання швидкості (від 1 до 255), так і з регульованим розділенням за часом (максимальне розділення 50-100 нс при діапазоні регулювання дозволу 1:128). Якщо перераховані вище вимоги до периферійних пристроїв мікроконтролера будуть виконані, то буде можливим вимірювання швидкості в діапазоні, як мінімум, 1:20000 з точністю, не нижче 0,1%.*

Для вимірювання електричних змінних мікроконтролер повинен мати вбудований АЦП з дозволом не нижче 10-12 двійкових розрядів і час перетворення не нижче 5-10 мкс. Як правило, восьми каналів АЦП досить для прийому не тільки сигналів зворотних зв'язків за струмом фаз, але і сигналів зворотних зв'язків за напругою і струмом в ланці постійного струму, а також зовнішніх сигналів задання. Додаткові аналогічні сигнали використовуються для реалізації захисту інвертора і двигуна. Робота АЦП буде продуктивнішою, якщо мікроконтролер дозволяє режим автоматичного сканування і запуску процесу перетворення. Звичайно це виконується або за допомогою окремого периферійного пристрою — процесора перифе-

рійних транзакцій, або за допомогою режиму автозапуску АЦП від процесора подій чи генератора ШІМ сигналів. Вибірка як мінімум двох аналогових сигналів повинна бути одночасною.

На основі отриманої інформації про струми фаз I_a і I_b відновлюється значення струму у фазі C (I_c) і виконується прив'язка струмів до нерухомої системи координат, пов'язаної зі статором ($a, b, z \otimes a, b$). Перехід від нерухомої системи координат до рухомої, пов'язаної з поточним положенням ротора ($a, b \otimes d, q$), дозволяє розрахувати компоненти результуючого вектора струму статора по осях d і q відповідно.

Відомо, що момент синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів прямо пропорційний складовій вектора струму статора по поперечній осі q . При цьому для мінімізації загального споживаного двигуном струму бажано підтримувати струм по поздовжній осі d рівним нулю. Таким чином, вихід регулятора швидкості приводу РС варто підключити на вхід регулятора струму по поперечній осі (РТ I_q), а на вхід регулятора струму по поздовжній осі (РТ I_d) подати нульове задання. Звичайно регулятори швидкості і струмів є пропорційно-інтегральними. Вихідні сигнали регуляторів струму пропорційні компонентам результуючого вектора напруги статора по осях d і q відповідно. У блоці векторної ШІМ-модуляції виконується спочатку перетворення компонентів вектора напруги до полярної системи координат (q, r), зв'язаної з поздовжньою віссю ротора. Потім, з урахуванням поточного положення ротора q , визначається робочий сектор, внутрішньосекторний кут, і розраховуються компоненти базових векторів в абсолютній системі координат, зв'язаній зі статором. Формуються напруги, що прикладаються до обмоток двигуна U_a, U_b, U_c .

Усі перераховані перетворення координат (прямі і зворотні перетворення Парка і Кларка) повинні виконуватися в реальному часі. Бажано, щоб використовуваний для реалізації системи векторного керування мікроконтролер мав вбудовану бібліотеку функцій, адаптованих для ефективного керування двигунами, у тому числі функцій перетворення координат. Час реалізації кожної з цих функцій не повинен перевищувати кількох мікросекунд.

Відмінною рисою системи векторного керування асинхронними двигунами є необхідність використання додаткового обчислювального блоку, у якому виробляється оцінка поточного кутового положення вектора потокозчеплення ротора. Це робиться на основі розв'язання в реальному часі системи диференціальних рівнянь, складених відповідно до математичної моделі двигуна.

Природно, що подібна операція вимагає додаткових обчислювальних ресурсів центрального процесора.

Розглянута структура системи керування забезпечує автоматичне формування у фазах двигуна синусоїдальних струмів і напруг при роботі виконавчого двигуна в режимі безколекторного двигуна постійного струму з оптимальним кутом комутації і мінімізацією пульсацій електромагнітного моменту. У ряді застосувань, наприклад, для приводів з вентильно-індукторними і безколекторними двигунами постійного струму, цілком достатньо на інтервалі комутації підтримувати в обмотці двигуна заданий фіксований рівень струму. Структура системи керування при цьому помітно спрощується (рис. 6.43).

З порівняно нових методів керування частотно регульованим приводом змінного струму з АД дійсно широко освоєними можна вважати такі:

- векторне керування двигунами;
- векторна синусоїдальна ШІМ.

Типова структура електропривода з векторним керуванням АД зображена на рис. 6.44.

Для реалізації векторного керування необхідно мати інформацію про координати відповідного вектора в нерухомій системі координат, у якій виконуються вимірювання і про орієнтацію оберткової системи координат, у якій здійснюється незалежне регулювання електромагнітних і механічних змінних. Далі виконується векторне перетворення. З можливих варіантів складу первинних вимірювачів найбільше поширення одержали вимірювання струму і положення ротора, а також вимірювання струму і напруги (у приводах без датчика механічного руху на валу двигуна).

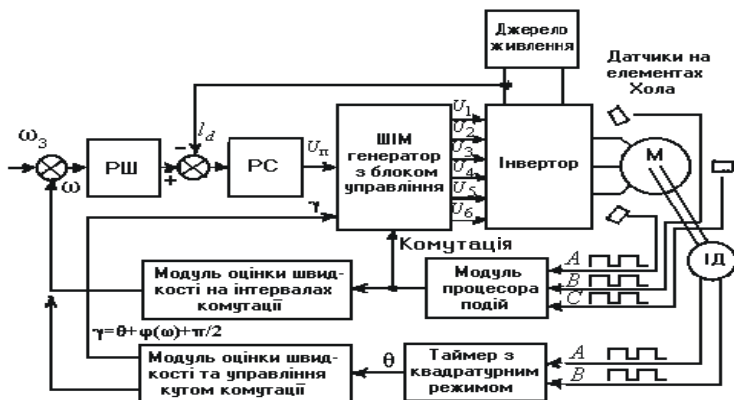


Рис. 6.43

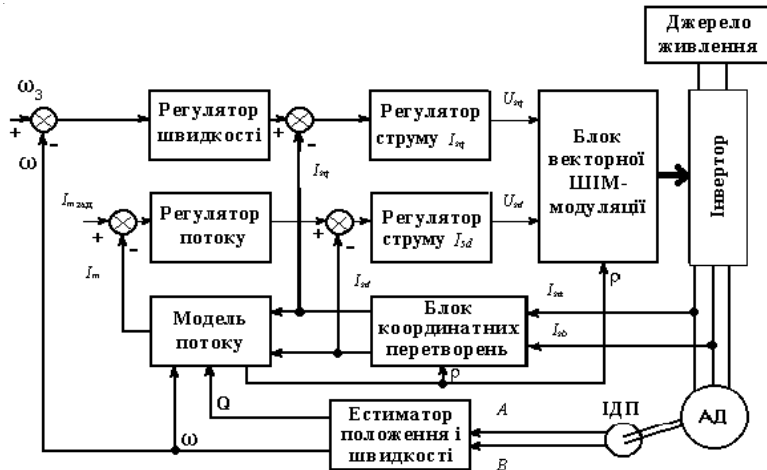


Рис. 6.44

Застосовувана векторна синусоїдальна ШІМ пояснюється рис.6.45, на якому зображена діаграма векторів вихідних напруг перетворювача (рис. 6.45.а) і часова діаграма фазних напруг (рис.6.45.б).

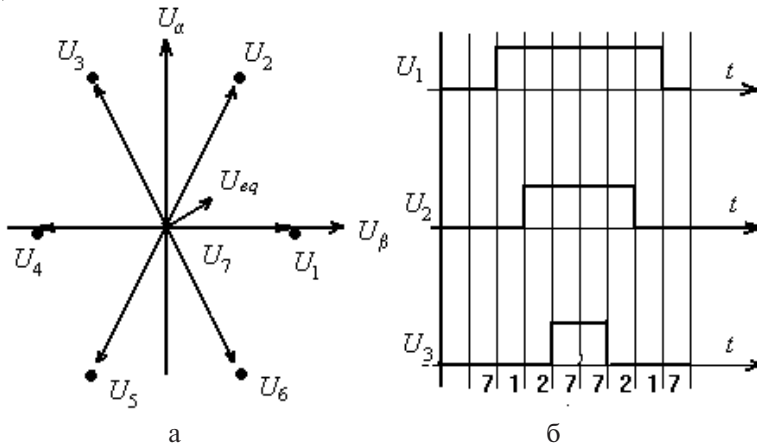


Рис. 6.45

Відносні тривалості реалізації кожного з векторів (закон модуляції) визначаються однозначно. Що стосується послідовності перемикачів (закон комутації), то вона повинна вибиратися додатково. Центрована ШІМ характеризується симетричною діаграмою комутації фазних напруг за період (рис.6.45.б).

Функціонування процесорного контролера ґрунтується на числовому інтегруванні рівнянь регуляторів і моделей кіл АД і реалізації векторних перетворень, показаних на рис.6.45. Оскільки виконання операцій здійснюється послідовно, розрахунок рівнянь відбувається з визначеним часовим запізнюванням на час виконання циклу обчислень. Тривалість циклу не повинна перевищувати 20 мкс, інакше в перехідних процесах позначається запізнювання обчислень.

У сучасних електроприводах часто використовуються цифрові системи керування, у яких алгоритм управління реалізується без використання мікропроцесора, що дозволяє здешевити привод. Типовим прикладом є реалізація керування вентильним приводом за допомогою спеціально розробленої мікросхеми з «жорстко» зашитим алгоритмом. Співставлення схем керування електроприводом із чіткою логікою і реалізованих на мікропроцесорному контролері показує, що перші, через їх значно меншу гнучкість, мають сенс лише для масових застосувань при дуже великій серійності.

Типовим представником електропривода з керуючими пристроями нових поколінь можна вважати 600-у серію «бездатчикових» силових перетворювачів для загальнопромислового регульованого асинхронного електропривода фірми АВВ. У цьому приводі реалізується не лише векторне керування, але й сучасні методи оцінки змінних стану (для регулювання частоти обертання в бездатчиковому приводі необхідно її оцінити за вимірюваннями струму і напруги), а також система релейного регулювання струму.

7. РЕГУЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗАСОБАМИ СИЛОВОЇ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1. ГЕНЕРУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК ВЕНТИЛЬНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

1.1. Гармоніки струму мережі мостових перетворювачів і силових трансформаторів

На рис. 7.1 наведена схема (а) і статичні характеристики (б) системи електропривода з трифазним мостовим тиристорним випрямлячем.

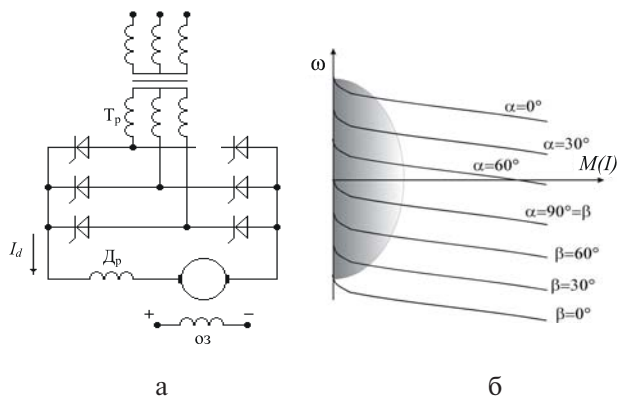


Рис. 7.1

Поява області переривчастих струмів викликана тим, що миттєві значення ЕРС перетворювача в окремі інтервали часу стають менше проти-ЕРС двигуна. Підтримка безперервності струму в цих інтервалах здійснюється завдяки накопиченій в індуктивностях якоря і згладжуючого дроселя електромагнітній енергії, пропорційній квадрату струму двигуна. При струмах неробочого ходу цієї енергії виявляється недостатньо для підтримки безперервності струму. Струм переривається, й обертаючий момент двигуна стає рівним нулю. Характер зміни швидкості залежить від моменту інерції системи, навантаження на валу і параметрів схеми. Зі збільшенням кута керування а область переривчастих струмів розширюється. Область переривчастих струмів характеризується підвищенням вмістом вищих гармонічних у кривій струму, що через узгоджуючий трансформатор проникають у мережу. Тому варто обмежувати режим неробочого ходу в часі.

Нелінійні елементи електричних мереж змінного струму можуть бути представлені двома видами схем заміщення: із джерелом струму n -ї гармоніки I_n і внутрішньою провідністю $Y_{впн}$ (рис. 7.2.а) і з джерелом ЕРС E_n і внутрішнім опором $Z_{впн}$ (рис. 7.2.б). Навантаженням є опір контуру комутації $Z_{кп}$ (провідність $Y_{кп}$). При розрахунку I_n і E_n цей опір, як правило, вважають чисто індуктивним.

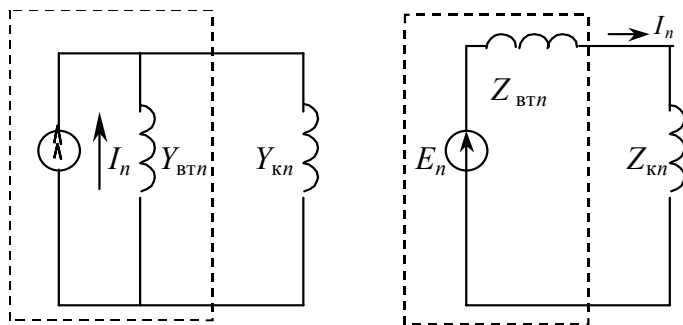


Рис. 7.2

Схема заміщення з джерелом ЕРС застосовується, якщо необхідно визначити значення гармоніки струму в батареях конденсаторів у режимі резонансу струмів на частоті якої-небудь гармоніки.

Перетворювачі працюють, як правило, на проти-ЕРС чи активно-індуктивне навантаження. Крива струму мережі при

з'єднанні первинної обмотки трансформатора перетворювача зіркою має вигляд, показаний на рис. 7.3.

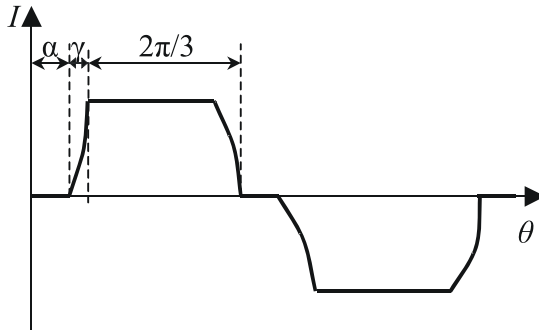


Рис. 7.3

Форма кривої залежить від кута керування α , що задається системою імпульсно-фазового керування, і кута комутації γ , обумовленого виразом:

$$\gamma = \arccos(\cos \alpha - I_{d*} X_{k*}),$$

де I_{d*} — відносне значення випрямленого струму; X_{k*} — відносне значення індуктивного опору контуру комутації, приведене до потужності трансформатора перетворювача. Для некерованого перетворювача, мабуть, $\alpha=0$; $\cos \alpha=1$.

Порядок (номери) гармонік струмів мережі визначається виразом:

$$n = mp \pm 1.$$

Для мостового перетворювача, у якого $m=6$, $n=5; 7; 11; 13; 17; 19; 23; 25$.

Амплітуда n -ї гармоніки визначається виразом:

$$I_{nm} = \sqrt{I_{na}^2 + I_{np}^2};$$

$$\begin{aligned}
 I_{na} &= \frac{2\sqrt{3}E_m}{n\pi X_k} \sin \frac{n\pi}{3} \left\{ \frac{1}{n+1} \sin \left[(n+1) \frac{\gamma}{2} \right] \sin [(n+1)\psi] - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{n-1} \sin \left[(n-1) \frac{\gamma}{2} \right] \sin [(n-1)\psi] \right\}; \\
 I_{np} &= \frac{2\sqrt{3}E_m}{n\pi X_k} \sin \frac{n\pi}{3} \left\{ -\frac{1}{n+1} \sin \left[(n+1) \frac{\gamma}{2} \right] \cos [(n+1)\psi] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{n-1} \sin \left[(n-1) \frac{\gamma}{2} \right] \cos [(n-1)\psi] \right\};
 \end{aligned}$$

де E_m – амплітуда ЕРС енергосистеми живлення; $\psi = \alpha + \gamma/2$ – кут зсуву по фазі між кривими ЕРС і струму 1-ї гармоніки мережі. Для першої гармоніки:

$$I_{1a} = \frac{3E_m}{2\pi X_k} \sin \gamma \sin 2\psi; \quad I_{1p} = \frac{3E_m}{2\pi X_k} (\gamma - \sin \gamma \cos 2\psi).$$

Діюче значення струму мережі незначно відрізняється (не більше, ніж на 2%) від відповідного значення 1-ї гармоніки. Вирази, отримані в припущенні, показують, що впливом ємностей кабельних ліній і батарей конденсаторів, а також електродвигунів і устаткування розподільних пристроїв на процес комутації можна знехтувати.

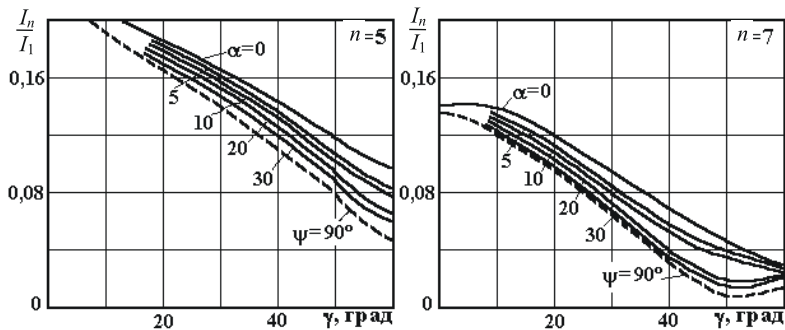


Рис. 7.4

На рис. 7.4 зображені криві $I_{n^*}=I_n/I_1$ для різних n . Початкова фаза n -ї гармоніки визначається досить точно за формулою:

$$\psi_n = n\psi.$$

У практичних розрахунках ψ зручно знаходити за виразом:

$$\psi = \arccos \frac{U_d}{U_{d0}},$$

де U_d і U_{d0} — середні значення випрямленої напруги перетворювача відповідно в режимах навантаження і неробочого ходу.

Для некерованих перетворювачів, що працюють з кутом комутації γ_0 ,

$$I_{n^*} = \frac{\sin \left[(n-1) \frac{\gamma_0}{2} \right]}{n(n-1) \frac{\gamma_0}{2}}.$$

Якщо мостовий перетворювач підмикається без трансформатора до шин, до яких приєднані також батареї конденсаторів, то крива струму мережі набуває прямокутно-східчастої форми ($\gamma \approx 0$). У цьому випадку виявляється

$$I_{n^*} = \frac{1}{n}.$$

Остання формула широко використовується на практиці й у випадках, коли є трансформатор вентильного перетворювача. Однак значення I_{n^*} при цьому виявляються завищеними: для n , що дорівнює 5 і 7, похибка може досягати 10 — 15 %, для n , що дорівнює 11 і 13 — до 20 %. При роботі перетворювача на чисто активне навантаження значення I_{n^*} будуть трохи меншими: при $\alpha=0$ виявляється $I_{5^*}=0,186$; $I_{7^*}=0,113$; $I_{11^*}=0,085$; $I_{13^*}=0,065$.

Відносне значення ЕРС n -ї гармоніки перетворювача E_{n^*}

$$E_{n*} = k_n \frac{S_{\text{пн}}}{S_{\text{к}}} \xi(n),$$

де $S_{\text{пн}}$ і $S_{\text{к}}$ – номінальні значення потужності перетворювача і потужності короткого замикання за його трансформатором; k_n – коефіцієнт завантаження перетворювача до повної потужності. Коефіцієнт (n) знаходиться за значеннями I_{n*} , обумовленими кривими на рис. 7.4.

$$\xi(n) = \frac{nI_{n*}}{1 - nI_{n*}}.$$

Значення ЕРС гармонік при n , що дорівнює 11 і 13, можуть досягати кількох десятків відсотків, а при $n = 30 \div 40$ – 2%.

Внутрішній опір джерела в схемі рис. 7.2. б виявляється чисто індуктивним:

$$Z_{\text{емл}} = X_{\text{емл}} = n X_{\text{к}} \zeta(n).$$

На рівень гармонік струму, генерованих перетворювачем, істотно впливають відхилення напруги. При роботі перетворювача з незмінним випрямленим струмом відносне відхилення напруги V обумовлює відносне збільшення струму n -ї гармоніки мережі I_{n*} , обумовлене виразом:

$$I_{n*} \approx \frac{2}{n\gamma} \sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right) \frac{V}{\text{tg}\varphi}.$$

Так, при $\gamma=0,2$, $V=0,1$, $\text{tg}\varphi=1$ для $n=5$ виявляється $I_{n*}=0,1$. При регулюванні напруги перетворювача за допомогою СІФУ й автотрансформатора зміна гармонік буде меншою.

У перехідних режимах роботи перетворювача зберігається те ж співвідношення між значеннями вищих гармонік струмів мережі, що й у сталому режимі. Однак з'являються гармоніки кратні трьом, з амплітудою до 0,5% амплітуди струму основної частоти, і парні гармоніки, у першу чергу 2-а і 4-а, з амплітудою до 2%.

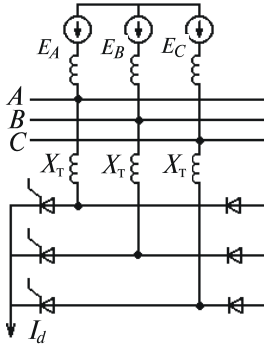


Рис. 7.5

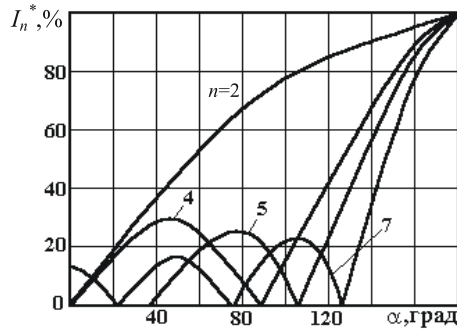


Рис. 7.6

Мостовий перетворювач з несиметричним керуванням (рис. 7.5) має поліпшені енергетичні показники. Такі перетворювачі використовують у системах збудження синхронних машин і в нереверсивному вентильному приводі середньої потужності (до 1000 кВт).

