



**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

Кафедра електропостачання ім. проф. В.М. Синькова

ГАЙ О.В., ПРИСТУПА А.Л.

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ. Ч.2 СПЕЦІАЛЬНІ РОЗДІЛИ

Навчальний посібник

для підготовки фахівців «Галузь знань 14 – Електрична інженерія Спеціальність 141 –
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**Київ
ЦП «Компринт»
2022**

УДК: 621.3.027.3 (075.8)

ББК 31.24

Т 27 Рекомендовано до друку Вченою радою національного університету біоресурсів і природодокористування України (протокол № 4 від 23.11.2022 р.)

Рецензенти:

Тугай Ю.І. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділом оптимізації систем електропостачання Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ;

Бодунов В.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Чернігівська політехніка» м. Чернігів;

Петренко А.В. - кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання ім. В.М. Синькова НУБіП України, м. Київ.

П 27 Перехідні процеси в системах електропостачання. Ч.2 Спеціальні розділи :
[Навчальний посібник] / О.В. Гай, А.Л. Приступа – К. : ЦП «Компринт», 2022. – 466 с.

ISBN

Навчальний посібник присвячений важливій профільуючій дисципліні в розрізі спеціальної (фахової) підготовки студента та формуванню фахівця, що розуміє основні короткі замикання на стороні трикутника понижувального трансформатора з одночасним обривом фаз на лінії з одностороннім живленням, неповнофазні режими без та з урахуванням ємності ліній, короткі замикання з одночасним обривом фаз на лініях з одностороннім живленням, подвійні замикання на землю, короткі замикання на стороні низької напруги трансформатора, струмовий захист нульової послідовності від замикань на землю ліній 110 – 550 кВ, вибір параметрів спрацьовування захистів одиночних ліній 110 - 500 кВ із двостороннім живленням без відгалужень.

Навчальний посібник написаний з щирою вдячністю вчителям за знання, терпіння і навички та підводить підсумок багаторічної роботи колективу кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова НУБіП України та призначений для фахівців, науковців, аспірантів, студентів та широкого кола фахівців в галузі електроенергетики. Автори висловлюють глибоку вдячність і подяку рецензентам монографії Тугаю Ю.І., Бодунову В.М. та Петренку А.В. за корисні поради та зауваження, співробітникам кафедри електропостачання ім. проф. В.М. Синькова НУБіП України Бортниковій Д. А. за допомогу в оформленні рукопису.

Для науковців, викладачів, докторантів, аспірантів і студентів вищих навчальних закладів, фахівців аграрної сфери та дослідників енергетичної галузі.

УДК: 621.3.027.3 (075.8)

ББК 31.24

ISBN

© О.В. Гай, А.Л. Приступа, 2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



Гай Олександр Валентинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання ім. В.М.Синькова Національного університету біоресурсів і природокористування. Викладає дисципліни "Перехідні процеси в електроенергетиці" "Експертні системи прийняття рішень в енергетиці" "Надійність та проектування електричних систем" "Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах" та "Техніка високих напруг". Наукові інтереси пов'язані з моделями і методами інтелектуальної інтеграції джерел розподіленої генерації до замкнутих електричних мереж сільських регіонів та аналіз показників надійності систем електропостачання на базі імітаційного моделювання. Автор більше 45 наукових праць, з яких 5 монографії, 4 навчальних посібника, 1 авторського свідоцтва. Електронна адреса: gaalx@ukr.net.



Приступа Анатолій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету "Чернігівська політехніка", викладає дисципліни: "Релейний захист та автоматизація електроенергетичних об'єктів", "Автоматика в електроенергетичних системах", "Основи метрології та електричних вимірювань". Наукові інтереси: підвищення ефективності діючих електроенергетичних систем, автономні системи енергозабезпечення на основі відновлювальних джерел. Автор більше 100 наукових праць з них 4 монографії, 5 патентів на винахід /корисну модель, 11 публікацій в Scopus. Електронна адреса: anatoliy.prystupa@stu.cn.ua

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
ЧАСТИНА I ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ НЕПОВНОФАЗНИХ РЕЖИМІВ І КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ	9
Глава перша НЕПОВНОФАЗНІ РЕЖИМИ БЕЗ УРАХУВАННЯ ЄМНОСТІ ЛІНІЙ	9
Глава друга НЕПОВНОФАЗНІ РЕЖИМИ З УРАХУВАННЯМ ЄМНОСТІ ЛІНІЙ.....	62
Глава третя КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ З ОДНОЧАСНИМ ОБРИВОМ ФАЗ НА ЛІНІЯХ ІЗ ДВОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ	108
Глава четверта КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ З ОДНОЧАСНИМ ОБРИВОМ ФАЗ НА ЛІНІЯХ З ОДНОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ	129
Глава п'ята КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ НА СТОРОНІ ТРИКУТНИКА ПОНИЖУВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З ОДНОЧАСНИМ ОБРИВОМ ФАЗ НА ЛІНІЇ З ОДНОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ	157
Глава шоста ДВА ОДНОЧАСНІ КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ НА ПІДСТАНЦІЯХ З КОРОТКОЗАМИКАЧАМИ	179
Глава сьома ПОДВІЙНІ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ	197
Глава восьма КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ НА СТОРОНІ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРА.....	216
ЧАСТИНА II СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ ЛІНІЙ 110 – 550 КВ.....	226
Глава дев'ята ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	226
Глава десята ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ ОДИНОЧНИХ ЛІНІЙ 110 - 500 КВ ІЗ ДВОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ БЕЗ ВІДГАЛУЖЕНЬ	229

Глава одинадцята ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЛІНІЙ 110 - 500 КВ ІЗ ДВОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ БЕЗ ВІДГАЛУЖЕНЬ	254
Глава дванадцята ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ ЛІНІЙ 110 - 500 КВ ІЗ ВІДГАЛУЖЕННЯМИ ПРИ НАЯВНОСТІ ЖИВЛЕННЯ ІЗ ДВОХ АБО БІЛЬШ СТОРІН.....	271
Глава тринадцята ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ ОДИНОЧНИХ ЛІНІЙ У РАДІАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ 110 - 220 КВ ІЗ ОДНОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ (З ВІДГАЛУЖЕННЯМИ Й БЕЗ ВІДГАЛУЖЕНЬ)	275
Глава чотирнадцята ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ ОДИНОЧНИХ ЛІНІЙ КІЛЬЦЕВОЇ МЕРЕЖІ 110 - 220 КВ ІЗ ОДНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ	282
Глава п'ятнадцята ПЕРЕВІРКА ЧУТЛИВОСТІ.....	283
Глава шістнадцята ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ	288
Додаток І СТРУМИ Й НАПРУГИ ПРИ ДВОХ ОДНОЧАСНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ НА ПІДСТАНЦІЯХ З КОРОТКОЗАМИКАЧАМИ	354
Додаток II УЗГОДЖЕННЯ СТРУМОВИХ ЗАХИСТІВ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ В КІЛЬЦЕВІЙ МЕРЕЖІ	369
Додаток III СКЛАДАННЯ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ІЗ ВЗАЄМОІНДУКЦІЄЮ МІЖ НИМИ	372
Додаток IV ВИБІР РОЗРАХУНКОВОЇ УМОВИ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ СТРУМУ СПРАЦЬОВУВАННЯ ПЕРШОГО СТУПЕНЯ ЗАХИСТУ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЛІНІЙ 110 - 500 КВ	387

Додаток V ПОВЕДІНКА ЗАХИСТУ НА ЛІНІЯХ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У БЛОКУ ІЗ ТРАНСФОРМАТОРАМИ (АВТОТРАНСФОРМАТОРАМИ), І НА ПАРАЛЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ З ВІДГАЛУЖЕННЯМИ.....	399
Додаток VI РОЗРАХУНКИ СТРУМУ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТУ ЗА УМОВОЮ ВІДБУДУВАННЯ ВІД КИДКА, ЩО НАМАГНІЧУЄ СТРУМУ ТРАНСФОРМАТОРІВ (АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ).....	409
Додаток VII ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ЗАХИСТУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БЛОКУВАЛЬНОГО РЕЛЕ НАПРЯМУ ПОТУЖНОСТІ, ЩО СПРАЦЬОВУЄ ПРИ НАПРЯМІ ПОТУЖНОСТІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ДО ШИН	431
Додаток VIII РОЗРАХУНКИ СТРУМУ НЕБАЛАНСУ В НУЛЬОВОМУ ПРОВІДІ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ В УСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ МІЖ ТРЬОМА ФАЗАМИ	442
Додаток IX ОЦІНКА ЗНИЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ЗАХИСТІВ ЛІНІЙ 110 - 220 КВ ДО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ ОДНІЄЇ ФАЗИ ПРИ ОДНОЧАСНОМУ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ МІЖ ФАЗАМИ ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ (АВТОТРАНСФОРМАТОРОМ)	454
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	463

ПЕРЕДМОВА

Зараз відбувається великий розвиток розподільних електричних мереж напругою до 330 кВ. Довжина електричних мереж напругою тільки 35 - 110 кВ, що перебувають в експлуатації в системі, склала більш 500000 км. Щорічно таких мереж вводять в експлуатацію більш 25000 км.

Для вибору типів пристроїв релейного захисту й автоматики розподільних мереж і аналізу роботи цих пристроїв потрібно розрахувати струми й напруги при неповнофазних режимах і різних видах складних коротких замикань (КЗ.).

Для складних мереж такі розрахунки виконуються на електронних обчислювальних машинах (ЕОМ) або на моделях-аналогах.

У посібниках з релейного захисту розподільних мереж відсутні розрахунки струмів і напруг для зазначених режимів, тому особам, що не мають практики в таких розрахунках, буває важко знайти досить швидкий розв'язок виникаючих у них питань.

Дана книга призначена допомогти опанувати техніку розрахунків електричних величин при неповнофазних режимах і складних видах КЗ у найпростіших розподільних мережах, що мають широке поширення в енергосистемах.

В першій частині книги дані приклади розрахунків мереж з одиночними лініями при односторонньому й двосторонньому живленні. До таких схем можуть бути в багатьох випадках наведені більш складні схеми розподільних мереж. У ряді прикладів розглянуті КЗ за трансформатором, що особливо важливо для релейного захисту розподільних мереж.

Крім того, у деяких прикладах, крім виконання заданого розрахунку, дані вказівки для розв'язку аналогічних прикладів, але таких, що мають відхилення від розглянутого випадку.

У книзі не розглядається саме використання результату розрахунків для вибору типів пристроїв релейного захисту й автоматики й аналізу їх роботи. Це слід робити по рекомендаціях, наведених у Провідних вказівках по релейному захисту й у відповідних посібниках.

Усі приклади дані з докладними поясненнями. Розв'язки прикладів виконані за розрахунковими формулами (джерела їх зазначені) із застосуванням методу симетричних складових і принципу накладання. У першому розділі виконані послідовно всі дії над комплексними числами, в інших главах після підстановки комплексних чисел у буквені вирази наведені лише кінцеві результати обчислень.

У деяких прикладах навантаження представлялося комплексним опором і враховувався активний опір ліній.

У розрахунках визначалися тільки періодичні складові струмів і напруг для початкового моменту КЗ, як це звичайно виконують для релейного захисту. В окремих випадках розрахунки виконані для усталеного режиму. Прийняті в прикладах параметри навантаження є наближеними й надалі можуть уточнюватися у зв'язку з новими дослідженнями.

В другій частині книги розглянуті струмові спрямовані і неспрямовані захисти нульової послідовності з ступінчатою характеристикою витримки часу, які встановлюють на лініях 110 – 550 кВ в мережах з великим струмом замикання на землю. Дані вказівки до розрахунку цих захистів для ліній із двостороннім живленням 110 – 550 кВ без відгалужень і з відгалуженнями і для ліній 110 – 220 кВ з одностороннім живленням.

В навчальному посібнику виконавець: 1-7, 11-18 – Гай О.В., 8-10 – Приступа А.Л.

ЧАСТИНА I

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ НЕПОВНОФАЗНИХ РЕЖИМІВ І КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ

Глава перша

НЕПОВНОФАЗНІ РЕЖИМИ БЕЗ УРАХУВАННЯ ЄМНОСТІ ЛІНІЙ

1-1. А. Навести метод розрахунків неповнофазних режимів при розриві (обриві) однієї й двох фаз на лінії із двостороннім живленням. Вказати умови застосування отриманих розрахункових виразів і схем заміщення для цих режимів на лініях з одностороннім живленням.

Б. Обчислити симетричні складові струмів і повні струми у фазах лінії 110 кВ із одностороннім живленням (рис.1.1) у початковий момент розриву фази *A* на лінії біля шин *I*, а також симетричні складові струмів при розриві фаз *B* і *C* у цьому ж місці. Навести комплексну схему заміщення передачі при розриві фази *A*.

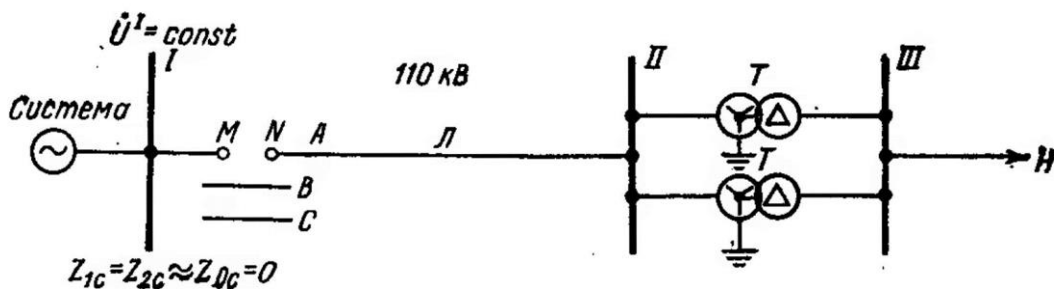


Рис.1.1. Вихідна схема для розрахунків струмів і напруг при розриві фази *A* на лінії Л 110 кВ.

Вихідні дані:

а) повна трифазна потужність і коефіцієнт потужності навантаження *H* відповідно рівні $S_H = 25$ МВА, $\cos \varphi_H = 0,85$; опір зворотної послідовності навантаження, віднесений до її повної потужності й приведений до шин 6 кВ, у відносних одиницях рівний $Z_{*2H} = 0,18 + j0,24$ [1];

б) номінальна потужність, напруга короткого замикання й коефіцієнт трансформації трансформаторів T відповідно рівні $S_{\text{ном.Т}} = 16$ МВА; $u_k = 10,5\%$; група з'єднання обмоток трансформатора $\nabla/\Delta - 11$;

$$n_T = 110/6,3; Z_{1T} = Z_{2T} = Z_T; Z_{0T} \approx Z_T;$$

в) довжина й питомі опори лінії $Л$ відповідно рівні:

$$l = 60 \text{ км}; x_{1\text{пит}} = x_{2\text{пит}} = 0,4 \text{ Ом/км}; x_{0\text{уд}} = 1,4 \text{ Ом/км};$$

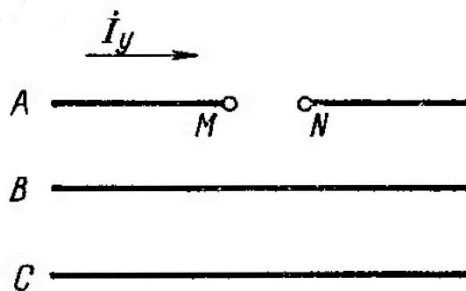
$$r_{1\text{пит}} = r_{2\text{пит}} = 0,17 \text{ Ом/км}; r_{0\text{пит}} = 0,26 \text{ Ом/км};$$

г) напруга на шинах I 110 кВ підтримується постійною, $U^I = \text{const}$; опори системи прийняті рівними нулю, тобто $Z_{1c} = Z_{2c} = Z_{0c} = 0$;

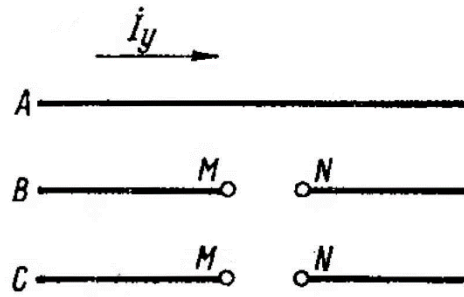
д) опори навантаження Z_n прийняті незмінними як у нормальному режимі, так і в початковий момент відключення однієї фази лінії;

е) нейтралі обох трансформаторів T заземлені.

Метод розрахунку неповнофазних режимів. Несиметричні схеми з розривом фази A (рис.1.2, а) або фаз B і C (рис.1.2, б) приводяться до схем без розриву шляхом уведення в місця розривів між точками M і N повздовжньої напруги $\dot{U}_y$ (рис.1.3), рівної різниці потенціалів між цими точками [2,3]. У цьому випадку результуючий струм $\dot{I}_y$ у схемах без розриву (рис.1.3), так само як і в схемах з розривом (рис.1.2), залишиться рівним нулю.

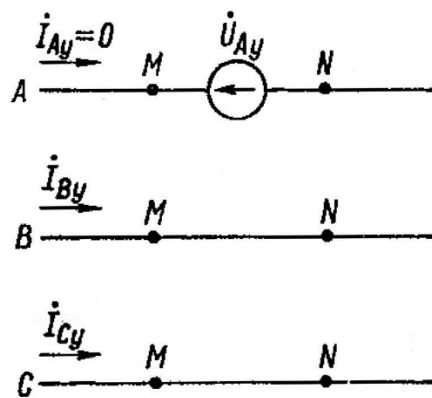


а)

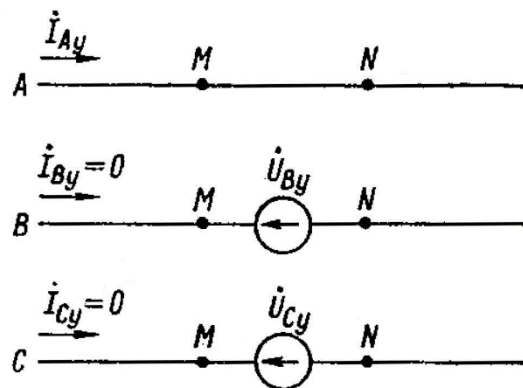


б)

Рис.1.2. Трифазна лінія з розривами: а - фази A, б - фаз B і C.



а)



б)

Рис.1.3. Послідовне включення напруг $\dot{U}_y$ у місця розривів, що представляють повздовжню несиметрію за рис.1.2.

Струм $\dot{I}_y$ дорівнює нулю, складається зі струму, обумовленого повздовжньою напругою $\dot{U}_y$ й струму навантаження $\dot{I}_n$, прийнятого рівним струму попереднього навантажувального режиму.

Несиметричні системи струмів і напруг у цих схемах (точки M і N на рис.1.3) характеризуються наступними граничними умовами:

а) при розриві однієї фази A

$$\dot{I}_{Ay} = 0; \quad \dot{U}_{By} = 0; \quad \dot{U}_{Cy} = 0; \quad (1.1)$$

б) при розриві двох фаз B і C

$$\dot{I}_{By} = 0; \quad \dot{I}_{Cy} = 0; \quad \dot{U}_{Ay} = 0. \quad (1.2)$$

Розглянуті випадки розриву фаз визначають, що фаза A є особливою, тому що перебуває в особливих умовах, відмінних від умов роботи двох інших фаз. Звичайно, як і в розрахунках струмів короткого замикання, у розрахунках неповнофазних режимів обчислення виконують методом симетричних складових для особливої фази A .

Розрив однієї фази A (рис.1.2,а і рис.1.3,а). Представимо несиметричні струми й напруги, наведені в (1.1), їхніми симетричними складовими, що відносяться до фази A :

$$\dot{I}_{Ay} = \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = 0, \quad (1.3)$$

звідки

$$\dot{I}_{A1y} = -(\dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y}); \quad (1.4)$$

$$\dot{U}_{By} = \dot{U}_{B1y} + \dot{U}_{B2y} + \dot{U}_{B0y} = a^2 \dot{U}_{A1y} + a \dot{U}_{A2y} + \dot{U}_{0y} = 0, \quad (1.5)$$

$$\dot{U}_{Cy} = \dot{U}_{C1y} + \dot{U}_{C2y} + \dot{U}_{C0y} = a \dot{U}_{A1y} + a^2 \dot{U}_{A2y} + \dot{U}_{0y} = 0, \quad (1.6)$$

де $a = e^{j120} = -0,5 + j0,867$ - оператор фази.

Віднімаючи (1.6) від (1.5), одержуємо

$$(a^2 - a) \dot{U}_{A1y} + (a - a^2) \dot{U}_{A2y} = 0,$$

звідки

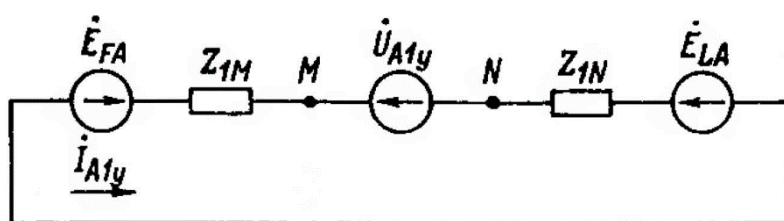
$$\dot{U}_{A1y} = \dot{U}_{A2y}. \quad (1.7)$$

Підставляючи (1.7) в (1.5), знаходимо

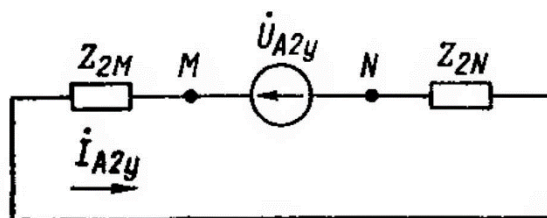
$$\dot{U}_{0y} = -(a + a^2) \dot{U}_{A1y} = \dot{U}_{A1y}, \quad (1.8)$$

де $a + a^2 = -1$.

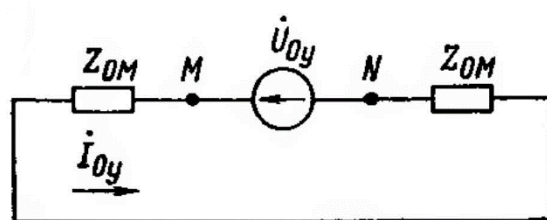
На рис.1.4 наведені схеми заміщення всіх трьох послідовностей для особливої фази A при розривах фаз (точки M і N) на лінії із двостороннім живленням. ЕРС $\dot{E}_F$ і $\dot{E}_L$ й опори Z_M і Z_N відповідно являють собою еквівалентні ЕРС і еквівалентні опори генераторів і навантажень систем, що примикають, або станцій.



а)



б)



в)

Рис.1.4. Схеми заміщення особливої фази A при розриві між точками M і N лінії із двостороннім живленням: a - прямої послідовності, $б$ - зворотної, $в$ - нульової.

(Для ліній з одностороннім живленням $\dot{E}_{LA} = 0$).

На основі схем заміщення рис.1.4,б і рис.1.4,в утворимо наступні рівняння:

$$\dot{U}_{A2y} = -\dot{I}_{A2y}(Z_{2M} + Z_{2N}) = -\dot{I}_{A2y}Z_{2\Sigma}, \quad (1.9)$$

$$\dot{U}_{0y} = -\dot{I}_{0y}(Z_{0M} + Z_{0N}) = -\dot{I}_{0y}Z_{0\Sigma}, \quad (1.10)$$

де $Z_{2\Sigma} = Z_{2M} + Z_{2N}$, $Z_{0\Sigma} = Z_{0M} + Z_{0N}$.

З (1.7) - (1.10) одержуємо

$$\dot{U}_{A1y} = -\dot{I}_{A2y}Z_{2\Sigma} = -\dot{I}_{0y}Z_{0\Sigma}. \quad (1.11)$$

На підставі рівності напруг усіх послідовностей у місці розриву фази A між точками M і N (1.7), (1.8) з урахуванням співвідношення між струмами (1.4) зі схем окремих послідовностей (рис.1.4) утворюємо комплексну схему заміщення, наведену на рис.1.5,а.

За цією схемою створюємо розрахункові вирази для визначення симетричних складових струмів у лінії:

$$\dot{I}_{A1y} = \frac{\dot{E}_{FA} - \dot{E}_{LA}}{Z_{1\Sigma} + \frac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}}, \quad (1.12)$$

де $Z_{1\Sigma} = Z_{1M} + Z_{1N}$,

$$\dot{I}_{A2y} = -\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}\dot{I}_{A1y}, \quad (1.13)$$

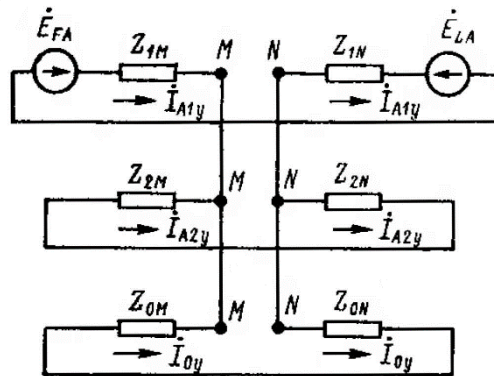
$$\dot{I}_{0y} = -\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}\dot{I}_{A1y}. \quad (1.14)$$

За цими струмами обчислюють напруги симетричних складових у місці розриву за (1.9) - (1.11) і в будь-якій точці схеми (рис.1.5, б).