Несиметричні перетворювачі генерують як непарні, так і парні гармоніки. Відносні значення їх, якщо знехтувати значеннями кутів комутації, з достатньою для практичного застосування точністю визначаються виразами:

$$I_{n*} = \frac{1}{n} \left| \frac{\sin\left(\frac{n\alpha}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right| \text{ при } n = 2; 4; 6; \quad I_{n*} = \frac{1}{n} \left| \frac{\cos\left(\frac{n\alpha}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right| \text{ при } n = 5; 7; 11.$$

Криві $I_{n*}(\alpha)$ зображені на рис. 7.6.

При живленні від загальних шин двох однакових груп несиметричних мостових перетворювачів доцільно в одній групі керувати вентилями включати в анодну групу, в іншій – у катодну. У цьому випадку відбувається компенсація парних гармонік.

Силові трансформатори є джерелами вищих гармонік намагнічувального струму. Внаслідок несиметрії магнітопроводу трифазних тристрижневих трансформаторів діючі значення намагнічувальних струмів крайніх фаз у 1,3–1,35 рази більше намагнічувального стру-

му середньої фази. З тієї ж причини в намагнічувальних струмах є всі непарні гармоніки, у тому числі і кратні трьом. Ці гармоніки утворюють системи прямої і зворотної послідовностей. Найбільшу питому вагу, крім основної, мають 3, 5 і 7-а гармоніки. Слід зазначити, що амплітудний спектр намагнічувальних струмів практично однаковий при схемах сполучень зірка-зірка і зірка-трикутник.

Діючи значення гармонік намагнічувальних струмів фаз $I_{\text{нф}}$ знаходяться за формулою:

$$I_{\text{нф}} = I_{\mu} k_{\text{нф}},$$

де I_{μ} — номінальне значення намагнічувального струму. Значення коефіцієнта $k_{\text{нф}}$ наведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1.

Гармоніка	Крайня фаза	Середня фаза
3-я	0,1	0,2
5-я	0,29	0,22
7-я	0,12	0,1

При відхиленнях напруги на затискачах трансформатора від номінального на $\Delta_{\text{т}}$ % гармоніки намагнічувального струму перераховують за формулою:

$$I_{\text{нф}} = I_{\text{нф}} (1 + \Delta_{\text{т}} \rho).$$

Значення коефіцієнтів ρ при $\Delta_{\text{т}} = 1\%$ наведені в табл. 7.2.

Таблиця 7.2.

n	Значення, %, при		n	Значення, %, при	
	$U < U_{\text{н}}$	$U > U_{\text{н}}$		$U < U_{\text{н}}$	$U > U_{\text{н}}$
1	−0,05	0,12	5	−0,05	0,16
3	−0,05	0,14	7	−0,05	0,20

При зростанні напруги понад номінальне значення на 3–5% рівень гармонік намагнічувального струму зростає в 1,5–2 рази. При великій установленій потужності трансформаторів цехових підстанцій це може призвести до помітного збільшення напруги вищих гармонік у мережі. При живленні трансформатора від мережі з несинусоїдальною напругою поряд зі зміною значення основної і вищої гармонік намагнічувального струму (у першу чергу

3, 5, 7-й) відбувається значне зростання комбінаційних складових високих частот, що кратні сумі чи різниці частот гармонік напруги мережі живлення.

Амплітудні спектри намагнічувальних струмів силових трансформаторів при несинусоїдальній напрузі мережі мають ряд характерних рис. Так, при рівні напруги 3-ї гармоніки не більш 10%, 5-ї і 7-ї гармонік – до 5% між рівнями гармонік напруги і намагнічувального струму існує наближена лінійна залежність, яка має вигляд:

$$I_1 = a + bU_{3(5)} + cU_{5(7)},$$

де $U_{3(5)}$ і $U_{5(7)}$ – процентний вміст 3-ї (5-ї) і 5-ї (7-ї) гармонік напруги; a, b, c – постійні коефіцієнти, значення яких знаходяться в межах 0,3–1,0.

В умовах промислових електромереж вищі гармоніки намагнічувальних струмів трансформатора при несинусоїдальній напрузі можуть зростати на 10–15%. Наявність 11-ї і 13-ї гармонік у мережі живлення практично не позначається на рівні гармонік намагнічувального струму.

1.2. Гармоніки струму мережі перетворювачів спеціального призначення

На базі трифазної мостової схеми реалізується ряд схем перетворювачів із природною і штучною комутацією. Ці схеми мають поліпшені енергетичні показники: менше споживання реактивної потужності і спотворення форми кривої струму мережі, у ряді випадків знижуються масогабаритні показники. Для нереверсивного електропривода застосовується двомостова схема з послідовним ввімкненням керованого і некерованого шестифазних перетворювачів (рис. 7.7).

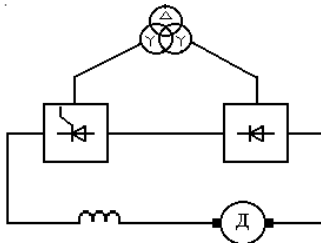


Рис. 7.7

За ступенем спотворення струму і напруги мережі ця схема займає проміжне значення між 6- і 12-фазними мостовими схемами із симетричним керуванням.

Для потужних реверсивних електроприводів постійного струму використовуються дво- і більш мостові зустрічно-паралельні схеми з почерговим керуванням. Кожний міст керується симетрично, однак при регулюванні випрямленої напруги кути керування мостів змінюються по черзі. Це дозволяє істотно знизити споживання перетворювачем реактивної потужності.

При регулюванні напруги можуть бути використані різні закони зміни кутів керування перетворювачами, тому доцільно рівні гармонік струму мережі визначати у функції відносного середнього значення випрямленої напруги E_{d^*} . Гармоніки струму мережі зручно відносити до середнього значення струму навантаження перетворювача I_d . У розглянутих схемах діючі значення струму мережі і його 1-ї гармоніки та перших двох – чотирьох гармонік виявляються близькими. У практиці проектування значення E_{d^*} і I_d при різних режимах роботи перетворювача звичайно відомі.

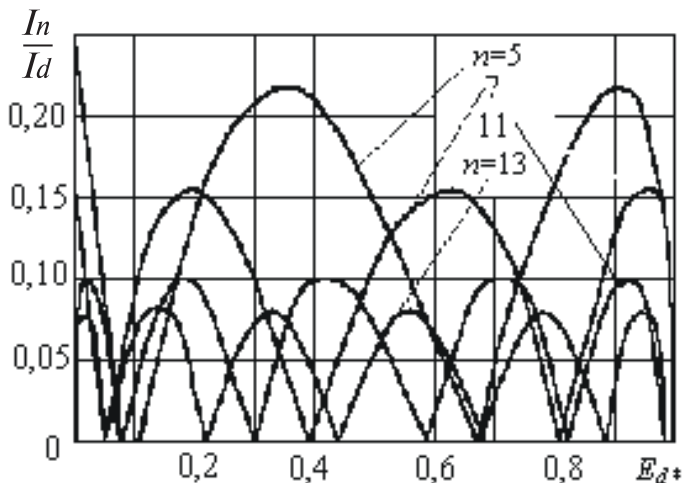


Рис. 7.8

На рис. 7.8 зображені криві $I_n/I_d = f(E_{d^*})$ для схем з почерговим регулюванням двох мостів. При одноякірних електродвигунах кращим є паралельне сполучення по черзі керованих перетворювачів, при двоякірних – послідовне. Як показали вимірювання в мережі

10 кВ, при застосуванні почергового керування $k_{\text{нс}}$ знижується у 2 рази в порівнянні з одночасним керуванням.

В асинхронно-вентильному каскаді гармонічний склад кривої струму інвертора визначається так само, як для реверсивного перетворювача із симетричним чи комбінованим керуванням. При симетричному керуванні амплітуда n -ї гармоніки:

$$I_{nm} = -\frac{8I_d}{\pi n^2 \gamma} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\gamma}{2} \sin \frac{n\pi}{2},$$

при комбінованому

$$I_{nm} = \frac{8I_d}{\pi n^2 \gamma} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\gamma}{2} \sin \left[n \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right],$$

Скомпенсований вентильний електропривод може бути реалізований при послідовному чи паралельному включенні перетворювачів, що працюють з рівними за значенням, але протилежними за знаком кутами керування. Крива струму мережі виявляється несинусоїдальною. При живленні двох перетворювачів через трансформатори з однаковими групами сполучень амплітудне значення гармоніки має вигляд:

$$I'_{nm} = 2I_{nm} \cos(n\alpha),$$

де I_{nm} — амплітудне значення n -ї гармоніки базового перетворювача, що комутується за трифазною мостовою схемою.

У відносних одиницях (стосовно амплітуди першої гармоніки) при $\alpha=0$:

$$I'_{nm*} = (1/n) \cos \alpha \cos(n \arccos U_{d*}),$$

де U_{d*} — відносне значення випрямленої напруги.

При зсуві фаз між вторинними напругами випрямлячів амплітудне значення n -ї гармоніки у відносних одиницях визначається за формулою:

$$I'_{nm*} = \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n \sin \frac{\pi}{3}} \cos \alpha \sin \left(\frac{n\pi}{2} - n \arccos U_{d*} \right)$$

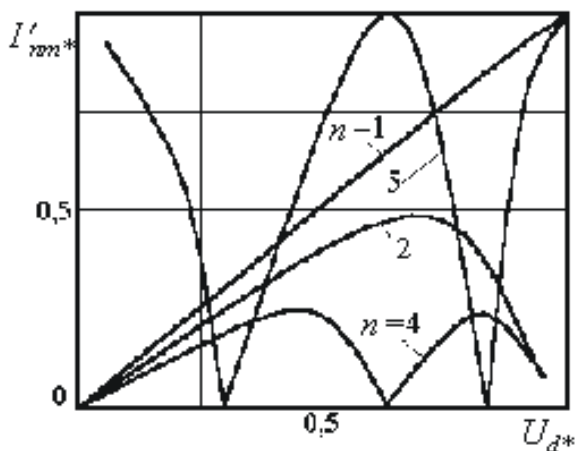


Рис. 7.9

На рис. 7.9 зображені графіки зміни амплітуд гармонік струму мережі скомпенсованого перетворювача при роботі на індуктивне навантаження і проти-ЕРС. Як видно з графіків, характерним для скомпенсованих перетворювачів є гармонічний характер зміни амплітуд вищих гармонік при регулюванні випрямленої напруги. У деяких випадках спектр вищих гармонік стає ширшим, ніж у перетворювачів із природною комутацією. Однак рівень гармонік скомпенсованих перетворювачів нижчий, ніж у звичайного мостового перетворювача.

Частотно-регульовані джерела реактивної потужності характеризуються змінною частотою струму в акумуляторі (реакторі або конденсаторі). Схема найпростішого частотно-регульованого трифазного джерела реактивної потужності наведена на рис. 7.10.

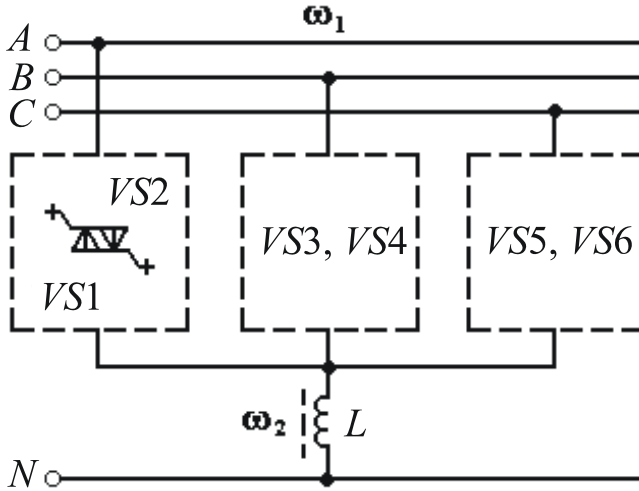


Рис. 7.10

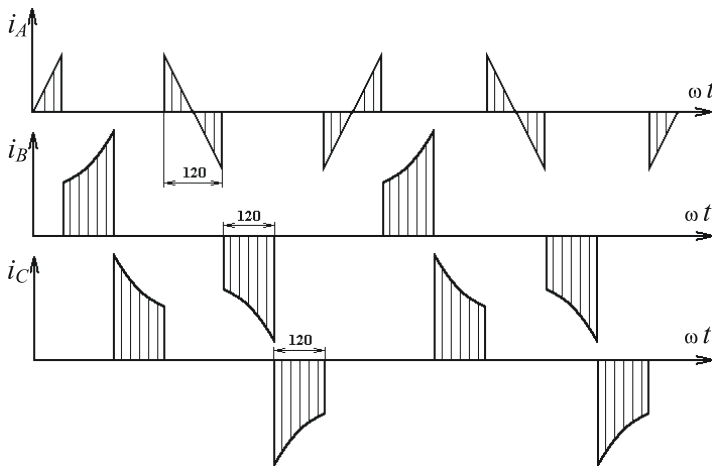


Рис. 7.11

Струм мережі джерела реактивної потужності в кожній фазі являє собою переривчасту криву, що складається з окремих ділянок, що відповідають провідності даної фази (рис. 7.11).

Джерело реактивної потужності є джерелом гармонік струму, рівні і частоти яких у загальному випадку залежать від частоти сигналів керування, що надходять на силові вентилях схеми, та інших параметрів. У кривих струму відсутні парні гармоніки, спектри різних фаз можуть значно відрізнятися один від одного. Гармоніки можуть бути також некратними частоті мережі.

1.3. Анормальні гармоніки вентильних перетворювачів

Анормальні чи неканонічні — це гармоніки, порядок яких не відповідає числу пульсацій випрямленого струму. Причиною виникнення анормальних гармонік в амплітудному спектрі струму мережі керованих перетворювачів є відхилення кутів керування окремих вентилів щодо встановленого значення. Останнє виникає в результаті несиметрії керуючих імпульсів СІФУ. Крива первинного струму керованого перетворювача при несиметрії керуючих імпульсів зображена на рис. 7.12

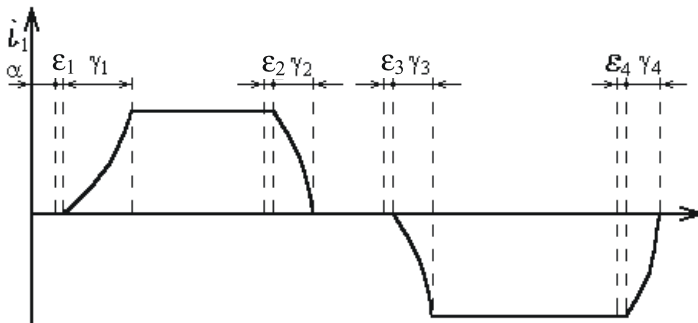


Рис. 7.12

Несиметрія керуючих імпульсів може виникати через різницю параметрів окремих елементів СІФУ, живлення їх від мережі з несинусоїдальною напругою. За наявності контурів зворотного зв'язку в СІФУ несиметрія керуючих імпульсів може підсилюватися. Некеровані перетворювачі також генерують анормальні гармоніки струму при живленні їх від мережі зі спотвореною кривою напруги, а також при несиметрії напруги мережі.

Несиметрія напруги мережі істотно впливає і на рівень анормальних гармонік, генерованих керованим перетворювачем. Так,

для перетворювача з арккосинусною регулювальною характеристикою при зміні опорної напруги від U_1 до U_2 (рис. 7.13) момент відкриття тиристора при постійному сигналі керування U_y змінюється від α_0/ω_0 до α'_0/ω'_0 .

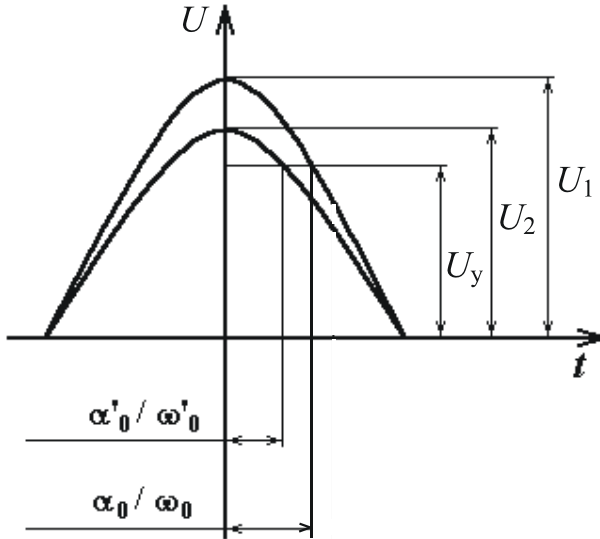


Рис. 7.13

При відхиленні кутів керування α_i по окремих каналах СІФУ від встановлених значень змінюються кути комутації. Зв'язок між модулями збільшень цих кутів складає $\Delta\alpha_i$ і $\Delta\gamma_i$ при сталості випрямленого струму, співвідношення між ними визначається виразом:

$$\Delta\gamma_i = \left[1 - \frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha+\gamma)} \right] \Delta\alpha_i = k\Delta\alpha_i.$$

Внаслідок порушення симетрії кривих струму мережі виникають аномальні гармоніки. Аналітично відповідні розрахункові вирази можна одержати шляхом розкладання в ряд Фур'є криволінійних імпульсів тривалістю $\Delta\gamma_i$ чи всієї спотвореної кривої. Перший підхід зручно реалізувати, скориставшись розкладанням виразу для I_n у ряд Тейлора, причому для практичних цілей залишком Лагранжа можна знехтувати:

$$I_n(\alpha + \Delta\alpha_i, \gamma + \Delta\gamma_i) = I_n(\alpha, \gamma) + \sum_{i=1}^4 \frac{\partial I_n(\alpha, \gamma)}{\partial \alpha} \Delta\alpha_i.$$

Аномальні гармоніки $I_{\text{пан}}$ визначаються другим членом виразу. На практиці $\Delta\alpha_i$ є стохастичними величинами, розподіленими в діапазоні $0 \div \Delta\alpha_n$, як правило, за законом. Значення $I_{\text{пан}}$ також є ймовірнісними величинами. Розподіл амплітуд аномальних гармонік підкоряється закону Релея, а фаз — закону ймовірності. Тому для розрахунків досить визначити максимально можливе значення $(I_{\text{пан}})_{\text{max}}$.

При використанні СІФУ тиристорних перетворювачів з арккосинусною характеристикою виявляється $\Delta\alpha_i \leq 3^\circ$, при цьому рівні аномальних гармонік не перевищують 3%.

2. ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ВІД ВИЩИХ ГАРМОНІК

2.1. Втрати в електричних машинах і трансформаторах

При роботі синхронних і асинхронних двигунів в умовах не-синусоїдальної напруги виникають додаткові втрати потужності, обумовлені вищими гармоніками струму в обмотках статора і ротора. З'являються також додаткові втрати в сталі статора і ротора, однак цими втратами можна знехтувати. Основна частина додаткових втрат приходить на частку заспокійливої і статорної обмоток, втрати в обмотці ротора, як правило, виявляються меншими. В асинхронних двигунах високої напруги втрати в статорі і роторі приблизно однакові.

Оцінка втрат від вищих гармонік у синхронних двигунах проводиться за кривими (рис. 7.14), на яких зображені відношення цих втрат $\Delta P_{\text{он}}$ при напрузі рівній 1% напруги основної частоти, до сумарних номінальних втрат ΔP_n . Величина ΔP_n наводиться в паспортних даних електродвигунів. Двигуни мають шихтовані статор і ротор.

Питомі втрати для однієї гармоніки будуть різними залежно від того, яку послідовність утворить система векторів напруги цієї гармоніки, оскільки різною виявляється частота струмів у роторі і заспокійливій системі. На рис. 7.14 криві побудовані для середнього значення питомих втрат, розрахованих для випадку прямого і

зворотного проходження фаз векторів напруги гармонік. З розгляду кривих випливає, що відношення $\Delta P_{\text{дл}} / \Delta P_{\text{н}}$ має найбільше значення на частотах гармонік низького порядку, у першу чергу другого і третього. Втрати на частотах гармонік вище 13-ї дуже малі, і в розрахунках ними можна знехтувати.

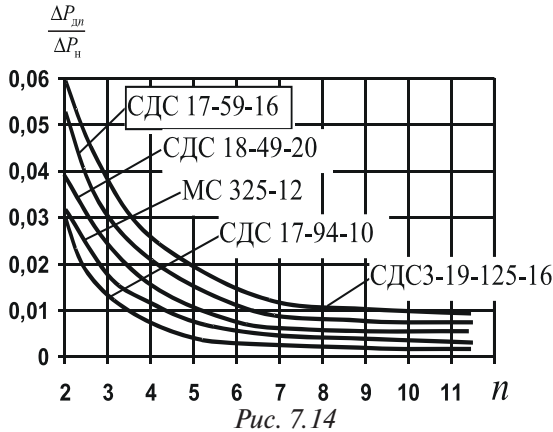


Рис. 7.14

Сумарні втрати $\Delta P_{\text{yn}}, \%$, обумовлені всіма гармоніками напруги, знаходяться за формулою:

$$\Delta P_{\Sigma n} = \sum_{n=2}^l \Delta P_{\text{дл}} \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2.$$

Розрахунки показують, що навіть у випадках неприпустимих спотворень напруги ($k_{\text{нс}} = 10 \div 15\%$) додаткові втрати від гармонік у синхронних двигунах із шихтованими статором і ротором не перевищують кількох відсотків номінальних втрат. Це значно менше припустимого значення додаткових втрат, що складає 0,25—0,4% номінальної активної потужності двигунів потужністю вище 1000 кВт. Тому перегрівання явнополюсних синхронних двигунів із шихтованими полюсами на промислових підприємствах не спостерігалось.

Втрати від вищих гармонік у синхронних двигунах з масивними полюсами виявляються значно більшими. Робота таких двигунів при несинусоїдальній напрузі загрожує небезпекою неприпустимого перегріву й ушкодження обмотки збудження. Так само

це стосується і синхронних компенсаторів, що мають масивні полюси. Синхронні компенсатори, встановлювані в мережах підприємств із високим рівнем гармонік, повинні мати шихтовані полюси. Електропромисловість серійно такі компенсатори не виготовляє.

Додаткові втрати в асинхронному двигуні, обумовлені струмом n -ї гармоніки, визначаються:

$$\Delta P_{\text{дн}} = 3I_n^2(r_{1n} + r'_{2n}),$$

де r_{1n} і r'_{2n} — відповідно активний опір статора і приведений активний опір ротора на частоті n -ї гармоніки.

При підвищених частотах в обмотках статора і ротора різко виявляється поверхневий ефект, тому:

$$r_{1n} = r_1 \sqrt{n}; \quad r'_{2n} = r'_2 \sqrt{n}.$$

Для асинхронних двигунів високої напруги можна вважати, що $r_1 = r'_2$

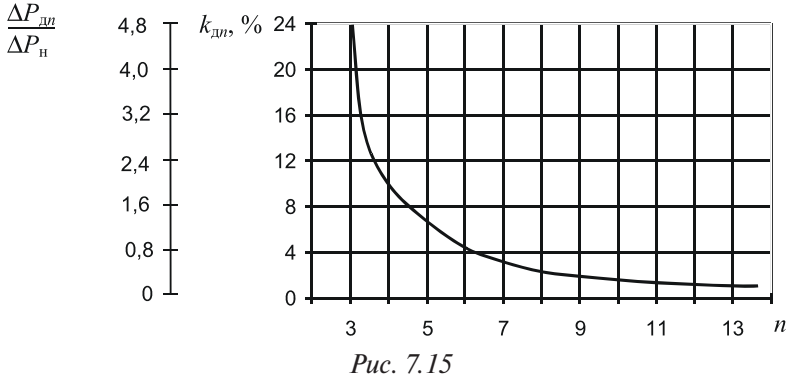
Виразивши струм n -ї гармоніки через номінальний струм двигуна і кратність λ_n пускового струму, розрахункову формулу для визначення сумарних втрат від вищих гармонік можна зобразити у вигляді:

$$\Delta P_{\Sigma n} = U_{1n} \lambda_n^2 \sum_{n=2}^l \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}) = U_{1n} \sum_{n=2}^l k_{\text{дн}},$$

де $k_{\text{дн}}$ — коефіцієнт, що враховує зростання втрат у міді за рахунок n -ї часової гармоніки.

Крива відносних втрат від вищих гармонік в асинхронних двигунах показана на рис. 7.15. По осі ординат відкладені середні значення $k_{\text{дн}}$ для випадків, коли n -а гармоніка струму утворить системи прямої і зворотної послідовності. При побудові кривої прийнято $\lambda_n = 5,5$.

Номінальні втрати в міді статора синхронних двигунів потужністю вище 1000 кВ • А складають до 20% загальної суми втрат ΔP_n . З урахуванням цього на рис. 7.15 є друга вісь ординат, на якій зображені значення $\Delta P_{\text{дн}} / \Delta P_n$.



В асинхронному електроприводі при великих частотах індуктивні опори значно більші за величиною, ніж активні. У цьому випадку, для вищих гармонічних схема заміщення АД має вигляд (рис.7.16).

Гармонічні складові струмів в обмотках АД:

$$I_n \approx \frac{U_n}{n(x_1 + x_2')},$$

тобто залежать від індуктивного опору короткого замикання:

$$x_k = x_1 + x_2'$$

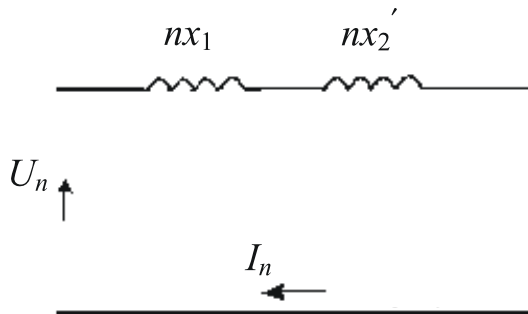


Рис. 7.16

Для найпоширеніших мостових схем змінної напруги і частоти граничні значення напруг 5-ї і 7-ї гармонік складають: $U_{(5)} \approx 0,25 U_{(1)}$; $U_{(7)} \approx 0,15 U_{(1)}$.

Схеми заміщення ДПС для постійної складової і гармонічних складових випрямленого струму зображені на рис. 7.17.

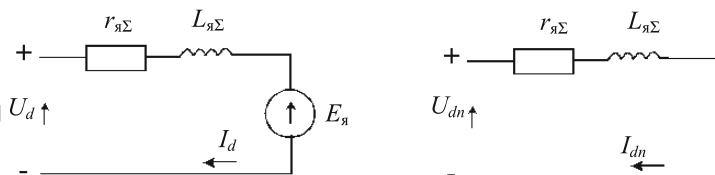


Рис. 7.17

ЕРС якоря $E_{\text{я}} = k\Phi\omega$ не містить вищих гармонічних, тому що високочастотні пульсації випрямленого струму практично не впливають на кутову швидкість двигуна в силу інерційності його механічної частини. Тому для вищих гармонічних знехтуємо ЕРС (друга схема). Зі схеми випливає.

$$I_{dn} = \frac{U_{dn}}{\sqrt{r_{\text{я}\Sigma}^2 + (\omega_{0n} L_{\text{я}\Sigma})^2}}.$$

Для реальних параметрів двигунів $\omega_{0n} L_{\text{я}\Sigma} \gg r_{\text{я}\Sigma}$:

$$I_{dn} \approx \frac{U_{dn}}{\omega_{0n} L_{\text{я}\Sigma}} = \frac{U_{dn}}{nd\omega_0 L_{\text{я}\Sigma}},$$

де $\omega_0 = 314 \frac{1}{c}$ — частота мережі ($f=50$ Гц); $nd=pm$ ($p=1, 2, 3, \dots$)

— номери гармонічних складових.

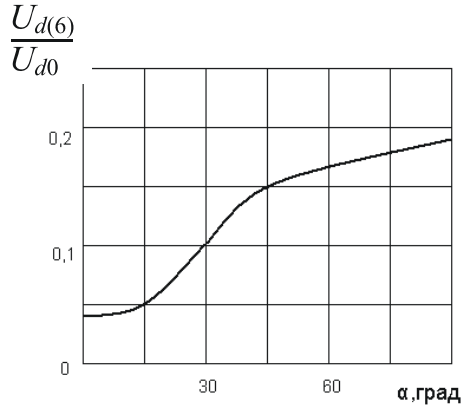


Рис. 7.18

Додаткові втрати в обмотці якоря від вищих гармонічних в основному визначаються найбільш низькочастотною складовою струму I_{dn} з порядковим номером $nd=m=6$. Залежність низькочастотної складової напруги $U_{d(6)}$ від кута керування зображена на рис.7.18.

Втрати в двигунах можна знизити, використовуючи імпульсні перетворювачі. У тиристорних перетворювачах ШІМ здійснюється на частотах 0,4 – 1 кГц, а в транзисторних більше – 10 кГц. Вищі гармонічні з такими частотами добре демпфіруються індуктивними опорами обмоток двигуна. Однак з ростом частоти ростуть втрати в перетворювачі. На практиці частоту вибирають такою, щоб збільшення втрат у перетворювачі компенсувалося за рахунок їх зниження в двигуні.

Втрати активної потужності від струмів вищих гармонік у трансформаторах виражаються формулою:

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2}^l I_{n\Gamma}^2 r_k k_{n\Gamma},$$

де $I_{n\Gamma}$ – струм n -ї гармоніки, що проходить через трансформатор; r_k – опір короткого замикання трансформатора при промисловій частоті; $k_{n\Gamma}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення опору короткого замикання для вищих гармонік внаслідок впливу поверхневого ефекту й ефекту близькості. Для силових трансформаторів можна прийняти $k_{5\Gamma}=2,1$; $k_{7\Gamma}=2,5$; $k_{11\Gamma}=3,2$; $k_{13\Gamma}=3,7$.

2.2. Втрати в батареях конденсаторів

При несинусоїдальній напрузі на затискачах батареї конденсаторів у їх діелектрику з'являються додаткові активні втрати, обумовлені вищими гармоніками. У заводських мережах підключення батареї конденсаторів можливе за однією з таких схем: безпосередньо до шин підстанції; у колі реактор-батарея для фільтрації гармонік послідовно з реактором, що захищає батарею від проникнення вищих гармонік. При підмиканні батареї конденсаторів без реактора втрати в діелектрику знаходяться в припущенні, що коефіцієнт діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ однаковий для вищих гармонік до 13-ї включно:

$$\Delta P_{\Sigma} = \omega C \operatorname{tg}\delta \sum_{n=1}^{13} U_n^2,$$

де U_n — напруга n -ї гармоніки на шинах після підмикання батареї конденсаторів ємністю C .

Втрати у фільтрі LC n -ї гармоніки складаються з втрат у реакторі і втрат у батареї конденсаторів на частотах гармоніки, на яку налагоджений фільтр, і 1-ї гармоніки. Втратами від інших гармонік, що проникають у фільтр, можна знехтувати. Втрати на частоті n -ї гармоніки у фільтрі:

$$\Delta P_{\Phi n} = 3I_n^2 r_p \sqrt{n} + 3n\omega C U_n^2 \operatorname{tg}\delta,$$

де I_n — струм n -ї гармоніки, що проходить через фільтр; r_p — активний опір реактора для n -ї гармоніки, взятий у припущенні різкого прояву поверхневого ефекту.

Останній вираз може бути приведений до вигляду:

$$\Delta P_{\Phi n} = 3I_n^2 X_p (n \operatorname{tg}\delta + \sqrt{n} \operatorname{ctg}\varphi_p),$$

де X_p — індуктивний опір реактора для 1-ї гармоніки;

$$\operatorname{ctg}\varphi_p = \frac{r_p}{X_p}.$$

Втрати на основній частоті в батареї і реакторі:

$$\Delta P_1 = U^2 \omega C \alpha^2 \operatorname{tg} \delta + 3 I^2 r_p,$$

де U і I — відповідно лінійна напруга мережі і струм у колі фільтра; $\alpha = n / (n^2 - 1)$.

Вираз для ΔP_1 може бути представлено в іншому вигляді:

$$\Delta P_1 = Q_\delta \alpha^2 \left(k_U^2 \operatorname{tg} \delta + \frac{\operatorname{ctg} \varphi_p}{n^2} \right),$$

де Q_δ — номінальна потужність батареї конденсаторів; $k_U = \frac{U_\delta}{U}$.

У випадку установки кількох фільтрів, настроєних на частоти $n_1, n_2, \dots, n_l$ -ї гармонік, сума активних втрат розраховується за формулою:

$$\Delta P_{\Phi\Sigma} = 3 \sum_{k=1}^l I_{nk} X_{pk} \left(n_k \operatorname{tg} \delta + \sqrt{n_k} \operatorname{ctg} \varphi_{pk} \right) + \sum_{k=1}^l Q_{\delta k} \alpha_k^2 \left(k_{uk}^2 \operatorname{tg} \delta + \frac{\operatorname{ctg} \varphi_{pk}}{n_k^2} \right),$$

де $k_{uk} = \frac{U_\delta}{U}$; $Q_{\delta k}$ — номінальна потужність батареї конденсаторів k -го фільтра.

При підключенні батареї конденсаторів через захисний реактор сумарні втрати в конденсаторах і реакторі:

$$\Delta P_{kp} = Q_\delta \alpha_l^2 \left(\operatorname{tg} \delta + \frac{\operatorname{ctg} \varphi_p}{ln_l} \right),$$

де $l = \frac{X_\delta}{X_p n_l^2}$; $\alpha_l = \frac{ln_l}{ln_l^2 - 1}$; $X_\delta = \frac{1}{\omega C}$; n_l — найменший номер вищої гармоніки амплітудного спектра напруги мережі.

3. ВПЛИВ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА СИЛОВІ УСТАНОВКИ, СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ, АВТОМАТИКИ І ЗВ'ЯЗКУ

Вищі гармоніки небажані з ряду причин: з'являються додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах; утруднюється компенсація реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів; скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів; погіршується робота пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку. При роботі асинхронного електродвигуна в умовах несинусоїдальної напруги знижуються його коефіцієнт потужності й обертаючий момент на валу. Так, наприклад, якщо амплітуди 5-ї і 7-ї гармонік напруги складають відповідно 20 і 15% амплітуди 1-ї гармоніки, то коефіцієнт потужності двигуна зменшується на 2,6% у порівнянні зі значенням його при синусоїдальній напрузі.

Моменти, що розвиваються вищими гармоніками струму, також дуже малі. Для асинхронного двигуна середньої потужності при питомій вазі 5-ї гармоніки напруги, рівній 20% основної, момент, обумовлений 5-ю гармонікою, не перевищує 0,1% моменту, що розвивається при промисловій частоті.

Спотворення форми кривої напруги помітно позначається на виникненні і протіканні іонізаційних процесів в ізоляції електричних машин і трансформаторів. За наявності газових включень в ізоляції виникає іонізація, сутність якої полягає в утворенні об'ємних зарядів і наступної нейтралізації їх. Нейтралізація зарядів пов'язана з розсіюванням енергії, наслідком якого є електричний, механічний і хімічний вплив на навколишній діелектрик. У результаті розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що призводить до зниження її електричної міцності, зростання діелектричних втрат і в кінцевому рахунку до скорочення терміну служби.

Кількість розрядів у газових включеннях залежить від форми напруги, прикладеної до ізоляції. На рис. 7.19 зображені періодичні криві напруги синусоїдальної (*б*) форми, загостреної (*а*) і сплющеної (*в*) з однаковим діючим значенням напруги.

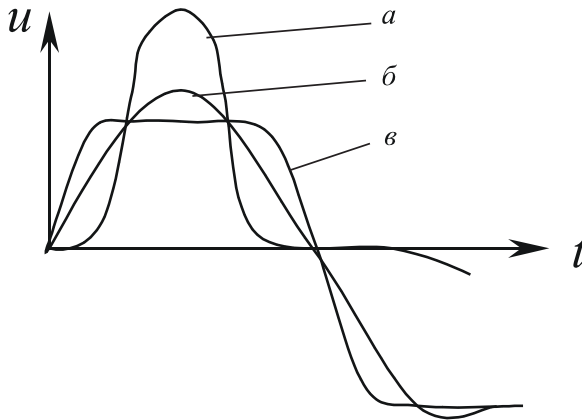


Рис. 7.19

Кількість розрядів у кожному газовому включенні за час рівний періоду кривої відповідно дорівнює 8; 16; 4. Відношення коефіцієнтів діелектричних втрат $\text{tg} \delta$ 1: 2,25: 0,23.

Дослідження показують, що при однакових амплітудах кривої напруги $\text{tg} \delta$ буде великим для кривої загостреної форми і меншим для сплющеної кривої (у порівнянні із синусоїдальною), хоча розходження будуть не настільки великі, як при однаковому діючому значенні. У мережах промислових підприємств за рахунок вищих гармонік криві напруги приймають більш загострену форму в порівнянні із синусоїдальною. Тому наявність вищих гармонік у цих мережах призводить до прискореного старіння ізоляції електричних машин і трансформаторів.

За наявності вищих гармонік у кривої напруги процес старіння діелектрика конденсаторів протікає також більш інтенсивно, ніж у випадку, коли конденсатори працюють при синусоїдальній напрузі. Це пояснюється тим, що фізико-хімічні процеси в діелектриках, що обумовлюють старіння їх, значно прискорюються при високих частотах електричного поля. Аналогічно впливає додаткове нагрівання, викликане протіканням вищих гармонік струму.

Відповідно до ДСТ 1282-68 батареї конденсаторів можуть довгостроково працювати при перевантаженні їх струмами вищих гармонік не більше, ніж на 30%; припустиме підвищення напруги

складає 10%. Однак під час тривалої експлуатації конденсаторів у цих умовах термін служби їх скорочується. В умовах промислових підприємств, як правило, конденсатори періодично виявляються в режимі, близькому до резонансу струмів на частоті якої-небудь з гармонік. Внаслідок систематичних перевантажень вони швидко виходять з ладу.

При несинусоїдальній напрузі мережі відбувається прискорення старіння ізоляції силових кабелів. Для підтвердження цього положення були співставлені результати вимірювань струмів витоку кабелів, прокладених майже одночасно і працюючих у подібних температурних умовах. Частина обстежених кабелів працювала за практично синусоїдальної напруги, інша — при рівні вищих гармонік у кривій напруги в межах 6 — 8,5% (переважали 5-я і 7-я гармоніки). Струми витоку в другому випадку через 2,5 роки експлуатації виявилися в середньому на 36%, через 3,5 роки — на 43% більше, ніж у першому.

Досвід експлуатації свідчить про те, що в мережах з великою питомою вагою вентиляльних навантажень часто виникають однофазні замикання в кабелі. Так, у мережах безперервного товстолистого стану гарячого прокату з $k_{\text{нс}} \approx 8\%$ число однофазних замикань на землю за рік виявилось на 30 — 40% більше, ніж у мережах інших цехів, де перетворювачів немає, і $k_{\text{нс}} \leq 2\%$. В обох випадках рівень напруги в мережі був досить стабільним. Однофазні замикання часто переходять у дво- і трифазні в місці першого пробоя внаслідок пропалювання кабелю, тому що ушкодження не самоліквідуються.

Облік електроенергії при несинусоїдальних режимах пов'язаний зі значними неточностями. Для обліку електроенергії найбільше поширення одержали лічильники індукційної системи, що мають негативну частотну похибку на частотах вищих гармонік. Залежно від того, лінійне чи нелінійне навантаження, можливий «переоблік» або «недооблік» споживаної ними електроенергії. На рис. 7.20 зображена частотна характеристика лічильника.

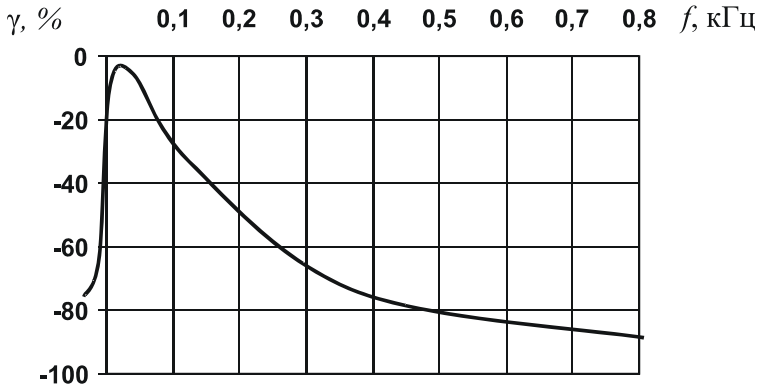


Рис. 7.20

Нелінійні навантаження є генераторами вищих гармонік. Потужність $P_{\text{нл}}$, споживана ними:

$$P_{\text{нл}} = P_1 - \sum_{n=2}^l \Delta P_n (1 + \gamma_n),$$

де P_1 і $\sum_{n=2}^l \Delta P_n$ — потужність на частотах першої і вищих гармонік;

γ_n — частотна похибка лічильника на частоті n -ї гармоніки.

Для лінійних навантажень:

$$P_{\text{л}} = P_1 + \sum_{n=2}^l \Delta P_n (1 + \gamma_n).$$

Результуюча похибка обліку електроенергії, обумовлена неси-
нусоїдальністю:

$$\gamma_{\Sigma} = \sum_{n=2}^l \Delta P_{n*} \gamma_n,$$

$$\text{де } \Delta P_{n*} = \frac{\Delta P_n}{P_1}.$$

З останнього виразу випливає, що у випадку лінійних навантажень, оскільки всі $\gamma_n < 0$, виявляється $\gamma_\Sigma < 0$, тобто має місце «недооблік» енергії. При нелінійних навантаженнях $\gamma_\Sigma > 0$, тобто відбувається «переоблік» електроенергії. Таким чином, споживачі, що погіршують якість електроенергії, як би «караються» за це. Споживачі, що не є джерелами гармонік, однак споживаючи їх, з погляду обліку електроенергії знаходяться в більш сприятливому положенні. Ці обставини приводять до виникнення конфліктних ситуацій між енергопостачальними організаціями і споживачами при розрахунках за витрачену електроенергію. Лічильники, встановлені з боку вищої чи нижчої напруги трансформатора підстанції, працюють з незначною частотною похибкою завдяки меншому спотворенню напруги і струму. Витрата активної енергії, врахована ними, буде менше сумарної витрати, визначеної показами лічильників нелінійних навантажень.

Частотна похибка індукційного лічильника на частоті n -ї гармоніки γ_n визначається відомим співвідношенням:

$$\gamma_n = \alpha [\exp(-\beta n) - 1],$$

де $\alpha=1,28$; $\beta=0,19$.

На частотах 5, 7, 11 і 13-ї гармонік частотні похибки $\gamma_5=0,32$; $\gamma_7=0,54$; $\gamma_{11}=0,71$; $\gamma_{13}=0,84$.

Для потужних нелінійних навантажень, підімкнених до шин 6-10 кВ підстанцій підприємств, виявляється:

$$\cos \varphi_n = \frac{0,1 \div 0,3}{\sqrt{n}}.$$

При великих спотвореннях напруги ($k_{nc} \approx 7 \div 10\%$) і перевазі 5–13-ї гармонік струмів позитивні неточності вимірювання енергії, споживаної тиристорними перетворювачами, можуть досягати 3–4%. Найбільше вплив несинусоїдальності на похибки індукційних лічильників виявляється на частотах 11-ї і 13-ї гармонік. При $k_{nc} \approx 5\%$, що припустимо відповідно до ДСТУ 13109-87, додаткові похибки вимірювань виявляються малими.

Вимірювання напруги і струму при наявності вищих гармонік також пов'язане з появою додаткових неточностей. Вимірювальні пристрої систем керування й автоматики, як, наприклад, безконтактний автоматичний регулятор напруги під навантаженням, ав-

томатичний регулятор потужності конденсаторної батареї типу АРКОН тощо, реагують на зміни амплітудного, середнього чи середньоквадратичного значення напруги за період.

Максимальна похибка виміру амплітуди несинусоїдальної напруги $\Delta\alpha$ залежно від рівня вищих гармонік знаходиться в межах:

$$\sum_{n=2}^l U_n^* \geq \Delta\alpha \geq -\sum_{n=2}^l U_n^* \text{ при } \sum_{n=2}^l U_n^* n^2 < 1,$$

де U_n^* — відносний рівень вищих гармонік напруги; l — номер останньої з гармонік, що враховуються.

Якщо $\sum_{n=2}^l U_n^* n^2 > 1$, то максимальна похибка $\Delta\alpha \leq \sum_{n=2}^l U_n^*$. При цьому похибка оцінюється як:

$$\Delta\alpha = \frac{U_m - U_{m1}}{U_{m1}},$$

де U_m — максимальне значення амплітуди несинусоїдальної напруги; U_{m1} — амплітуда 1-ї гармоніки напруги.