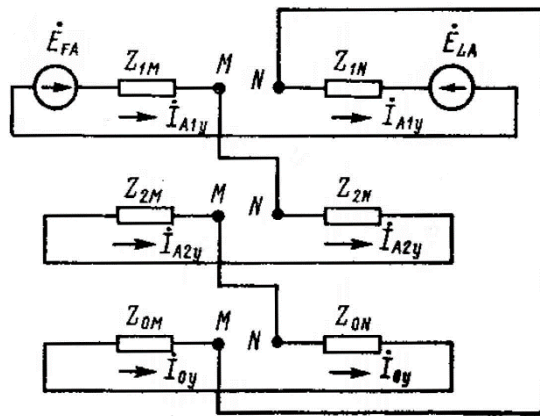
Розрив двох фаз B і C (рис.1.2,б і рис.1.3,б). Представивши несиметричні струми й напруги, наведені в (1.2), їхніми симетричними складовими, що відносяться до фази A , після деяких перетворень одержуємо

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y}, \quad (1.15)$$

$$\dot{U}_{A1y} = -(\dot{U}_{A2y} + \dot{U}_{0y}) = \dot{I}_{A2y} Z_{2\Sigma} + \dot{I}_{0y} Z_{0\Sigma}. \quad (1.16)$$



а)



б)

Рис.1.5. Комплексні схеми заміщення особливої фази A лінії із двостороннім живленням: a – для розриву фази A ,
 $б$ – при розриві фаз B і C .

(Для ліній з одностороннім живленням $\dot{E}_{LA} = 0$.

Виразам (1.15) і (1.16) відповідає комплексна схема, наведена на рис.1.5,б, з якої одержуємо

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y} = \frac{\dot{E}_{FA} - \dot{E}_{LA}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}. \quad (1.17)$$

Для ліній з одностороннім живленням в (1.12), (1.17) і на рис.1.4 і рис.1.5 слід прийняти $\dot{E}_{LA} = 0$, а $Z_{1N} = Z_{2N}$ повинні дорівнювати сумі опорів навантаження й елементів правої частини схем до точки N .

Розрахунки при розривах фаз можуть бути виконані також на основі принципу накладання [2, 3]. Цей принцип слід застосовувати, коли відомі значення струмів і напруг попереднього повнофазного режиму навантаження.

Розрахунки по п.Б умови задачі. Струм і опори навантаження H (рис.1.1) визначаємо з умови, що напруга на шинах III 6 кВ, приведена до мережі 110 кВ, $U_{\bar{6}} = 110$ кВ:

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{\bar{6}}} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 131 \text{ А};$$

$$r_H = \frac{U}{\sqrt{3}I_H} \cos \varphi_H = \frac{110000 \cdot 0,85}{\sqrt{3} \cdot 131} = 411 \text{ Ом};$$

$$x_{1H} = r_H \tan \varphi_H = 411 \cdot 0,625 = 257 \text{ Ом};$$

$$Z_{2H} = (0,18 + j0,24) \frac{U_{\bar{6}}}{\sqrt{3}I_H} = (0,18 + j0,24) \frac{110000}{\sqrt{3} \cdot 131} = (87,3 + j116,4) \text{ Ом};$$

Опір трансформатора T

$$Z_{0H} \approx Z_{1T} = Z_{2T} = Z_T = \frac{u_k U_{\text{ном.}T}^2}{S_{\text{ном.}T}} = \frac{0,105 \cdot 110^2}{16} = 79,3 \text{ Ом};$$

де $U_{\text{ном.}T}$ - напруга, кВ; $S_{\text{ном.}T}$ - потужність, МВА.

1-2. Визначити симетричні складові струмів і повні струми фаз B і C у лінії L (рис.1.1) у момент розриву фази A біля шин I , при цьому модулі повних опорів навантаження H складати арифметично з індуктивними складовими опорів усіх інших елементів схеми.

Порівняти результати даного розрахунку і уточненого, виконаного в п.Б задачі 1-1. Використовувати обчислені в задачі 1-1 значення струму навантаження й індуктивних опорів елементів схеми.

Розв'язок. Обчислюємо повні опори навантаження H (в омах), приведені до напруги 110 кВ:

$$Z_{1H} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}I_H} = \frac{110000}{\sqrt{3} \cdot 131} = 484 \text{ Ом},$$

$$Z_{2H} = Z_{1H} \sqrt{r_{*2H}^2 + x_{*2H}^2} = 484 \sqrt{0,18^2 + 0,24^2} = 145 \text{ Ом}.$$

Обчислюємо результуючі опори прямої і зворотної послідовності, приведені до місця розриву, розташовуючи за умовою повні опори навантаження по осі $+j$:

$$Z_{1\Sigma} = Z_{1H} + 0,5Z_{1T} + Z_{1l} + Z_{1c} = j(484 + 0,5 \cdot 79,3 + 24 + 0) = j547,65 \text{ Ом};$$

$$Z_{2\Sigma} = Z_{2H} + 0,5Z_{2T} + Z_{2l} + Z_{2c} = j(145 + 0,5 \cdot 79,3 + 24 + 0) = j208,65 \text{ Ом};$$

$$Z_{0\Sigma} = j123,65 \text{ Ом. (із задачі 1-1).}$$

Напруга на шинах I 110 кВ

$$\dot{U}^I = I_H Z_{1\Sigma} = 131 \cdot j547,65 = j71600 \text{ В}.$$

Симетричні складові струмів в лінії (рис.1.6) обчислюємо за формулами (1.12) - (1.14) при $\dot{E}_L = 0$ й $\dot{E}_F = \dot{U}^I$:

$$\dot{I}_{A1y} = \frac{\dot{U}^I}{Z_{1\Sigma} + \frac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}} = \frac{j71600}{j547,65 + \frac{j208,65 \cdot j123,65}{j(208,65 + 123,65)}} = 114,5 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{A2y} = -\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \dot{I}_{A1y} = -\frac{j123,65}{j(208,65 + 123,65)} \cdot 114,5 = -42,6 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{0y} = -\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \dot{I}_{A1y} = -\frac{j208,65}{j(208,65 + 123,65)} \cdot 114,5 = -71,9 \text{ А}.$$

Для перевірки правильності обчислень визначимо струм фази A в місці розриву, який повинен дорівнювати нулю, тобто

$$\dot{I}_{Ay} = \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = 114,5 - 42,6 - 71,9 = 0.$$

Струми фаз B і C у лінії

$$\begin{aligned} \dot{I}_{By} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 - j0,867) \cdot 114,5 - (-0,5 + j0,867) \cdot 42,6 - \\ - 71,9 = -107,85 - j136,3 = 173,7e^{j231} \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{Cy} = a\dot{I}_{A1y} + a^2\dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 + j0,867) \cdot 114,5 - (-0,5 - j0,867) \cdot 42,6 - 71,9 = -107,85 + j136,3 = 173,7e^{j128} \text{ А.}$$

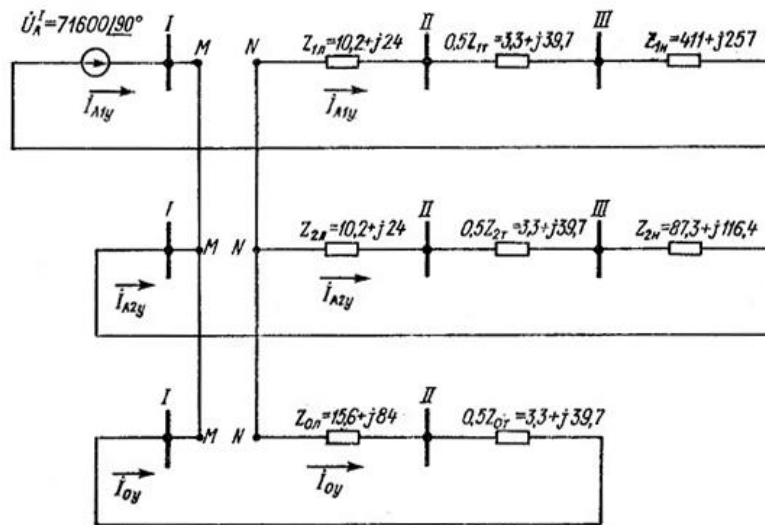


Рис.1.6. Комплексна схема заміщення розриву фази А на початку лінії з одностороннім живленням навантаження.

Результати розрахунків наведені в табл.1.1

Таблиця 1.1

Результати розрахунків

Розрахунки	Симетричні складові струмів і повні струми фаз В і С, А				
	$\dot{I}_{A1y}$	$\dot{I}_{A2y}$	$\dot{I}_{0y}$	$\dot{I}_{By}$	$\dot{I}_{Cy}$
Уточнений, по задачі 1-1	$117e^{-j5}$	$-45e^{j8}$	$-74e^{-j12}$	$161e^{j226}$	$193,8e^{j123}$
Наближений, по задачі 1-2	114,5	-42,6	-71,9	$173,7e^{j231}$	$173,7e^{j128}$

Порівняння їх показує, що арифметичне додавання повних опорів навантаження до індуктивних опорів інших елементів схеми призвело до похибки симетричних складових струму порядку 5%, повних струмів - порядку 10%. При розрахунках неповнофазних режимів наближеним способом зазначена похибка повинна бути врахована в розрахунках уставок релейного захисту.

1-3. Обчислити напруги зворотної й нульової послідовності на шинах 110 кВ I і II (рис.1.7) у момент розриву фази A на початку лінії Л з одностороннім живленням навантаження Н.

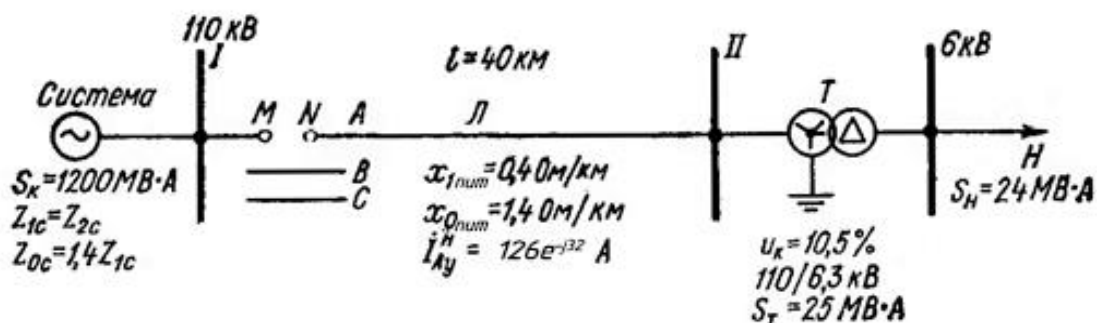


Рис.1.7. Вихідна схема з даними для розрахунків при обриві на лінії 110 кВ.

Згідно [2] модулі повних опорів навантаження Н, віднесені до заданої потужності, прийняти $Z_{1H\%} = 120$, $Z_{2H\%} = 35$ і складати арифметично з індуктивними складовими опорів інших елементів схеми, тобто z_{1H} і z_{2H} уважати індуктивними й розташовувати по осі $+j$.

Вихідні дані наведені на рис.1.7, при цьому нейтраль трансформатора Т заземлена. Дати якісний аналіз установлених на живлячому кінці лінії струмових захистів від міжфазних коротких замикань і від замикань на землю.

Розв'язок. Оскільки заданий вектор (комплекс) струму навантаження лінії в повнофазному режимі, розрахунки простіше виконувати із застосуванням принципу накладання.

Згідно із цим принципом [2] розглядаємо два режими:

а) повнофазний навантажувальний режим (до виникнення розриву) зі струмом у лінії $\dot{I}_{Ay}^H = 126 e^{-j32} \text{ A}$;

б) додатковий режим з розривом фази А, представлений комплексною схемою заміщення (рис.1.8), у якій у місці розриву включений струм $(-\dot{I}_{Ay}^H)$, а ЕРС відсутні. Дійсні симетричні складові струмів визначаються накладанням обох режимів.

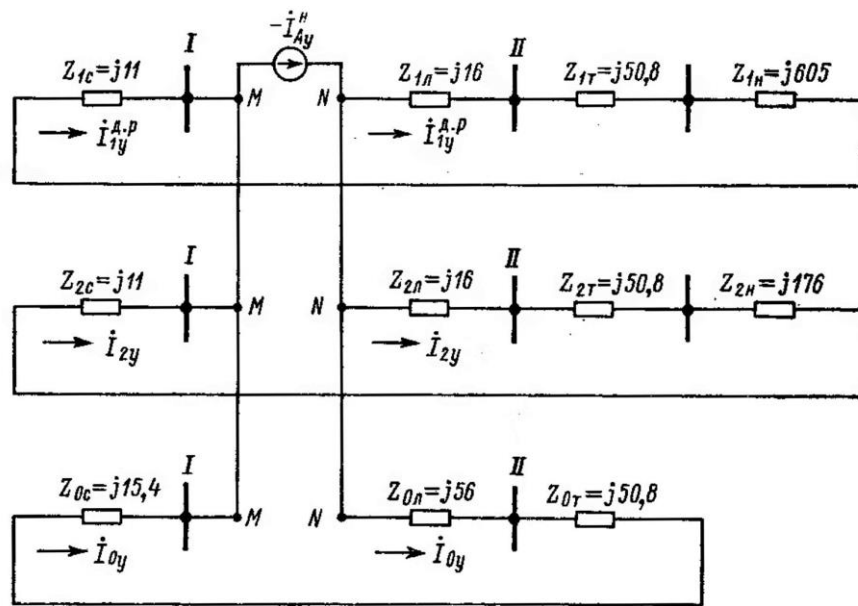


Рис.1.8. Комплексна схема заміщення додаткового режиму при обриві фази A в схемі за рис.1.7.

У схемі додаткового режиму для спрощення, як це звичайно приймається в інженерних розрахунках струмів КЗ, враховуємо лише індуктивні опори елементів. При цьому повні опори навантаження складаємо арифметично з індуктивними опорами інших елементів схеми, тобто приймаємо $Z_{1H} = jx_{1H}$ і $Z_{2H} = jx_{2H}$.

У схемі додаткового режиму (рис.1.8) шукані струми зворотної й нульової послідовності є дійсними (реальними) струмами у вихідній схемі на рис.1.7 з розривом фази A , тому що в схемі повнофазного режиму вони відсутні. Тим часом дійсний струм прямої послідовності I_{A1y} визначається додаванням струму прямої послідовності додаткового режиму $I_{A1y}^{0,p}$ до струму навантаження I_{Ay}^H попереднього повнофазного режиму, тобто

$$I_{A1y} = I_{A1y}^{0,p} + I_{Ay}^H. \quad (1.18)$$

Обчислюємо опори, приведені до мережі 110 кВ, елементів схеми (рис.1.8) і окремі члени розрахункових виразів для струмів, що приводяться нижче.

Опори системи

$$Z_{1c} = Z_{2c} = \frac{jU_{cp}^2}{S_k} = \frac{j115^2}{1200} = j11 \text{ Ом},$$

де U_{cp} – розрахункова напруга;

$$Z_{0c} = 1,4Z_{1c} = 1,4 \cdot j11 = j15,4 \text{ Ом}.$$

Опори лінії

$$Z_{1л} = Z_{2л} \approx jx_{1л}l = j0,4 \cdot 40 = j16 \text{ Ом};$$

$$Z_{0л} = jx_{0л}l = j1,4 \cdot 40 = j56 \text{ Ом}.$$

Опір трансформатора T , приведений до його номінальних даних,

$$z_{oT} \approx z_{1T} = z_{2T} = \frac{u U_{ном.T}^2}{S_{ном.T}} = \frac{0,105 \cdot 110^2}{25} = 50,8 \text{ Ом};$$

Опори навантаження, приведені до $U_{ном.T}$ і заданої потужності,

$$z_{1н} = x_{1н} = \frac{z_{1н} \% U_{ном.T}^2}{100 S_{н}} = \frac{120 \cdot 110^2}{100 \cdot 24} = 605 \text{ Ом};$$

$$z_{2н} = x_{2н} = \frac{z_{2н} \% U_{ном.T}^2}{100 S_{н}} = \frac{35 \cdot 110^2}{100 \cdot 24} = 176 \text{ Ом}.$$

Обчислені значення наведені на рис.1.8.

Результуючі опори всіх трьох послідовностей схеми (рис.1.8):

$$Z_{1\Sigma} = Z_{1c} + Z_{1л} + Z_{1T} + Z_{1н} = j11 + j16 + j50,8 + j605 = j682,8 \text{ Ом};$$

$$Z_{2\Sigma} = Z_{2c} + Z_{2л} + Z_{2T} + Z_{2н} = j11 + j16 + j50,8 + j176 = j253,8 \text{ Ом};$$

$$Z_{0\Sigma} = Z_{0c} + Z_{0л} + Z_{0T} = j15,4 + j56 + j50,8 = j122,2 \text{ Ом}.$$

Значення провідностей, що входять у розрахункові вирази:

$$\frac{1}{Z_{1\Sigma}} = \frac{1}{j682,8} = -j0,00146; \quad \frac{1}{Z_{2\Sigma}} = \frac{1}{j253,8} = -j0,00349;$$

$$\frac{1}{Z_{0\Sigma}} = \frac{1}{j122,2} = -j0,0082; \quad \frac{1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma}} + \frac{1}{Z_{0\Sigma}} = -j0,0136.$$

З рис.1.8 знаходимо струми окремих послідовностей фази A розподілом струму навантаження ($-I_{Ay}^H$) у повнофазному режимі пропорційно провідностям схем окремих послідовностей:

$$\dot{I}_{A1y}^{\partial.p} = -\frac{\frac{1}{Z_{1\Sigma}}}{\frac{1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma}} + \frac{1}{Z_{0\Sigma}}} \dot{I}_{Ay}^H. \quad (1.19)$$

Дійсний струм прямої послідовності в місці розриву за формулами (1.18) і (1.19)

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A1y}^{\partial.p} + \dot{I}_{A1y}^H &= \frac{\frac{1}{Z_{2\Sigma}} + \frac{1}{Z_{0\Sigma}}}{\frac{1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma}} + \frac{1}{Z_{0\Sigma}}} \dot{I}_{Ay}^H = \frac{-j(0,00394 + 0,0082)}{-j0,0136} 126e^{-j32} = \\ &= 112,5e^{-j32} \text{ А.} \end{aligned}$$

Дійсні струми зворотної й нульової послідовності

$$\dot{I}_{A2y} = -\frac{\frac{1}{Z_{2\Sigma}}}{\frac{1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma}} + \frac{1}{Z_{0\Sigma}}} \dot{I}_{Ay}^H = -\frac{-j0,00394}{-j0,0136} 126e^{-j32} = -36,5e^{-j32} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{0y} = -\frac{\frac{1}{Z_{0\Sigma}}}{\frac{1}{Z_{1\Sigma}} + \frac{1}{Z_{2\Sigma}} + \frac{1}{Z_{0\Sigma}}} \dot{I}_{Ay}^H = -\frac{-j0,0082}{-j0,0136} 126e^{-j32} = -76e^{-j32} \text{ А.}$$

За обчисленими значеннями струмів $\dot{I}_{A2y}$ і $\dot{I}_{0y}$ на підставі комплексної схеми заміщення (рис.1.8) визначаємо напруги зворотної й нульової послідовності на шинах I й II:

$$\dot{U}_{A2I} = -\dot{I}_{A2y} Z_{2c} = -(-36,5e^{-j32}) j11 = 401e^{j58} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{0I} = -\dot{I}_{0y} Z_{0c} = -(-76e^{-j32}) j15,4 = 1172e^{j58} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{A2II} = \dot{I}_{A2y} (Z_{2n} + Z_{2T}) = -36,5e^{-j32} \cdot j(176 + 50,8) = -8270e^{j58} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{0II} = \dot{I}_{0y} Z_{0T} = -76e^{-j32} \cdot j50,8 = -3860e^{j58} \text{ В.}$$

Для аналізу струмових захистів від міжфазних КЗ обчислюємо повні струми фаз B і C:

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = e^{j240} \cdot 112,5e^{-j32} + e^{j120} \cdot (-36,5e^{-j32}) - 76e^{-j32} = \\ &= 112,5e^{j208} - 36,5e^{j88} - 76e^{-j32} = 112,5(-0,833 - j0,47) - \\ &- 36,5(0,035 + j0,999) - 76(0,848 - j0,53) = -99,3 - j52,8 - 1,28 - j36,453 - \\ &- 64,4 + j40,3 = -164,98 - j48,95 = 172e^{j196,5} \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = e^{j120} \cdot 112,5e^{-j32} + e^{j240} \cdot (-36,5e^{-j32}) - 76e^{-j32} = \\ &= 3,94 + j112,4 + 32,2 + j17,1 - 64,4 + j40,3 = -28,26 + j169,8 = 172e^{j99,4} \text{ А}. \end{aligned}$$

Перевіримо правильність проведених обчислень, для чого визначимо напруги зворотної й нульової послідовності в місці розриву, які повинні бути рівні між собою, і струм фази A в лінії, який повинен дорівнювати нулю:

$$\dot{U}_{A2y} = -\dot{I}_{A2y} Z_{2\Sigma} = -(-36,5e^{-j32}) j253,8 = 9260e^{j58} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{0y} = -\dot{I}_{0y} Z_{0\Sigma} = -(-76e^{-j32}) j122,2 = 9260e^{j58} \text{ В};$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = 112,5e^{-j32} - 36,5e^{-j32} - 76e^{-j32} = 0.$$

Отримані значення підтверджують правильність виконаних розрахунків.

З результатів розрахунків випливає, що при обриві лінії з одностороннім живленням однієї з фаз (A) повні струми в інших фазах (B і C) при незмінному опорі навантаження зростають у порівнянні зі струмом навантаження в попередньому повнофазному режимі, а кут зсуву фаз між цими струмами зменшується. У цьому випадку струми в усталеному режимі збільшилися на 36,6%, а кут зсуву фаз склав $95,1^\circ$ замість 120° у повнофазному режимі. Крім того, у схемі передачі (рис.1.7) з'являються струми й напруги зворотної й нульової послідовності.

Усе це повинно бути враховано при виборі типів захистів і їх уставок на лініях і на трансформаторах, режим яких передбачає як тривалу роботу двома фазами, так і короткочасний неповнофазний режим.

1-4. За даними задачі 1-3 за умови, що нейтраль трансформатора T не заземлена (рис.1.7), визначити симетричні складові струмів і повні струми в лінії $Л$ при обриві фази A на початку лінії.

Розв'язок. Розрахунки виконуємо, застосовуючи принцип накладання двох режимів: а) повнофазного режиму навантаження, який заданий в умові задачі 1-3; б) додаткового режиму при обриві фази A .

Для обчислення струмів у додатковому режимі використовується комплексна схема заміщення, наведена на рис.1.8.

За умовою даної задачі, нейтраль трансформатора T не заземлена, тому $Z_{0T} = \infty$. У цьому випадку в схемі заміщення (рис.1.8) вітка з опором Z_{0T} повинна бути розімкнута й, отже, $I_{0T} = 0$.

Зі схеми заміщення (рис.1.8) при розімкнутій схемі нульової послідовності струми визначаються як величини, обернено пропорційні результуючим опорам схем прямої і зворотної послідовності, за наступними виразами:

$$\dot{I}_{A1y}^{\partial.p} = \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}} (-\dot{I}_{Ay}^H) = \frac{j253,8(-126e^{-j32})}{j(682,8 + 253,8)} = -34,2e^{-j32} \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2y} = \frac{Z_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}} (-\dot{I}_{Ay}^H) = \frac{j682,8(-126e^{-j32})}{j(682,8 + 253,8)} = -91,8e^{-j32} \text{ А};$$

значення $Z_{1\Sigma}$ і $Z_{2\Sigma}$ визначено в задачі 1-3.

Дійсний струм прямої послідовності

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A1y}^{\partial.p} + \dot{I}_{Ay}^H = -34,2e^{-j32} + 126e^{-j32} = 91,8e^{-j32} \text{ А}.$$

Повні струми фаз A , B і C

$$\dot{I}_{Ay} = \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} = 91,8e^{-j32} - 91,8e^{-j32} = 0,$$

$$\dot{I}_{By} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} = 91,8e^{-j32} (a^2 - a) = 91,8e^{-j32} (-j\sqrt{3}) = 159e^{-j122} \text{ А},$$

$$\dot{I}_{Cy} = a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} = 91,8e^{-j32} (a - a^2) = 91,8e^{-j32} (j\sqrt{3}) = 159e^{j58} \text{ А},$$

$$\text{де } a^2 - a = -j\sqrt{3}.$$

Між струмами $\dot{I}_{By}$ й $\dot{I}_{Cy}$ кут зсуву фаз $\alpha = -122^\circ - 58^\circ = -180^\circ$.

1-5. За вихідним даними, наведеними у задачі 1-3, визначити струми симетричних складових і повний струм у лінії (рис.1.7), а також напруги зворотної й нульової послідовності на шинах II 110 кВ приймаючої підстанції при обриві фаз B і C на початку лінії для двох випадків:

а) нейтраль трансформатора T заземлена наглухо;

б) нейтраль трансформатора T не заземлена.

Розв'язок. А. Нейтраль трансформатора T заземлена наглухо.

Оскільки в задачі 1-3 розглянутий нормальний повнофазний режим, розрахунки виконуємо з використанням принципу накладання двох режимів: повнофазного навантажувального й додаткового режиму при обриві фаз B і C .

Граничні умови в місці обриву фаз B і C наступні:

$$\dot{I}_{By} = 0; \quad \dot{I}_{Cy} = 0; \quad (1.20)$$

$$\dot{U}_{Ay} = 0; \quad (1.21)$$

$$\dot{I}_{Ay} \neq 0. \quad (1.22)$$

Розкладаємо струми й напруги [формули (1.20) – (1.22)] на симетричні складові, приведені до особливої фази A . Після деяких перетворень одержуємо наступні рівняння в місці обриву фаз:

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y} = \dot{I}_{A1y}^{\partial.p} + \dot{I}_{Ay}^n; \quad (1.23)$$

$$\dot{U}_{A1y} = -\dot{U}_{A2y} - \dot{U}_{0y} = \dot{I}_{A2y} Z_{2\Sigma} + \dot{I}_{0y} Z_{0\Sigma} = -\dot{I}_{A1y}^{\partial.p} Z_{1\Sigma}, \quad (1.24)$$

де $\dot{I}_{A1y}^{\partial.p}$ - струм прямої послідовності в додатковому режимі;

$\dot{I}_{Ay}^n$ - струм навантаження в нормальному повнофазному режимі;

$Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$ і $Z_{0\Sigma}$ - результуючі опори в схемах прямої, зворотної й нульової послідовності.