При вимірі середнього за напівперіод значення напруги максимальна похибка знаходиться в межах:

$$-\sum_{n=3}^{2k+1} \frac{U_n^*}{n} \leq \Delta\alpha_{\text{ср}} \leq \sum_{n=3}^{2k+1} \frac{U_n^*}{n},$$

$$\text{де } \Delta\alpha_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}} - U_{\text{ср1}}}{U_{\text{ср1}}} \text{ — похибка вимірювання; } U_{\text{ср}} \text{ і } U_{\text{ср1}} \text{ — відпо-}$$

відно середнє за напівперіод значення несинусоїдальної напруги і напруги 1-ї гармоніки.

Вплив вищих гармонік на системи імпульсно-фазового керування СІФУ перетворювача може призвести до виникнення так званої гармонічної нестійкості. Явище гармонічної нестійкості полягає в появі на шинах багатофазного перетворювача високої напруги парної чи кратної трьом гармоніки. При цьому в кривій напруги мережі з'являються також інші парні і кратні трьом гармоніки, однак менші за величиною. Спотворення кривої напруги мережі можуть бути настільки великими, що в інверторному ре-

жимі перетворювача з'являться порушення комутації. При цьому робота СІФУ також може виявитися нестійкою.

Гармонічна нестійкість може виникнути при підімкненні перетворювача до електричної системи, потужність короткого замикання якої сумірна з потужністю перетворювача, у випадку, якщо є інші джерела гармонік (наприклад, силові трансформатори) і при наявності асиметрії керуючих імпульсів СІФУ. Результатом цієї асиметрії є виникнення в спектрі струму перетворювача парних і кратних трьом гармонік. Посилення їх за наявності зазначених вище умов і призводить до гармонічної нестійкості. Підвищення напруги на частоті будь-якої гармоніки істотно обмежується при використанні загороджувальних фільтрів у СІФУ.

Відомі випадки виникнення автоколивань у системах керування вентильними перетворювачами внаслідок проникнення в СІФУ 30 — 40-х гармонік струму. Внаслідок автоколивань виникали значні коливання струму навантаження, що призводило до аварійного вимикання перетворювача.

Вплив гармонік на індукційні датчики положення може призвести до порушення технологічного процесу. Такі випадки мали місце на машинобудівних підприємствах. Вищі гармоніки струму і напруги мережі погіршують роботу телемеханічних пристроїв і навіть викликають збої, якщо силові кола використовуються як канали зв'язку між напівкомплектами диспетчерського і контролюваного пунктів. Утруднюється використання простих і дешевих систем циркулярного телекерування по лініях розподільних мереж за наявності парних гармонік. Вищі гармоніки струму в повітряних лініях електропередачі погіршують роботу каналів зв'язку.

Відомі випадки корисного застосування вищих гармонік. Так, широке застосування на промислових підприємствах одержали системи сигналізації однофазних замикань на землю, засновані на використанні природних чи штучно генерованих вищих гармонік струму замикання на землю. У мережах 6 — 10 кВ багатьох великих промислових підприємств передбачається компенсація ємнісного струму однофазного замикання на землю за допомогою дугогасильних апаратів. Тому при резонансному налаштуванні цих апаратів використання ємнісного струму промислової частоти для сигналізації неможливе. Застосування вищих гармонік дозволяє забезпечити необхідні чутливість і селективність роботи сигналізації. Така сигналізація одержала також значне поширення в розподільних мережах енергосистем.

Гармоніки струму, проникаючи в мережі енергосистем, призводять до погіршення роботи високочастотного зв'язку і систем автоматики, а також викликають помилкові спрацьовування деяких релейних захистів, особливо значний вплив гармонік на пристрої, що не містять напівпровідникових елементів.

4. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ І ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НА МЕРЕЖУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ВЕНТИЛЬНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

4.1. Традиційні способи компенсації реактивної потужності

В наш час застосовують такі методи регулювання якості електроенергії і зменшення впливу на мережу вентильних електроприводів:

- використання традиційних способів компенсації реактивної енергії. До них належать синхронні двигуни і компенсатори, а також батареї конденсаторів;
- застосування багатофункціональних пристроїв — силових резонансних фільтрів. До них належать: фільтрокомпенсуючі (ФКП) і фільтросиметруючі (ФСП) пристрої; пристрої «акумуляторна батарея — перетворювач»; коректори потужності; статичні тиристорні компенсатори. Перераховані пристрої забезпечують одночасно компенсацію реактивної потужності, фільтрацію вищих гармонік, зменшення відхилень і коливань напруги та її симетрування по фазах;
- зниження рівнів гармонік засобами мережі живлення;
- використання спеціальних способів керування і схемних рішень вентильних перетворювачів;
- застосування систем керування вентильними перетворювачами, що дозволяють поліпшити енергетичні показники електропривода.

Синхронні двигуни є ефективним засобом компенсації реактивної потужності в системі електропостачання. Виконуючи свою основну функцію приводного двигуна, СД одночасно можуть генерувати в мережу реактивну потужність, тобто працювати з ви-

переджальним $\cos\varphi$. Це забезпечується відповідним регулюванням їх струму збудження.

Синхронні компенсатори призначені для компенсації коефіцієнта потужності мережі і підтримки нормального рівня напруги в районах зосередження споживчих навантажень. Нормальним є перезбуджений режим роботи синхронного компенсатора, коли він віддає в мережу реактивну потужність.

У зв'язку з цим компенсатори, як і призначені для цієї ж мети батареї конденсаторів, установлювані на споживчих підстанціях, називають також генераторами реактивної потужності. Однак у періоди спаду споживчих навантажень (наприклад, уночі) нерідко виникає необхідність роботи синхронних компенсаторів також у недозбудженому режимі, коли вони споживають з мережі індуктивний струм і реактивну потужність. У цьому випадку напруга мережі прагне зрости, і для підтримки її на нормальному рівні необхідно завантажити мережу індуктивними струмами, що викликають у ній додаткове зниження напруги. Для цього кожен синхронний компенсатор забезпечується автоматичним регулятором збудження, що підтримує напругу на затискачах компенсатора сталою.

Синхронні компенсатори позбавлені приводних двигунів і з погляду режиму своєї роботи, по суті, є синхронними двигунами, що працюють на неробочому ходу. Тому синхронні компенсатори завантажені також невеликим активним струмом і споживають з мережі активну потужність для покриття своїх втрат. Компенсатори будуються на потужність до $S_n = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ і мають полюсну конструкцію, звичайно з 4 полюсами, і мають полюсну конструкцію, звичайно з $2p = 6$ чи 8. Потужні компенсатори мають водневе охолодження.

Для здійснення асинхронного пуску всі синхронні компенсатори забезпечуються пусковими обмотками в полюсних наконечниках, полюси робляться масивними. При цьому використовується спосіб прямого, а в необхідних випадках — реакторного пуску. Іноді потужні компенсатори пускаються в хід також за допомогою пускових фазних асинхронних двигунів, що розміщуються з ними на одному валу. Для синхронізації з мережею при цьому звичайно використовується метод самосинхронізації.

Оскільки синхронні компенсатори не розвивають активної потужності, то питання про статичну стійкість роботи для них втрачає гостроту. Вони виготовляються з меншим повітряним зазором, ніж генератори та двигуни, тому реактивні опори в них більші.

Зменшення зазору дозволяє полегшити обмотку збудження й здешеввити машину.

Номинальна повна потужність синхронного компенсатора S_H $= m U_H I_H$ відповідає його роботі з перезбудженням. Найбільші значення струму і потужності в недозбудженому режимі виходять при роботі в реактивному режимі з $i_f = 0$ і $E = 0$. Якщо знехтувати втра-

тами, то $I_{H3} = \frac{E - U_H}{x_d} = \frac{U_H}{x_d}$, і відповідна повна потужність складає

$$S_{H3} = m U_H I_{H3} = \frac{m U_H^2}{x_d}.$$

Відповідно до останніх рівностей

$$\frac{S_{H3}}{S_H} = \frac{U_H}{x_d I_H} = \frac{1}{x_{d*}}.$$

$$\text{Звичайно } x_{d*} = 1,5 \div 2,2 \text{ і } \frac{S_{H3}}{S_H} = 0,45 \div 0,67.$$

У більшості випадків у недозбудженому режимі вимагаються менші потужності, ніж у перезбудженому, і зазначені вище значення відношень задовольняють експлуатаційним вимогам, але в деяких випадках необхідна велика потужність S_{H3} . Цього можна досягти збільшенням зазору, що, однак, призводить до подорожчання машини, тому останнім часом ставиться питання про використання режиму з негативним струмом збудження. При цьому $E < 0$, унаслідок чого I_{H3} зростає. Оскільки синхронний компенсатор по активній потужності завантажений тільки втратами, він може працювати стійко також з невеликим негативним збудженням.

У ряді випадків у маловодні періоди для роботи в режимі компенсаторів використовуються також генератори гідроелектростанцій.

Конденсатори — це спеціальні ємності, призначені для вироблення реактивної потужності. Конденсатори в порівнянні з іншими джерелами реактивної потужності мають такі переваги, як малі втрати реактивної потужності, простоту монтажу й експлуатації. До їх недоліків слід віднести залежність генерованої потужності від напруги, недостатню стійкість при перевантаженнях по струму і напрузі, а також погіршення роботи в мережах з підвищеним вмістом вищих гармонік.

4.2. Силіві резонансні фільтри енергетичного призначення

Зниження рівня вищих гармонік в електромережах є частиною загальної задачі зменшення впливу нелінійних навантажень на мережу живлення і поліпшення якості енергії в електричних мережах підприємств. Комплексне вирішення цієї задачі, засноване на застосуванні багатофункціональних пристроїв, виявляється в економічному відношенні більш доцільним, ніж, наприклад, використання заходів щодо поліпшення форми струму мережі перетворювача. Прикладом таких багатофункціональних пристроїв є силіві резонансні фільтри (СРФ) вищих гармонік, так звані фільтрокомпенсуючі пристрої, що поряд зі зниженням рівня вищих гармонік генерують у мережу реактивну потужність. За певних умов такі фільтри можуть використовуватися також для симетрування системи нелінійних напруг в електромережі. Фільтри можуть використовуватися для поділу лінійних і нелінійних навантажень (загороджувальні фільтри) чи для шунтування (поглинання) струмів вищих гармонік.

Поділ лінійних і нелінійних навантажень може здійснюватися за допомогою фільтрів низьких частот (ФНЧ) чи смугових фільтрів. Останні більш складні, ніж ФНЧ. Найпростішим фільтром низької частоти є Г-подібний фільтр, контур якого утворюється індуктивністю трансформатора перетворювача і ємністю батареї конденсаторів, підключеної до шин підстанції. Щоб уникнути резонансних підвищень напруги на частотах гармонік, резонансна частота контуру мережа — батарея конденсаторів повинна бути меншою частоти найменшої гармоніки амплітудного спектра струму (ЕРС) нелінійного навантаження.

Відношення опорів навантаження (батареї) і мережі для n -ї гармоніки:

$$\frac{X_{Cn}}{X_{nn}} = \frac{S_{\kappa}}{Q_n^2}.$$

Відношення потужності короткого замикання за трансформатором живлення до потужності цього трансформатора знаходиться в межах:

$$\frac{S_k}{S_r} = 5 \div 10.$$

Відношення струмів n -ї гармоніки після фільтра і до фільтра позначимо в такий спосіб:

$$k = \frac{I_{2n}}{I_{1n}}.$$

За допомогою останніх виразів співвідношення між потужністю трансформатора живлення і реактивною потужністю батареї конденсаторів, при якому забезпечується задане значення коефіцієнта k , записується у вигляді

$$\frac{Q_\delta}{S_r} \geq \frac{(5 \div 10) S_r (1 - k)}{k n^2}.$$

Останній вираз дозволяє дійти висновку, що для ефективного зниження рівнів гармонік за допомогою Г-подібного фільтра потрібна потужність батареї конденсаторів того ж порядку, що і потужність трансформатора живлення. Очевидно, що таке рішення нерациональне.

Аналогічний результат виходить і при використанні мостових ФНЧ. Застосування Т-подібного фільтра менш доцільно, ніж П-подібного, тому що Т-подібний фільтр менш надійний через наявність двох послідовно включених реакторів. Крім того, вхідний опір Т-подібного фільтра на частотах гармонік дещо вище, ніж П-подібного, тому спотворення кривої напруги на затискачах нелінійного навантаження будуть також великими.

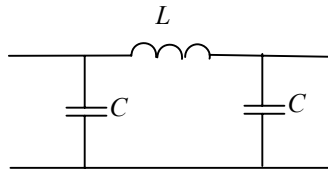


Рис. 7.21

При визначенні параметрів реакторів і конденсаторів фільтрів знехтуємо активними опорами фільтра і систем електропостачання. Передатна функція по струму схеми, наведеної на рис.7.21, має вид:

$$I(p) = \frac{i_2(p)}{i_1(p)} = \frac{1}{p^4 C^2 L_n L + p^2 C(2L_n + L) + 1};$$

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{n^4 \frac{X_p X_n}{X_c^2} + n^2 \frac{X_p + 2X_n}{X_c} + 1},$$

де X_p, X_n, X_c – реактивні опори реактора фільтра, навантаження і поперечного плеча фільтра.

Позначивши $\frac{X_p}{X_n} = k_n$ і $\frac{X_n}{X_c} = k_{p1}$, вираз для k_{p1} при заданому значенні коефіцієнта k знайдемо з рівняння:

$$k_{p1} = -\frac{k_n n^2}{2(k_n n^2 + 2)} + \sqrt{\frac{1-k}{\alpha(k_n n^2 + 2)n^2} + \left[\frac{k_n}{2(k_n n^2 + 2)} \right]^2}.$$

Для $k_n = 1, k = 0,5$ і $n = 5$ виявляється $k_{p1} = 0,025$. Отже, сумарна потужність батареї конденсаторів фільтра:

$$Q_{\delta\Sigma} = 2 \cdot 0,025(5 \div 10) S_T = (0,25 \div 0,5) S_T.$$

Таким чином, для ефективного зниження рівнів гармонік напруги в мережі потрібна встановлена потужність батареї конденсаторів близька до потужності трансформатора живлення.

При паралельному сполученні LC -кіл, настроєних на частоти окремих гармонік, реалізується ланцюговий фільтр. Дефіцит реактивної потужності на шинах підстанції в цьому випадку може бути цілком покритий за допомогою батареї конденсаторів фільтрів, причому встановлена потужність конденсаторів використовується на 80-90%. Таким чином, ланцюгові фільтри є найбільш простими й економічними (рис. 7.22).

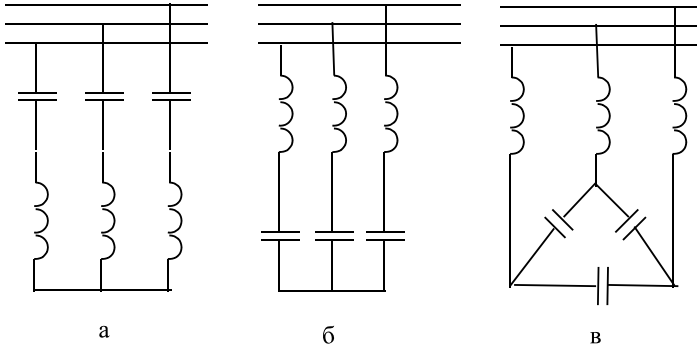


Рис. 7.22

У схемі рис. 7.22.а ізоляція конденсаторів відносно землі знаходиться під напругою, що не перевищує фазну напругу мережі, тобто підвищується надійність використання батареї. Найбільше поширення одержала схема наведена на рис. 7.22.б.

Технічними умовами на експлуатацію конденсаторів передбачається обмеження перевищень напруги і струму понад номінальні значення деякими величинами C_u і C_i (у частках номінальних значень). При роботі конденсаторів у мережах з гармоніками іноді висувається додаткова вимога, що обмежує потужність батареї в робочих режимах номінальним значенням. При цьому приймається $C_u = 1$ і $C_i = 1,3$.

Знайдемо вираз для потужності батареї конденсаторів силового резонансного фільтра n -ї гармоніки, припускаючи, що в колі фільтра протікає струм лише 1-ї і n -ї гармонік. Напруга на батареї конденсаторів не перевищує припустимого (номінального) значення, якщо дотримується умова:

$$\alpha_p^2 k_u^2 \leq C_u,$$

$$\text{де } \alpha_p = \frac{n_p^2}{n_p^2 - 1}; k_u = \frac{U_m}{k_c U_{нр}}; n_p - \text{гармоніка, на частоту якої на-}$$

строєний фільтр; U_m — найбільше можливе в експлуатації значення лінійної напруги на шинах підстанції; $U_{нр}$ — номінальна лінійна напруга батареї конденсаторів фільтра.

При сполученні конденсаторів у трикутник чи зірку значення коефіцієнта k_c береться відповідно рівним одиниці чи $\sqrt{3}$. Неприпустимі перевантаження конденсаторів фільтра по струму не мають місця, якщо:

$$\sqrt{I_{1p}^2 + \Sigma I_{np}^2} \leq C_i I_{np},$$

де I_{1p} і I_{np} — лінійні струми 1-ї і n-ї гармонік у колі фільтра; I_{np} — номінальний струм батареї.

Якщо в колі встановлено кілька фільтрів, то в першому наближенні можна припустити, що через кожен фільтр проходить струм 1-ї гармоніки, на частоту якої він настроєний. У цьому випадку вираз для потужності батареї конденсаторів фільтра n-ї гармоніки може бути представлено у вигляді

$$Q_p \geq \frac{\sqrt{3} U_n I_{np}}{\sqrt{C_i^2 - a_p^2 k_u^2}}.$$

Спрощений вираз для Q_p , застосований на практиці, має вигляд:

$$Q_p \geq 1,2 k_c U_{np} I_{np},$$

де $k_c = \sqrt{3}$ при сполученні конденсаторів у трикутник, при сполученні в зірку $k_c = 3$.

Для врахування обмежень потужності батареї необхідно також дотримання умови:

$$Q_p \geq Q_{1p} + Q_{np},$$

де Q_{1p} і Q_{np} — реактивна потужність батареї на частотах 1-ї і n-ї гармонік. Ця умова задовольняється, якщо:

$$a_p^2 k_u^2 + \frac{\xi_p^2}{n_p} \leq 1,$$

$$\text{де } \xi_p = \frac{I_{np}}{I_{np}}.$$

При стабільній несиметрії напруг силові резонансні фільтри можуть використовуватися одночасно як симетруючі пристрої, оскільки при промисловій частоті індуктивний опір реакторів малий в порівнянні з опором батареї.

Схеми деяких ФКП наведені на рис.7.23.

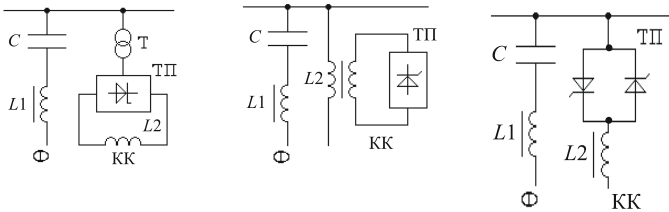


Рис. 7.23

Фільтрокомпенсуючі і фільтросиметруючі пристрої складаються з керованого компенсатора КК, що забезпечує регулювання реактивної потужності, і енергетичних фільтрів Ф, що служать для фільтрації вищих гармонік струму електропривода, а також компенсації реактивної потужності.

Енергетичні фільтри – це послідовні індуктивно-ємнісні LC резонансні кола, настроєні на частоти вищих гармонік вентильних електроприводів. Число паралельно включених резонансних кіл фільтрів повинне бути таким, щоб коефіцієнт несинусоїдальності напруги був не більше 5%. Для кожної непарної вищої гармоніки використовується свій фільтр, для всіх парних гармонік використовується один фільтр.

Реактивна потужність, генерована фільтром n-ї гармоніки, визначається виразом:

$$Q_{\Phi_n} = \left(U_1 \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) 2\pi f_1 C_n$$

де $U_1 \approx 0,95 U_n$ — напруга основної гармоніки лінійної напруги мережі U_n ; C_n — ємність фільтра n -ї гармоніки.

Сумарна реактивна потужність усіх фільтрів визначає постійну складову компенсованої реактивної потужності. Регулювання компенсованої потужності здійснюється за допомогою керованого компенсатора, що звичайно складається з реактора $L2$, керованого за допомогою тиристорного перетворювача ТП. При закритих тиристорах реактивна потужність реактором не споживається і генерована пристроєм реактивна потужність дорівнює потужності фільтрів Φ .

При відкритті тиристорів реактор починає споживати реактивну потужність, у результаті чого потужність, що віддається в мережу, буде визначатися різницею потужності, генерованої фільтрами, і потужності, споживаної реактором:

$$Q_{\text{фпк}} = \sum Q_{\text{ф}} - Q_{\text{пк}}.$$

4.3. Використання ненастроєних фільтрів

Існуюча практика фільтрації гармонік ґрунтується на використанні фільтрів, настроєних по можливості точно на частоти гармонік, що переважають в амплітудному спектрі струмів нелінійних навантажень. Такий підхід визначається прагненням знизити рівень вищих гармонік у мережі до мінімально можливого значення (теоретично — до нуля). Застосування фільтрів малої і середньої потужності (з відношенням потужності батареї конденсаторів Q_p до потужності короткого замикання мережі S_k порядку $k_p = Q_p / S_k < 10^{-2}$) обумовлювало підвищення вимог до точності настроювання, щоб уникнути посилення окремих гармонік напруги в мережі, перевантаження фільтра й інших неприємних явищ.

Зростання питомої ваги нелінійних навантажень, що мають низький коефіцієнт потужності, призвело до необхідності застосування в складі фільтрів батарей великої потужності ($k_p \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$), що дозволило знизити вимоги до точності настроювання фільтрів.

Дослідження збитків, обумовлених вищими гармоніками, показало, що збитки максимальні при значних напругах гармонік і зменшуються зі зниженням напруги у залежності, близькій до квадратичної. Тому необхідність повного зниження рівнів гармонік практично відсутня. Досить знизити їх до межі, обумовленої технічними вимогами, наприклад, до значення $k_{\text{нс}} = 5\%$, припусти-

мо відповідно до ДСТУ 13109-87. Очевидно, що при такому підході в розглянутому випадку ($k_p \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$) відпадає необхідність установлювати велике число фільтрів.