На підставі формул (1.23) і (1.24) на рис.1.9 наведена комплексна схема заміщення додаткового режиму. Струми $\dot{I}_{A1y}^{\partial.p}$, $\dot{I}_{2y}$ і $\dot{I}_{0y}$ визначаються зі схеми заміщення (рис.1.9) розподілом струму ($-\dot{I}_{Ay}^H$) обернено пропорційно результуючому опору прямої послідовності й сумі результуючих опорів зворотної й нульової послідовності.

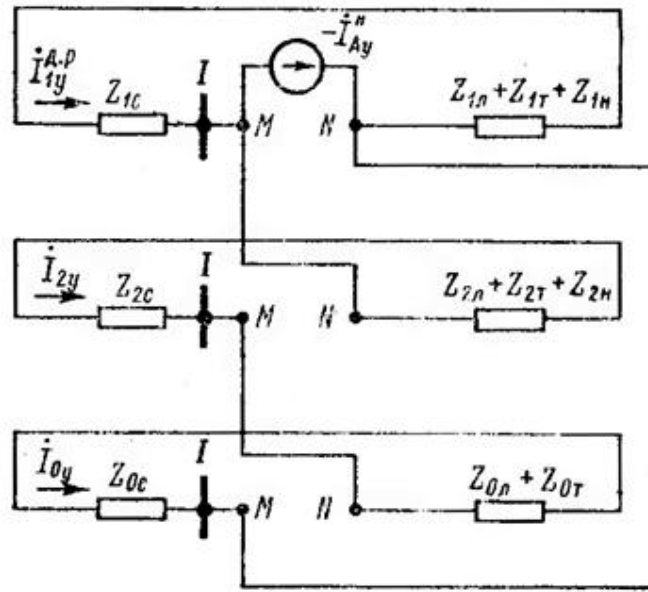


Рис.1.9. Комплексна схема заміщення додаткового режиму для фази A (особливої) при обриві фаз B і C у схемі за рис.1.7.

Виведемо розрахункові вирази для визначення струмів $\dot{I}_{A1y}^{\partial.p}$ і $\dot{I}_{A1y}$ при обриві фаз B і C . З рівнянь (1.23) і (1.24) маємо

$$\frac{-\dot{I}_{A1y}^{\partial.p}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} = \frac{\dot{I}_{A1y}}{Z_{1\Sigma}}.$$

Складемо наступну пропорцію із цього рівняння:

$$\frac{-\dot{I}_{A1y}^{\partial.p}}{\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A1y}^{\partial.p}} = \frac{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}. \quad (1.25)$$

Підставляючи значення $\dot{I}_{A1y}$ з (1.23) в (1.25), одержуємо:

$$\frac{-\dot{I}_{A1y}^{\partial.p}}{\dot{I}_{Ay}^H} = \frac{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}},$$

звідки

$$\dot{I}_{A1y}^{\partial,p} = -\frac{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \dot{I}_{Ay}^n. \quad (1.26)$$

З рівнянь (1.23) і (1.26) визначимо також $\dot{I}_{A1y}$:

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{Ay}^n + \dot{I}_{A1y}^{\partial,p} = \dot{I}_{Ay}^n - \frac{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \dot{I}_{Ay}^n = \frac{Z_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \dot{I}_{Ay}^n. \quad (1.27)$$

Підставляючи в (1.27) значення опорів, обчислених у задачі 1-3, одержуємо:

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y} = \frac{j628,8 \cdot 126e^{-j32}}{j(628,8 + 253,8 + 122,2)} = 78,7e^{-j32} \text{ А.}$$

Повний струм фази A

$$\dot{I}_{Ay} = 3\dot{I}_{A1y} = 3 \cdot j78,7e^{-j32} = 236e^{-j32} \text{ А.}$$

Зі схеми заміщення додаткового режиму (рис.1.9) визначаємо напруги зворотної й нульової послідовності на шинах II 110 кВ приймаючої підстанції:

$$\dot{U}_{A2II} = \dot{I}_{A2y} (Z_{2n} + Z_{2T}) = 78,7e^{-j32} \cdot j(176 + 50,8) = 17900e^{j58} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0II} = \dot{I}_{0y} Z_{0T} = 78,7e^{-j32} \cdot j50,8 = 4000e^{j58} \text{ В.}$$

Для перевірки правильності проведених обчислень визначимо струм фази B у місці розриву (він повинен дорівнювати нулю):

$$\dot{I}_{By} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = 78,7e^{-j32} (a^2 + a + 1) = 0,$$

оскільки $a^2 + a + 1 = 0$.

Обчислимо також напруги всіх послідовностей у місці обриву двох фаз за формулами (1.24) і (1.26):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1y} &= -\dot{I}_{A1y}^{\partial,p} Z_{1\Sigma} = \frac{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} Z_{1\Sigma} \dot{I}_{Ay}^n = \\ &= \frac{j(253,8 + 122,8)}{j(628,8 + 253,8 + 122,8)} \cdot j628,8 \cdot 126e^{-j32} = 29600e^{j58} \text{ В,} \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{A2y} = -\dot{I}_{A2y} Z_{2\Sigma} = -78,7e^{-j32} \cdot j253,8 = -20000e^{j58} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0y} = -\dot{I}_{0y} Z_{0\Sigma} = -78,7e^{-j32} \cdot j122,8 = -9660e^{j58} \text{ В.}$$

Виконуємо перевірку правильності обчислення напруг за граничною умовою (1.21):

$$\dot{U}_{Ay} = \dot{U}_{A1y} + \dot{U}_{A2y} + \dot{U}_{0y} = 29600e^{j58} - 20000e^{j58} - 9660e^{j58} \approx 0.$$

Б. *Нейтраль трансформатора Т не заземлена.* Опір нульової послідовності незаземленого трансформатора дорівнює нескінченності, і в схемі заміщення нульової послідовності (рис.1.9) права вітка в трансформатора повинна бути розімкнута.

У цьому випадку струми зворотної й нульової послідовності (рис.1.9) не протікають і, отже,

$$\dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y} = 0.$$

Тоді для вузла M_1 маємо:

$$\dot{I}_{A1y}^{\partial.p} = -\dot{I}_{Ay}^n. \quad (1.28)$$

З виразів (1.23) і (1.28) одержуємо:

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A1y}^{\partial.p} + \dot{I}_{Ay}^n = -\dot{I}_{Ay}^n + \dot{I}_{Ay}^n = 0.$$

Таким чином, при обриві двох фаз і при незаземленій нейтралі трансформатора Т на приймаючій підстанції симетричні складові струмів фази А дорівнюють нулю, отже, дорівнює нулю й повний струм фази А. Фізично це пояснюється тим, що відсутній замкнений електричний ланцюг для протікання струму в третій, необірваній, фазі.

1-6. На рис.1.10 наведена схема живлення навантаження H по лінії 220 кВ від виділеного блоку турбогенератор - трансформатор. При розриві фази на лінії біля понижуючої підстанції визначити

- а) допустимий час роботи турбогенератора за умовою нагрівання струмами зворотної послідовності;
- б) усталені струми всіх фаз обмотки статора генератора;
- в) напруги в усталеному режимі на шинах 11 кВ понижуючої підстанції.

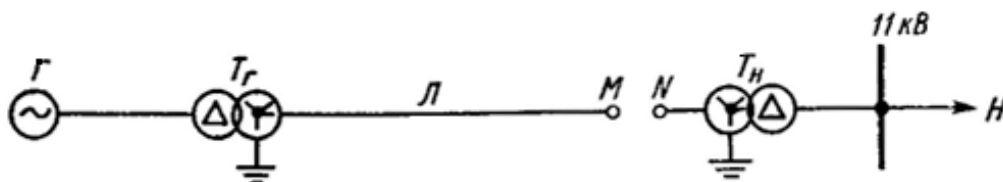


Рис.1.10. Схема живлення навантаження H від виділеного блоку генератор – трансформатор.

При виконанні розрахунків слід: прийняти опори навантаження H незмінними як у повнофазному режимі, так і при обриві однієї фази на лінії; урахувувати активні й індуктивні опори навантаження H і лінії L ; виходити з того, що регулятор напруги генератора підтримує постійною і рівною 237 кВ напругу на стороні вищої напруги підвищуючого трансформатора.

Вихідні дані. Турбогенератор G :

тип ТВ2-100, $P_{\text{ном. Г}} = 100 \text{ МВт}$; $U_{\text{ном. Г}} = 13,8 \text{ кВ}$, $\cos \varphi = 0,85$,

$S_{\text{ном. Г}} = 117,5 \text{ МВА}$, $x_{*2Г} = 0,168$, теплова стала $A = 29$.

Трансформатор $T_{\text{Г}}$: $S_{\text{ном. ТГ}} = 125 \text{ МВА}$, $n_{\text{ТГ}} = 13,8/230 \text{ кВ}$, $u_{\text{к}} = 13\%$,
 $\text{Y}/\Delta - 11$.

Трансформатор $T_{\text{Н}}$: $S_{\text{ном. ТН}} = 125 \text{ МВА}$, $n_{\text{ТН}} = 220/11 \text{ кВ}$, $u_{\text{к}} = 13\%$,
 $\text{Y}/\Delta - 11$.

Лінія L : довжина $l = 180 \text{ км}$, $x_{1\text{пит}} = x_{2\text{пит}} = 0,42 \text{ Ом/км}$,
 $r_{1\text{пит}} = 0,105 \text{ Ом/км}$, $x_{0\text{пит}} = 1,47 \text{ Ом/км}$, $r_{0\text{пит}} = 0,25 \text{ Ом/км}$.

Навантаження H : $S_{\text{Н}} = 90 \text{ МВА}$, $\cos \varphi_{\text{Н}} = 0,85$, $Z_{*2\text{Н}} = 0,18 + j 0,24$.

При розрахунках слід знехтувати ємністю лінії L між проводами і ємністю проводів відносно землі.

Розв'язок. Визначаємо опори окремих елементів і струми всіх послідовностей, приведені до напруги 220 кВ. Опори навантаження H :

$$z_{1\text{Н}} = \frac{U_{\text{ф.Н}}}{I_{\text{ф.Н}}} = \frac{U_{\text{мф}}^2}{S_{\text{Н}}} = \frac{220^2}{90} = 538 \text{ Ом}; \quad r_{1\text{Н}} = z_{1\text{Н}} \cos \varphi_{\text{Н}} = 538 \cdot 0,85 = 458 \text{ Ом},$$

$$x_{1\text{Н}} = z_{1\text{Н}} \sin \varphi_{\text{Н}} = 538 \cdot 0,53 = 286 \text{ Ом}, \quad Z_{1\text{Н}} = 458 + j286 = 538e^{j32} \text{ Ом},$$

$$Z_{2H} = Z_{1H}(0,18 + j0,24) = 538(0,18 + j0,24) = 97 + j129 = 161e^{j53} \text{ Ом.}$$

Опори понижуючого й підвищуючого трансформаторів:

$$x_{1T_H} = x_{2T_H} = x_{0T_H} = \frac{u_k U_{ном.T_H}^2}{S_{ном.T_H}} = \frac{0,13 \cdot 220^2}{125} = 50,3 \text{ Ом,}$$

$$x_{1T_\Gamma} = x_{2T_\Gamma} = x_{0T_\Gamma} = \frac{0,13 \cdot 230^2}{125} = 55 \text{ Ом.}$$

Опори лінії Л:

$$Z_{1L} = Z_{2L} = l(r_{ліній} + jx_{ліній}) = 180(0,105 + j0,42) = 18,9 + j75,6 = 77,8e^{j76} \text{ Ом,}$$

$$Z_{0L} = l(r_{0ліній} + jx_{0ліній}) = 180(0,25 + j1,47) = 45 + j264 = 268e^{j80} \text{ Ом.}$$

Опір зворотної послідовності генератора визначаємо за виразом:

$$x_{2Г} = \frac{x_{2Г} \% U_{ном.Г} n_{T_\Gamma}^2}{100 S_{ном.Г}} = \frac{16,8 \cdot 13,8^2 \left(\frac{230}{13,8} \right)^2}{100 \cdot 117,5} = 75,7 \text{ Ом.}$$

Оскільки регулятор напруги генератора підтримує напругу на стороні вищої напруги трансформатора постійною, у схемі прямої послідовності необхідно прийняти опори генератора й трансформатора T_Γ рівними нулю.

На рис.1.11 наведена комплексна схема заміщення розриву фази А біля понижуючої підстанції; за схемою визначаємо симетричні складові струмів і напруг фази А в місці розриву.

Попередньо обчислимо результуючі опори всіх послідовностей відносно місця розриву:

$$Z_{1\Sigma} = Z_{1L} + Z_{1T_H} + Z_{1H} = 18,9 + j75,6 + j50,3 + 458 + j286 = 477 + j412 = 631e^{j41} \text{ Ом;}$$

$$Z_{1\Sigma} = Z_{2Г} + Z_{2T_\Gamma} + Z_{2L} + Z_{2T_H} + Z_{2H} = j75,7 + j55 + 18,9 + j75,6 + j50,3 + 97 + j129 = 115,9 + j385,6 = 402e^{j73} \text{ Ом;}$$

$$Z_{0\Sigma} = Z_{0L} + Z_{0T_\Gamma} + Z_{0T_H} = 45 + j264 + j55 + j50,3 = 45 + j369,3 = 371,5e^{j83} \text{ Ом.}$$

Приймаємо комплекс (вектор) напруги на стороні вищої напруги підвищуючого трансформатора співпадаючим з віссю дійсних величин (

$\dot{U}_{T_r} = U_{T_r}$) і обчислюємо струми всіх послідовностей за схемою заміщення, наведеній на рис.1.11.

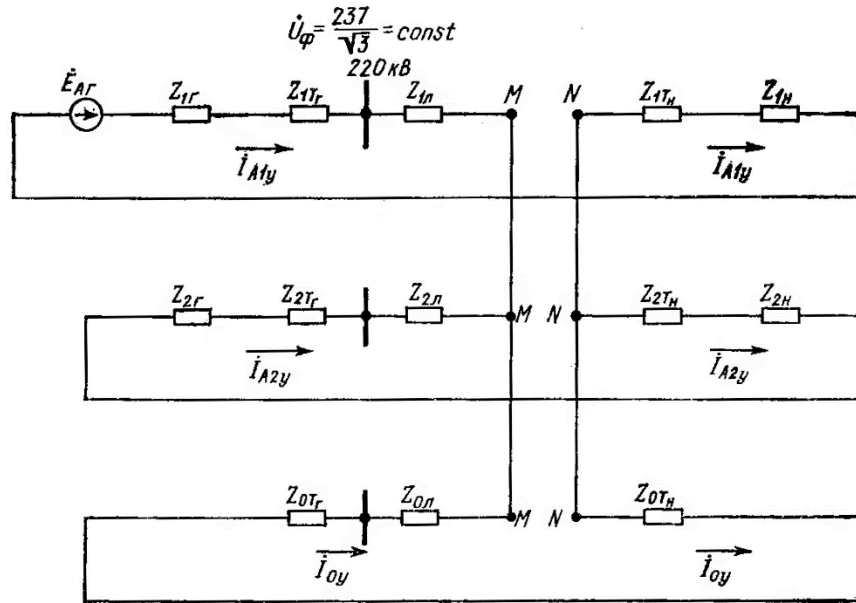


Рис.1.11. Комплексна схема заміщення обриву фази на лінії (рис.1.10).

Струм прямої послідовності фази A в місці розриву визначаємо за виразом:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A2y} &= \frac{\dot{U}_{T_r}}{Z_{1\Sigma} + \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}} = \frac{237000 / \sqrt{3}}{477 + j412 + \frac{402e^{j73} \cdot 371,5e^{j83}}{115,9 + j385,6 + 45 + j369,3}} = \\ &= \frac{137000}{477 + j412 + \frac{402e^{j73} \cdot 371,5e^{j83}}{77e^{j278}}} = \frac{137000}{477 + j412 + 40,2 + j189} = \quad (1.29) \\ &= \frac{137000}{793e^{j49}} = 172,6e^{-j49} \text{ А.} \end{aligned}$$

Струм зворотної послідовності в місці розриву

$$\dot{I}_{A2y} = -\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \dot{I}_{A1y} = \frac{371,5e^{j83} \cdot 172,6e^{-j49}}{772e^{j78}} = -83e^{-j44} = 83e^{j136} \text{ А.} \quad (1.30)$$

Струм нульової послідовності в місці розриву

$$\dot{I}_{0y} = -\frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \dot{I}_{A1y} = \frac{-402e^{j73} \cdot 172,6e^{-j49}}{772e^{j78}} = -90e^{-j54} = 90e^{j126} \text{ А.} \quad (1.31)$$

А. Визначення допустимого часу роботи турбогенератора за умовою нагрівання ротора струмами зворотної послідовності. Допустимий час $t_{\text{доп}}$ з умови запобігання ушкодження ротора генератора через перегрів струмами зворотної послідовності характеризується рівнянням адіабатного процесу $I_{*2}^2 t_{\text{доп}} = A_{*2}$, де I_{*2} - кратність ефективного струму зворотної послідовності відносно номінального струму генератора; A - постійна для даного типу генератора величина; для турбогенератора без форсованого охолодження типу ТВ2 $A = 29$; $t_{\text{доп}}$ - допустимий час, с.

Із цього рівняння визначаємо допустимий час роботи турбогенератора, для чого обчислимо I_{*2} .

Струм зворотної послідовності, що протікає в генераторі,

$$I_2 = I_{A2y} n_{T_\Gamma} = 83 \cdot \frac{230}{13,8} = 1383 \text{ А.}$$

Номінальний струм генератора

$$I_{\text{ном.}\Gamma} = \frac{S_{\text{ном.}\Gamma}}{\sqrt{3} U_{\text{ном.}\Gamma}} = \frac{117500}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 4920 \text{ А.}$$

Відносний струм зворотної послідовності, що протікає через генератор,

$$I_{*2} = \frac{I_2}{I_{\text{ном.}\Gamma}} = \frac{1383}{4920} = 0,281.$$

Допустимий час

$$t_{\text{доп}} = \frac{A}{I_{*2}^2} = \frac{29}{0,281^2} = \frac{29}{0,079} = 367 \text{ с.}$$

Б. Визначення повних струмів генератора. Для визначення повних струмів генератора, тобто лінійних струмів на стороні трикутника трансформатора T_Γ із групою з'єднання обмоток Υ/Δ - 11, при обриві фази на стороні зірки слід урахувати, що ці струми не містять складових нульової послідовності. Останні замикаються в обмотках трансформатора, з'єднаних у трикутник. Крім того, при переході зі

сторони зірки на сторону трикутника цього трансформатора комплекси лінійних струмів прямої послідовності повертаються на 30° у позитивному напрямку обертання векторів (проти годинникової стрілки), а зворотної послідовності - на 30° у протилежному напрямку.

Таким чином, лінійні струми на стороні 13,8 кВ генератора визначаємо за наступними виразами:

$$\begin{aligned}\dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = (\dot{I}_{A1y} \cdot e^{j30} + \dot{I}_{A2y} \cdot e^{-j30}) n_{T_r} = \\ &= (172,6e^{-j49} \cdot e^{j30} - 83e^{-j44} \cdot e^{-j30}) \frac{230}{13,8} = (172,6e^{-j19} - 83e^{-j74}) \frac{230}{13,8} = \\ &= 2720 - j940 - 382 + j1330 = 2338 + j390 = 2375e^{j10} \text{ A}, \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} = (a^2 \dot{I}_{A1y} \cdot e^{j30} + a \dot{I}_{A2y} \cdot e^{-j30}) n_{T_r} = \\ &= (172,6e^{-j49} \cdot e^{j270} - 83e^{-j44} \cdot e^{j90}) \frac{230}{13,8} = (172,6e^{j221} - 83e^{j46}) \frac{230}{13,8} = \\ &= -2175 - j1887 - 943 - j997 = -3118 - j2884 = 4260e^{j223} \text{ A}, \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} = (a \dot{I}_{A1y} \cdot e^{j30} + a^2 \dot{I}_{A2y} \cdot e^{-j30}) n_{T_r} = \\ &= (172,6e^{-j49} \cdot e^{j150} - 83e^{-j44} \cdot e^{j210}) \frac{230}{13,8} = (172,6e^{j101} - 83e^{j166}) \frac{230}{13,8} = \\ &= -550 + j2825 + 1340 - j335 = 790 + j2490 = 2610e^{j72} \text{ A}.\end{aligned}$$

В. Визначення напруг на шинах 11 кВ понижуючої підстанції.
Визначаємо симетричні складові напруги відносноч нейтральної точки системи на шинах 11 кВ підстанції. При переході від зірки до трикутника лінійні струми прямої послідовності повертаються на кут 30° , а струми зворотної послідовності - на кут -30° , тому

$$\begin{aligned}\dot{U}_{a1} &= \dot{I}_{a1} Z_{1H} = \dot{I}_{A1y} \cdot e^{j30} Z_{1H} \frac{1}{n_{T_H}} = 172,6e^{-j49} \cdot e^{j30} \cdot 538e^{j32} \frac{11}{220} = 4640e^{j13} = \\ &= (4520 + j1045) \text{ В}, \\ \dot{U}_{a2} &= \dot{I}_{a2} Z_{2H} = \dot{I}_{A2y} \cdot e^{-j30} Z_{2H} \frac{1}{n_{T_H}} = -83e^{-j44} \cdot e^{-j30} \cdot 161e^{j53} \frac{11}{220} = -668e^{-j21} = \\ &= (-624 + j240) \text{ В}.\end{aligned}$$

Напруги на стороні трикутника трансформатора не залежать від складових напруги нульової послідовності на стороні зірки трансформатора, тому фазні напруги відносно нейтральної точки системи на стороні 11 кВ дорівнюють сумі напруг прямої і зворотної послідовності. Таким чином,

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} = 4520 + j1045 - 624 + j240 = 3896 + j1285 = 4110e^{j18} \text{ В},$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_b &= \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{b2} = a^2 \dot{U}_{a1} + a \dot{U}_{a2} = e^{j240} \cdot 4640e^{j13} - e^{j120} \cdot 668e^{-j21} = \\ &= 4640e^{j253} - 668e^{j99} = -1360 - j4440 + 105 - j660 = -1255 - j5100 = \\ &= 5250e^{j256} \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_c &= \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{c2} = a \dot{U}_{a1} + a^2 \dot{U}_{a2} = e^{j120} \cdot 4640e^{j13} - e^{j240} \cdot 668e^{-j21} = \\ &= 4640e^{j133} - 668e^{j219} = -3170 + j3400 + 519 + j421 = -2651 + j3821 = \\ &= 4650e^{j125} \text{ В}. \end{aligned}$$

Міжфазні напруги:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b = 3896 + j1285 + 1255 + j5100 = 5151 + j6385 = 8210e^{j51} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c = -1255 - j5100 + 2651 - j3821 = 1396 - j8921 = 9030e^{j279} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a = -2651 + j3821 - 3896 - j1285 = -6547 + j2536 = 7015e^{j159} \text{ В}.$$

1-7. При обриві фази А (рис.1.10) в кінці лінії L передача енергії від турбогенератора G здійснюється по двом фазам лінії й трансформаторам T_{Γ} і T_H із наглухо заземленими нейтральними точками, тобто утворюється тривалий неповнофазний режим. За вихідним даними й за даними розрахунків, наведеними у задачі 1-6, визначити припустиму граничну потужність навантаження H , при якій можлива тривала робота турбогенератора типу ТВ2-100-2. При цьому відомо, що для даного генератора можливо тривале протікання струмів зворотної послідовності $I_{2\Gamma}$ (за умовою нагрівання ротора цими струмами), рівних 5% номінального.

Розв'язок. Дану задачу вирішуємо визначенням залежності струму зворотної послідовності від потужності навантаження H при обриві фази А. Для цього використовуємо вирази (1.29) і (1.30), наведені в задачі 1-6.

Для декількох значень потужності навантаження H визначимо значення струмів зворотної послідовності при обриві фази й цю залежність представимо графічно. Визначаємо струм зворотної послідовності для двох значень потужності навантаження: $S_H = 10$ МВА й $S_H = 30$ МВА. Третя точка кривої є початком координат, тому що при потужності навантаження, рівній нулю, струм зворотної послідовності, очевидно, також дорівнює нулю.

Визначаємо струм зворотної послідовності при $S_H = 10$ МВА, для чого використовуємо розрахункові вирази (1.29) і (1.30), наведені в задачі 1-6. Обчислюємо попередньо результуючі опори прямої і зворотної послідовності відносно місця розриву.

Опори навантаження, приведені до напруги 220 кВ:

$$z_{1H} = \frac{220^2}{10} = 4840 \text{ Ом}; \quad r_{1H} = z_{1H} \cos \varphi_H = 4840 \cdot 0,85 = 4120 \text{ Ом},$$

$$x_{1H} = z_{1H} \sin \varphi_H = 4840 \cdot 0,53 = 2560 \text{ Ом}, \quad Z_{1H} = 4120 + j2560 = 4840e^{j32} \text{ Ом},$$

$$Z_{2H} = Z_{1H}(0,18 + j0,24) = 4840(0,18 + j0,24) = 870 + j1160 = 1450e^{j53} \text{ Ом}.$$

Результуючі опори прямої і зворотної послідовності відносно місця обриву:

$$Z_{1\Sigma} = Z_{1L} + Z_{1T_H} + Z_{1H} = 18,9 + j75,6 + j50,3 + 4120 + j2560 = \\ = 4138,9 + j2685,9 = 4920e^{j33} \text{ Ом},$$

$$Z_{2\Sigma} = Z_{2L} + Z_{2T_H} + Z_{2L} + Z_{2T_H} + Z_{2H} = j75,7 + j55 + 18,9 + j75,6 + j50,3 + 870 + \\ + j1160 = 888,9 + j1416,6 = 1670e^{j58} \text{ Ом}.$$

Опори генератора, трансформаторів і лінії взято із задачі 1-6. Результуючий опір нульової послідовності відносно місця обриву, обчислений в задачі 1-6, не змінюється при зміні потужності навантаження, оскільки він дорівнює сумі опорів трансформаторів і лінії.

З формул (1.29) і (1.30) випливає, що струм зворотної послідовності визначається виразом

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A2y} &= -\frac{\dot{U}_{T_\Gamma} Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma} Z_{2\Sigma} + Z_{1\Sigma} Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma}} = \\
&= -\frac{\frac{237000}{\sqrt{3}} 371,5 e^{j83}}{4920 \cdot 1670 e^{j91} + 4920 \cdot 371,5 e^{j116} + 1670 \cdot 371,5 e^{j141}} = \\
&= \frac{-137 \cdot 371,5 e^{j83}}{j8210 - 800 + j1640 - 482 + j390} = \frac{-137 \cdot 371,5 e^{j83}}{10320 e^{j97}} = -4,9 e^{-j14} \text{ А.}
\end{aligned}$$

Виконуємо аналогічні обчислення:

$$\text{при } S_H = 30 \text{ МВА, } z_{1H} = 220^2/30 = 1615 \text{ Ом,}$$

$$Z_{1H} = 1615(0,85 + j0,53) = 1370 + j855 = 1615 e^{j32} \text{ Ом,}$$

$$Z_{2H} = 1615(0,18 + j0,24) = 290 + j387 = 484 e^{j53} \text{ Ом,}$$

$$\begin{aligned}
Z_{1\Sigma} &= Z_{1L} + Z_{1T_H} + Z_{1H} = 18,9 + j75,6 + j50,3 + 1370 + j855 = 1388,9 + j980,9 = \\
&= 1700 e^{j35} \text{ Ом,}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{2\Sigma} &= Z_{2\Gamma} + Z_{2T_\Gamma} + Z_{2L} + Z_{2T_H} + Z_{2H} = j75,7 + j55 + 18,9 + j75,6 + j50,3 + \\
&+ 290 + j387 = 308,9 + j643,6 = 713 e^{j64,3} \text{ Ом,}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A2y} &= -\frac{\frac{237000}{\sqrt{3}} 371,5 e^{j83}}{1700 \cdot 713 e^{j99,3} + 1700 \cdot 371,5 e^{j118} + 713 \cdot 371,5 e^{j147,3}} = \\
&= \frac{-137 \cdot 371,5 e^{j83}}{-196 + j1195 - 296 + j558 - 223 + j142} = \frac{-137 \cdot 371,5 e^{j83}}{2020 e^{j110,7}} = -25,1 e^{-j27,7} \text{ А.}
\end{aligned}$$

Номінальний струм генератора, приведений до напруги 220 кВ,

$$I_{ном.\Gamma} = \frac{S_{ном.\Gamma} n_{T_\Gamma}}{\sqrt{3} U_{ном.\Gamma}} = \frac{117,5 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 13,8} \cdot \frac{13,8}{230} = 295 \text{ А.}$$

Визначаємо струм генератора, рівний 5% номінального:

$$I_\Gamma = 0,05 I_{ном.\Gamma} = 0,05 \cdot 295 = 14,75 \text{ А.}$$

На рис.1.12 побудована крива залежності струму зворотної послідовності в генераторі від потужності навантаження. Із цього графіка випливає, що при струмі зворотної послідовності генератора, рівному 5% номінального, припустима потужність навантаження на понижуючій підстанції рівна 21 МВА.

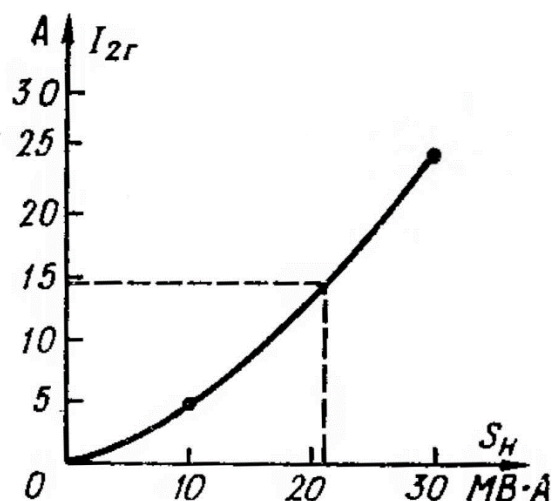


Рис.1.12. До задачі 1-7. Залежність струму зворотної послідовності генератора від потужності навантаження (рис.1.10).

1-8. Обчислити симетричні складові напруг і побудувати їхні епюри в початковий момент розриву фази A біля понижуючої підстанції (рис.1.10) на лінії $Л$ 220 кВ, що перебуває під навантаженням, за наступними даними (з розв'язку задачі 1-6), приведеними до напруги 220 кВ:

$$\dot{I}_{A1y} = 172,6e^{-j49} \text{ А}, \quad \dot{I}_{A2y} = -83e^{-j44} \text{ А}, \quad \dot{I}_{0y} = -90e^{-j54} \text{ А},$$

$$Z_{1H} = 458 + j286 = 538e^{j32} \text{ Ом}, \quad Z_{2H} = 97 + j129 = 161e^{j53} \text{ Ом},$$

$$Z_{1T_H} \approx jx_{1T_H} = jx_{2T_H} = jx_{0T_H} = j50,3 \text{ Ом}, \quad Z_{1L} = Z_{2L} = 18,9 + j75,6 = 77,8e^{j76} \text{ Ом},$$

$$Z_{0L} = 45 + j264 = 268e^{j80} \text{ Ом}, \quad Z_{1T_r} \approx jx_{1T_r} = jx_{2T_r} = jx_{0T_r} = j55 \text{ Ом},$$

$$x_{2r} = 75,7 \text{ Ом}.$$

Напруга на стороні 220 кВ блоку підтримується регулятором напруги постійною і рівною 237 кВ.

Комплексна схема заміщення для розглянутого режиму наведена на рис.1.11.

Розв'язок. Визначаємо напруги (потенціали) усіх послідовностей у різних точках комплексної схеми заміщення (рис.1.11) обходом окремих віток від нульових точок навантаження, генератора, трансформаторів T_H і T_r до точок розриву фази N і M . При обході схеми напруга підвищується

або знижується пропорційно опору даного елемента. При напрямку обходу від нульових точок навантаження й трансформатора T_H до точок (обхід проти напрямку струму) напруга підвищується.

При обході від нульової точки генератора до точки M у схемі зворотної послідовності й від нульової точки трансформатора T_T до точки M у схемі нульової послідовності (обхід за напрямком струму) напруга знижується.

У схемі прямої послідовності при обході від нульової точки генератора у бік точки M на ділянці генератора й трансформатора напруга підвищується стрибкоподібно й стає рівною напрузі генератора на стороні 220 кВ, а на ділянці лінії $Z_{1л}$ напруга знижується. Відповідно до наведених пояснень визначаємо напруги окремих послідовностей.

Фазна напруга прямої послідовності на затискачах навантаження

$$\dot{U}_{A1H} = \dot{I}_{A1y} Z_{1H} = 172,6e^{-j49} \cdot 538e^{j32} = 93000e^{-j17} \text{ В.}$$

Фазна напруга прямої послідовності в точці N_1

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1N} &= \dot{I}_{A1y} (Z_{1H} + Z_{1T_H}) = 172,6e^{-j49} (458 + j286 + j50,3) = 172,6e^{-j49} \cdot 568e^{j36} = \\ &= 98000e^{-j13} = (95500 - j22000) \text{ В.} \end{aligned}$$

Фазна напруга на стороні 220 кВ блоку постійна й за умовою

$$\dot{U}_{A1Г} = \frac{237000}{\sqrt{3}} = 137000 \text{ В.}$$

Фазна напруга прямої послідовності в точці M_1 у місці розриву

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1M} &= \dot{U}_{A1Г} - \dot{I}_{A1y} Z_{1л} = 137000 - 172,6e^{-j49} \cdot 77,8e^{j76} = 137000 - 13430e^{j27} = \\ &= 137000 - 11850 - j6100 = 125150 - j6100 = 125200e^{-j3} \text{ В.} \end{aligned}$$

Фазна напруга зворотної послідовності на затискачах навантаження

$$\dot{U}_{A2H} = \dot{I}_{A2y} Z_{2H} = -83e^{-j44} \cdot 161e^{j53} = -13370e^{j9} \text{ В.}$$

Фазна напруга зворотної послідовності в точці N_2

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2N} &= \dot{I}_{A2y} (Z_{2H} + Z_{2T_H}) = -83e^{-j44} (97 + j129 + j50,3) = -83e^{-j44} \cdot 204e^{j62} = \\ &= -16930e^{j18} = (-16130 - j5240) \text{ В.} \end{aligned}$$

Фазна напруга зворотної послідовності на затискачах генератора

$$\dot{U}_{A2\Gamma} = -\dot{I}_{A1y} Z_{2\Gamma} = -83e^{-j44} \cdot 75,7e^{j90} = 6290e^{j46} \text{ В.}$$

На стороні вищої напруги трансформатора T_{Γ} фазна напруга зворотної послідовності

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2T_{\Gamma}} = -\dot{I}_{A2y} (Z_{2\Gamma} + Z_{2T_{\Gamma}}) &= -(-83e^{-j44} (75,7e^{j90} + 55e^{j90})) = -83e^{-j44} \cdot 103,7e^{j90} = \\ &= 10840e^{j46} \text{ В.} \end{aligned}$$

У точці M_2 фазна напруга зворотної послідовності

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2y} (Z_{2\Gamma} + Z_{2T_{\Gamma}} + Z_{2n}) &= -(-83e^{-j44} (75,7e^{j90} + 55e^{j90} + 18,9 + j75,6)) = \\ &= -83e^{-j44} \cdot (18,9 + j206,3) = 83e^{-j44} \cdot 207e^{j85} = 17170e^{j41} = (12960 + j11300) \text{ В.} \end{aligned}$$

У точці N_0 напруга нульової послідовності

$$\dot{U}_{0N} = \dot{I}_{0y} Z_{0T_H} = -90e^{-j54} \cdot 50,3e^{j90} = -4530e^{j36} = (-3664 - j2665) \text{ В.}$$

На стороні вищої напруги трансформатора T_{Γ} напруга нульової послідовності

$$\dot{U}_{0T_{\Gamma}} = \dot{I}_{0y} Z_{0T_{\Gamma}} = -(-90e^{-j54} \cdot 55e^{j90}) = 4950e^{j36} \text{ В.}$$

У точці M_0 напруга нульової послідовності

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0M} = -\dot{I}_{0y} (Z_{2\Gamma} + Z_{0T_{\Gamma}} + Z_{0n}) &= -(-90e^{-j54} (55e^{j90} + 45 + j264)) = \\ &= 90e^{-j54} \cdot (45 + j319) = 90e^{-j54} \cdot 322e^{j82} = 29000e^{j28} = (25630 + j13640) \text{ В.} \end{aligned}$$

Для перевірки правильності проведених обчислень визначаємо напруги всіх послідовностей у місці розриву фази A як різницю напруг між точками M і N у схемі кожної послідовності:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1MN} = \dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A1N} &= 125150 - j6100 - 95500 + j22000 = 29650 + j15900 = \\ &= 33600e^{j28} \text{ В,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2MN} = \dot{U}_{A2M} - \dot{U}_{A2N} &= 12960 + j11300 + 16130 + j5240 = 29090 + j16540 = \\ &= 33500e^{j30} \text{ В,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0MN} = \dot{U}_{0M} - \dot{U}_{0N} &= 25630 + j13640 + 3664 + j2665 = 29294 + j16305 = \\ &= 33550e^{j29} \text{ В.} \end{aligned}$$

Очікувано, вектори напруг усіх послідовностей у місці розриву рівні між собою. За обчисленими напругами усіх послідовностей на рис.1.13 побудовані епюри.

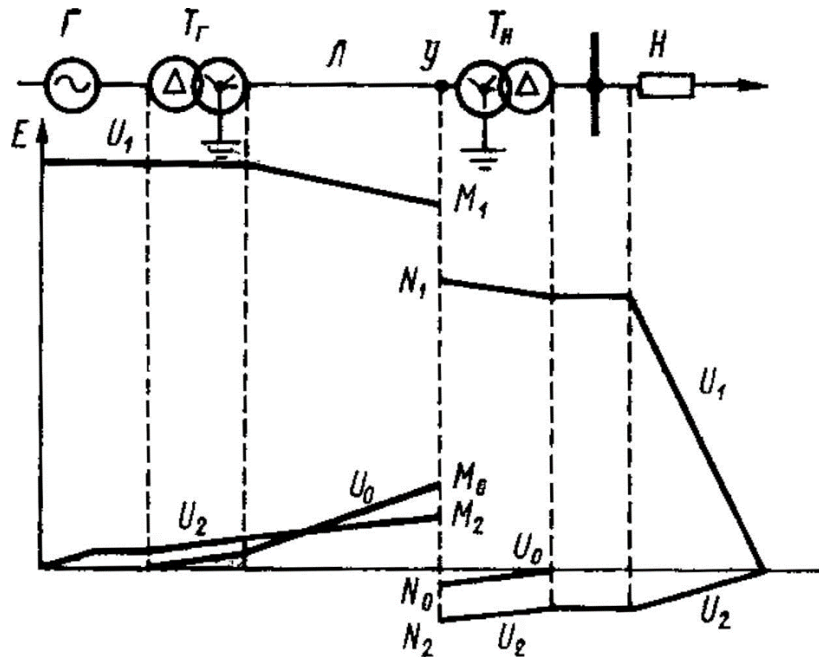


Рис.1.13. До задачі 1-8. Епюри напруг окремих послідовностей при обриві однієї фази в кінці лінії (точка y).

1-9. Визначити поведінку реле напрямку потужності зворотної й нульової послідовності, установлених на початку лінії 220 кВ, при обриві фази в її кінці (рис.1.10) у нормальному режимі навантаження. Симетричні складові струмів у лінії й напруг на початку лінії для цього режиму обчислено в задачах 1-6 і 1-8.

Вихідні дані.

А. Реле напрямку потужності зворотної послідовності. Фазна потужність спрацьовування реле при куті максимальної чутливості рівна $S_{2с.р} = 3$ ВА; кут максимальної чутливості між фазною напругою $\dot{U}_{2ф.р}$ й фазним струмом $\dot{I}_{2ф.р}$ зворотної послідовності, що підводяться до затискачів реле, $\varphi_{2м.ч} = -110 \pm 10^\circ$ (вектор струму випереджає за фазою вектор напруги).

Б. Реле напрямку потужності нульової послідовності. Потужність спрацювання реле при куті максимальної чутливості $S_{0c.p} = 3$ ВА; кут максимальної чутливості між напругою нульової послідовності $\dot{U}_{0p}$ й струмом $\dot{I}_{0p}$ цієї послідовності $\varphi_{0м.ч} = 70 \pm 5^\circ$ (вектор струму відстає за фазою від вектора напруги, при цьому однополярні затискачі обмоток струму й напруги встановлювалися при куті $0 < \varphi_{0p} < 180^\circ$).

Коефіцієнти трансформації трансформаторів струму й трансформаторів напруги відповідно рівні:

$$n_T = \frac{400}{5}; \quad n_{н.ф} = \frac{220}{\sqrt{3}} : \frac{0,1}{\sqrt{3}} : 0,1.$$

Первинні струми й напруги зворотної й нульової послідовності на початку лінії при обриві однієї фази в її кінці за даними задач 1-6 і 1-8 рівні:

$$\dot{I}_{A2\phi} = 83e^{j136} \text{ А}, \quad \dot{U}_{A2\phi} = 10840e^{j46} \text{ В},$$

$$\dot{I}_0 = 90e^{j126} \text{ А}, \quad \dot{U}_0 = 4950e^{j36} \text{ В}.$$

Розв'язок. А. Реле напрямку потужності зворотної послідовності. До затискачів реле напрямку потужності зворотної послідовності підводять фазні напруги від вимірювальної обмотки трансформатора напруги, у якій $n_{н.ф} = \frac{220}{\sqrt{3}} : \frac{0,1}{\sqrt{3}}$, і фазні струми. Фазна потужність зворотної послідовності (при куті максимальної чутливості), що підводиться реле, при обриві фази на лінії визначається виразом

$$S_{2p} = \frac{U_{A2\phi} I_{A2\phi}}{n_{н.ф} n_T} = \frac{10840 \cdot 83}{\frac{220}{\sqrt{3}} : \frac{0,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{400}{5}} = 5,12 \text{ ВА}.$$

При несиметричних коротких замиканнях на лінії векторна діаграма напруги й струму зворотної послідовності в місці ввімкнення реле представлена на рис.1.14 [4].

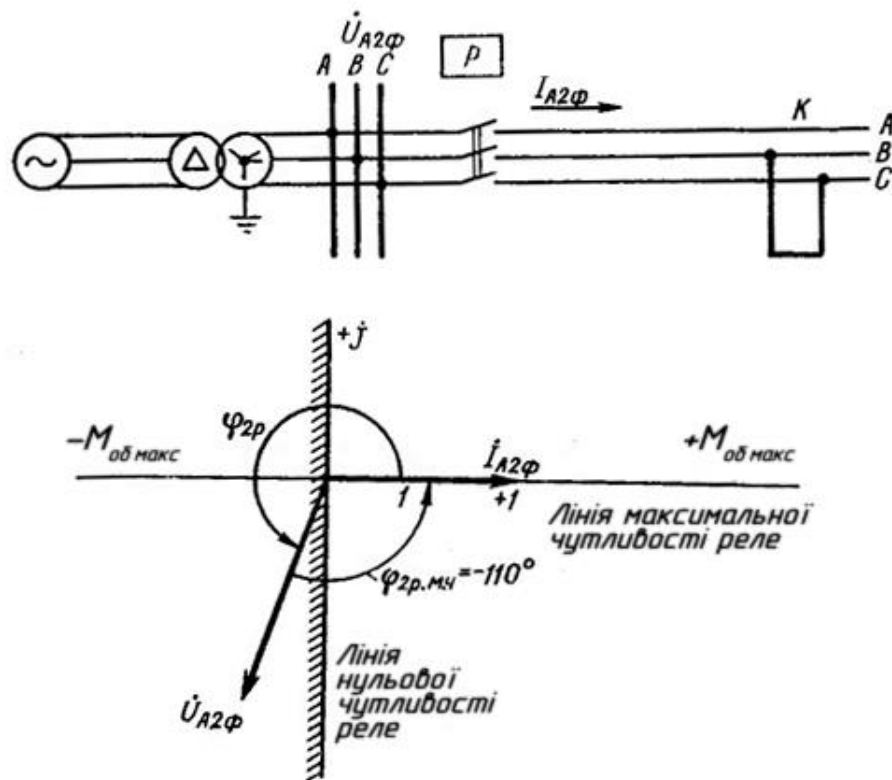


Рис.1.14. Векторна діаграма напруги й струму зворотної послідовності в місці установки реле при двофазному короткому замиканні на лінії (у точці К).

Ця діаграма побудована виходячи з виразу, що визначає напругу зворотної послідовності на шинах 220 кВ, $\dot{U}_{A2\phi} = -\dot{I}_{A2\phi} Z_{2c}$, де Z_{2c} - комплекс опору зворотної послідовності від нульової точки генераторів системи до шин, де встановлене реле потужності зворотної послідовності.

Звичайно кут опору Z_{2c} становить приблизно 70° і тому, враховуючи знак мінус (поворот вектора на 180°) у виразі для $\dot{U}_{A2\phi}$ маємо: $\varphi_{2p} = 70^\circ + 180^\circ = 250^\circ$, тобто вектор струму $\dot{I}_{A2\phi}$ відстає за фазою від вектора напруги $\dot{U}_{A2\phi}$ на 250° , або $\varphi_{2p} = -110^\circ$ (вектор $\dot{I}_{A2\phi}$ випереджає за фазою вектор $\dot{U}_{A2\phi}$ на 110°).

Реле напрямку потужності зворотної послідовності підключається до ланцюгів трансформаторів струму й трансформаторів напруги таким чином, щоб при несиметричних коротких замиканнях на лінії реле

спрацювало на замикання свого замикаючого контакту. Кут максимальної чутливості реле за каталогом рівний -110° і приблизно відповідає куту зсуву фаз між фазними струмами й фазними напругами зворотної послідовності при несиметричних коротких замиканнях на лінії (рис.1.14). Таким чином, це реле при несиметричних коротких замиканнях спрацює й замикає свій замикаючий контакт в оптимальних умовах.

При обриві однієї фази на лінії в навантажувальному режимі згідно даним розрахунків, проведених у задачах 1-6 і 1-8, кут зсуву фаз між векторами струму й напруги зворотної послідовності в місці установки реле, на початку лінії (рис.1.15), $\varphi_{2p} = -\varphi_{2T} + \varphi_{2H} = -136^\circ + 46^\circ = -90^\circ$. У дійсності кут φ_{2p} буде приблизно -100° , оскільки в розрахунках $\dot{U}_{A2\phi}$ не враховані активні опори генератора й трансформатора.

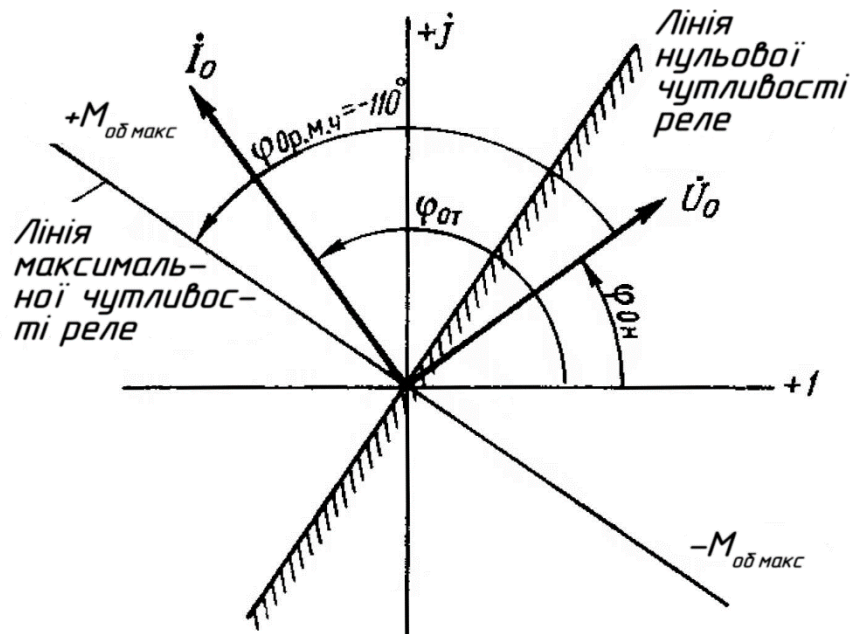


Рис.1.15. Векторна діаграма напруги й струму зворотної послідовності в місці установки реле при обриві однієї фази на лінії.

Як видно з рис.1.14 і рис.1.15, кут зсуву фаз між струмом і напругою зворотної послідовності в місці установки реле при обриві фази на лінії приблизно такий же, як і при несиметричних коротких

замиканнях на ній. На рис.1.14 і рис.1.15 нанесені: лінія максимальної чутливості реле, або лінія максимальних моментів обертання реле $+ M_{об. макс.}$, яка за умовою задачі випереджає вектор напруги $\dot{U}_{A2\phi}$ на 110° , і лінія нульової чутливості реле, або лінія зміни знаків моментів обертання реле, яка перпендикулярна до лінії $M_{об. макс.}$. На обох рисунках вектори $\dot{I}_{A2\phi}$ й $\dot{U}_{A2\phi}$ перебувають по різні сторони лінії нульової чутливості реле, при цьому в обох випадках - КЗ і при обриві фази - реле діє на замикання замикаючого контакту. Тому, якщо до реле напряму потужності зворотної послідовності при обриві фази на лінії підводиться потужність, більша його потужності спрацювання, воно замкне замикаючий контакт. У цьому випадку при обриві фази на лінії це відбудеться, оскільки $S_{2p} = 5,13$ ВА, $S_{2c.p} = 3$ ВА, тобто $S_{2p} > S_{2c.p.}$

Б. Реле напряму потужності нульової послідовності. До затискачів реле напрямку потужності нульової послідовності підводяться напруга нульової послідовності від спеціальної обмотки трансформатора напруги, для якої $n_{н.0} = \frac{220}{\sqrt{3}} : 0,1$, і струми нульової послідовності. Потужність нульової послідовності (при куті максимальної чутливості), що підводиться до реле, при обриві фази на лінії визначається виразом

$$S_{0p} = \frac{3U_0 3I_0}{n_{н.0} n_T} = \frac{3 \cdot 4950 \cdot 3 \cdot 90}{\frac{220}{\sqrt{3}} : 0,1 \cdot \frac{400}{5}} = 39,3 \text{ ВА.}$$

При однофазному й двофазному коротких замиканнях на землю векторна діаграма струму й напруги нульової послідовності в місці включення реле представлена на рис.1.16 [4]. Ця діаграма побудована виходячи з виразу, що визначає напругу нульової послідовності на шинах 220 кВ, $\dot{U}_0 = -\dot{I}_0 Z_{0T}$, де Z_{0T} - комплекс опору нульової послідовності трансформатора. Активний опір трансформатора досить малий, тому кут повного опору Z_{0T} близький до 90° .