При установці одного фільтра, настроєного на частоту n -ї гармоніки, відносна залишкова напруга n_q -ї гармоніки в мережі δ_q визначається виразом:

$$\delta_q = \frac{1 - n_{q*}^2}{1 - n_{q*}^2 + k_p n_p^2},$$

$$\text{де } n_{q*} = \frac{n_p}{n_q}.$$

Необхідне значення d_q забезпечується при дотриманні нерівності:

$$k_p \geq (1 - n_{q*}^2) \frac{1 - \delta_q}{\delta_q n_p^2}.$$

З виразу випливає, що при настроюванні фільтра на частоту 11-ї гармоніки ($n_p = 11$) зниження напруги 13-ї гармоніки ($n_q = 13$) на 50 чи 70% (δ_q складає 0,5 чи 0,3) забезпечується вже при $k_p = 0,23 \cdot 10^{-2}$ і $k_p = 0,67 \cdot 10^{-2}$. Економічні збитки, обумовлені 13-ю гармонікою напруги, зменшуються відповідно на 75 і 91 %. Зниження напруги 7-ї гармоніки на 50 % забезпечується фільтром 5-ї гармоніки значно більшої потужності: $k_p \geq 2 \cdot 10^{-2}$.

Для знаходження оптимальної частоти настроювання досить розв'язати рівняння вигляду:

$$\frac{dk_{nc}}{dn_p} = 0.$$

Використання фільтрів є поширеним способом зниження рівня вищих гармонік. При установці фільтрів частково або цілком вирішується також задача компенсації реактивної потужності, тому що батареї конденсаторів, які входять до складу фільтрів, є джерелами реактивної потужності.

Силові резонансні фільтри входять також до складу швидкодіючих статичних компенсуючих пристроїв, призначених, у першу чергу для компенсації реактивної потужності, зниження коливань напруги і рівнів вищих гармонік.

На рис. 7.24 зображена схема статичного компенсатора реактивної потужності.

У схемі використовується регульована лінійна індуктивність і силові резонансні фільтри 3, 5, 7, 11-й гармонік. Фільтри гармонік найбільшого порядку виконуються широкосмуговими для фільтрації гармонік порядків $n > 11$. З цією метою добротність фільтра погіршується введенням активних опорів у схему. Фільтри комплектуються як регульованими, так і нерегульованими реакторами. Крім фільтрів на шини включаються батареї конденсаторів, кількість яких у процесі експлуатації варіюється залежно від рівня напруги в мережі.

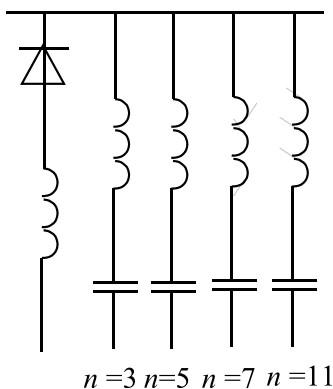


Рис. 7.24

Для фільтрів використовуються конденсатори з великою одиничною потужністю (75 — 100 квар) з напругою, що відповідає номінальній напрузі мережі. При напрузі понад 15 кВ застосовується послідовне ввімкнення конденсаторів. Допускається відхилення ємності конденсаторів від номінальної до 4 %, тривале перевантаження по струму на 30 % понад номінальний і по потужності на 43 %.

Силові резонансні фільтри обладнуються максимальним струмовим захистом і мають захист від перенапруг, а також від неба-

лансу в батареї конденсаторів. Кожен конденсатор обладнується індивідуальним запобіжником.

4.4. Застосування багатофункціональних пристроїв на основі активних фільтрів

В останні роки найбільший розвиток одержали роботи з активними фільтрами, які складаються з перетворювача змінного/постійного струму з індуктивним чи ємнісним акумулятором енергії на стороні постійного струму. Такий фільтр може підключатися паралельно чи послідовно нелінійному споживачу. На рис. 7.25 зображені основні типи активних фільтрів: а – паралельне джерело струму; б – паралельне джерело напруги; в – послідовне джерело напруги; г – послідовне джерело струму.

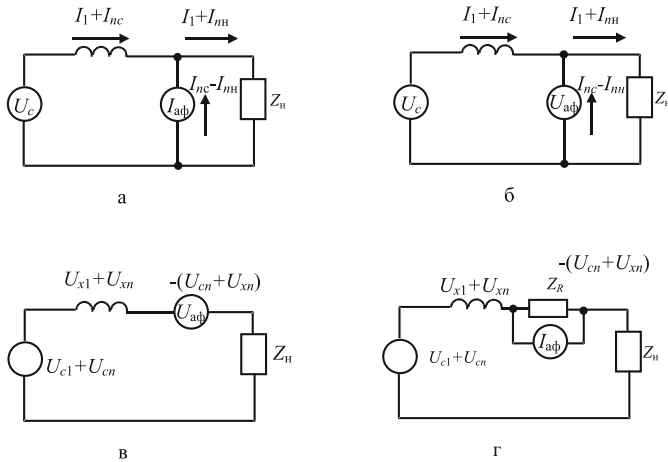


Рис. 7.25

Для виключення чи мінімізації реактивної потужності всіх гармонік струму, включаючи основну, перетворювач працює в режимі ніби генератора антигармонік, що виключає чи обмежує їх надходження в мережу електропостачання. Таким чином, відбувається захист мережі від негативного впливу потужності вищих гармонік, а також поліпшення коефіцієнта потужності основної гармоніки. Остання функція відповідає традиційним компенсаторам чи ре-

гуляторам реактивної потужності основної гармоніки. Крім того, при необхідності може здійснюватися і регулювання потоку не тільки реактивної, але й активної потужності. Як приклад можна привести розробку університету Вісконсін-Медисон (США), де створений перетворювач на ГТО-тиристорах з надпровідним індуктивним нагромаджувачем. Він працює з імпульсною модуляцією параметра струму, що дозволяє регулювати потоки активної і реактивної потужності в місцевій мережі залежно від її завантаження споживачами, одночасно обмежуючи рівень вищих гармонік струму.

Основним недоліком активних фільтрів є відносно велика встановлена потужність перетворювачів, що входять до їх складу. Практично вона повинна бути розрахована на потужність близьку чи трохи перевищуючу потужність нелінійного споживача. У цьому відношенні більш перспективні гібридні фільтри. Останні є компромісним технічним рішенням, що поєднує переваги традиційних пасивних фільтрів з реактивних елементів і активних фільтрів порівняно малої потужності. Відомо, що реальний частотний спектр вищих гармонік струму чи напруги в мережі має стохастичний характер, що змінюється. Крім того, на параметри фільтрів впливають технологічні допуски і процеси старіння їх елементів. У результаті практично виключається їх настроювання на строго фіксовані частоти. З іншого боку, точність настроювання і висока добротність фільтрів, як правило, впливають на перехідні процеси, викликаючи, наприклад, перенапруги в мережі. Крім того, зміна параметрів ліній мережі і частотного спектра можуть призвести до виникнення явища «антирезонансу» на частотах близьких до резонансної.

Рис. 7.26 пояснює явище антирезонансу: а – принципова схема; б – частотна залежність вхідного повного опору.

Використання активного фільтра як регульованого імпедансу дозволяє виключити антирезонансні явища і поліпшити якість перехідних процесів при комутації навантаження. При цьому встановлена потужність перетворювача активного фільтра може бути знижена до 10 % і менше від потужності джерела гармонік струму. Наприклад, при коефіцієнті спотворень струму навантаження 35,9 % застосування двох пасивних LC – кіл і широкосмугового RLC – фільтра знижує цей коефіцієнт до 28 %, а при додаванні двох малопотужних коригувальних перетворювачів спотворення струму складає 3,9 %.

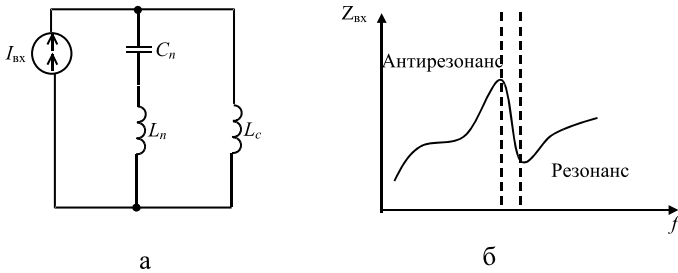


Рис. 7.26

Для керування параметрами фільтра до його пасивних елементів підключаються активні (рис. 7.27).

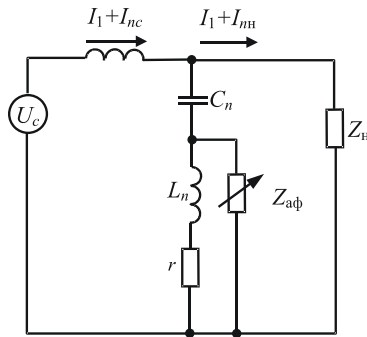


Рис. 7.27

Виключити генерування вищих гармонік струму і поліпшити коефіцієнт потужності споживача по основній гармоніці можна і на етапі його розробки різними схемотехнічними засобами, наприклад, за рахунок підвищення числа фаз перетворювачів тощо. Деякими фірмами розроблені коректори потужності, що вбудовуються безпосередньо в нелінійні споживачі. Наприклад, для вторинних джерел живлення запропонований модуль коректора потужності. Такий коректор підключається безпосередньо на стороні постійного струму первинного випрямляча і забезпечує споживання струму близького за формою до синусоїдального, а також коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 1$ у всіх режимах роботи. З урахуванням масового використання вторинних джерел ефект від викори-

стання коректорів потужності може бути значним. Для трифазних схем випрямлення також розроблені схеми коректорів потужності.

В наш час з'явилася тенденція розширення функцій пристроїв «акумуляторна батарея – перетворювач» АБП із метою регулювання якості електроенергії мережі. При цьому структура пристрою типу «on-line» вирішує не лише зазначені задачі, але і дозволяє стабілізувати параметри напруги, яка живить споживачі, однак такий пристрій рідко використовується, оскільки має відносно високу вартість. Структура пристрою складається, як мінімум, із двох перетворювальних ланок, кожна з яких розрахована на повну потужність споживача.

У деяких нових структурах таких пристроїв перетворювач за наявності мережі працює в режимі активного фільтра, пригнічуючи вищі гармоніки нелінійного споживача і компенсуючи потужність основної гармоніки. Структурна схема такого АБП зображена на рис. 7.28.

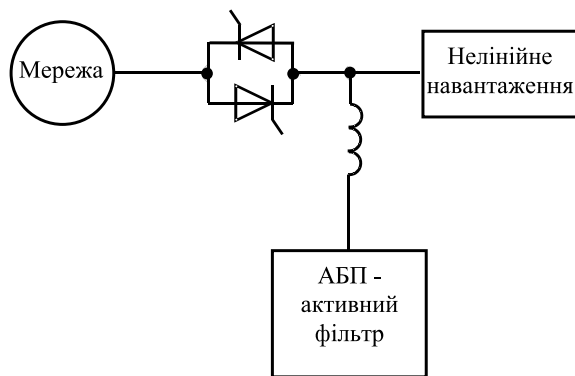


Рис. 7.28

Оскільки вищі гармоніки струму створюють обмін реактивною потужністю між сторонами постійного і змінного струму інвертора, для виключення негативного впливу цих гармонік на акумуляторну батарею на стороні постійного струму підключений конденсатор, відділений від батареї високочастотним фільтром.

Для того щоб виключити при низькій якості напруги мережі часте підключення інвертора до батареї, використовують структури з додатковим стабілізатором напруги мережі, що забезпечує

необхідний рівень напруги на навантаженні при відносно невеликих коливаннях напруги: $+10\%$ – -15% . Як стабілізатори можуть використовуватися різні пристрої. Наприклад, схема з вольтодобувальним трансформатором і перемиканням обмоток. Для більш точного регулювання послідовно з ним ввімкнено реактор малої індуктивності. Як стабілізатор напруги може використовуватися малопотужний інвертор з підключенням обмоток вихідного трансформатора послідовно з навантаженням з метою регулювання напруги у вузькому діапазоні. При цьому основний перетворювач пристрою працює в режимі активного фільтра. Малопотужний інвертор використовується також для підзарядки акумуляторної батареї.

Структуру АБП із такими функціями прийнято називати інтерактивною стосовно мережі, тобто такою, що знаходиться у визначеній взаємодії з мережею. Слід зазначити, що такі відомі в електротехніці організації як IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) і NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ввели стандарти на термінологію для цих систем. Зокрема, відповідно до визначення IEEE, в АБП з інтерактивним зв'язком з мережею, що мають одноступінчатую структуру перетворювача, напруга мережі змінного струму не перетворюється в постійний струм, а живлення навантаження здійснюється безпосередньо від цієї мережі через трансформатор чи реактор. При цьому регулювання напруги здійснюється за допомогою використання інвертора на ключових елементах у поєднанні з такими пасивними компонентами, як реактори, лінійні чи ферорезонансні трансформатори. Термін інтерактивний АБП означає, що в його роботі інвертор забезпечує підвищення і зниження напруги мережі чи її заміщення при провалі напруги мережі.

Як стабілізатор напруги з функціями активного фільтра може бути використана схема, зображена на рис. 7.29.

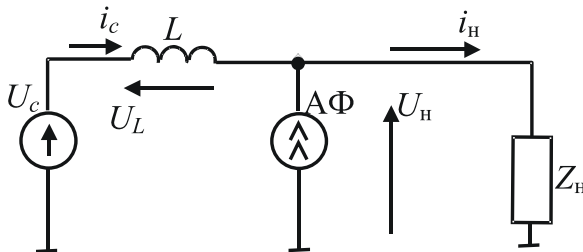


Рис. 7.29

У цій схемі активний фільтр АФ компенсує вищі гармоніки струму нелінійного навантаження Z_n . Стабілізація ж напруги U_n здійснюється за рахунок регулювання реактивної потужності основної гармоніки. Слід зазначити, що процес регулювання здійснюється за законом, сприятливим для режиму роботи мережі. При незначних відхиленнях напруги від заданого значення (5 %) вхідний коефіцієнт потужності по основній гармоніці залишиться близьким до $\cos\varphi = 1$ за рахунок компенсації повної реактивної потужності навантаження. У випадку ж незначного зниження вхідної напруги чи її підвищення коефіцієнт потужності зменшується з одночасною зміною характеру потужності. При зниженні напруги вона має ємнісний характер, а при підвищенні – індуктивний. Слід зазначити, що наявність вхідного реактора L підвищує захищеність схеми від різких сплесків і провалів напруги. Наявність же ємнісного акумулятора в активному фільтрі дозволяє забезпечити захист споживача протягом короткочасних відхилень від норми. Очевидно, що ефективність такого захисту визначається значенням ємності на стороні постійного струму чи інших видів акумуляторів енергії на постійному струмі.

4.5. Розрахунок параметрів фільтрів для забезпечення електромагнітної сумісності вентильного перетворювача з мережею й електродвигуном.

Сучасні перетворювачі частоти для регулювання асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором знаходять все ширше застосування в технологічному устаткуванні. Переважна більшість пропонованих перетворювачів частоти використовують як силовий перетворювач транзисторний інвертор із ШІМ. Як силові ключі в інверторі застосовуються IGBT-транзистори, частота комутації яких у режимі ШІМ може досягати 20 кГц.

Регульований електропривод з перетворювачем частоти є нелінійним навантаженням для мережі живлення змінного струму і джерелом реактивної потужності, генерує в мережу гармоніки, кратні частоті мережі і несучій частоті ШІМ. Підвищення рівня електромагнітних перешкод у мережі призводить до збою в роботі інших електронних систем, що працюють у безпосередній близь-

кості від перетворювача частоти та спільних з ним шин змінного струму.

Найбільш ефективним способом поліпшення електромагнітної сумісності при використанні перетворювачів частоти є застосування пасивних фільтруючих пристроїв. При цьому використання LC -фільтрів є більш вигідним з технічної й економічної сторони.

Припустимий рівень вищих гармонік, генерованих перетворювачем частоти, регламентується відповідними міжнародними стандартами IEC (IEC 1800-3-EMC. Product Standard for Power Drive System), європейськими нормами EN 61800-3, а також рекомендаціями Міжнародного Спеціального Комітету з Перешкод (CISPR). У СНД рівень припустимих перешкод також регламентується стандартами (ДСТУ 13661-92. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Пасивні фільтри й елементи, що встановлюють допустимі норми індустриальних радіоперешкод, на промислових об'єктах і в житлових будинках).

З огляду на різні умови експлуатації і вимоги EMC, комплекс заходів для забезпечення вимог EMC за допомогою фільтрів полягає у виборі оптимальної схеми фільтра і розрахунку його параметрів, при яких забезпечується припустимий рівень вищих гармонік. При цьому необхідно враховувати існуючий електромагнітний фон в місці підключення ПЧ і необхідний показник рівня перешкод для надійної, стійкої роботи всього технологічного устаткування і розташованих поблизу електронних засобів. Як зовнішні впливи при розрахунку фільтруючих пристроїв доцільно використовувати цифрові осцилограми струмів і напруг у досліджуваній точці силового каналу електропривода.

Розглянемо структуру асинхронного електропривода з фільтруючими пристроями (рис. 7.30).



Рис. 7.30

Фільтр №1 призначений для фільтрації перешкод, генерованих перетворювачем частоти в мережу. Фільтр №2 призначений для фільтрації вищих гармонік, що йдуть з виходу перетворювача

частоти в обмотки двигуна, а також для зменшення вібрацій вала регульованого електродвигуна. Кожен фільтр складається з трьох ідентичних фільтруючих елементів для кожної фази. Для першого фільтра еквівалентна схема ввімкнення наведена на рис. 7.31 де Z_e — еквівалентний опір електродвигуна; E_{π} — ЕРС джерела перешкоди; Z_m — еквівалентний опір мережі; $Z_{пч}$ — еквівалентний опір перетворювача частоти.

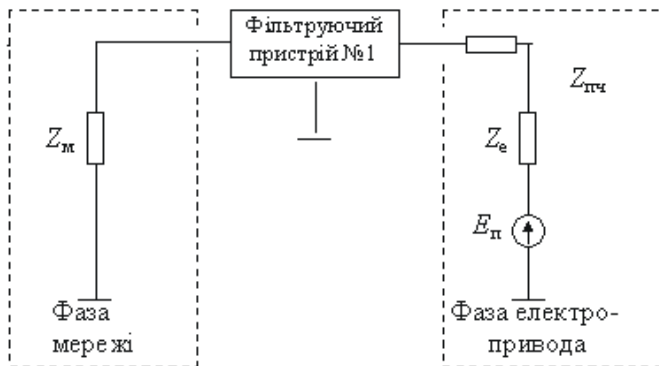


Рис. 7.31

Джерелом перешкод виступає перетворювач частоти. Оскільки навантаженням ПЧ є регульований АД, внутрішній опір джерела Z_B перешкоди E_{π} визначається виразом

$$Z_B = Z_e + Z_{пч}.$$

Приймачем перешкоди є мережа змінного струму. При цьому за навантаження фільтра прийнятий еквівалент мережі Z_m за ДСТ 11001-80.

Для другого фільтра еквівалентна схема включення має вигляд, наведений на рис. 7.32.

Джерелом перешкоди виступає ПЧ, а приймачем є фаза АД. Внутрішній опір:

$$Z_B = Z_m + Z_{пч}.$$

Розрахунок оптимального типу і параметрів фільтра за допомогою імітаційного моделювання дозволяє звести задачу до дослідження (аналізу) моделі фільтра, на вході якого є зображення пе-

решки $E_n(s)$, а на виході — зображення напруги $U(s)$, що створюється на навантаженні.

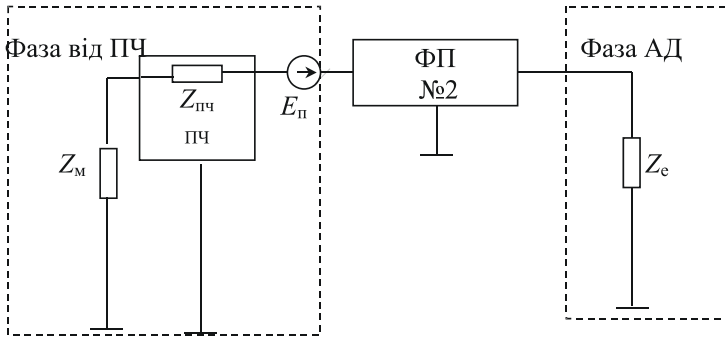


Рис. 7.32

Навантаження моделюється опором активно-індуктивного характеру:

$$Z_n = R_n + j\omega L_n.$$

Джерело перешкоди моделюється як джерело ЕРС із внутрішнім опором:

$$Z_b = R_b + j\omega L_b.$$

Зображенню перешкоди відповідає функція в часовій області:

$$E_n(s) \Rightarrow e(t) = \sum_{n=0}^{\infty} E_n \sin(n\omega_0 + \varphi_n),$$

де E_n — діюче значення ЕРС n -ї гармоніки; ω_0 — частота першої гармоніки; φ_n — фаза n -ї гармоніки.

Зображенню напруги, створюваної перешкодою на навантаженні, відповідає функція в часовій області:

$$U(s) \Rightarrow u(t) = \sum_{n=0}^{\infty} U_n \sin(n\omega_0 + \psi_n),$$

де U_n — діюче значення напруги n -ї гармоніки; ψ_n — фаза n -ї гармоніки.

При цьому вихідний сигнал розраховується за такими формулами:

$$U_n = A(n\omega_0)E_n; \psi_n = \varphi(n\omega_0)\varphi_n,$$

де $A(n\omega_0)$ і $\varphi(n\omega_0)$ — значення АЧХ і ФЧХ системи електропривода з фільтром на частотах, кратних частоті першої гармоніки.

Розглянемо найбільш поширені схеми пригнічуючих LC-фільтрів.

Г-подібний фільтр з конденсатором на вході (рис. 7.33.а).

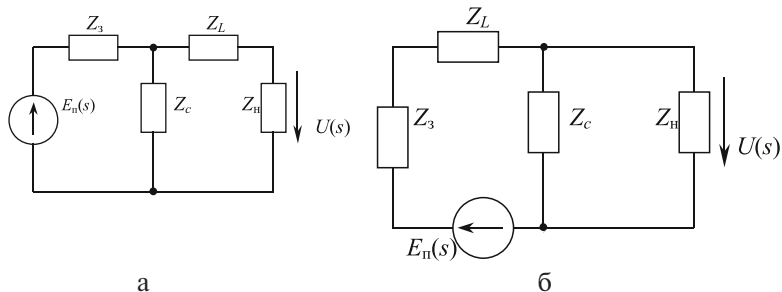


Рис. 7.33

Передатна функція $H(s) = \frac{U(s)}{E_n(s)}$;

$$H(s) = \frac{Z_H}{Z_3(1 + Z_L / Z_C + Z_H / Z_C) + Z_L + Z_H}.$$

АЧХ і ФЧХ мають вигляд:

$$A_1 = \sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}; \varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega L_H}{R_H}\right);$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[A_2] &= R_H + R_3 - \omega^2 C(LR_3 + L_3 R_H + R_3 L_H); \\ \operatorname{Im}[A_2] &= \omega(L + L_3 + L_H + CR_3 R_H) - \omega^3 CL_3(L + L_H) \end{aligned}$$

$$A_2 = \sqrt{(\operatorname{Re}[A_2])^2 + (\operatorname{Im}[A_2])^2}; \varphi_2 = \arctg\left(\frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]}\right).$$

Якщо $\text{Re}[A_2] < 0$, то $\Phi_2 = \arctg \frac{\text{Im}[A_2]}{\text{Re}[A_2]} + \pi$; $A = A_1/A_2$; $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

Г-подібний фільтр з конденсатором на виході (рис. 7.33. б).

Передатна функція:

$$H(s) = \frac{Z_H}{(Z_B + Z_L)(1 + Z_L / Z_C) + Z_H}.$$

АЧХ і ФЧХ мають вигляд:

$$A_1 = \sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}; \quad \varphi_1 = \arctg \left(\frac{\omega L_H}{R_H} \right);$$

$$\text{Re}[A_2] = R_H + R_3 - \omega^2 C(LR_3 + L_3 R_H + R_H L);$$

$$\text{Im}[A_2] = \omega(L_H + CR_3 R_H) - \omega^3 CL_H(L + L_3);$$

$$A_2 = \sqrt{(\text{Re}[A_2])^2 + (\text{Im}[A_2])^2}; \quad \Phi_2 = \arctg \frac{\text{Im}[A_2]}{\text{Re}[A_2]}.$$

Якщо $\text{Re}[A_2] < 0$, то $\Phi_2 = \arctg \frac{\text{Im}[A_2]}{\text{Re}[A_2]} + \pi$; $A = A_1/A_2$; $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

Т-подібний фільтр (рис. 7.34. а)

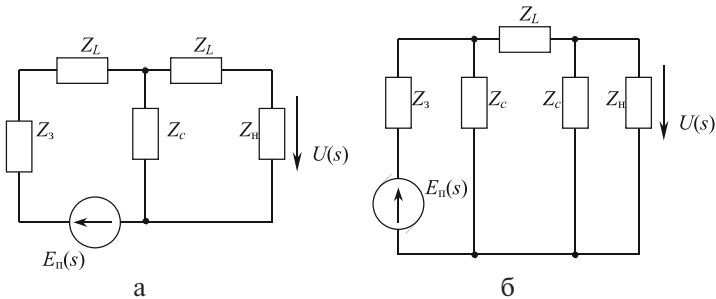


Рис. 7.34

Передатна функція:

$$H(s) = \frac{Z_n}{(Z_3 + Z_L)(1 + Z_L / Z_C + Z_n / Z_C) + Z_L + Z_n}.$$

АЧХ і ФЧХ мають вигляд:

$$A_1 = \sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_n^2}; \varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega L_n}{R_n}\right);$$

$$\operatorname{Re}[A_2] = R_n + R_3 - \omega^2 C(LR_3 + L_3 R_n + R_n L + R_3 L_n);$$

$$\operatorname{Im}[A_2] = \omega(2L + L_3 + L_n + CR_3 R_n) - \omega^3 C(L_3 + L)(L + L_n);$$

$$A_2 = \sqrt{(\operatorname{Re}[A_2])^2 + (\operatorname{Im}[A_2])^2}; \varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]}.$$

Якщо $\operatorname{Re}[A_2] < 0$, то $\varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]} + \pi$; $A = A_1/A_2$; $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

П-подібний фільтр (рис. 7.34. б).

Передатна функція:

$$H(s) = \frac{Z_n}{Z_3 + (1 + Z_L / Z_C)(1 + Z_n / Z_C) + Z_L(1 + Z_n / Z_C) + Z_n}.$$

АЧХ і ФЧХ мають вигляд:

$$A_1 = \sqrt{R_n^2 + \omega^2 L_n^2}; \varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega L_n}{R_n}\right);$$

$$\operatorname{Re}[A_2] = R_n - \omega^2 CLR_n + (1 - \omega^2 CL)(R_3(1 - \omega^2 L_n C) - \omega^2 L_3 R_n C);$$

$$\operatorname{Im}[A_2] = \omega(L + L_n) - \omega^3 LL_n + (1 - \omega^2 LC)(\omega R_n R_3 C + \omega L_3(1 - \omega^2 L_n C));$$

$$A_2 = \sqrt{(\operatorname{Re}[A_2])^2 + (\operatorname{Im}[A_2])^2}; \varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]}.$$

Якщо $\operatorname{Re}[A_2] < 0$, то $\varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]} + \pi$; $A = A_1/A_2$; $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

При виборі конкретної схеми фільтра доцільно дотримуватися рекомендацій (табл. 7.3), що враховують внутрішній опір джерела перешкоди і навантаження.

Таблиця 7.3

Фільтр	Внутрішній опір джерела	Опір навантаження
Г-подібний з конденсатором на вході	Високий	Низький
Г-подібний з конденсатором на виході	Низький	Високий
Т-подібний	Низький	Низький
П-подібний	Високий	Високий

Розрахунок і проектування фільтрів проводиться в кілька етапів.

1. Синтез фільтра по заданому припустимому рівні електромагнітних перешкод і потужності двигуна. На цьому етапі проводиться аналіз припустимого рівня перешкод, внесених ПЧ, при яких не порушується нормальний режим роботи іншого технологічного устаткування. Як вихідне значення припустимого рівня перешкод може бути прийнято:

- типове значення для заданого діапазону частот;
- значення, що враховує специфіку застосування ПЧ на конкретному об'єкті;
- нормований спектр, що задовольняє вимогам стандартів по ЕМС.

Прийняте значення припустимого рівня перешкод порівнюють з результатами вимірювання реального рівня перешкод у системі електроживлення з ПЧ (без фільтра). Потім за необхідною потужністю регульованого двигуна і ПЧ розраховуються основні параметри фільтра: індуктивність дроселя і ємність фільтруючого конденсатора.

2. Перевірка отриманих показників якості фільтра. На цьому етапі проводиться оцінка загасання на частоті перешкоди з використанням розрахункових значень параметрів фільтра, при яких повинно забезпечуватися зниження рівня ЕМП. Фільтр повинен максимально послаблювати вищі гармоніки і передавати в навантаження основну гармоніку з найменшим ослабленням. Загасання в смузі частот регулювання характеризує втрати потужності у фільтрі. У випадку незадовільних показників параметри фільтра підбираються заново.

Якщо загасання в смузі регулювання частоти менше 0, то це означає, що на виході фільтра має місце резонанс. Це можливо при використанні П-подібного фільтра. У цьому випадку необхідно вибрати інший тип фільтра.

3. Розрахунок дроселя фільтра. Результатом розрахунку фільтра є значення індуктивності дроселя і ємності конденсатора. Значен-

ня ємності конденсатора при розрахунку приймається рівним найближчому типовому значенню, вибраному зі стандартного ряду конденсаторів на відповідну робочу напругу. Виходячи з цього остаточний розрахунок фільтра полягає в проектуванні дроселя.

Розрахунок і проектування дроселя зводяться до одержання конструктивних даних, достатніх для виготовлення його в промислових умовах і вбудовування в систему електроживлення комплектного електропривода.

Вихідні дані для розрахунку дроселя:

- струм, що протікає через обмотку I_0 , А;
- індуктивність дроселя $L_{др}$, мГн, отримана при розрахунку фільтра;
- тип осердя дроселя (Ш-подібний чи стрічковий);
- матеріал осердя, його магнітна проникність μ ;
- густина струму ($3 - 4$ А/мм²), більше значення для дроселів з малою кількістю витків – 4 А/мм² (для економії міді).

4.6. Використання статичних тиристорних компенсаторів

Компенсація коливань напруги в малопотужних енергосистемах може здійснюватися за допомогою високошвидкісних пристроїв компенсації реактивної потужності. Статичні тиристорні компенсатори чи тиристорні джерела реактивної потужності будуються з використанням компенсаційних перетворювачів, що мають штучну комутацію вентилів. Такий перетворювач має на стороні випрямленого струму реактор (індуктивний акумулятор енергії) чи батарею конденсаторів (ємнісний акумулятор енергії). Поєднання перетворювача з реактивним елементом дозволяє створити пристрій для регулювання реактивної потужності в системі електропостачання.

На рис. 7.35 наведена схема перетворювача напруги мережі, побудована на біполярних транзисторах з ізолюваним затвором IGBT.

З появою IGBT транзисторів відкрилася можливість реалізації частоти перемикачів більше 15000 Гц при незначній потужності системи керування. Ключовим фактором, що обумовлює застосування цих пристроїв в електричних системах великої потужності, є можливість послідовного включення транзисторів з ізолюваним затвором.

У зображеній схемі транзистори працюють у режимі перемикачів трьох рівнів напруги, що на стороні постійного струму відповідає $+u$, 0 , $-u$. Якщо переключення здійснюються з великою частотою і відповідно до визначеного алгоритму, то на стороні змінного струму виходить практично синусоїдальна міжфазна напруга.

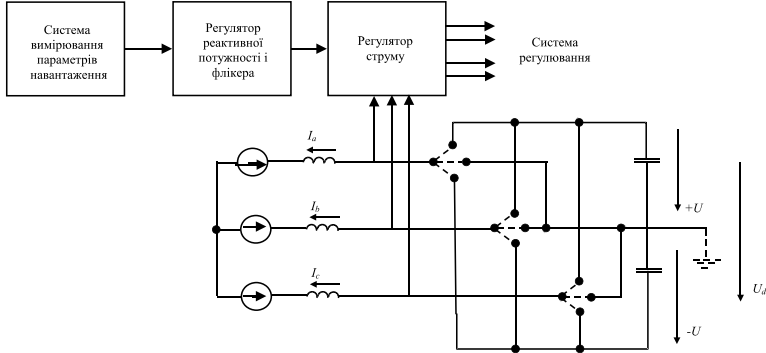


Рис. 7.35

На підставі викладеного принципу відкривається можливість швидкого і незалежного пофазного регулювання по амплітуді і частоті. У даній схемі можливі як споживання, так і генерація реактивної потужності при мінімальній потужності конденсатора на стороні постійного струму.

В наш час перетворювач напруги мережі реалізований на рівні промислової установки тільки однією компанією у світі – ABB. Зазначений спосіб дозволяє виключити всі складні електромагнітні узгодження і здійснювати безпосереднє підмикання компенсуючих реакторів з повітряним осердям до напруги мережі.

За своїми стабілізуючими характеристиками компенсатори СТК-лайт перевершують будь-яке інше існуюче устаткування, призначене для ліквідації так званого флікер-ефекту – у порівнянні зі стандартною технологією СТК (крива 1 на рис. 7.36); нові СТК-лайт працюють щонайменше в два-три рази ефективніше (крива 2 на рис. 7.36).

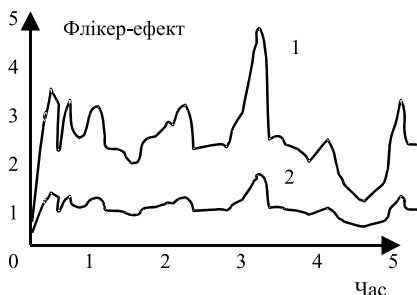


Рис. 7.36

Як додаткова вигода статичний компенсатор реактивної потужності СТК-лайт дозволить підвищити економічність технологічного процесу і, відповідно, збільшити продуктивність, знизити питому енергоемність і поліпшити показники якості енергії енергосистеми.

До складу пристрою компенсації СТК-лайт звичайно входить перетворювач напруги, струмообмежуючий реактор і фільтр гармонік, що одночасно є компенсатором коливань реактивної потужності самого компенсатора, роблячи його цілком ємнісним елементом мережі. Усі разом ці елементи утворюють високоефективну систему, що забезпечує підвищення якісних характеристик електроенергії й економічності технологічного процесу за рахунок великих меж змін власних динамічних характеристик, а також їх незначного негативного впливу на енергосистему.

Основні відмінності характеристики СТК-лайт стосовно стандартних компенсаторів:

- ефективність згладжування флікер-ефекту в два-три рази вище, ніж у традиційно використовуваного устаткування;
- відсутність трансформатора зв'язку із шинами системи підвищує надійність установки, тому що показники надійності трансформатора нижче, ніж у компенсатора в цілому;
- більш компактна конструкція СТК-лайт — третина об'єму звичайного СТК;
- знадобиться менше мережних фільтрів для зниження рівня гармонік — практично половина кількості, необхідної при використанні звичайного СТК.

4.7. Зниження рівнів гармонік засобами мережі живлення

Зниження рівнів гармонік засобами мережі живлення досягається в основному раціональною побудовою системи електропостачання, при якому забезпечується припустимий рівень гармонік напруги на шинах споживача. Найбільш поширеними засобами є застосування трансформаторів з підвищеною напругою 110 – 220 (330) кВ; живлення нелінійних навантажень від окремих трансформаторів чи підімкнення їх до окремих обмоток триобмоточних трансформаторів або окремих обмоток двообмоточних трансформаторів з розщепленою обмоткою; підімкнення паралельно нелінійним навантаженням синхронних і асинхронних двигунів. Застосування в перетворювальних агрегатах трансформаторів з первинною напругою 110 – 220 кВ виключає вплив різкозмінних навантажень на споживачі розподільних мереж 0,4 – 10 кВ. Перешкодою до використання таких трансформаторів може бути поява неприпустимих напруг гармонік в основних мережах енергосистеми живлення.

На рис. 7.37 показана схема районної підстанції 220 кВ, до шин якої крім трансформатора перетворювача приєднані також лінії зв'язку з районними електростанціями і тупиковою лінією з навантаженням S_n . Вхідний опір цієї лінії для n -ї гармоніки

$$X_{вхл} = Z_c \operatorname{tg}(n\alpha l + \arctg \frac{X_{нл}}{Z_c}),$$

де Z_c – хвильовий опір лінії ($Z_c = 400$ Ом); α – коефіцієнт фази ($\alpha = 0,06$ град/км); l – довжина лінії, км.

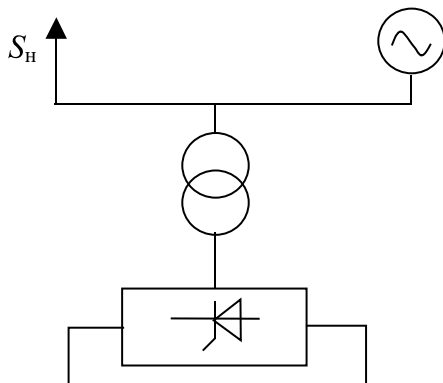


Рис. 7.37

Приймаючи опір навантаження тупикової лінії пропорційним опору узагальненого навантаження:

$$X_{\text{нл}} = 0,45 \frac{U^2}{S_{\text{н}}} n; S_{\text{н}} = (0,1 \div 0,2) S_{\text{к}},$$

одержуємо з похибкою не більше 2 % для $n \geq 5$

$$X_{\text{вхл}} = -Z_c \operatorname{ctg}(n\alpha l).$$

Опір генераторних ліній:

$$X_{\text{гл}} = k_{\text{гл}} n X_{\text{к}},$$

де $X_{\text{к}}$ — опір короткого замикання на шинах підстанції; $k_{\text{гл}}$ — коефіцієнт, що враховує нелінійність характеристики $X_{\text{гл}}(n)$.

Умова виникнення резонансу струмів:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{n\alpha l}{Z_c}\right) = \frac{1}{k_{\text{гл}} n X_{\text{к}}},$$

звідси

$$l = \frac{1}{n^2} \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{k_{\text{гл}} n X_{\text{к}}}\right).$$

У потужних енергосистемах ($S_k > 3000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$) резонанс струмів на частотах 11 – 13-ї гармонік можливий при $l \geq 60 - 80 \text{ км}$.

Напруга n -ї гармоніки на паралельному резонансному контурі:

$$\frac{U_n}{U_n} \approx \frac{S_n}{S_k} \frac{k_n}{k_R} n \sqrt{n},$$

де S_n – потужність перетворювача; $k = R/X_R$; для мереж 110 – 220 кВ у середньому $k \approx 0,1$. При $n = 13$, $S_n = 20 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ і $S_k = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ напруга n -ї гармоніки складає $U_n/U_n \approx 0,28$.

При виникненні резонансу комутація вентилів відбувається теоретично миттєво ($\gamma \approx 0$). В цьому випадку можливе ушкодження вентилів. Резонансні підвищення напруги на частотах вищих гармонік можливі також у вузлах основних мереж електричних систем, до яких не підключені перетворювачі. Таким чином, застосування трансформаторів перетворювачів з вищою напругою 110 – 220 кВ за певних умов може призвести до виникнення значних напруг 11 – 13-ї гармонік (меншою мірою – 17 – 19-ї).

Якщо на підприємстві є станція чи синхронний компенсатор, підімкнений через трансформатор до шин 110 – 220 кВ, і відсутні споживчі приєднання 110 – 220 кВ значної довжини, підімкнення трансформатора перетворювача до шин 110 – 220 кВ цілком припустиме. При виділенні нелінійних навантажень (перетворювачів) на одну секцію, підімкнену до двообмоточного трансформатора, виникає випадок, аналогічний попередньому. При відсутності батарей конденсаторів і підімкненні синхронного компенсатора (двигуна) до шин 10 кВ опір навантаження n -ї гармоніки.

$$X_{nn} = \frac{17}{S_d} n,$$

де S_d – потужність двигуна компенсатора.

Відносне значення напруги n -ї гармоніки при резонансі:

$$U_n^* = \frac{U_n}{U_1} \approx 0,3 \frac{S_n}{S_d} n k_n.$$

При $S_k \gg S_n$ і $k_{11(13)} \approx 0,05$ виявляється $U_n^* < 0,03$. Однак, якщо $S_k \approx S_d$, відносне значення напруги 11 – 13-ї гармоніки на частоті

резонансу може скласти 10 – 20 %. Того ж порядку буде напруга на шинах 110-220 кВ. Установка фільтра 11-ї гармоніки виключить це явище. Відзначимо, що при виникненні режиму резонансу напруг у мережах 110-220 кВ можливі значні (до 8 %) підвищення напруги на частотах вищих гармонік у цих мережах і мережах підприємства. Тому, якщо від шин 110 – 220 кВ живляться споживчі приєднання, доцільно в мережі підприємства встановлювати фільтри.

4.8. Спеціальні способи керування і схемні рішення вентильних перетворювачів

Для одержання характеристик ДПС, розташованих у всіх чотирьох квадрантах, використовуються реверсивні перетворювачі, що складаються з двох комплектів нереверсивних випрямлячів. На рис. 7.38 зображені перехресна (а) і зустрічно-паралельна (б) схеми реверсивних перетворювачів.

При керуванні реверсивними перетворювачами використовуються два основних принципи керування комплектами вентилів: спільне і роздільне.

Спільне керування передбачає подачу від СІФУ імпульсів керування одночасно на вентилі обох випрямлячів. При цьому за рахунок зсуву між імпульсами двох перетворювачів близького до 180° один працює у випрямному, а інший в інверторному режимах. Між середніми значеннями ЕРС випрямляча $E_{\text{дв}}$ і інвертора $E_{\text{ді}}$ витримується співвідношення $E_{\text{ді}}$ і $E_{\text{дв}}$, однак за рахунок різниці миттєвих значень ЕРС між перетворювачами протікають зрівнювальні струми. Для їх обмеження передбачені зрівнювальні реактори $L1-L4$.

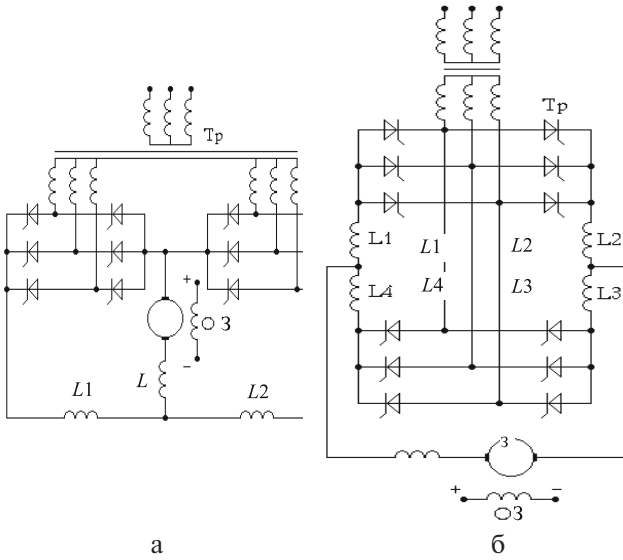


Рис. 7.38

Вигляд статичних характеристик залежить від способу узгодження кутів керування (рис. 7.39). При лінійному узгодженні:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$$

характеристики лінійні й аналогічні характеристикам Г-Д. На рис. 7.39 зображені характеристики при спільному лінійному і нелінійному узгодженні кутів керування.

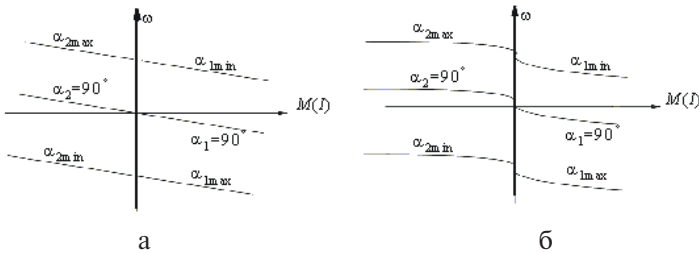


Рис. 7.39

Для зменшення зрівняльних струмів використовують нелінійне узгодження:

$$\alpha_1 + \alpha_2 \neq \pi.$$

При цьому має місце помітне збільшення швидкості ДПС при переході від рушійного режиму до генераторного, що обмежує застосування цього способу.

Роздільне керування використовується для виключення зрівнювальних струмів між перетворювачами. При цьому відсутні згладжувальні дроселі. Суть керування полягає в тому, що імпульси подаються тільки на один з перетворювачів, другий при цьому не працює. При переході від рушійного режиму до гальмівного припиняється подача сигналів на випрямляч. Після зникнення струму в якірному колі (безструмова пауза складає 5...10 мс) подаються сигнали на другий перетворювач з кутом регулювання $\alpha > 90^\circ$, що забезпечує його роботу в інверторному режимі.