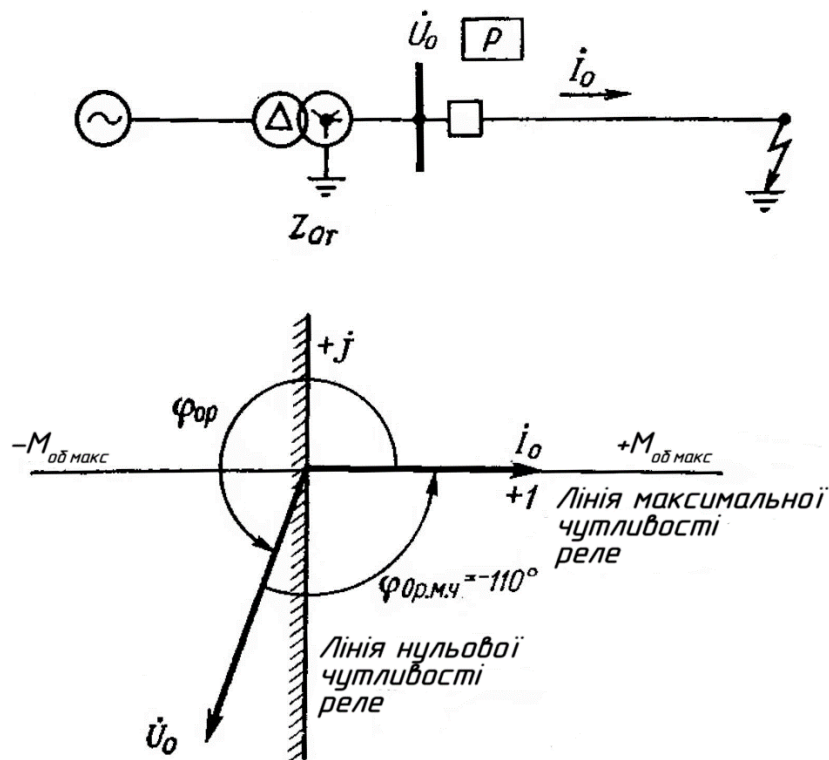


Рис.1.16. Векторна діаграма напруги й струму нульової послідовності в місці установки реле при однофазному короткому замиканні на лінії.

Звичайно струм $\dot{I}_0$ у місці установки реле, протікаючи по лініях, що мають значну активну складову повного опору, при короткому замиканні на лінії замикається також через заземлені нейтралі трансформаторів інших підстанцій. Тому кут опору Z_{0T} можна прийняти приблизно 70° ; тоді, враховуючи знак мінус у виразі для $\dot{U}_0$ маємо:

$$\varphi_{0p} = 70^\circ + 180^\circ = 250^\circ, \quad \varphi_{0p} = -360^\circ + 250^\circ = -110^\circ,$$

тобто струм $\dot{I}_0$ випереджає за фазою напругу $\dot{U}_0$ на 110° .

Реле напряду потужності нульової послідовності підключається до фільтрів струму й напруги обмотками струму й напруги протилежної полярності. Зазначене підключення необхідне для того, щоб при замиканнях на землю на лінії при $\varphi_{0p} = -110^\circ$ реле спрацьовувало на замикання замикаючого контакту, оскільки маркування полярності обмоток у цього реле виконується при $0 < \varphi_p < 180^\circ$.

При зазначеному підключенні реле кут максимальної чутливості, зазначений у каталозі й в умові задачі, змінюється на 180° :

$$\varphi_{0\text{м.год}} = -180^\circ + 70^\circ = -110^\circ.$$

У цьому випадку кут максимальної чутливості реле приблизно відповідає куту зсуву фаз між струмом $\dot{I}_0$ і напругою $\dot{U}_0$ тобто при коротких замиканнях реле спрацьовує в оптимальних умовах.

На рис.1.17 наведена векторна діаграма струму в лінії $\dot{I}_0$ й напруги на шинах 220 кВ при обриві однієї фази на лінії в навантажувальному режимі (за даними задач 1-6 і 1-8). Кут зсуву фаз струму стосовно напруги

$$\varphi_{0p} = \varphi_{0T} = -126^\circ + 36^\circ = -90^\circ + \varphi_{0н}.$$

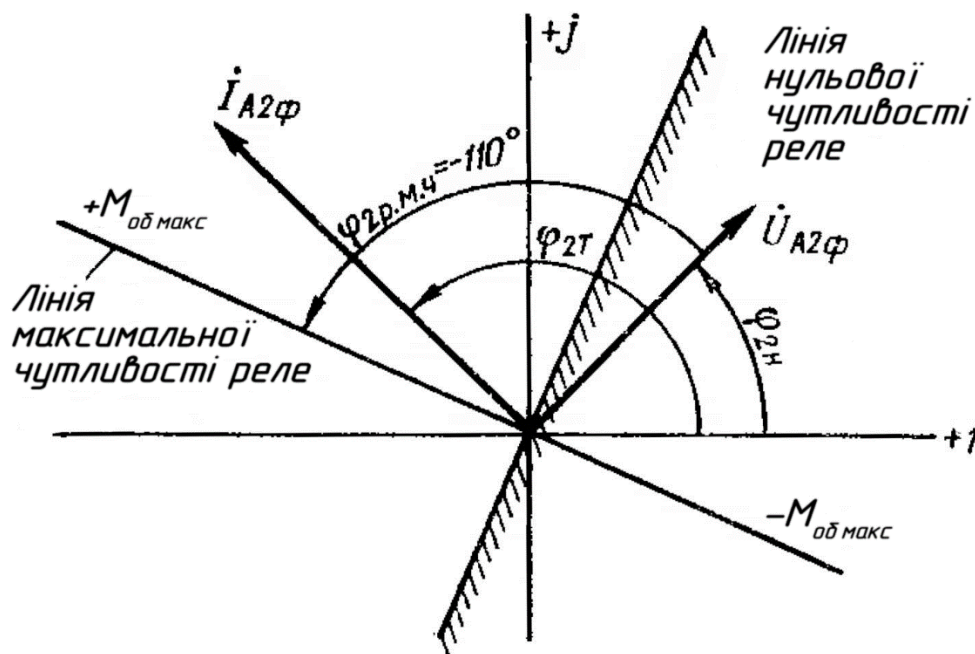


Рис.1.17. Векторна діаграма напруги й струму нульової послідовності в місці установки реле при обриві однієї фази на лінії.

Як видно з рис.1.17 і рис.1.16, кут зсуву фаз між струмом $\dot{I}_0$ і напругою $\dot{U}_0$ при обриві фази на лінії приблизно такий же, як і при коротких замиканнях на землю на цій же лінії. На рис.1.16 і рис.1.17 нанесені лінії максимальної й нульової чутливості реле потужності

нульової послідовності. Із цих рисунків видно, що вектори $\dot{U}_0$ й $\dot{I}_0$ при КЗ і обриві фази перебувають по різні сторони лінії нульової чутливості реле. Тому, якщо до реле потужності нульової послідовності при обриві фази на лінії підводиться потужність, більша його потужності спрацювання, реле замкне замикаючий контакт. Це відбудеться й у цьому випадку, оскільки $S_{0p} = 39,3 \text{ ВА}$, тобто $S_{0p} > S_{0c.p.}$

1-10. У понижуючого трансформатора T , що живить навантаження H (рис.1.18), на стороні 35 кВ згорів запобіжник на фазі B .

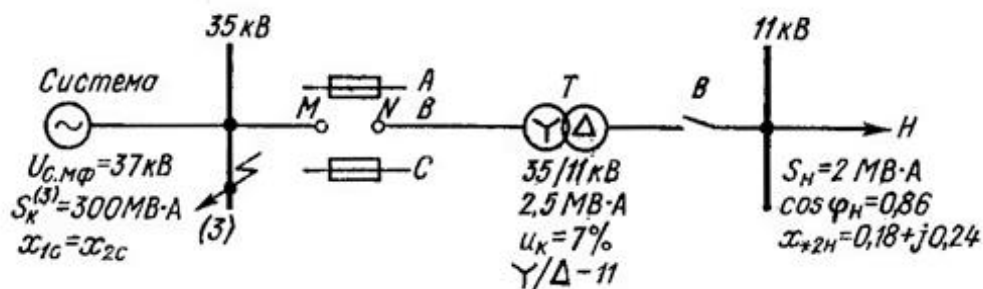


Рис.1.18. Вихідна схема з даними для розрахунків.

Перегоряння запобіжника на рис.1.18 показане у вигляді розриву між точками M і N . Для початкового моменту розриву визначити струми на сторонах 35 кВ і 11 кВ трансформатора й напруги на шинах 11 кВ. Вихідні дані наведено на рис.1.18. Мережа 35 кВ працює з ізольованою нейтраллю. Прийняти параметри навантаження до розриву й у початковий момент розриву фази незмінними. Представити векторні діаграми симетричних складових і повних напруг на стороні 11 кВ.

Розв'язок. Визначаємо опори всіх елементів, приведені до напруги 35 кВ.

Опори системи визначаємо за формулою

$$x_{1c} = x_{2c} = \frac{U_{c.мф}^2}{S_K^{(3)}} = \frac{37^2}{300} = 4,56 \text{ Ом.}$$

Опір трансформатора

$$x_{1T} = x_{2T} = \frac{u_{\kappa} U_{ном.T}^2}{S_{ном.T}} = \frac{0,07 \cdot 35^2}{2,5} = 34,2 \text{ Ом.}$$

Опори навантаження

$$z_{1H} = \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{35^2}{2} = 612,5 \text{ Ом,} \quad r_{1H} = z_{1H} \cos \varphi_H = 612,5 \cdot 0,86 = 526 \text{ Ом,}$$

$$x_{1H} = z_{1H} \sin \varphi_H = 612,5 \cdot 0,51 = 312 \text{ Ом,}$$

$$Z_{2H} = (0,18 + j0,24)z_{1H} = (0,18 + j0,24)612,5 = 110 + j147 = 183,5e^{j53} \text{ Ом.}$$

Комплексна схема заміщення фази B при розриві її наведена на рис.1.19; за нею визначаємо результуючі опори відносно місця розриву:

$$Z_{1\Sigma} = Z_{1c} + Z_{1H} + Z_{1T} = j4,56 + 526 + j312 + j34,2 = (526 + j350,76) \text{ Ом,}$$

$$Z_{2\Sigma} = Z_{2c} + Z_{2H} + Z_{2T} = j4,56 + 110 + j147 + j34,2 = (110 + j185,76) \text{ Ом.}$$

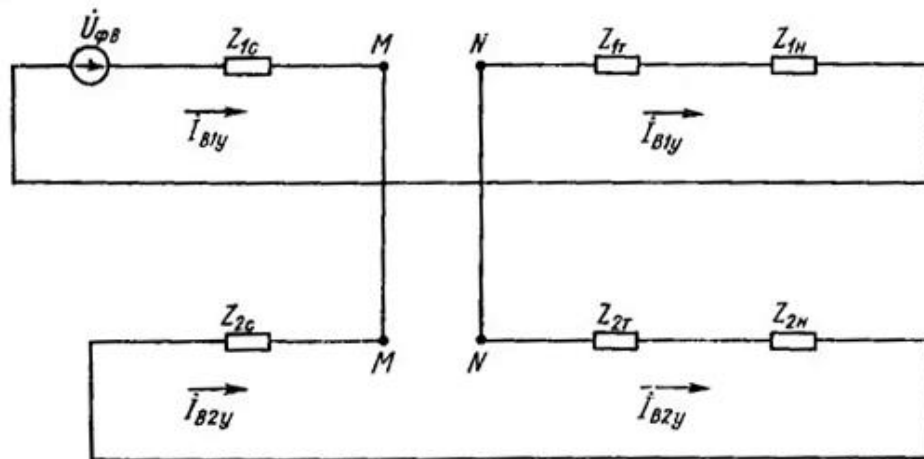


Рис.1.19. Комплексна схема заміщення для фази B при перегоранні запобіжника на цій фазі.

Струми прямої і зворотної послідовності фази B у місці розриву визначаємо за виразами:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{B1y} = -\dot{I}_{B2y} &= \frac{\dot{U}_{c.\phi}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}} = \frac{37000 : \sqrt{3}}{526 + j350,76 + 110 + j185,76} = \frac{21400}{636 + j536,52} = \\ &= \frac{21400}{831e^{j40}} = 25,8e^{-j40} \text{ А,} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{B2y} = -25,8e^{-j40} \text{ А.}$$

Струми фаз A та C на стороні 35 кВ:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Ay} &= \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} = a\dot{I}_{B1y} + a^2\dot{I}_{B2y} = e^{j120} \cdot 25,8e^{-j40} + e^{j240}(-25,8e^{-j40}) = \\ &= 25,8e^{j80} - 25,8e^{j200} = 4,5 + j25,4 + 24,2 + j8,8 = 28,7 + j34,2 = 44,6e^{j50} \text{ A}, \\ \dot{I}_{Cy} &= \dot{I}_{C1y} + \dot{I}_{C2y} = a^2\dot{I}_{B1y} + a\dot{I}_{B2y} = e^{j240} \cdot 25,8e^{-j40} + e^{j120}(-25,8e^{-j40}) = \\ &= 25,8e^{j200} - 25,8e^{j80} = -24,2 - j8,8 - 4,5 - j25,4 = -28,7 - j34,2 = 44,6e^{j230} \text{ A}. \end{aligned}$$

Струм навантаження в повнофазному режимі на сторонах 35 і 11 кВ:

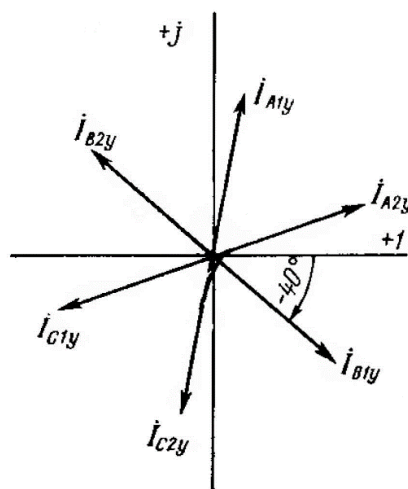
$$I_{н35} = \frac{S_{н}}{\sqrt{3}U_{н}} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 33,1 \text{ A},$$

$$I_{н11} = I_{н35}n_T = 33,1 \frac{35}{11} = 105,4 \text{ A}.$$

Абсолютні значення симетричних складових струмів на стороні 11 кВ трансформатора:

$$I_1 = I_2 = I_{B1}n_T = 25,8 \cdot \frac{35}{11} = 82 \text{ A}.$$

Струми на стороні трикутника визначаємо графічно з урахуванням повороту на $+30^\circ$ струмів прямої послідовності й на -30° струмів зворотної послідовності при переході зі сторони зірки на сторону трикутника трансформатора ∇/Δ - 11. Зазначена побудова наведена на рис.1.20,а.



а)

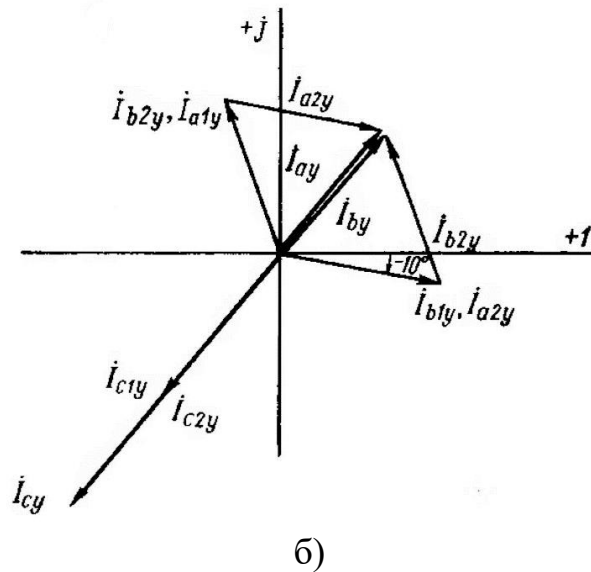


Рис.1.20. Векторні діаграми: а - симетричних складових струмів на стороні 35 кВ, б - симетричних складових і повних лінійних струмів на стороні 11 кВ трансформатора.

За даними рис.1.20,б лінійні струми рівні: $I_{ay} = I_{by} = 82$ А, $I_{cy} = 164$ А.

Фазні напруги відносно нейтральної точки системи на стороні трикутника трансформатора визначаємо з умови рівності нулю потенціалу нейтральної точки навантаження H .

Враховуючи зазначені повороти струмів і коефіцієнт трансформації трансформатора, симетричні складові фазних напруг відносно нейтральної точки системи на стороні 11 кВ (трикутника трансформатора) визначаємо виразами:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{b1} = \dot{I}_{b1} Z_{1H} = \dot{I}_{B1y} e^{j30} Z_{1H} \frac{1}{n_T} &= 25,8 e^{-j40} \cdot e^{j30} \cdot 612,5 e^{j31} \cdot \frac{11}{35} = 4970 e^{j21} = \\ &= (4640 + j1780) \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{b2} = \dot{I}_{b2} Z_{2H} = \dot{I}_{B2y} e^{-j30} Z_{2H} \frac{1}{n_T} &= -25,8 e^{-j40} \cdot e^{-j30} \cdot 183,5 e^{j53} \cdot \frac{11}{35} = -1490 e^{-j17} = \\ &= (-1427 + j436) \text{ В}, \end{aligned}$$

де $n_T = \frac{35}{11}$ - коефіцієнт трансформації трансформатора.

Напруга фази b рівна:

$$\dot{U}_b = \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{b2} = 4640 + j1780 - 1427 + j436 = 3213 + j2216 = 3900e^{j35} \text{ В.}$$

Напруги фаз a і c рівні:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a = \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} = a\dot{U}_{b1} + a^2\dot{U}_{b2} = e^{j120} \cdot 4970e^{j21} + e^{j240}(-1490e^{-j17}) = 4970e^{j141} - \\ -1490e^{-j17} = -3860 + j3130 + 1090 + j1020 = -2770 + j4150 = 4990e^{j124} \text{ В,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_c = \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{c2} = a^2\dot{U}_{b1} + a\dot{U}_{b2} = e^{j240} \cdot 4970e^{j21} + e^{j120}(-1490e^{-j17}) = 4970e^{j261} - \\ -1490e^{-j103} = -776 - j4900 + 336 - j1450 = -440 - j6350 = 6360e^{j266} \text{ В.} \end{aligned}$$

За отриманим даними на рис.1.21 побудована векторна діаграма симетричних складових і повних фазних напруг відносно нейтральної точки системи. З діаграми випливає, що при розриві фази відбувається викривлення трикутника міжфазних напруг.

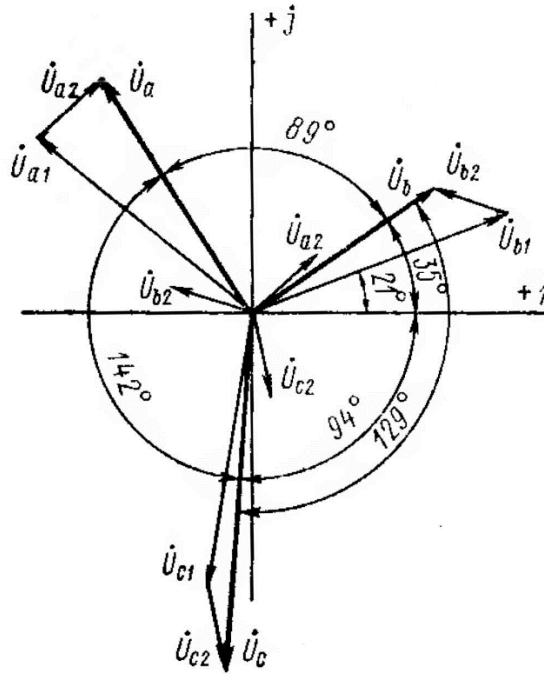


Рис.1.21. Векторна діаграма симетричних складових і повних фазних напруг на шинах 11 кВ.

Слід зазначити, що повні струми й фазні напруги можна не обчислювати аналітично, а визначати їх графічно за симетричними складовими прямої і зворотної послідовності, як на рис.1.20 і рис.1.21. З рис.1.21 визначаємо міжфазні напруги на шинах 11 кВ:

$$U_{ab} = 6250 \text{ В, } U_{bc} = 9330 \text{ В, } U_{ca} = 10740 \text{ В.}$$

1-11. При ввімкненні вимикача B на понижуючій підстанції (рис.1.18) погіршився контакт на фазі A в цього вимикача. Обчислити струми й напруги на стороні розриву фази в початковий момент пуску двигунів навантаження й дати висновок про їхню поведінку за наступним даними, приведеними до напруги 11 кВ: опори системи $Z_{1c} = Z_{2c} = j0,15$ Ом, опори трансформатора $Z_{1T} = Z_{2T} = j3,39$ Ом, опори прямої і зворотної послідовності узагальненого навантаження в початковий момент пуску прийняті однаковими: $Z_{*1H} = Z_{*2H} = j0,35$ Ом;

для зручності обчислень прийнято, що вектор фазної напруги системи на стороні 35 кВ $\dot{U}_{\phi 35} = U_{\phi 35} e^{j60}$.

Розв'язок. Вектор фазної напруги відносно нейтральної точки системи на стороні 11 кВ із урахуванням його повороту на 30° (у позитивному напрямку обертання векторів) при переході зі сторони зірки на сторону трикутника трансформатора із групою з'єднання Y/Δ - 11

$$\dot{U}_{c\phi} = \dot{U}_{\phi 35} \frac{1}{n_T} = \frac{1}{n_T} U_{\phi 35} e^{j60} e^{j30} = j \frac{37000}{\sqrt{3}:35:11} = j6720 \text{ В.}$$

Визначаємо опори узагальненого навантаження, віднесені до повної потужності:

$$Z_{1H} = Z_{2H} = \frac{Z_{*1H} U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{j0,35 \cdot 11^2}{2} = j21,2 \text{ Ом.}$$

На рис.1.22 наведена комплексна схема заміщення для випадку розриву фази A на стороні 11 кВ, на підставі якої визначаємо струми прямої і зворотної послідовності за виразом:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1y} = -\dot{I}_{A2y} &= \frac{\dot{U}_{c\phi}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}} = \frac{\dot{U}_{c\phi}}{2Z_{1\Sigma}} = \frac{\dot{U}_{c\phi}}{2(Z_{1c} + Z_{1H} + Z_{1T})} = \frac{j6720}{2j(0,15 + 3,39 + 21,2)} = \\ &= \frac{6720}{49,48} = 136 \text{ А.} \end{aligned}$$

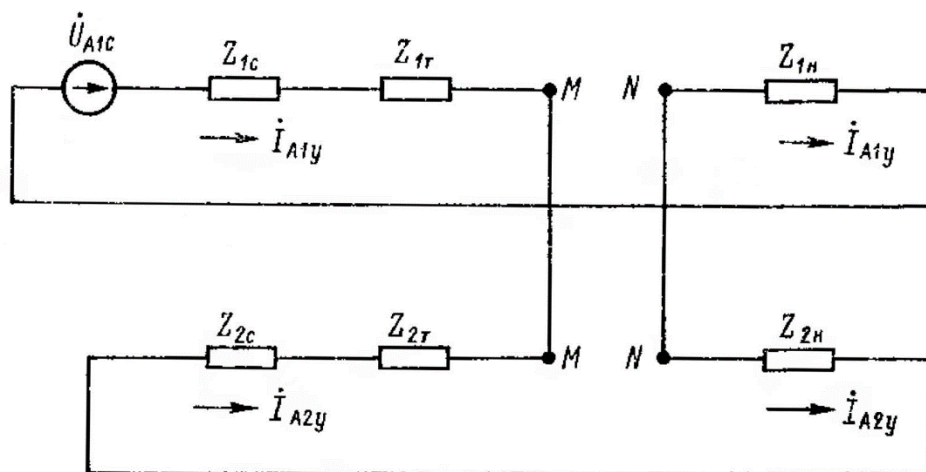


Рис.1.22. Комплексна схема заміщення при обриві фази *A* на стороні 11 кВ (рис.1.18).

Фазні напруги відносно нейтральної точки системи (за яку приймаємо нульову точку навантаження) прямої і зворотної послідовності на затискачах навантаження (точки *N* на рис.1.22) визначаємо за виразами:

$$\dot{U}_{A1H} = \dot{U}_{A1N} = \dot{I}_{A1y} Z_{1H} = 136 \cdot j21,2 = j2880 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2H} = \dot{U}_{A2N} = \dot{I}_{A2y} Z_{2H} = -136 \cdot j21,2 = -j2880 \text{ В}.$$

Результуючий обертаючий момент електродвигунів $M_{об.рез}$ складається з моментів прямої $M_{1об}$ і зворотної $M_{2об}$ послідовності, що мають різні знаки. Це пояснюється тим, що в повітряному зазорі магнітні поля прямої і зворотної послідовності обертаються в протилежні сторони. Таким чином, $M_{об.рез} = M_{1об} - M_{2об} = k_1 (U_1^2 - U_2^2)$.

При загальмованих електродвигунах, коли ковзання $s = 1$, у випадку розриву фази напруги прямої і зворотної послідовності за абсолютним значенням рівні між собою й, отже, $M_{об.рез} = M_{1об} - M_{2об} = 0$, тому пуск двигуна неможливий.

Визначимо струми у фазах узагальненого навантаження, вважаючи, що вона в основному складається з електродвигунів:

$$\dot{I}_{Ay} = \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} = 136 - 136 = 0;$$

$$\dot{I}_{By} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} = (-0,5 - j0,867)136 - (-0,5 + j0,867)136 = -j235 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{Cy} = a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} = (-0,5 + j0,867)136 - (-0,5 - j0,867)136 = j235 \text{ A}.$$

Номінальний струм узагальненого навантаження

$$I_{ном.н} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 105 \text{ A}.$$

Кратність пускового струму при обриві відносно номінального струму узагальненого навантаження

$$k_n = \frac{I_{By}}{I_{ном.н}} = \frac{235}{105} = 2,04.$$

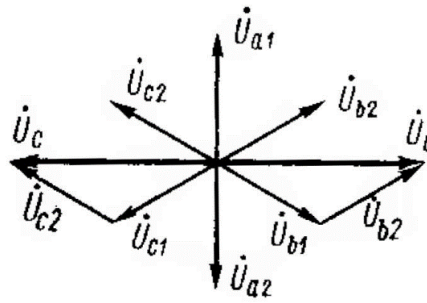
Струм спрацьовування максимального струмового захисту трансформатора

$$I_{с.з} = \frac{k_n k_z I_{ном.т}}{k_v} = \frac{1,2 \cdot 2}{0,8} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 11} = 394 \text{ A},$$

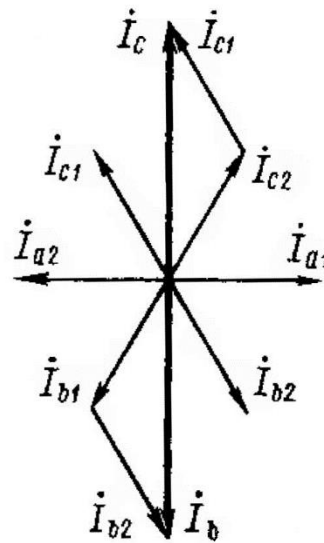
де $k_n = 1,2$, $k_z = 2$, $k_v = 0,8$ - коефіцієнти надійності, самозапуску навантаження й повернення реле відповідно.