Щоб струм якірного кола при вмиканні перетворювача, що вступає в роботу, не перевищував припустимих значень, його кут регулювання повинен відповідати необхідному режиму роботи привода. Тому перетворювачі звичайно працюють у режимі лінійного узгодження (рис. 7.40), але сигнали відкриття подаються тільки на перетворювач, що знаходиться в роботі. Внаслідок безструмової паузи при переході з одного енергетичного режиму в інший поблизу осі ординат має місце режим переривчастих струмів, що відбивається на статичних характеристиках.

З наведених двох способів керування реверсивними перетворювачами роздільне керування має більш високі енергетичні показники. При спільному керуванні зрівняльний струм, минаючи двигун, додатково навантажує вентилі і трансформатор, знижуючи ККД привода, і вимагає збільшення габаритної потужності перетворювачів і трансформаторів.

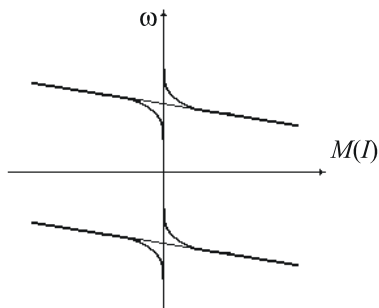


Рис. 7.40

Почергове керування перетворювачами полягає в тому, щоб при їх роботі переважали граничні випрямлювальні та інверторні режими з мінімальними кутами керування, що характеризуються малим споживанням реактивної потужності. Наприклад, при послідовному сполученні двох перетворювачів (рис. 7.41) в одному з них устанавлюється мінімальний кут керування $\alpha_1=0$, а регулювання напруги здійснюється другим перетворювачем за рахунок зміни кута керування α_2 від 0 до 180° .

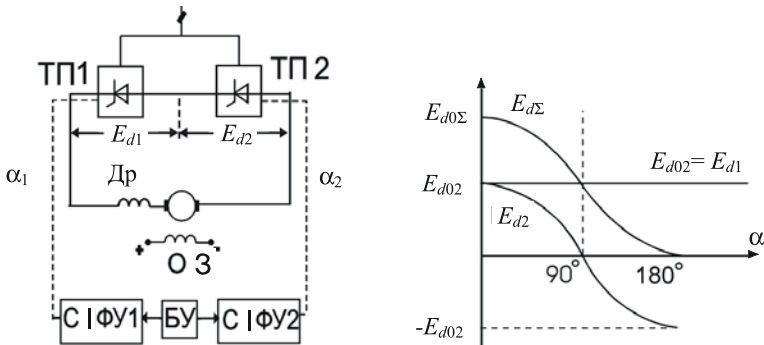


Рис. 7.41

У схемі з почерговим керуванням коефіцієнт потужності регулюється зміною кута керування α_2 :

$$\cos \varphi = \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{2} = \frac{1 + (0 \dots 1)}{2} = 0,5 \dots 1.$$

У нереверсивних електроприводах, де не потрібно зміни полярності напруги, один з перетворювачів може бути виконаний на некерованих вентилях-діодах, що еквівалентно куту керування $\alpha_1 = 0$.

У приводах з одним перетворювачем також можна реалізувати почергове керування. Для цього необхідне використання двох систем імпульсно-фазового керування, що працюють по черзі з катодною й анодною групами вентилів (рис. 7.42. а).

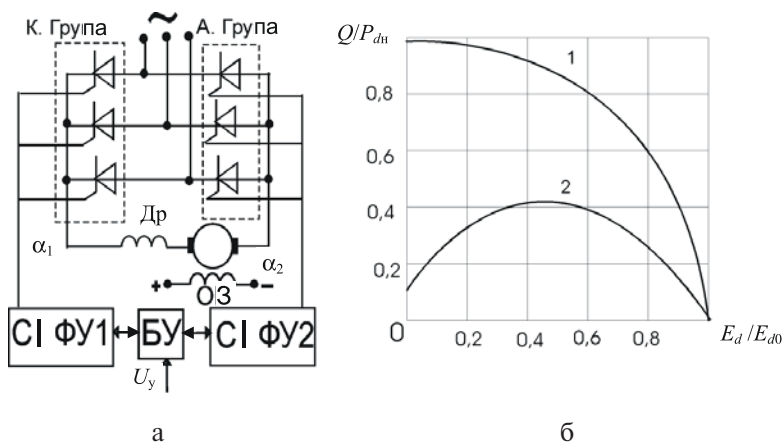


Рис. 7.42

Ефект зниження споживання реактивної потужності електроприводом з почерговим керуванням ілюструє рисунок. На діаграмі показані залежності відносної реактивної потужності $Q/P_{дн}$ від ступеня регулювання напруги E_d/E_{d0} трифазного мостового перетворювача при звичайному симетричному керуванні — крива 1 і почерговому керуванні — крива 2. Як видно, споживання реактивної потужності при почерговому керуванні істотно менше, особливо при глибокому регулюванні напруги.

Одним з перспективних способів зниження несинусоїдальності в електричних мережах є поліпшення форми кривої струму мережі перетворювачів. Цього можна досягти компенсацією вищих гармонік магнітного потоку трансформатора перетворювача, накладенням струмів 3; 9; 15-ї і гармонік більш високих порядків на струми обмоток чи трансформатора забезпеченням спеціальних законів керування перетворювачами.

Схема компенсації вищих гармонік магнітного потоку трансформатора випрямляча зображена на рис. 7.43.

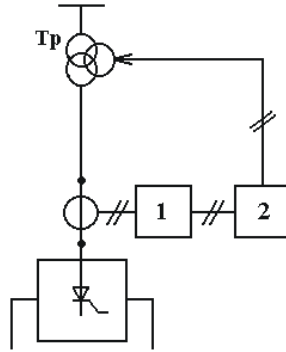


Рис. 7.43

У третій обмотці трансформатора перетворювача створюється магнітувальна сила (МРС) вищих гармонік. Магнітний потік, обумовлений цією МРС, має напрямок протилежний напрямку основного потоку в трансформаторі. У результаті вищі гармоніки магнітного потоку компенсуються. Фільтр 1 є загороджувальним для першої гармоніки. Підсилювач 2 підсилює струми вищих гармонік. При реалізації схеми можуть бути пригнічені канонічні й аномальні гармоніки потоку і мережних струмів перетворювача. Застосування схеми в деяких випадках (наприклад, для ліній електропередачі) може супроводитися меншими витратами, ніж у випадку використання звичайних перетворювачів і резонансних фільтрів.

Недоліками схеми є її складність, необхідність застосування триобмоточних трансформаторів, а швидкодія щонайменше на порядок менша, ніж звичайних схем автоматичного керування частотою обертання електропривода.

Введення струму 3-ї чи кратної трьом непарної гармоніки можливе в нульовій і мостовій схемах перетворювачів, у тому числі в схемах (рис. 7.44) зі зрівнювальним реактором.

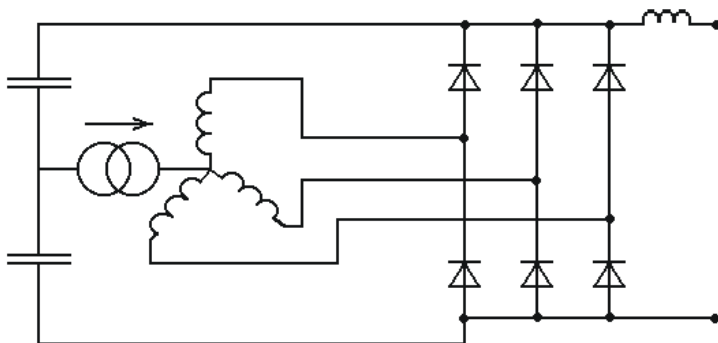


Рис. 7.44

Змінюючи значення і фазу накладеного струму, можна знизити до нуля ту чи іншу гармоніку мережного струму (наприклад 5-у; 7-у) при одночасному істотному зменшенні значень інших гармонік канонічних порядків.

Джерелом накладеного струму для перетворювача невеликої потужності служить звичайно генератор низькочастотних коливань з підсилювачем, для потужних перетворювачів використовуються синхронні генератори. При роботі перетворювача тільки в режимі випрямляча джерело струму може бути замінено резистором. Однак для реверсивних перетворювачів використання резисторів неможливе, тому що при інвертуванні джерело струму повинно працювати в генераторному режимі.

Застосування спеціального джерела струму чи резистора призводить до додаткових втрат, що досягають 10 % енергії, споживаної перетворювачем. Ця обставина, а також додаткове ускладнення схеми стало причиною того, що у вітчизняній практиці перетворювачі з накладенням струму одержали незначне поширення.

В останні роки розроблені методи, що дозволяють здійснювати введення додаткових струмів гармонік за допомогою спеціальних схем безпосередньо від перетворювача. З цією метою починають використовуватися також мікроконтролерні схеми керування перетворювачами.

У складних перетворювальних пристроях, що складаються з послідовно чи паралельно сполучених одно- чи двомостових перетворювачів, принципово можливе керування гармонічним складом струму мережі. З цією метою повинна бути забезпечена певна різниця значень кутів керування анодними і катодними групами

вентилів. Так, за експериментальними даними, для однієї зі схем ця різниця повинна скласти 36 для 5-ї гармоніки, 26 — 7-ї, 16 — 11-ї. Відомі й інші закони керування, реалізовані за допомогою ЕОМ чи мікроконтролерів.

Серед заходів, спрямованих на зниження рівнів вищих гармонік, генерованих мостовими перетворювачами, найбільш поширеним є збільшення фазності системи. Для досягнення цього можливі два шляхи: використання трансформаторів перетворювачів зі спеціальним виконанням обмоток, що дозволяє реалізувати потрібний багатофазний режим перетворення; забезпечення еквівалентного багатофазного режиму групи перетворювачів, кожен з яких має схему з меншим числом фаз.

Еквівалентні чи умовні багатофазні схеми забезпечують взаємну компенсацію на шинах джерела живлення вищих гармонік струму, нехарактерних для багатофазного режиму. Так, при умовній 12-фазній схемі компенсуються 5, 7, 17, 19-а й інші вищі гармоніки.

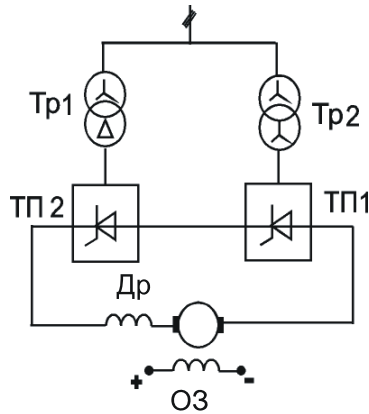


Рис. 7.45

Вектори 5-ї гармоніки струму утворюють симетричну систему зворотної послідовності. Отже, щодо векторів напруги основної частоти вони обертаються з частотою, що дорівнює 6, де щ — кутова частота мережі. Вектори 7-ї гармоніки утворюють систему прямої послідовності й обертаються в той самий бік, що і вектори напруги системи живлення. Частота обертання векторів струму гармонік щодо тієї ж системи векторів напруги також складе 6 ω . При сполученні обмоток мережі двох перетворювачів у зірку і три-

кутник (рис.7.45) зсув по фазі між векторами напруг складає 30° . Отже, вектори вищих гармонік струмів однойменних фаз, зсунуті на кут 180° , виявляться в протифазі і будуть взаємно компенсуватися на шинах підстанції. Тою ж мірою це відноситься до 17-ї і 19-ї гармонік.

Зсув по фазі між векторами напруг, підведених до трансформатора, може бути також забезпечений при використанні спеціального фазоповоротного трансформатора, що підмикається перед трансформатором перетворювача. У цьому випадку реалізуються еквівалентні багатофазні режими з великим числом фаз (18, 24 тощо). Так, при роботі двох 12-фазних перетворювачів може бути отриманий умовний 24-фазний режим перетворювача.

Значення кута зсуву по фазі δ між одночасно працюючими перетворювачами в конкретних випадках повинне бути таким (табл.7.4).

Таблиця 7.4

Еквівалентна фазність	Число перетворювачів з еквівалентною 12-фазною схемою	δ
24	2	$\pm 15^\circ$
36	3	$\pm 10^\circ; 0; -10^\circ$
48	4	$\pm 15^\circ; +7,5^\circ; 0; -7,5^\circ$

Ефект зниження рівнів вищих гармонік за допомогою умовних багатофазних схем виявляється повною мірою лише при однаковому завантаженні перетворювачів групи і симетрії СІФУ. Ці умови виконуються при паралельній роботі перетворювачів на стороні випрямленої напруги.

За спеціальними технічними вимогами промисловістю випускаються фазоповоротні трансформатори на напругу 10 кВ, прохідну потужність 32 МВ · А і $\delta = 7,5^\circ$. Кут $\delta = 15^\circ$ виходить при каскадному з'єднанні двох фазоповоротних трансформаторів з $\delta = 7,5^\circ$. Еквівалентний багатофазний режим перетворювача можна також забезпечити, якщо однакові перетворювачі, підімкнені до одного вузла мережі, працюють з однаковим навантаженням. При розходженні навантаження повна компенсація гармонік нехарактерних для багатофазного режиму не відбувається.

Якщо відхилення струму навантаження двох перетворювачів, які працюють в еквівалентному багатофазному режимі, складають ΔI_{d1}^* і ΔI_{d2}^* , то еквівалентне значення некомпенсованої гармоні-

ки струму ΔI_n^* у частках струму 1-й гармоніки одного перетворювача при даному навантаженні знаходиться за виразом:

$$\Delta I_n^* = \frac{(\Delta I_{d1}^* - \Delta I_{d2}^*) X^*}{n \gamma \sin\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right)}.$$

Формула застосовна при $|DI_{d1}^* - DI_{d2}^*| \leq 0,04$. Похибка цієї формули не перевищує 10 % при n рівних 5 і 7 і 15% – при n рівних 11 і 13. Наявність похибки пояснюється в першу чергу неврахуванням фазових співвідношень між гармоніками. Наприклад, при $\alpha = 20^\circ$; $\gamma = 10^\circ$ і $|DI_{d1}^* - DI_{d2}^*| X^* = 0,02$ одержимо: $DI_5^* = 0,055$; $DI_7^* = 0,04$; $DI_{11}^* = 0,025$; $DI_{13}^* = 0,021$. При асиметрії керуючих імпульсів або при неоднаковому настроюванні СІФУ двох перетворювачів, що працюють в еквівалентному багатofазному режимі, значення некомпенсованих гармонік може бути ще більше.

У перетворювачах із природною комутацією вентилів, коли моменти їх відкриття і закривання визначаються напругою мережі, повна компенсація реактивної потужності без спеціальних компенсаційних пристроїв неможлива. У той же час використання штучної комутації вентилів (за рахунок енергії, накопиченої в реактивних елементах перетворювача) дозволяє одержати перетворювач без споживання реактивної потужності, а при необхідності навіть з віддачею її в мережу. Такі перетворювачі з $\cos \varphi = 1$ називають компенсованими. Найбільш раціональним є використання складених перетворювачів, одна з частин яких виконана зі штучною, а інша – з природною комутацією.

4.9. Системи керування вентилями перетворювачами

Енергозберігаючі функції електропривода багато в чому визначаються засобами керування. Несправність у системі керування призводить до аварійного режиму в силових колах і порушенню ритмічності технологічного процесу.

Для підвищення працездатності системи вводиться інформаційна чи апаратурна надлишковість, внаслідок чого зменшується

ймовірність появи помилкових сигналів. Однак це призводить до багаторазового збільшення числа елементів кола керування. Навіть при виконанні всіх захисних заходів для підвищення надійності можлива поява перешкод і збоїв, що нерозривно пов'язані з роботою логічних схем. Логічна схема будь-якого ступеня складності, як правило, складається з елементарних автоматів нагромаджуючого і комбінаційного типів. Під час перехідних процесів в автоматах можлива поява «небезпечних змагань», що призводять до помилкових сигналів.

Найдоцільнішим рішенням є створення систем керування з використанням комплексних методів підвищення працездатності, що не потребують значних витрат:

- застосування циклічної (тактової) синхронізації;
- введення відсічень, що замикають елементарні автомати після їх спрацювання;
- обробка інформаційних сигналів, представлених у вигляді логічних нулів;
- передача сигналів між вузлами в парафазному вигляді з наступним їх порівнянням;
- застосування логічних елементів з підвищеною перешкодо-захищеністю на МОП-структурах.

Системи імпульсно-фазового керування призначені для регулювання середнього значення ЕРС на виході перетворювача і застосовуються в таких приводах:

- привод постійного струму з тиристорним перетворювачем;
- вентильний-асинхронно-вентильний каскад з керованим інвертором;
- вентильний двигун постійного і змінного струму;
- частотно-регульований привод з перетворювачем і ланкою постійного струму;
- асинхронний привод з регулюванням напруги на статорі.

Системи імпульсно-фазового керування за принципом побудови фазової затримки бувають:

- багатоканальні;
- одноканальні.

У багатоканальній СІФУ для кожної фази напруги кут керування формується окремими фазозсуваючими пристроями, число яких може бути 6 чи 3. В одноканальній СІФУ відлік кута керування проводиться в одному каналі для всіх фаз.

За принципом синхронізації з мережею СІФУ поділяються на

- синхронні;

- асинхронні.

Робота синхронних систем синхронізована з напругою мережі живлення. Асинхронні системи синхронізуються від окремого генератора, не зв'язаного з мережею. Через свою простоту найбільше застосування одержали синхронні системи.

Функціональна схема синхронної багатоканальної СІФУ зображена на рис. 7.46.

До складу СІФУ входять:

СП1...СП6 — синхронізуючі пристрої. Вони виконують дві функції — синхронізують роботу СІФУ з мережею і здійснюють гальванічну розв'язку системи керування від мережі. У найпростішому випадку ці функції виконує трансформатор;

ФЗП1...ФЗП6 — фазозсуваючі пристрої, що здійснюють фазовий зсув імпульсів керування на кут α . Величина фазового зсуву визначається напругою керування U_n ;

ГПН — генератор пилоподібної напруги, що формує напругу розгортки;

К — компаратор, що порівнює напругу керування з напругою розгортки. У момент їх рівності компаратор формує імпульс керування;

ВП1...ВП6 — вихідні підсилювачі. Вони виконують дві функції — формують імпульс відкриття тиристора і здійснюють гальванічну розв'язку системи керування від мережі.

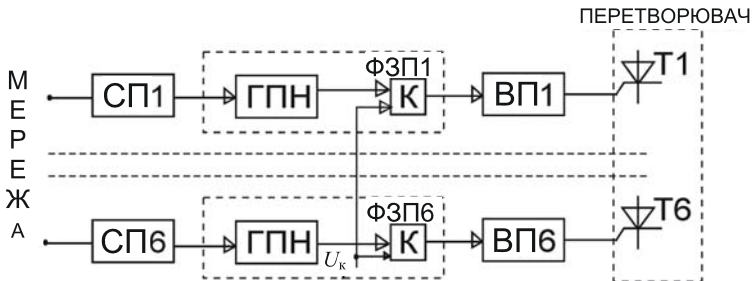


Рис. 7.46

На рис. 7.47 зображені діаграми роботи синхронної багатоканальної СІФУ, що пояснює принцип її дії.

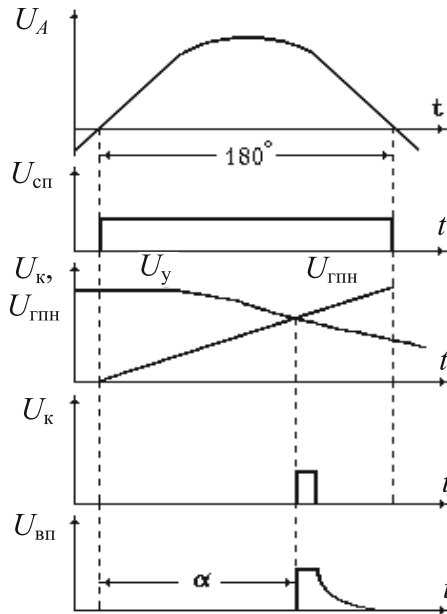


Рис. 7.47

Перевага багатоканальної СІФУ — максимальна швидкодія в динамічних режимах, пов'язаних зі зміною величини напруги керування. Однак робота багатоканальної системи характеризується фазовою асиметрією імпульсів керування, викликану відмінністю параметрів каналів керування. Фазова асиметрія моментів відкриття тиристорів перетворювача викликає додаткові спотворення напруги мережі. Це призводить до зростання амплітуд вищих гармонічних складових напруги і появи нових гармонік, генерованих перетворювачем у мережу. При цьому амплітуда, частота і фаза аномальних гармонік змінюється за випадковим законом, що утруднює їх компенсацію.

На відміну від багатоканальної системи, в одноканальній формування фази зсуву імпульсу керування виробляється в одному каналі для всіх трьох фаз. Таке рішення виключає асиметрію імпульсів керування, обумовлену розкидом параметрів каналів керування.

Однак одноканальні системи мають динамічну похибку (запізнювання) яка виникає при переведенні перетворювача з випрямного режиму в інверторний і навпаки.

Похибка перетворення аналогової величини (напруги керування), що змінюється в часі, у набір дискретних сигналів, що надходять на керуючі електроди вентилів перетворювача, визначається видом функції розгортки. Найбільшу динамічну похибку (порядку 300 ел. град) має елементарна розгортка з частотою, рівною частоті мережі $f_p = f_c = 50$ Гц. При збільшенні частоти розгортки в 6 разів ($f_p = 6f_c = 300$ Гц) динамічна похибка виключається цілком. Але при цьому в стільки ж раз звужується діапазон регулювання кута керування, що у цьому випадку складає 0...60 ел. град.

З метою зменшення динамічної похибки за умови збереження повного діапазону регулювання 0...180 ел. град використовують лінійні акордні функції розгортки, у яких частота проходження кожної елементарної розгортки дорівнює 300 Гц. Акордні системи утворюються з елементарних шляхом зсуву розгорток по одній або кількох координатах, наприклад, у часі.

Функціональна схема синхронної одноканальної СІФУ зображена на рис. 7.48.

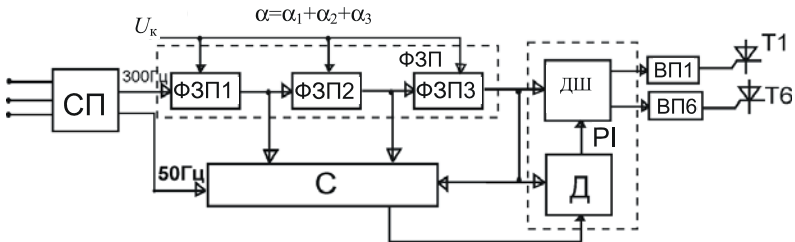


Рис. 7.48

До складу СІФУ крім відомих елементів входять нові: С — синхронізатор; РІ — розподільник імпульсів; ДШ — дешифратор; Д — подільник на шість.

На рис. 7.49 зображені діаграми роботи синхронної одноканальної СІФУ, що пояснюють принцип її дії.

На виході синхронізуючого пристрою формуються сигнали синхронізації з частотою 300 Гц, що надходять відповідно на входи синхронізатора і фазозсуваючого пристрою.

Фазозсуваючий пристрій складається з трьох послідовно включених однотипних пристроїв, кожен з яких має максимальну фазову затримку 60 ел. град. частоти мережі. Таким чином, з елементарних функцій, що розгортають, з частотою розгортки 300 Гц утворюються акордні, що зберігають повний діапазон розгортки 0...180 ел. град.

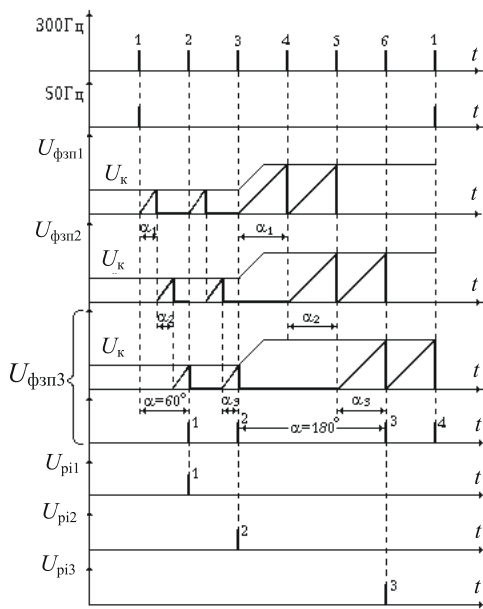


Рис. 7.49

У фазозсуваючому пристрої відбувається порівняння змінної напруги розгортки з напругою керування. У момент їх рівності на виході кожного фазозсуваючого вузла формуються імпульси, що надходять далі в синхронізатор і на вхід наступного вузла розгортки. Оскільки всі синхроімпульси затримуються по фазі тими самими вузлами, асиметрія, внесена ними, практично відсутня.

Для правильного розподілу імпульсів керування по фазах перетворювача застосований синхронізатор. Він зв'язаний з виходом кожного вузла фазової затримки і виділяє із шести затриманих імпульсів тільки перший, котрий синхронізує роботу розподільника імпульсів. У розподільнику за допомогою подільника на шість і дешифраторів сигнали розділяються на шість каналів за числом тиристорів катодної й анодної груп кожної фази двигуна.

На якість перетворення напруги істотний вплив чинять дрижання і дрейф імпульсів керування, викликані коливаннями частоти мережі і комутаційних провалів напруги при вмиканні тиристорів, а також похибкою системи керування. Поліпшення процесу формування імпульсів керування дозволяє зменшити

амплітуди аномальних гармонік і стабілізувати частотний спектр напруги мережі. Це спрощує процес фільтрації вищих гармонік фільтрокомпенсуючими пристроями і підвищує його ефективність.

Функціональна схема і діаграма роботи синхронізуючого пристрою, що усуває фазовий дрейф імпульсів керування (аномальні гармоніки), зображені на рис. 7.50(а,б).

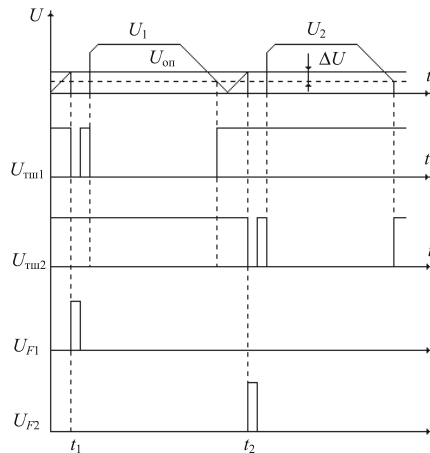
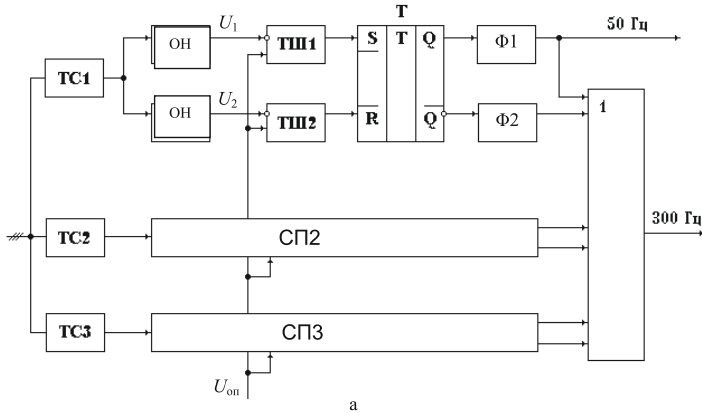


Рис. 7.50

До складу пристрою входять: ТС1...ТС3 — трансформатори синхронізації; ОГ — обмежувачі напруги; ТШ — тригери Шмітта; Т — тригери RS-типу; Ф — формувачі.

Первинні обмотки трансформаторів синхронізації мають відводи напруги 660, 380, 220 і 100 В, що дозволяє підключити їх як до мережі 50 Гц, так і до вторинних обмоток високовольтного вимірювального трансформатора з напругою вимірювальних обмоток 100 В. Трансформатори сполучені за схемою «трикутник» — «зірка-зворотна зірка» для одержання на вторинних обмотках напруг, що знаходяться у фазі і протифазі з лінійними напругами первинних обмоток. Амплітудні значення синфазних напруг трансформаторів складають 35...40 В.

Синфазні напруги обмежуються до рівня 10 В і надходять на інвертуючі входи тригерів Шмітта. На інвертуючі входи тригерів подається позитивна опорна напруга. Тригери Шмітта служать для зменшення дрижання і дрейфу імпульсів керування, що виникають через пульсації і комутаційні провали напруги живлення.

Тригер Шмітта виконаний на операційному підсилювачі з позитивним зворотним зв'язком. Щоб залежність вихідної напруги від вхідної мала релейний характер, коефіцієнт позитивного зворотного зв'язку вибирається більше коефіцієнту підсилення. Ширина гістерезисної петлі ΔU регулюється резистором у колі зворотного зв'язку підсилювача, а опорна напруга переміщує середину петлі по осі ординат.

У момент часу t_1 , коли напруга обмежувача стає рівною опорній, відбувається перехід тригера Шмітта в нульовий стан. Перекидається RS-тригер і на виході першого формувача генерується імпульс керування, що надходить далі через фазовий пристрій на тиристор. Відбувається вмикання тиристора, і якщо комутаційні провали в напрузі мережі великі, то тригер Шмітта знову перекинується. Однак це не змінить стан RS-тригера, і не відбудеться помилкового спрацювання системи. Змінить стан RS-тригера тільки сигнал другого тригера Шмітта, що надходить у момент часу t_2 . Така схема утворить дискретний фільтр, який не вносить фазового зсуву і що виключає дрижання і дрейф імпульсів керування.

Функціональна схема елементарного вузла одноканального акордного фазозсуваючого пристрою зображена на рис. 7.51.

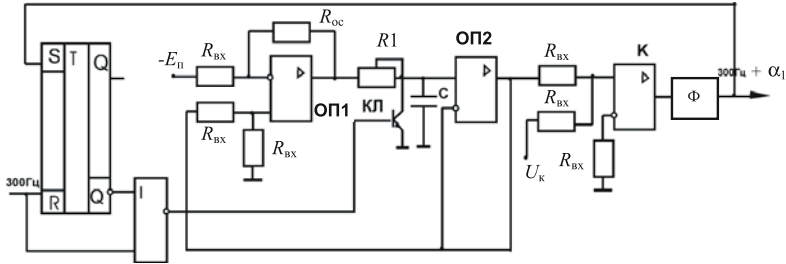


Рис. 7.51

Кожен синхроімпульс частотної послідовності 300 Гц готує RS-тригер і запускає генератор пилкоподібної напруги, відкриваючи ключ КЛ. Генератор складений на двох операційних підсилювачах ОП1, ОП2 і має високий коефіцієнт лінійності. Нахил напруги розгортки регулюється резистором R1.

Лінійно наростаюча напруга надходить далі на вхід струмового компаратора К, у який відбувається порівняння його з напругою керування. У момент їх рівності компаратор перекидається. При цьому на виході формувача з'являється імпульс, що перемикає RS-тригер, у результаті чого починається процес розряду конденсатора С. Одночасно цей імпульс надходить на вхід наступного вузла затримки. Відсічення напруги, розгортки у даному вузлі виключають помилкові спрацювання в динамічних режимах при зміні напруги керування.

Регульовальна характеристика СІФУ зображена на рис.7.52.

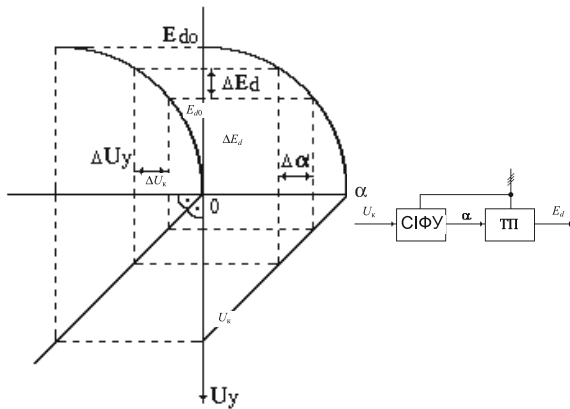


Рис. 7.52

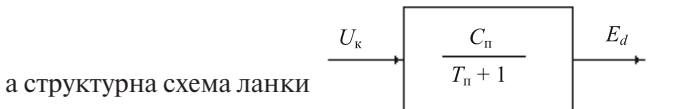
СІФУ і перетворювач звичайно описуються аперіодичною ланкою першого порядку.

Коефіцієнт передачі перетворювача визначається з регулювальної характеристики СІФУ:

$$C_n = \frac{\Delta E_d}{\Delta \alpha} \frac{\Delta \alpha}{\Delta U_k} = \frac{\Delta E_d}{\Delta U_k}.$$

Електромагнітну сталу часу перетворювача звичайно приймають рівною половині періоду частоти напруги живлення $T_n = 0,01$ с. Тоді диференціальне рівняння перетворювача має вигляд:

$$T_n \frac{dE_d}{dt} + E_d = C_n U_y,$$



ЛІТЕРАТУРА

1. *Вахванов Г.Г.* Энергосбережение и надежность вентиляторных установок. — М.: Стройиздат, 1989. — 176 с.
2. *Гольстрем В.А., Кузнецов Ю.Л.* Справочник по экономии топливоэнергетических ресурсов. — Киев: Техника, 1985. — 383 с.
3. *Ильинский Н.Ф. и др.* Энергосбережение в электроприводе — М.: Высшая школа, 1989. — 127с.
4. *Ключев В.И.* Теория электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 560 с.
5. *Копытов Ю.В., Чуланов Б.А.* Экономия электроэнергии в промышленности : справочник. — М.: Энергия, 1978. — 120 с.
6. *Мамалыга В.М.* Энергосбережение в системах электропривода. — Киев.: Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. — 86 с.
7. *Москаленко В.В.* Автоматизированный электропривод. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 416 с.
8. *Москаленко В.В.* Электрический привод. — М.: Высш.шк., 1991. — 430 с.
9. *Некрасов В.Г.* Внутриводской транспорт с инерционным аккумулятированием энергии. / Промышленная энергетика: Энергосбережение. — М., 1985. №3. — С. 46-49.
10. Нормативный документ Министерства угольной промышленности Украины: Конвейеры ленточные. Методика выбора и расчета привода. — Киев: Электромеханика, 1995.
11. ОСТ 12.25.011-84. Экономия электрической энергии на угольных шахтах. Основные мероприятия и методы расчета. — М.: Минуглепром СССР, 1984. — 136 с.
12. *Преображенский В.И.* Полупроводниковые выпрямители. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 136 с.
13. Расчет и конструирование элементов электропривода / В.С.Яковенко и др. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 320 с.
14. Справочник по электроустановкам угольных предприятий. Электроустановки угольных шахт.: Справочник /под ред. В.В.Дегтярева и др. М.: Недра, 1988. — 727с.

15. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В.А.Елисеєва и А.В. Шинянского. — М: Энергоатомиздат, 1983. — 616 с.

16. Енергозбереження — пріоритетний напрямок державної політики України / Ковалко М.П. Денисюк С.П. Відпов. ред. Шидловський А.К. — Київ: УЕЗ, 1998. — 506 с.

17. Енергозбереження — досвід, проблеми, перспективи / Ковалко М.П. Відпов. ред. Шидловський А.К; Держкоменергозбереження України — Київ: Ін-т електродинаміки НАНУ, 1997. — 152 с.

18. Від виробництва до ефективного споживання енергії. Посібник для вчителів / О.І. Соловей, А.В. Праховник, Е.М. Іншеков та інші. К. — Нот. ф-ка, 1999. — 400 с. іл.-(Енергозбереження; кн. 2).

19. *Луговой А.В.* Итоги научно-производственного семинара «Проблемы создания новых машин и технологий», научные труды КГПИ, Кременчуг.: 1998. — Вып. 2.

20. *Луговой А.В.* К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода// Электротехника. — 1999. — № 5. — С. 62-67.

21. *Маевский О.А.* Энергетические показатели вентильных преобразователей. — М.: Энергоатомиздат, 1978.

22. *Флоренцев С.Н.* Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий// Электротехника. — 1999. — №4. — С.2—7.

23. *Галанов В.И. и др.* Современные мощные полупроводниковые приборы и их функциональные особенности// Электротехника. — 1998. — №3. — С. 48-52

24. *Калашиников Б.Е.* Опыт разработки и внедрения IGBT-инверторов для асинхронного электропривода// Электротехника. — 1998. — №7. — С. 24—31

25. *Браславский И.Я.* О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехника. — 1998. — №8. — С. 2-5

26. *Лезнов Б.С., Чебанов В.Б.* Применение регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения и водотлива //Электротехника. — 1995. — №7. — С. 9—12

27. *Розанов Ю.К., Флоренцев С.Н.* Электропривод и силовая электроника //Электротехника. — 1997. — №11. — С. 7—12

28. *Изосимов Д.Б., Козаченко В.Ф.* Алгоритмы и системы цифрового управления электроприводами переменного тока //Электротехника. — 1999. — №4. — С. 41-51

29. *Барский В.А. и др.* Создание серии IGBT преобразователей частоты для регулируемых асинхронных электроприводов // *Электротехника*. — 1999. — №7. — С. 38-41

30. *Ильинский Н.Ф.* Перспективы применения вентильно-индукторного привода в современных технологиях // *Электротехника*. — 1997. — №2. — С. 1-3

31. *Хашимов А.А.* Энергосберегающие системы автоматизированного электропривода переменного тока // *Электротехника*. — 1995. — №11. — С. 34-39

32. *Масандилов Л.Б.* Применение систем электропривода. Тиристорный преобразователь напряжения — асинхронный двигатель для грузоподъемных машин // *Электротехника*. — 1995. — №10. — С. 24-27

33. *Накопители энергии: Учебное пособие для вузов / Бут Д.А. и др.* — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 400с.,ил.

34. *Жежеленко И.В.* Высшие гармоники в системах электропитания промпредприятий. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 160с.,ил.

35. *Розанов Ю.К.* Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники // *Электротехника*. — 1999. — №4. — С. 28-32.

36. *Прня Р.* Качество напряжения — новое в решении проблемы компенсации реактивной мощности // *Электротехника*. — 1999. — №4. — С.32-34.

37. *Андрианов М.В.* Определение параметров фильтрующих устройств для обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов // *Электротехника*. — 1999. — №11. — С. 37-41.

38. *Чукреев Н. Я.* Атомная энергетика: достоинства, проблемы и перспективы // *Енергетична політика України*. — №7-8, 2002. С. 96-103

39. *Шпак Я.* Яку стратегію розвитку вітроенергетики України доцільно прийняти? // *Енергетична політика України*. — №6. — 2002. — С. 66-68.

40. *Першин В.П.* Энергоэкономия как фактор сталого розвитку вітчизняної економіки // Тези доп., МНТ конф., «Енергоефективність-2002». — Київ, 2002. — С. 20-25.

41. *Жовтянський В. А.* Ключові проблеми енергозбереження у розрізі енергетичної стратегії України. // Тези доп., МНТ конф., «Енергоефективність-2002». — Київ, 2002. — С. 20-25.

42. *Стан ТЕС України, її роль в забезпеченні попиту на електроенергію. // ТЕС України, проблеми і перспективи, ЕНКОГ, ІНЕКО-Менеджмент.* — Київ, 2002. — С. 1-29.

Навчальне видання

**Закладний Олександр Миколайович
Праховник Артур Веніамінович
Соловей Олександр Іванович**

**ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАСОБАМИ
ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

Навчальний посібник

*Редактор Вдовиченко Валентина Миколаївна
Коректор Асташева Марія Василівна
Комп'ютерна верстка Полончук Микола Андрійович
Дизайн обкладинки Вакуленко Микола Миколайович*

Підписано до друку 29.01.2004.

Формат 84 x 108 1/32. Папір офсетний. Друк офсетний. Гарнітура

Newton. Умовн. друк. аркушів — 20,5. Обл.-вид. аркушів — 28,7.

Наклад 1 000 примір.

Замовлення № _____

Видавництво «Кондор»
Свідоцтво ДК № 1157 від 17.12.2002 р.
03057, м. Київ, пров. Польовий, 6,
тел./факс (044) 456-60-82, 241-83-47

Книги видавництва «Кондор» завжди можна придбати у наших регіональних партнерів:

- м. Київ, «Наукова думка», вул. Грушевського, 4, тел. (044) 228-06-96;
- м. Київ, «Знання», вул. Хрещатик, 44, тел. (044) 229-10-45;
- м. Київ, маг. «Буква» Будинку книги, вул. Л. Толстого, 11/61, тел. (044) 230-25-74;
- м. Київ, ДЧП Книгарня №52, вул. Ю. Гагаріна, 13, тел. (044) 552-22-41;
- м. Київ, «Академкнига» № 7, вул. Стрітенська, 17, тел. (044) 212-34-72;
- м. Київ, ТОВ «Книгарня «Сяйво», вул. Велика Васильківська, 6, тел. (044) 235-43-66
- м. Вінниця, «Кобзар», вул. Привокзальна, 2/1, тел. (0432) 21-67-44;
- м. Дніпропетровськ, «Бібколектор», пр. Кірова, 22, тел. (0567) 78-38-39;
- м. Донецьк, «Будинок книги», вул. Артема, 147а, тел. (0622) 55-44-76, 90-58-88;
- м. Житомир, «ЦНТЕІ», вул. Велика Бердичівська, 31, тел. (0412) 37-22-56;
- м. Житомир, ТОВ «Житомиркнига», вул. Черняхівського, 12а, тел. (0412) 37-27-74, 37-41-45;
- м. Запоріжжя, ТОВ «Сучасник ЛТД», просп. Леніна, 151, тел. (0612) 33-12-27;
- м. Запоріжжя, фірма «Константа-», пр. Леніна, 142, (0612) 62-50-70, 13-75-05
- м. Івано-Франківськ, «Сучасна українська книга», Вічковий майдан, 3, тел. (03422) 3-04-60;
- м. Івано-Франківськ, КП «Букініст», Незалежності, 19, (03422) 2-38-28;
- м. Кіровоград, ОКП «Бібколектор», вул. Гайдара, 44, тел. (0522) 27-74-78
- м. Кіровоград, «Книжковий світ», вул. Набережна, 13, тел. (0522) 24-94-64;
- м. Кривий Ріг, «Букініст», пл. Визволення, 1, тел. (0564) 92-37-32;
- м. Львів, Бібколектор, вул. Лисенка, 21, тел. (0322) 75-79-86;
- м. Львів, ТОВ «Ноти», просп. Шевченка, 16, тел. (0322) 72-67-96;
- м. Львів, «Еней», вул. Тургенєва, 52/7, тел. (0322) 35-12-93К
- м. Луганськ, «Глобус-книга», вул. Радянська, 58, (0642) 53-62-30;
- м. Луцьк, «Освіта», просп. Волі, 8, тел. (0332) 72-46-14;
- м. Луцьк, «Планета», просп. Волі, 8, тел. (0332) 22-39-58;
- м. Одеса, «Епос», вул. Троїцька, 28, тел. (0482) 25-85-69;
- м. Полтава, «Планета», вул. Жовтнева, 60а, тел. (05322) 7-20-19;
- м. Рівне, «Іскра», вул. Бандери, 36а, тел. (0362) 23-63-16;
- м. Рівне, «ДККП Рівнекнига», вул. Островського, 16, тел. (0362) 22-41-05;
- м. Тернопіль, ТОВ «Дар», вул. Б. Хмельницького, 17, тел. (0352) 22-24-33;
- м. Тернопіль, «ДП Кооп-книга», Майдан Волі, 4/1, тел. (0352) 22-25-40;
- м. Ужгород, «Кобзар», площа Корятовича, 1, тел. (03122) 3-35-16;
- м. Харків, «Авіоніка», вул. Сумська, 51, тел. (0572) 14-04-70;
- м. Харків, «Вища школа», вул. Петровського, 6/8, тел. (0572) 47-80-20;
- м. Херсон, ЗАТ «Херсонкнига», просп. 40-річчя Жовтня, 31а, тел. (0552) 22-57-76;
- м. Хмельницький, ТОВ «Проскурівкнига», вул. Володимирська, 63, тел. (0382) 76-29-36;
- м. Черкаси, «Будинок книги», вул. Хрещатик, 200, тел. (0472) 45-99-20;
- м. Черкаси, ТОВ «Фірма «Світоч», вул. Б. Вишневецького, тел. (0472) 47-92-20;
- м. Чернівці, ДКТП «Наука», вул. Заньковецької, 4, тел. (03722) 2-59-35;
- м. Чернівці, ОРТП «Чернівцікнига», вул. Шептицького, 23, тел. (03722) 2-23-13.

Книготорговельним організаціям та оптовим покупцям звертатися за тел./факсом: (044) 241-66-07, 241-83-47.

E-mail: condor@kiev.ldc.net, condor@public.ua.net.

<http://www.condor-books.com>