З порівняння струму спрацьовування максимального захисту з пусковим струмом при обриві фази випливає, що цей захист у даних випадках не буде діяти. Необхідно передбачити захист, який реагував би на розрив фази в початковий момент включення навантаження. Таким пристроєм може бути фільтр-реле струму або напруги зворотної послідовності.

Для більшої наочності на рис.1.23 наведені векторні діаграми симетричних складових струмів і напруг, а також повних струмів і фазних напруг відносно нейтральної точки системи.



а)



б)

Рис.1.23. Векторні діаграми в початковий момент пуску узагальненого навантаження при обриві фази: а - напруг, б - струмів.

1-12. При пуску асинхронного електродвигуна 6 кВ із короткозамкненим ротором не ввімкнулася одна фаза у вимикача. Визначити струми в обмотці статора відносно номінального струму й нормального пускового й вибрати тип захисту за наступним даними: номінальні напруга, потужність, ККД, коефіцієнт потужності, кратність пускового струму двигуна відповідно рівні: $U_{ном.д} = 6$ кВ, $P_{ном.д} = 550$ кВт, $\eta_{ном.д} = 93\%$, $\cos \varphi_{ном.д} = 0,87$, $k_n = 5$; опорами системи до шин 6 кВ підстанції в порівнянні з опором електродвигуна, який підключений до цих шин, можна знехтувати; напругу системи U_c прийняти рівною 6,3 кВ.

Розв'язок. Розрахунки виконуємо у відносних одиницях, прийнявши за базисні номінальні дані двигуна:

$$U_{\phi} = 6 \text{ кВ}, \quad S_{\phi} = S_{\text{ном.}\phi} = \frac{P_{\text{ном.}\phi}}{\eta_{\text{ном.}\phi} \cos \varphi_{\text{ном.}\phi}} = \frac{559}{0,93 \cdot 0,87} = 630 \text{ кВА}.$$

$$I_{\phi} = I_{\text{ном.}\phi} = \frac{S_{\text{ном.}\phi}}{\sqrt{3} U_{\text{ном.}\phi}} = \frac{680}{\sqrt{3} \cdot 6} = 65,5 \text{ А}.$$

Приймаємо опір зворотної послідовності двигуна рівним опору прямої послідовності в початковий момент пуску, тобто

$$Z_{*2} = Z_{*1\kappa} = Z_{*1n} \approx jx_{*1n} = j \frac{1}{k_n} = j \frac{1}{5} = j0,2.$$

Пусковий струм двигуна при нормальному пуску

$$I_{*n} = U_{*c} k_n = \frac{6,3}{6} \cdot 5 = 5,25 \text{ або } I_n = I_{*n} I_{\text{ном.}\phi} = 5,25 I_{\phi} = 5,25 \cdot 65,5 = 344 \text{ А}.$$

Використовуючи комплексну схему заміщення, наведену на рис.1.22, у якій за умовою задачі слід прийняти $Z_{1c} + Z_{1T} + Z_{2c} + Z_{2T} \approx 0$, визначаємо струми прямої і зворотної послідовності в початковий момент пуску двигуна при розриві фази A :

$$\dot{I}_{*A1y} = \frac{\dot{U}_{*c}}{Z_{*1\kappa} + Z_{*2}} \approx \frac{j1,05}{j2x_{*1n}} = \frac{1,05}{2 \cdot 0,2} = 2,625;$$

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{*A1y} I_{\phi} = 2,625 \cdot 65,5 = 172 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2y} = -\dot{I}_{A1y} = -172 \text{ А}.$$

Струми в неушкоджених фазах B і C при обриві в початковий момент пуску рівні:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{By} &= \dot{I}_{B1y} + \dot{I}_{B2y} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} = (-0,5 - j0,867)172 - (-0,5 + j0,867)172 = \\ &= -j2 \cdot 0,867 \cdot 172 = -j1,73 \cdot 172 = -j298 \text{ А}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Cy} &= a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} = (-0,5 + j0,867)172 - (-0,5 - j0,867)172 = j1,73 \cdot 172 = \\ &= j298 \text{ А}, \end{aligned}$$

$$I_{By} = I_{Cy} = 298 \text{ А}.$$

Відношення цих струмів до нормального пускового струму

$$I_{By} / I_n = 298 : 344 = 0,867.$$

Відношення цих струмів до номінального:

$$I_{By} / I_{ном.0} = 298 : 65,5 = 4,55.$$

Таким чином, при розриві фази й пуску двигуна струми у ввімкнених фазах становлять 86,7% нормального пускового струму. Із задачі 1-11 випливає, що в цьому випадку двигун не може розкрутитися тому, що результуючий момент дорівнює нулю й, отже, потрібен його захист від розриву фази, якщо розриви фаз імовірні [5, § 12-6]. Таким захистом може бути фільтр-реле струму зворотної послідовності, відбудований від струмів зворотної послідовності, які обумовлені однією з наступних причин: наявністю несиметрії в робочих напругах; зовнішніми несиметричними КЗ; розривами фаз на інших приєднаннях; струмами небалансу, обумовленими пусковими струмами й струмами при зовнішніх трифазних КЗ.

1-13. На рис.1.24 наведена схема живлення навантаження H від двох однофазних трансформаторів T , з'єднаних у відкритий трикутник. Визначити коефіцієнт несиметрії, що дорівнює відношенню струмів зворотної й прямої послідовності. Вихідні дані, необхідні для розрахунків, наведені на рис.1.24.

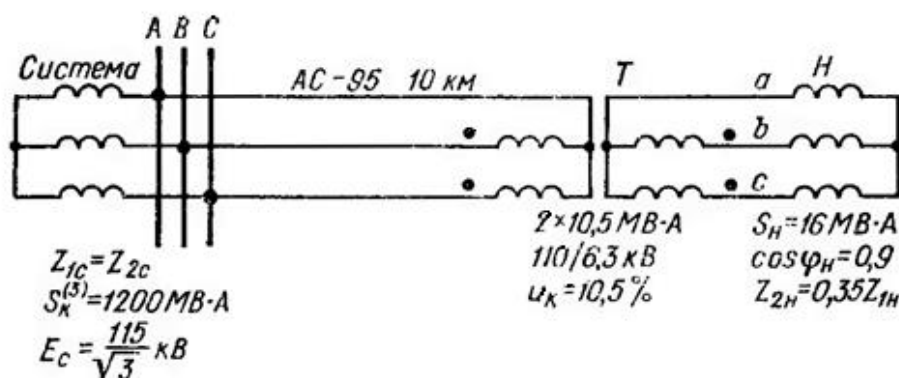


Рис.1.24. Схема живлення навантаження від трансформатора T , з'єданого у відкритий трикутник.

Розв'язок. Схема із включенням двох однофазних трансформаторів T , кожний з опором Z_T , у фази B і C відкритим трикутником (рис.1.24) рівнозначна схемі з неповним розривом фаз B і C через опір Z_T . Цю схему можна привести до схеми з неповним розривом в одній фазі, для цього включимо у фазу A опори $+Z_T$ і $-Z_T$, як це показано на рис.1.25.

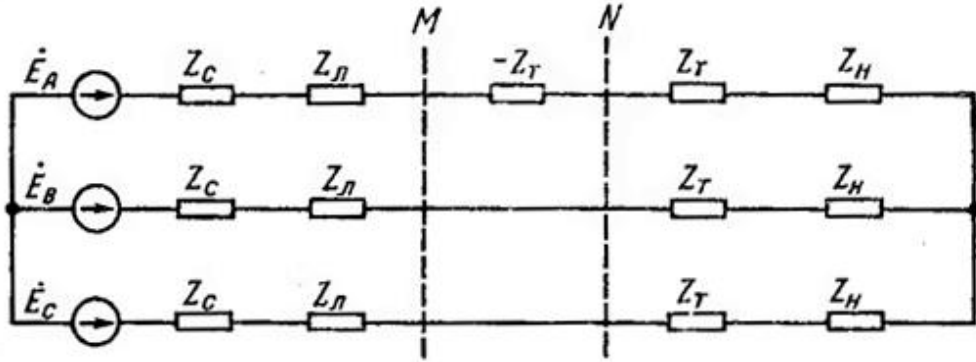


Рис.1.25. Приведення схеми відкритого трикутника трансформатора (рис.1.24) до схеми з неповним розривом у фазі A між точками M і N .

У цьому випадку одержуємо схему з неповним розривом в одній фазі A через опір $-Z_T$, а опір $+Z_T$ у всіх трьох фазах враховуємо як симетричний елемент. Неповний розрив фази A через опір $-Z_T$ можна представити як включення зашунтованих опорів $-Z_T$ в усі три фази й розрив ланцюга шунтування фази A між точками M і N , як це показано на рис.1.26.

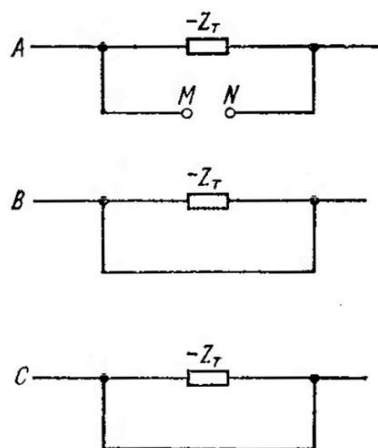


Рис.1.26. Приведення схеми із включенням опорів $-Z_T$ у фазу A до схеми з розривом у цій фазі.

У цьому випадку в комплексній схемі заміщення при розриві фази A , що представлена на рис.1.5,а, слід між точками M і N ввімкнути три опори $-Z_T$, що рівнозначно ввімкненню одного опору $-Z_T/3$.

Враховуючи зазначене й те, що при роботі за схемою відкритого трикутника відсутні струми нульової послідовності, можна схему з неповним розривом фази A (рис.1.25) (яка є особливою й прийнятою за розрахункову) привести до комплексної схеми заміщення (рис.1.27), з якої можна визначити струми прямої і зворотної послідовності.

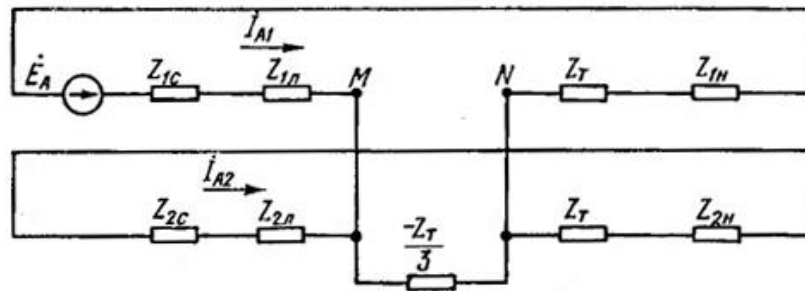


Рис.1.27. Комплексна схема заміщення для випадку неповного розриву у фазі A (рис.1.25).

Еквівалентний опір схеми зворотної послідовності й опору $-Z_T/3$

$$Z_e = \frac{-\frac{1}{3}Z_T(Z_{2c} + Z_{2l} + Z_{2h} + Z_T)}{-\frac{Z_T}{3} + Z_{2c} + Z_{2l} + Z_{2h} + Z_T} = \frac{-Z_T Z_2 - Z_T^2}{3Z_2 + 2Z_T}, \quad (1.32)$$

де $Z_2 = Z_{2l} + Z_{2h} + Z_{2c}$.

Струм прямої послідовності визначається виразом

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_A}{Z_{1c} + Z_{1l} + Z_e + Z_T + Z_{1h}}. \quad (1.33)$$

Позначивши $Z_{1c} + Z_{1l} + Z_{1h} = Z_1$ й підставивши значення Z_e з (1.32) в (1.33), одержуємо

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_A}{Z_1 + Z_T + \frac{-Z_T Z_2 - Z_T^2}{3Z_2 + 2Z_T}} = \frac{\dot{E}_A}{Z_1 + \frac{Z_T(2Z_2 + Z_T)}{3Z_2 + 2Z_T}}. \quad (1.34)$$

Струм зворотної послідовності визначається виразом

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \frac{Z_e}{Z_2 + Z_T} = \dot{I}_1 \frac{Z_T (2Z_2 + Z_T)}{(3Z_2 + 2Z_T)(Z_2 + Z_T)} = \frac{I_1 Z_T}{3Z_2 + 2Z_T}. \quad (1.35)$$

Обчислюємо опори всіх елементів схеми, приведені до ступеня напруги 110 кВ; при цьому знехтуємо активними опорами системи й трансформатора T .

Опір системи

$$Z_{1c} = Z_{2c} = j \frac{U_{\text{мф}}^2}{S_{\kappa}^{(3)}} = j \frac{115^2}{1200} = j11 \text{ Ом.}$$

Опори лінії 110 кВ і трансформатора T рівні:

$$Z_{1л} = Z_{2л} = Z_{\text{ліній}} l = (0,33 + j0,4)10 = 3,3 + j4 = 5,18e^{j50,5} \text{ Ом,}$$

$$Z_{1T} = Z_{2T} = Z_T = \frac{u_{\kappa} U_{\text{ном.ф}}^2}{S_{\text{ном.ф}}} = \frac{0,105 \cdot 110^2}{10,5} = 121 \text{ Ом,}$$

де $U_{\text{ном.ф}}$ і $S_{\text{ном.ф}}$ - номінальні напруга, кВ, і потужність, МВА, однієї фази трансформатора.

Опори навантаження рівні:

$$Z_{1н} = \frac{U_{\text{н.мф}}^2}{S_{\text{н}}} (\cos \varphi_{\text{н}} + j \sin \varphi_{\text{н}}) = \frac{110^2}{16} (0,9 + j0,435) = 680 + j329 = 756e^{j25,8} \text{ Ом,}$$

$$Z_{2н} = 0,35Z_{1н} = 0,35 \cdot 756e^{j25,8} = 264e^{j25,8} = 238 + j115 \text{ Ом,}$$

$$Z_1 = Z_{1c} + Z_{1л} + Z_{1н} = j11 + 3,3 + j4 + 680 + j329 = 683,3 + j344 \text{ Ом,}$$

$$Z_2 = Z_{2c} + Z_{2л} + Z_{2н} = j11 + 3,3 + j4 + 238 + j115 = 241,3 + j130 \text{ Ом.}$$

Підставляючи обчислені значення у вирази (1.34) і (1.35), одержимо:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}_A}{Z_1 + \frac{Z_T (2Z_2 + Z_T)}{3Z_2 + 2Z_T}} = \frac{j66500}{683,3 + j344 + \frac{j121(482,6 + j260 + j121)}{723,9 + j390 + j242}} = \\ &= \frac{j66500}{683,3 + j344 + 3,3 + j71,6} = \frac{j66500}{860e^{j31}} = 77,3e^{j59} \text{ А,} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_2 = I_1 \frac{Z_T}{3Z_2 + 2Z_T} = 77,3e^{j59} \frac{j121}{723,9 + j390 + j242} = \frac{77,3e^{j59} \cdot j121}{960e^{j41}} = 9,74e^{j108} \text{ A.}$$

Коефіцієнт несиметрії дорівнює відношенню модулів струмів:

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{9,74}{77,3} = 0,125 = 12,5\%.$$

Глава друга

НЕПОВНОФАЗНІ РЕЖИМИ З УРАХУВАННЯМ ЄМНОСТІ ЛІНІЙ

2-1. Обчислити симетричні складові ємнісних струмів, що протікають по лінії 220 кВ при ввімкненні її з однієї сторони однієї, двома або трьома фазами за даними: довжина лінії $l = 210$ км, розташування проводів горизонтальне (рис.2.1), марка проводу АС-400, діаметр проводу $d = 28$ мм, відстань між проводами $D = 7,4$ м, $D = D_{12} = D_{23}$, середня геометрична висота проводів відносно землі з урахуванням їх прогину $h_{сер} = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3} = 13$ м; на лінії здійснена транспозиція проводів.

Розрахунки ємнісних струмів прямої, зворотної й нульової послідовності проводяться для вибору уставок диференційно-фазного високочастотного захисту, а також для перевірки надійності налаштування відсічки нульової послідовності при включенні довгої лінії з одного кінця.

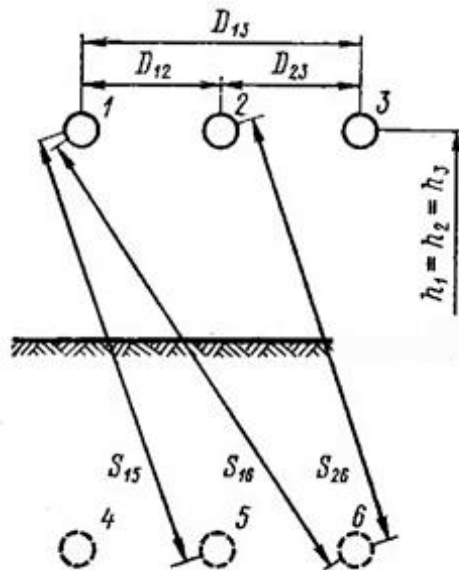


Рис.2.1. Розташування проводів лінії і їх дзеркальне відображення відносно рівня землі.

Розв'язок. Для обчислення струмів при односторонньому включенні лінії необхідно визначити питомі ємності фаз стосовно землі (C_0) і між

проводами ($C_{мф}$). Ці ємності (Ф/км) визначаємо за виразами, наведеними в [7]:

$$C_0 = \frac{1}{(\alpha_{11} + 2\alpha_{12}) \cdot 9 \cdot 10^6}, \quad (2.1)$$

$$C_{мф} = C_0 \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11} - \alpha_{12}}, \quad (2.2)$$

де α_{11} і α_{12} – потенційні коефіцієнти.

Ці коефіцієнти визначаються виразами

$$\alpha_{11} = 2 \ln \frac{2h_{сер}}{r} = 2 \ln \frac{2 \cdot 13}{0,014} = 2 \ln 1860 = 2(\ln 10 + \ln 186) = 2(2,3026 + 5,2257) = 2 \cdot 7,5283 = 15,0566;$$

$$\alpha_{12} = 2 \ln(S_{сер} / D_{сер}).$$

Величини $D_{сер}$ і $S_{сер}$ обчислюються за наступними виразами з використанням відстаней, наведених на рис.2.1:

$$D_{сер} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} = \sqrt[3]{7,4 \cdot 7,4 \cdot 14,8} = 9,32 \text{ м},$$

$$S_{15} = S_{26} = \sqrt{(2h_{сер})^2 + D^2} = \sqrt{(2 \cdot 13)^2 + 7,4^2} = \sqrt{730,8} = 27 \text{ м},$$

$$S_{15} = S_{16} = \sqrt{(2h_{сер})^2 + (2D)^2} = \sqrt{(2 \cdot 13)^2 + (2 \cdot 7,4)^2} = \sqrt{895} = 29,9 \text{ м},$$

$$S_{сер} = \sqrt[3]{S_{15}S_{16}S_{26}} = \sqrt[3]{27 \cdot 29,9 \cdot 27} = 27,95 \text{ м},$$

$$\alpha_{12} = 2 \ln \frac{27,95}{9,32} = 2 \cdot 1,098 = 2,196.$$

Підставляючи значення потенційних коефіцієнтів α_{11} і α_{12} у вирази (2.1) і (2.2), отримуємо:

$$C_0 = \frac{1}{(\alpha_{11} + 2\alpha_{12}) \cdot 9 \cdot 10^6} = \frac{1}{(15,0566 + 2 \cdot 2,196) \cdot 9 \cdot 10^6} = \frac{1}{19,448 \cdot 9 \cdot 10^6} = 0,0057 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км},$$

$$C_{мф} = C_0 \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11} - \alpha_{12}} = 0,0057 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2,196}{15,0566 - 2,196} = 0,00097 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км}.$$

Ємнісні струми прямої і зворотної послідовності протікають через ємності $C_{мф}$ і C_0 (рис.2.2,а). Для обчислення струмів перетворимо схему

трикутника, що складається з ємностей $C_{мф}$, в еквівалентну зірку (рис.2.2,б):

$$\frac{1}{\omega C} = x_C = \frac{x_{мф} x_{мф}}{x_{мф} + x_{мф} + x_{мф}} = \frac{x_{мф}}{3} = \frac{1}{3\omega x_{мф}},$$

звідки $C = 3 C_{мф}$.

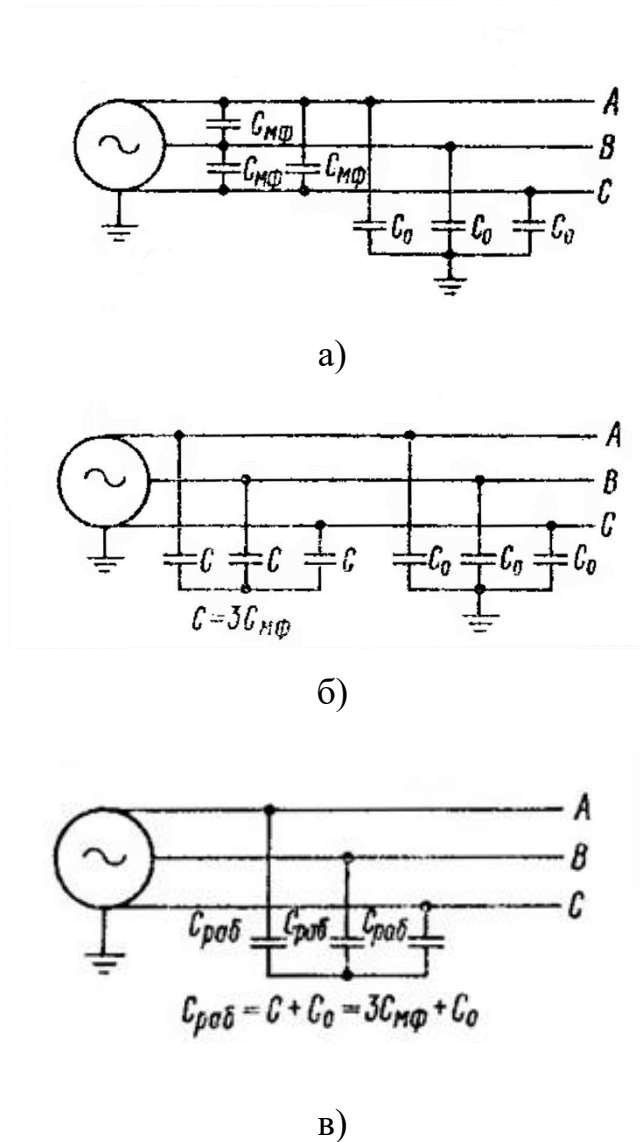


Рис.2.2. До визначення робочої ємності лінії.

Ємнісні струми прямої і зворотної послідовності будуть протікати через еквівалентну ємність $C_{роб} = C_0 + C = C_0 + 3C_{мф}$. Ємність $C_{роб}$ називається робочою ємністю або ємністю фази лінії. За робочою ємністю $C_{роб}$ у нормальному режимі обчислюють зарядні ємнісні струми, тому її

називають також зарядною. Ємнісні струми нульової послідовності через ємності C_0 протікають по землі до нульових заземлених точок і до місця замикання на землю.

Таким чином, ємнісна провідність для струмів прямої і зворотної послідовності b_1 і b_2 визначається за значенням робочої ємності

$$C_{роб} = C_0 + 3C_{мф} = 0,0057 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 0,00097 \cdot 10^{-6} = (0,0057 + 0,0029) \cdot 10^{-6} = 0,0086 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км},$$

$$jb_1 = jb_2 = j\omega C_{роб} = j314 \cdot 0,0086 \cdot 10^{-6} = j2,7 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Ємнісна провідність для струмів нульової послідовності

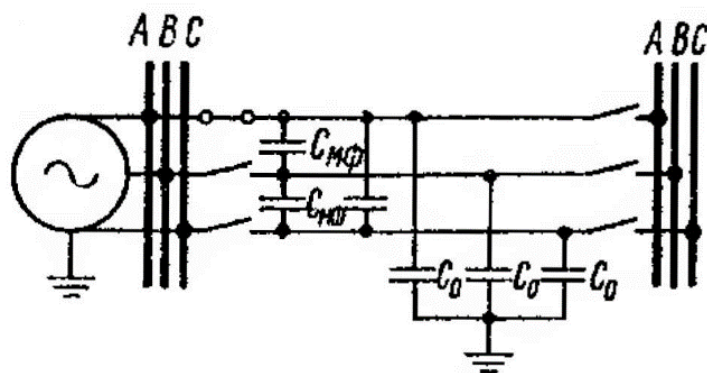
$$jb_0 = j\omega C_0 = j314 \cdot 0,0057 \cdot 10^{-6} = j1,79 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Ємнісні опори лінії струмам прямої, зворотної й нульової послідовності рівні:

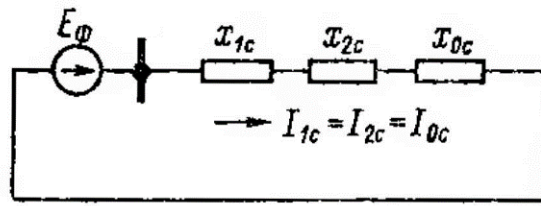
$$x_{1C} = x_{2C} = \frac{1}{jb_1 l} = \frac{1}{j2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 210} = -j1765 \text{ Ом},$$

$$x_{0C} = \frac{1}{jb_0 l} = \frac{1}{j1,79 \cdot 10^{-6} \cdot 210} = -j2660 \text{ Ом}.$$

Відповідно до [2] на рис.2.3 – 2.5 наведені принципові схеми й схеми заміщення при ввімкненні з одного кінця лінії однієї, двох і трьох фаз вимикача. У цих схемах за особливу й розрахункову прийнята фаза A . Оскільки ємнісні опори лінії великі, у розрахунках ємнісних струмів нехтуємо опорами джерел живлення (енергосистеми) і фаз лінії.

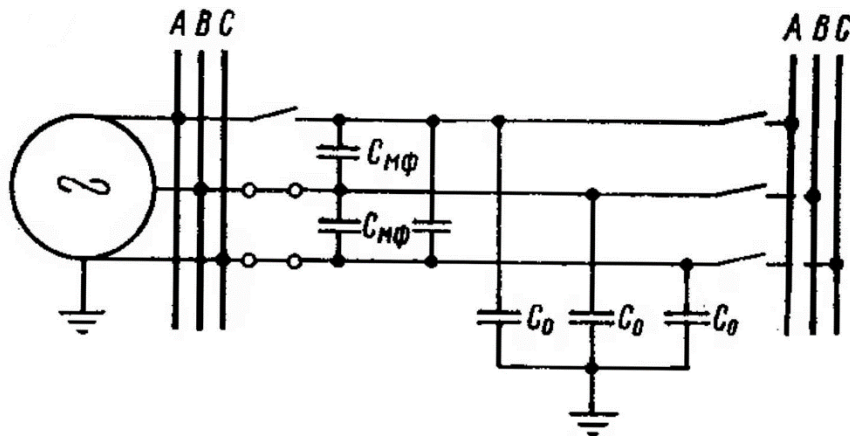


a)

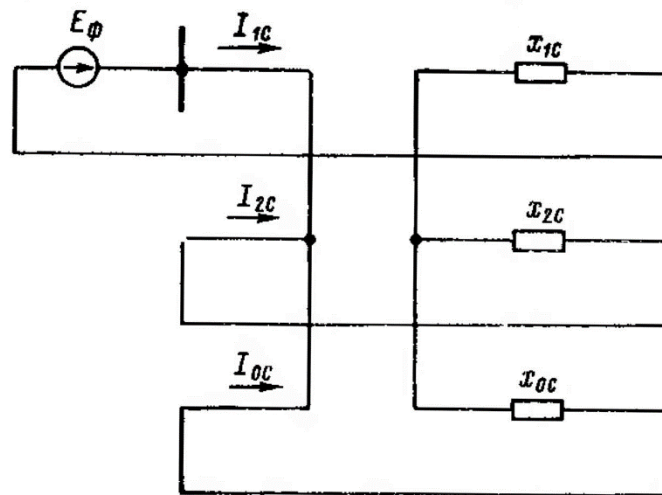


б)

Рис.2.3. Схеми для випадку ввімкнення з одного кінця однієї фази лінії:
а – принципова схема, б – схема заміщення.



а)



б)

Рис.2.4. Схеми для випадку ввімкнення з одного кінця двох фаз лінії:
а - принципова схема, б - комплексна схема заміщення.

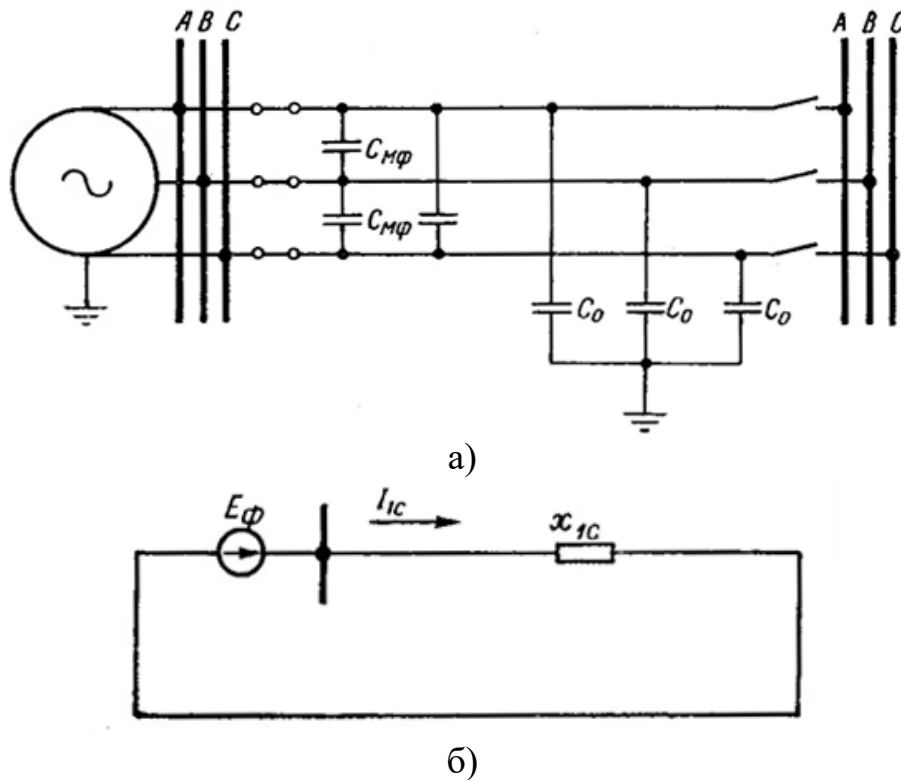


Рис.2.5. Схеми для випадку ввімкнення з одного кінця трьох фаз лінії:
а - принципова схема, б - схема заміщення.

Зі схем заміщення, наведених на рис.2.3, рис.2.4 і рис.2.5, визначаємо ємнісні струми прямої, зворотної й нульової послідовності при включенні лінії з одного кінця. При ввімкненні однієї фази лінії з одного кінця (рис.2.3) ємнісні струми прямої, зворотної й нульової послідовності рівні:

$$I_{1C} = I_{2C} = I_{0C} = \frac{E_{\phi}}{x_{1C} + x_{2C} + x_{0C}} = \frac{230000}{\sqrt{3}(1765 + 1765 + 2660)} = 21,7 \text{ A.}$$

При ввімкненні лінії двома фазами з одного кінця (рис.2.4) ємнісні струми всіх послідовностей визначаються виразами:

$$I_{1C} = \frac{E_{\phi}}{x_{1C} + \frac{x_{2C}x_{0C}}{x_{2C} + x_{0C}}} = \frac{230000}{\sqrt{3}\left(1765 + \frac{1765 \cdot 2660}{1765 + 2660}\right)} = 42,7 \text{ A,}$$

$$I_{2C} = -I_{1C} \frac{x_{0C}}{x_{2C} + x_{0C}} = -47,2 \cdot \frac{2660}{1765 + 2660} = -28,4 \text{ A,}$$

$$I_{0C} = -I_{1C} \frac{x_{2C}}{x_{2C} + x_{0C}} = -47,2 \cdot \frac{1765}{1765 + 2660} = -18,8 \text{ А.}$$

При ввімкненні лінії трьома фазами з одного кінця зарядні ємнісні струми у всіх фазах однакові:

$$I_{1C} = \frac{E_{\phi}}{x_{1C}} = \frac{230000}{\sqrt{3} \cdot 1765} = 75,2 \text{ А.}$$

2-2. Для лінії 500 кВ робоча (зарядна) питома ємнісна провідність фази $b_{роб} = 3,93 \cdot 10^{-6}$ См/км, а питома ємнісна провідність фази відносно землі $b_0 = 2,7 \cdot 10^{-6}$ См/км.

Визначити питомі ємності лінії: між проводами $C_{мф}$, проводів відносно землі C_0 , робочу (зарядну) $C_{роб}$.

Розв'язок. Питому ємність проводів відносно землі визначаємо за формулою $b_0 = \omega C_0$, звідки

$$C_0 = \frac{b_0}{\omega} = \frac{2,7 \cdot 10^{-6}}{314} = 8,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км.}$$

Під зарядною (робочою) ємнісною провідністю фази розуміють ємнісні провідності фази трифазної лінії, що викликають протікання зарядних струмів прямої і зворотної послідовності. Звичайно в літературі ці еквівалентні ємнісні провідності називають скорочено ємнісними провідностями.

Перетворюючи в зірку ємності між фазами $C_{мф}$, з'єднані в трикутник (рис.2.2), одержуємо: $C_{роб} = C_0 + 3C_{мф} = C_1 = C_2$.

Таким чином, $b_{роб} = b_1 = b_2 = \omega C_{роб} = \omega(C_0 + 3C_{мф})$, звідки

$$C_{роб} = \frac{b_{роб}}{\omega} = \frac{3,93 \cdot 10^{-6}}{314} = 12,5 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км;}$$

$$C_{мф} = \frac{C_{роб} - C_0}{3} = \frac{b_{роб} - b_0}{3\omega} = \frac{(3,93 - 2,7) \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 314} = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км.}$$

Додаткові позначення робочої ємності через C_1 і C_2 введені для того, щоб показати, що через ці ємності протікають струми прямої і зворотної послідовності.

2-3. На рис.2.6 наведена схема електропередачі 500 кВ. Фаза A лінії відключена із двох сторін. Визначити напругу на відключеній фазі й симетричні складові напруг на лінії біля підстанції I за наступним даними: питома ємність кожного проводу відносно землі $C_0 = 8,6 \cdot 10^{-9}$ Ф/км, питома ємність між проводами $C_{мф} = 1,3 \cdot 10^{-9}$ Ф/км, напруги фаз B і C біля підстанції I відносно землі $\dot{U}_B = 289000e^{j0}$ В, $\dot{U}_C = 289000e^{j240}$ В; при розрахунках не враховується електромагнітний зв'язок між відключеною фазою та фазами, що залишилися в роботі.

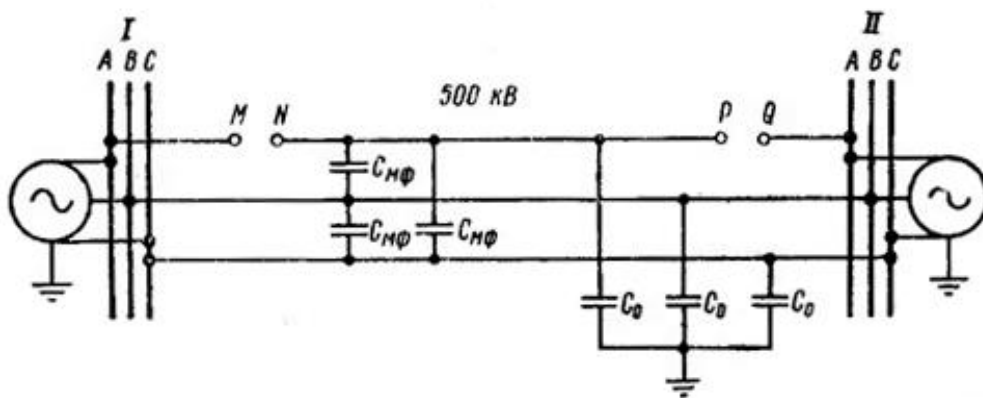
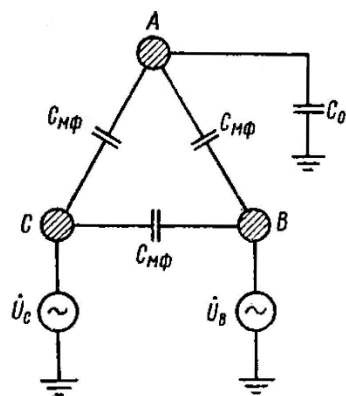


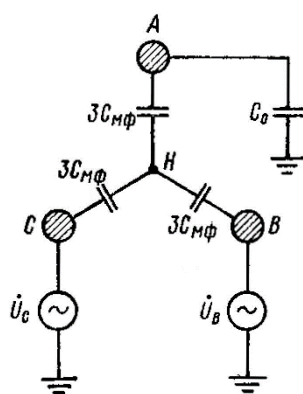
Рис.2.6. До задачі 2-3. Вихідна схема електропередачі 500 кВ.

Розв'язок. У цьому випадку напруга відключеної фази A визначається напругами фаз B і C і відношенням питомих ємностей $C_{мф}$ і C_0 (рис.2.6).

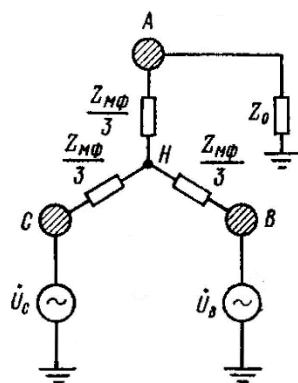
Розрахункова схема для визначення напруги відключеної фази лінії наведена на рис.2.7,а. Перетворюючи трикутник ABC з ємностями $C_{мф}$ на рис.2.7,а в зірку, одержуємо схему, наведену на рис.2.7,б (див. також задачу 2-1).



a)



б)



в)

Рис.2.7. Розрахункові схеми заміщення для визначення напруги на відключеній фазі A (рис.2.6).

Далі, переходячи від ємностей до повних опорів $Z_{mf} = \frac{1}{j\omega C_{mf}}$ і

$Z_0 = \frac{1}{j\omega C_0}$, одержуємо остаточну розрахункову схему, наведену на рис.2.7,в, за якою обчислюємо методом вузлових потенціалів напругу точки H відносно землі

$$\begin{aligned}\dot{U}_H &= \frac{\dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = \frac{\dot{U}_B \frac{3}{Z_{mf}} + \dot{U}_C \frac{3}{Z_{mf}}}{\frac{1}{Z_0 + \frac{1}{3}Z_{mf}} + \frac{3}{Z_{mf}} + \frac{3}{Z_{mf}}} = \frac{\frac{3}{Z_{mf}}(\dot{U}_B + \dot{U}_C)}{\frac{3}{Z_0 + Z_{mf}} + \frac{6}{Z_{mf}}} = \\ &= \frac{\frac{Z_{mf}}{3} + Z_0}{Z_{mf} + 2Z_0}(\dot{U}_B + \dot{U}_C),\end{aligned}$$

де Y_A , Y_B , Y_C - провідності віток A , B і C відносно точки H за рис.2.7,в.

Напруга відключеної фази A відносно землі біля підстанції I визначається виразами (див. рис.2.7,в):

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \frac{\dot{U}_H Z_0}{\frac{Z_{mf}}{3} + Z_0} = \frac{\frac{Z_{mf}}{3} + Z_0}{Z_{mf} + 2Z_0}(\dot{U}_B + \dot{U}_C) \frac{Z_0}{\frac{Z_{mf}}{3} + Z_0} = \frac{Z_0}{Z_{mf} + 2Z_0}(\dot{U}_B + \dot{U}_C) = \\ &= \frac{1}{j\omega C_0}(\dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{C_{mf}(\dot{U}_B + \dot{U}_C)}{C_0 + 2C_{mf}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-9}}{8,6 \cdot 10^{-9} + 2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-9}} \cdot (289000 + \\ &+ 289000e^{j240}) = 0,116(289000 + 289000(\cos 240 + j \sin 240)) = 16750 - \\ &- j29000 = 33600e^{-j60} \text{ В},\end{aligned}$$

$$U_A = 33600 \text{ В}.$$

Визначаємо симетричні складові напруг на лінії з відключеною фазою:

$$\dot{U}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \frac{1}{3}(33600e^{-j60} + 289000 \cdot e^{j120} + e^{j240} \cdot 289000e^{j240}) = -90750 + j157300 = 181700e^{j120} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \frac{1}{3}(33600e^{-j60} + 289000 \cdot e^{j240} + e^{j120} \cdot 289000e^{j240}) = 53800 - j93300 = 107700e^{-j60} \text{ В},$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{3}(33600e^{-j60} + 289000 + 289000e^{j240}) = 53800 - j93300 = 107700e^{-j60} \text{ В}.$$

Перевіримо правильність обчислень симетричних складових:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_0 &= -90750 + j157300 + 53800 - j93300 + 53800 - j93300 = \\ &= 16850 - j29300 = 33600e^{-j60} \text{ В}.\end{aligned}$$

Обчислення виконані правильно, оскільки отримане значення $\dot{U}_A$ збігається з отриманим раніше.

2-4. На рис.2.8 наведена вихідна схема електропередачі 500 кВ. Для визначення струмів і напруг на лінії при відключенні її фази по обидва боки здійснити розрахунок нормального повнофазного навантажувального режиму з урахуванням ємності лінії й скласти схеми заміщення прямої, зворотної й нульової послідовності для наступного розрахунку неповнофазного режиму. ЕРС генераторів станції й системи визначити в нормальному режимі за перехідним опором.

Ці ЕРС використовуються для розрахунків струмів і напруг у початковий момент відключення фази тому, що вони залишаються постійними в початковий момент перехідного процесу в енергосистемі.

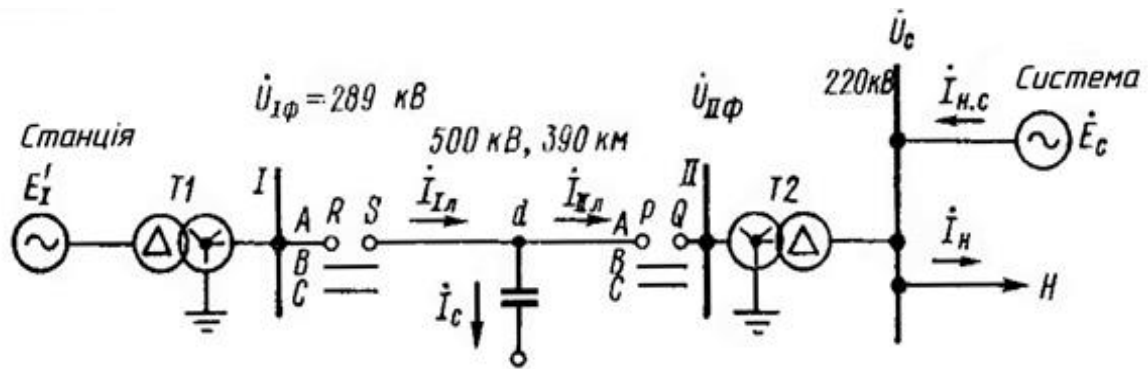


Рис.2.8. До задачі 2-4. Вихідна схема.

Вихідні дані. Лінія 500 кВ:

$$r_{\text{ліній}} = 0,021 \text{ Ом/км}, \quad x_{\text{ліній}} = x_{\text{2ліній}} = 0,29 \text{ Ом/км}, \quad x_{\text{0ліній}} = 0,95 \text{ Ом/км},$$

питома ємнісна провідність струмів прямої (зворотної) і нульової послідовності $b_{\text{ліній}} = b_{\text{2ліній}} = 3,93 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$, $b_{\text{0ліній}} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$.

Електростанція:

генератори із загальною номінальною повною потужністю

$$S_{\text{ном}} = 740 \text{ МВА}, \quad U_{\text{ном}} = 13,8 \text{ В}, \quad x'_d = x'_q = x'_r = 19\%, \quad x_{2r} = 24\%,$$

трансформатори T1: 630 МВА, 13,8/525 кВ, $u_k = 13\%$, фазна напруга на

шинах I: $\dot{U}_{I\phi} = 289e^{j0} \text{ кВ}$; струм навантаження на початку лінії, біля шин

$$I, \quad I_{1л} = 650e^{j3} \text{ А}.$$

Система:

встановлена потужність

$$S_{\text{вст}} = 3000 \text{ МВА}, \quad x'_{dc} = x'_{qc} = x'_c = 30\%, \quad x_{2c} = 26\%$$

Узагальнене навантаження H:

$$S_H = 2600 \text{ МВА}, \quad \cos \varphi_H = 0,85, \quad z_{2H} \approx jx_{2H} = 40\%$$

Трансформатори T2: 630 МВА, 500/231 кВ, $u_k = 13\%$.

Розв'язок. Лінію передачі представляємо Т-подібною схемою заміщення. Беручи до уваги, що лінія 500 кВ має довжину 390 км, для урахування її рівномірно розподілених опорів і провідностей вводимо

поправочні коефіцієнти k_1 і k_2 , на які слід помножити опір лінії і ємнісну провідність лінії $Z_{\text{л}}$ відповідно [8]. Опір лінії

$$Z_{1\text{л}} = Z_{2\text{л}} = l(r_{\text{ліній}} + jx_{\text{ліній}}) = 390(0,021 + j0,29) = 8,18 + j113 = 113e^{j85,8} \text{ Ом.}$$

Ємнісна провідність ліній для струмів прямої і зворотної послідовності

$$Y_{1\text{л}} = Y_{2\text{л}} = jlb_{\text{ліній}} = j390 \cdot 3,93 \cdot 10^{-6} = j1530 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Опір і провідність для струмів нульової послідовності рівні:

$$Z_{0\text{л}} = jlx_{0\text{ліній}} = j390 \cdot 0,95 = j370 \text{ Ом,}$$

$$Y_{0\text{л}} = jlb_{0\text{ліній}} = j390 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} = j1052 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Обчислюємо поправочні коефіцієнти для схем прямої і зворотної послідовності лінії:

$$k_1 = \frac{1 + \frac{Z_{1\text{л}} Y_{1\text{л}}}{12}}{1 + \frac{Z_{1\text{л}} Y_{1\text{л}}}{6}} = \frac{1 + \frac{113e^{j85,8} \cdot 1530 \cdot 10^{-6} e^{j90}}{12}}{1 + \frac{113e^{j85,8} \cdot 1530 \cdot 10^{-6} e^{j90}}{6}} = \frac{1 + 0,0144e^{j175,8}}{1 + 0,0288e^{j175,8}} =$$

$$= \frac{0,9857e^{j0,1}}{0,9713e^{j0,1}} \approx 1,015;$$

$$k_2 = 1 + \frac{Z_{1\text{л}} Y_{1\text{л}}}{6} = 0,9713e^{j0,1}.$$

Поправочні коефіцієнти для Т-подібної схеми нульової послідовності рівні:

$$k_{10} = \frac{1 + \frac{Z_{0\text{л}} Y_{0\text{л}}}{12}}{1 + \frac{Z_{0\text{л}} Y_{0\text{л}}}{6}} = \frac{1 + \frac{j370 \cdot j1052 \cdot 10^{-6}}{12}}{1 + \frac{j370 \cdot j1052 \cdot 10^{-6}}{6}} = \frac{0,9676}{0,9352} = 1,035;$$

$$k_{20} = 1 + \frac{Z_{0\text{л}} Y_{0\text{л}}}{6} = 0,9352.$$

Визначаємо опори й провідності, які повинні бути прийняті в Т-подібній схемі заміщення лінії (із зосередженими параметрами) з урахуванням того, що вона має рівномірно розподілені параметри:

$$Z'_{1л} = Z'_{2л} = k_1 Z_{1л} = 1,015(8,18 + j113) = 8,3 + j114,8 = 115e^{j85,8} \text{ Ом},$$

$$Y'_{1л} = Y'_{2л} = k_2 Y_{1л} = 0,9713e^{j0,1} \cdot j1530 \cdot 10^{-6} = j1487 \cdot 10^{-6} \text{ См},$$

$$Z'_{0л} = Z'_{2л} = k_{10} Z_{0л} = 1,035 \cdot j370 = j382 \text{ Ом},$$

$$Y'_{0л} = k_{20} Y_{0л} = 0,9352 \cdot j1052 \cdot 10^{-6} = j982 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Ємнісні опори лінії струмам прямої, зворотної й нульової послідовності з урахуванням рівномірно розподілених параметрів рівні:

$$Z'_{1лC} = \frac{1}{Y'_{1л}} \approx jx_{1лC} = jx_{2лC} = \frac{1}{j1487 \cdot 10^{-6}} = -j672 \text{ Ом},$$

$$Z'_{0лC} = \frac{1}{Y'_{0л}} \approx jx_{0лC} = \frac{1}{j982 \cdot 10^{-6}} = -j1018 \text{ Ом}.$$

На рис.2.9 наведена однолінійна схема заміщення для розрахунків нормального повнофазного навантажувального режиму.

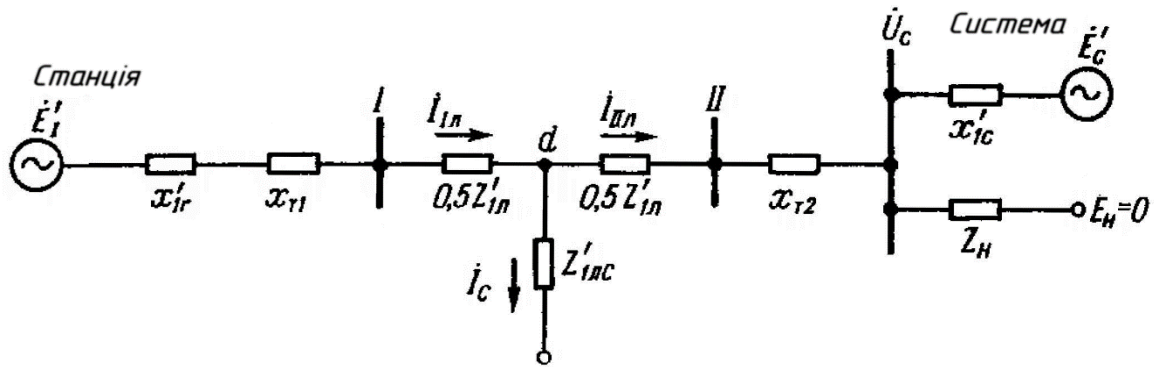


Рис.2.9. Схема заміщення для розрахунків нормального навантажувального режиму. Лінія представлена Т-подібною схемою.

Розрахунки струму в лінії біля шин II і напруги на шинах II виконуємо методом еквівалентних постійних за наступними формулами [8]:

$$\dot{U}_{II\phi} = D\dot{U}_{I\phi} - B\dot{I}_{Ll}, \quad (2.3)$$

$$\dot{I}_{IIl} = -C\dot{U}_{I\phi} + A\dot{I}_{Ll}, \quad (2.4)$$

де для симетричної Т-подібної схеми заміщення лінії

$$A = D = 1 + \frac{Z'_{1л} Y'_{1л}}{2} = 1 + \frac{115e^{j85,8} \cdot 1487 \cdot 10^{-6} e^{j90}}{2} = 0,9148 + j0,00626 = 0,9148e^{j0,4};$$

$$B = Z'_{1л} \left(1 + \frac{Z'_{1л} Y'_{1л}}{4} \right) = 115e^{j85,8} \cdot \left(1 + \frac{115e^{j85,8} \cdot 1487 \cdot 10^{-6} e^{j90}}{4} \right) = 115e^{j85,8} \cdot 0,9574e^{j0,2} = 110e^{j86}.$$

Підставляючи обчислені постійні у вирази (2.3) і (2.4), знаходимо:

$$\dot{U}_{\Pi\phi} = 0,9148e^{j0,4} \cdot 289000 - 110e^{j86} \cdot 650e^{j3} = 262750 - j69500 = 272000e^{-j14,8} \text{ В},$$

$$\dot{I}_{\Pi л} = -j1487 \cdot 10^{-6} \cdot 289000 + 0,9148e^{j0,4} \cdot 650e^{j3} = 593 - j394,7 = 710e^{-j33,7} \text{ А}.$$

Для перевірки правильності проведених обчислень визначимо $\dot{U}_{\Pi\phi}$ за іншими рівняннями, використовуючи схему заміщення, наведену на рис.2.9.

Напряга і ємнісний струм у середині лінії

$$\dot{U}_d = \dot{U}_{I\phi} - \dot{I}_{1л} \frac{Z'_{1л}}{2} = 289000 - 650e^{j3} \cdot 57,4e^{j85,8} = 288254 - j37300 = 290500e^{-j7,4} \text{ В},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_d}{Z'_{лC}} = \frac{290500e^{-j7,4}}{672e^{-j90}} = 432e^{j82,6} = (55,6 + j428) \text{ А}.$$

Струм у лінії біля шин II

$$\dot{I}_{\Pi л} = \dot{I}_{1л} - \dot{I}_C = 650e^{j3} - 55,6 - j428 = 593,4 - j394 = 711e^{-j33,7} \text{ А},$$

напряга на шинах

$$\dot{U}_{\Pi\phi} = \dot{U}_d - \dot{I}_{\Pi л} \frac{Z'_{1л}}{2} = 288254 - j37300 + 711e^{-j33,7} \cdot 57,4e^{j85,8} = 263054 - j69500 = 272000e^{-j14,8} \text{ В},$$

Результати розрахунків $\dot{U}_{\Pi\phi}$ і $\dot{I}_{\Pi л}$ двома методами збігаються.

Визначаємо опори трансформаторів T1 і T2, приведені до сторони 500 кВ:

$$x_{T1} = \frac{u_{\kappa} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{0,13 \cdot 525^2}{630} = 57 \text{ Ом}, \quad x_{T2} = \frac{0,13 \cdot 500^2}{630} = 51,6 \text{ Ом}.$$

Перехідний опір генераторів станції, приведений до сторони 500 кВ,

$$x'_G = \frac{x'_{*G} U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} n_{T1}^2 = \frac{0,19 \cdot 13,8^2}{740} \cdot \left(\frac{525}{13,8} \right)^2 = 71 \text{ Ом}.$$

ЕРС. Станції за перехідним опором у нормальному режимі визначається виразом:

$$\begin{aligned} \dot{E}'_I &= \dot{U}_{I\phi} + \dot{I}_{1L} j(x_{T1} + x'_G) = 289000 + 650e^{j3} (57 + 71)e^{j90} = 284650 + j83000 = \\ &= 296500e^{j16,3} \text{ В.} \end{aligned}$$

Визначаємо перехідний опір генераторів системи й опір навантаження системи в нормальному режимі, приведені до середньої номінальної напруги 500 кВ:

$$x'_c = \frac{0,3 \cdot 500^2}{3000} = 25 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} Z &= \frac{U_{\text{сеп}}^2}{S_n} (\cos \varphi_n + j \sin \varphi_n) = \frac{500^2}{2600} \cdot (0,85 + j0,527) = 96,2e^{j31,8} = \\ &= (81,7 + j50,6) \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Визначаємо напругу на шинах 220 кВ системи за виразом:

$$\begin{aligned} \dot{U}_c &= \dot{U}_{I\phi} - \dot{I}_{1L} jx_{T2} = 263054 - j69500 - 711e^{-j33,7} \cdot 51,6e^{j90} = 263054 - \\ &- j69500 - 36600e^{j56,3} = 263054 - j69500 - 20300 - j30400 = 242756 - \\ &- j99900 = 262500e^{-j22,5} \text{ В.} \end{aligned}$$

Визначаємо струм навантаження:

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{U}_c}{Z_n} = \frac{262500e^{-j22,5}}{96,2e^{j31,8}} = 2730e^{-j54,3} = (1590 - j2220) \text{ А}.$$

Струм навантаження, що підтікає до шин 220 кВ від системи,

$$\dot{I}_{n.c} = \dot{I}_n - \dot{I}_{1L} = 1590 - j2220 - 593,4 + j394 = 996,6 - j1826 = 2080e^{-j61,3} \text{ А}.$$

Визначаємо ЕРС системи за перехідним опором у нормальному режимі:

$$\dot{E}'_c + \dot{U}_c + \dot{I}_{n,c} jx'_c = 242756 - j99900 + 2080e^{-j61,3} \cdot 25e^{j90} = 288354 - j74950 = 298000e^{-j14,5} \text{ В.}$$

Об'єднуємо вітку системи з віткою навантаження в одну еквівалентну:

$$\dot{E}'_{II} = \frac{\dot{E}'_c Z'_n + \dot{E}'_n Z'_c}{Z'_n + Z'_c} = \frac{298000e^{-j14,5} \cdot 96,2e^{j31,8}}{81,7 + j50,6 + j25} = \frac{298000e^{-j14,5} \cdot 96,2e^{j31,8}}{111e^{j42,7}} = 258000e^{-j25,4} = (233000 - j110800) \text{ В.}$$

$$Z_e = \frac{Z'_n Z'_c}{Z'_n + Z'_c} = \frac{96,2e^{j31,8} \cdot 25e^{j90}}{111e^{j42,7}} = 21,6e^{j79,1} = (4,08 + j21,2) \text{ Ом.}$$

Визначаємо опори зворотної послідовності генераторів системи й навантаження, приведені до середньої номінальної напруги 500 кВ:

$$x_{2c} = \frac{26 \cdot 500^2}{100 \cdot 3000} = 21,7 \text{ Ом; } x_{2n} = \frac{40 \cdot 500^2}{100 \cdot 2600} = 38,4 \text{ Ом.}$$

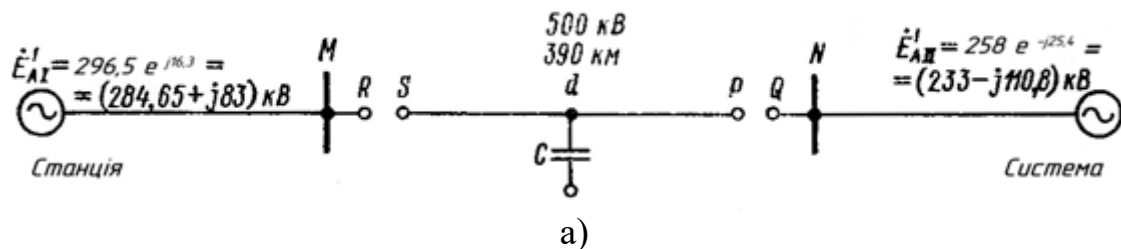
Еквівалентний опір зворотної послідовності генераторів системи й навантаження

$$x_{2e} = \frac{x_{2c} x_{2n}}{x_{2c} + x_{2n}} = \frac{21,7 \cdot 38,4}{21,7 + 38,4} = 13,9 \text{ Ом.}$$

Опір зворотної послідовності генераторів станції, приведений до сторони 500 кВ,

$$x_{2\Gamma} = \frac{x_{*2\Gamma} U_{ном}^2}{S_{ном}} n_{T1}^2 = \frac{0,24 \cdot 13,8^2}{740} \cdot \left(\frac{525}{13,8} \right)^2 = 89,6 \text{ Ом.}$$

На рис.2.10 наведені схеми заміщення всіх послідовностей і нанесені обчислені величини. За цими схемами можна проводити розрахунки неповнофазних режимів.



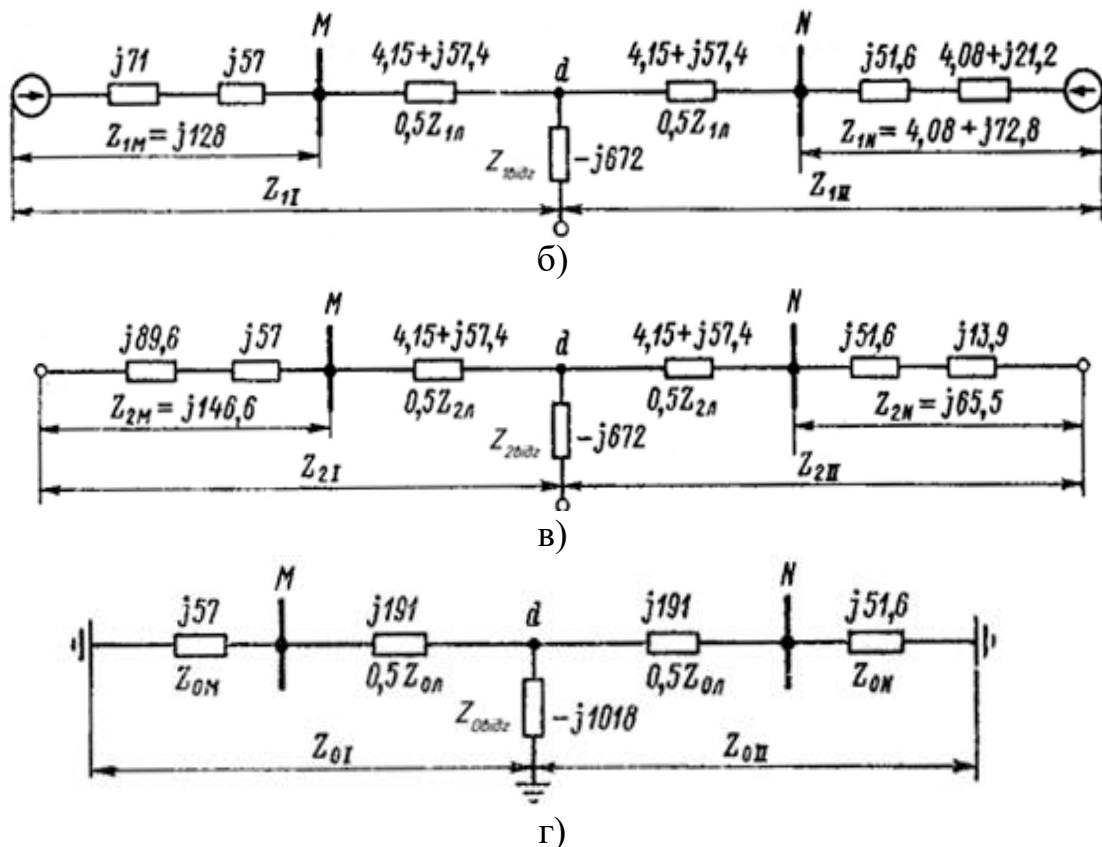
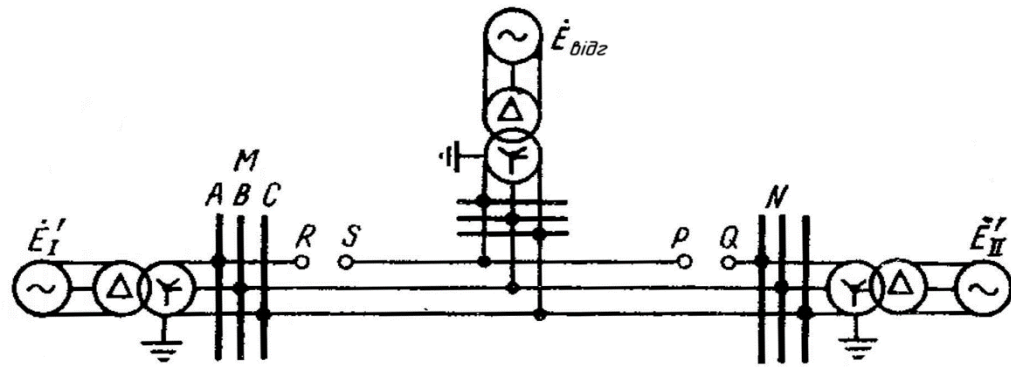


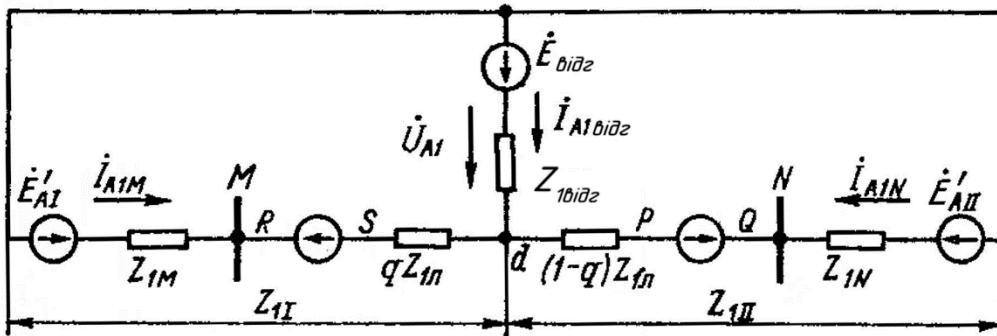
Рис.2.10. До задач 2-4 і 2-5: а – вихідна схема, б – схема заміщення прямої послідовності, в – зворотної, г – нульової.
(Значення опорів, приведені до напруги 500 кВ, зазначені в омах.)

2-5. На рис.2.10 за даними розрахунків, виконаних в задачі 2-4, наведені схема електропередачі 500 кВ із урахуванням ємнісної провідності лінії й схеми заміщення всіх послідовностей. Фаза А лінії відключена із двох сторін. Визначити симетричні складові струмів по обидва боки лінії.

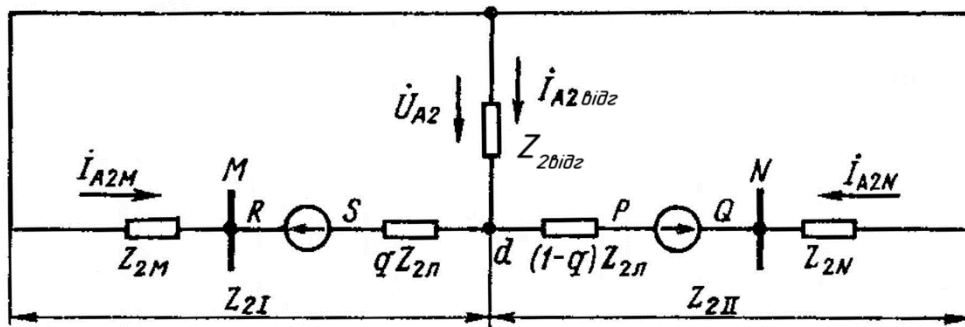
Розв'язок. Це завдання вирішуємо методом, наведеним в [9]. Схеми окремих послідовностей при двосторонньому відключенні однієї фази лінії з відгалуженням наведені на рис.2.11.



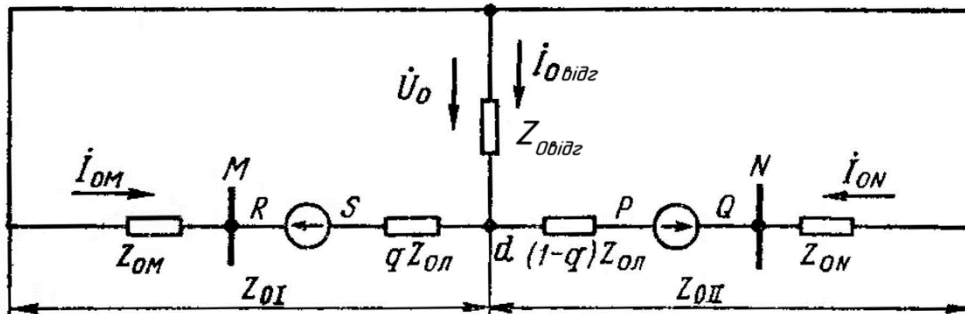
а)



б)



в)



г)

Рис.2.11. Схеми при двосторонньому відключенні однієї фази лінії з відгалуженням: а – вихідна схема, б – схема заміщення прямої послідовності, в – зворотної, г – нульової.

Лінію 500 кВ із урахуванням її ємності в схемах окремих послідовностей представляємо Т-подібною схемою заміщення (див. задачу 2-4). Така лінія при двосторонньому відключенні однієї її фази може бути представлена схемами всіх послідовностей, наведеними на рис.2.11, якщо в них під опорами відгалужень $Z_{\text{відг}}$ розуміти ємнісні опори (відповідно до Т-подібної схеми заміщення), а величину $\dot{E}_{\text{відг}}$ прийняти рівною нулю.

За схемах окремих послідовностей складається комплексна схема заміщення для неповнофазного режиму при відключенні однієї фази лінії з урахуванням її ємності. Ця комплексна схема наведена на рис.2.12.

Комплексна схема заміщення складена на підставі теореми про компенсацію. При відомих напругах $\dot{U}_2$ і $\dot{U}_0$ в точці лінії d схеми зворотної й нульової послідовності можна розділити в цій точці (рис.2.12).

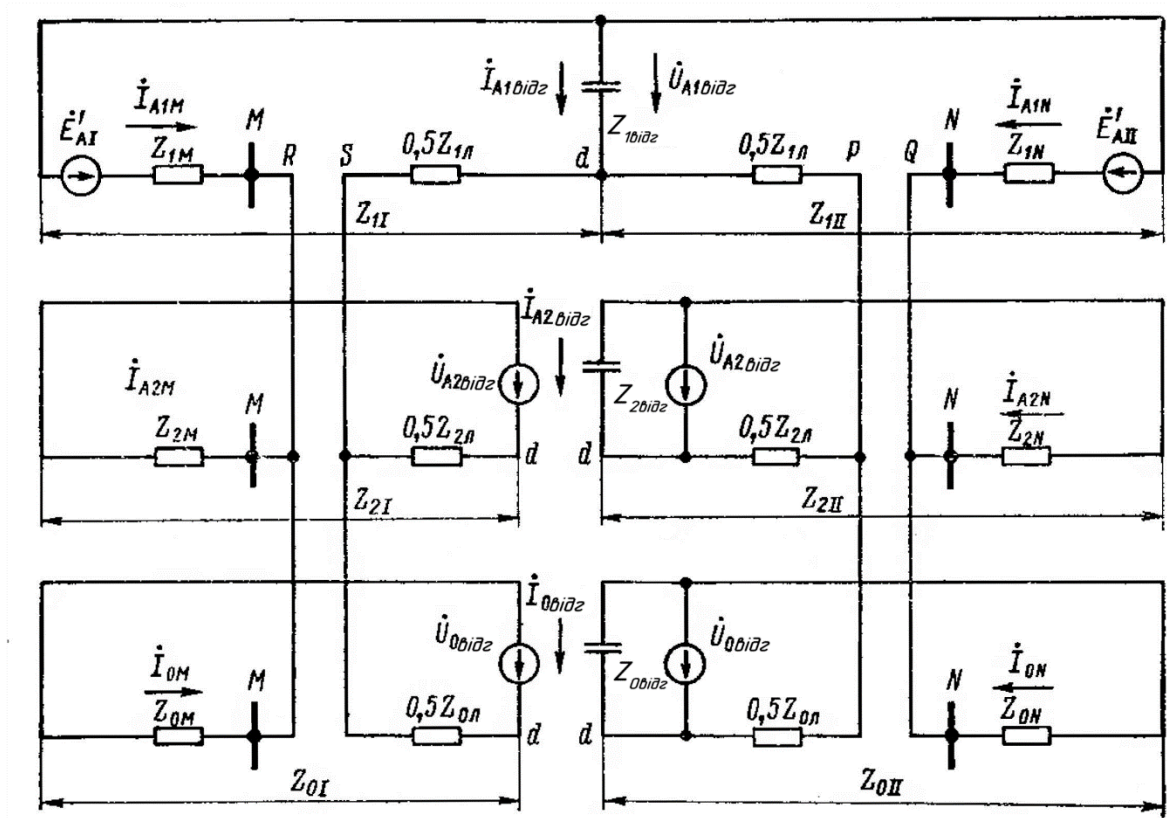


Рис.2.12. Комплексна схема заміщення для неповнофазного режиму при двосторонньому відключенні фази A лінії з урахуванням її ємності.

У цьому випадку частини схем, розташовані правіше й лівіше точки заміняються джерелами напруги із внутрішніми опорами, рівними нулю, і ЕРС, рівними відповідно напругам $\dot{U}_2$ і $\dot{U}_0$ в точці d лінії. Оскільки джерела напруги в цій комплексній схемі заміщення є джерелами нескінченної потужності, опори відгалуження (ємнісний опір лінії) у схемах зворотної й нульової послідовності можуть підключатися як до правих (рис.2.12), так і до лівих частин розділених схем.

Оскільки враховується ємнісна провідність лінії, струми на кінцях лінії неоднакові й граничні умови для струмів у місцях розриву RS і PQ фази A відповідають рівностям:

$$\dot{I}_{AM} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{0M} = 0 \quad \text{або} \quad \dot{I}_{A1M} = -(\dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{0M}), \quad (2.5)$$

$$\dot{I}_{AN} = \dot{I}_{A1N} + \dot{I}_{A2N} + \dot{I}_{0N} = 0 \quad \text{або} \quad \dot{I}_{A1N} = -(\dot{I}_{A2N} + \dot{I}_{0N}), \quad (2.6)$$

З комплексної схеми заміщення випливає, що струми всіх трьох послідовностей у відгалуженні (ємності C лінії, представлені Т-подібною схемою заміщення) визначаються виразом:

$$\dot{I}_{A\alpha\text{відг}} = -(\dot{I}_{A\alpha M} + \dot{I}_{A\alpha N}), \quad (2.7)$$

де $\alpha = 1, 2, 0$ - номер послідовності.

Таким чином, з формул (2.5), (2.6) і (2.7) випливає, що для знаходження струмозподілу в комплексній схемі заміщення на рис.2.12 досить знайти значення струмів $\dot{I}_{A2M}$, $\dot{I}_{A2N}$, $\dot{I}_{0M}$ і $\dot{I}_{0N}$. Для обчислення цих струмів використовуються чотири рівняння, наведені в [9, рівняння (П-23)], у яких ЕРС відгалуження дорівнює нулю, а опори прямої і зворотної послідовності відгалуження однакові. Зазначене можливо, оскільки замість відгалуження розглядається ємність лінії, представлені Т-подібною схемою заміщення. У відповідності зі схемами на рис.2.10 і рис.2.12 приводимо ці чотири рівняння:

$$(Z_{1I} - Z_{2I})\dot{I}_{A2M} - (Z_{1II} - Z_{2II})\dot{I}_{A2N} + (Z_{1I} + Z_{0I})\dot{I}_{0M} - (Z_{1II} + Z_{0II})\dot{I}_{0N} = \dot{E}'_{AII} - \dot{E}'_{AI}, \quad (2.8)$$

$$(Z_{1I} - Z_{2I})\dot{I}_{A2M} + (Z_{1I} + 2Z_{0I} + Z_{1\epsilon i\partial z} + 2Z_{0\epsilon i\partial z})\dot{I}_{0M} + (Z_{1\epsilon i\partial z} + 2Z_{0\epsilon i\partial z})\dot{I}_{0N} = -\dot{E}'_{AI}, \quad (2.9)$$

$$(Z_{1I} + 2Z_{2I})\dot{I}_{A2M} - (Z_{1II} + Z_{2II})\dot{I}_{A2N} + (Z_{1I} - Z_{0I})\dot{I}_{0M} - (Z_{1II} - Z_{0II})\dot{I}_{0N} = \dot{E}'_{AII} - \dot{E}'_{AI}, \quad (2.10)$$

$$(Z_{1I} + 2Z_{2I} + 3Z_{1\epsilon i\partial z})\dot{I}_{A2M} + 3Z_{1\epsilon i\partial z}\dot{I}_{A2N} + (Z_{1I} - Z_{0I} + Z_{1\epsilon i\partial z} - Z_{0\epsilon i\partial z})\dot{I}_{0M} + (Z_{1\epsilon i\partial z} - Z_{0\epsilon i\partial z})\dot{I}_{0N} = -\dot{E}'_{AI}, \quad (2.11)$$

За даними, наведеним на рис.2.10, обчислюємо деякі величини й вирази (у дужках), що входять у рівняння (2.8) - (2.11):

$$Z_{1I} = Z_{1M} + 0,5Z_{1I} = j128 + 4,15 + j57,4 = (4,15 + j185,4) \text{ Ом},$$

$$Z_{2I} = Z_{2M} + 0,5Z_{2I} = j146,6 + 4,15 + j57,4 = (4,15 + j204) \text{ Ом},$$

$$Z_{1II} = Z_{1N} + 0,5Z_{1I} = 4,08 + j72,8 + 4,15 + j57,4 = (8,23 + j130,2) \text{ Ом},$$

$$Z_{2II} = Z_{2N} + 0,5Z_{2I} = j65,5 + 4,15 + j57,4 = (4,15 + j122,9) \text{ Ом},$$

$$Z_{0I} = Z_{0M} + 0,5Z_{0I} = j57 + j191 = j248 \text{ Ом},$$

$$Z_{0II} = Z_{0N} + 0,5Z_{0I} = j51,6 + j191 = j242,6 \text{ Ом},$$

$$Z_{1I} - Z_{2I} = 4,15 + j185,4 - 4,15 - j204 = -j18,6 \text{ Ом},$$

$$Z_{1II} - Z_{2II} = 8,23 + j130,2 - 4,15 - j122,9 = (4,08 + j7,3) \text{ Ом},$$

$$Z_{1I} + 2Z_{0I} = 4,15 + j185,4 + 2 \cdot j248 = (4,15 + j681,4) \text{ Ом},$$

$$Z_{1II} + 2Z_{0II} = 8,23 + j130,2 + 2 \cdot j242,6 = (8,23 + j615,4) \text{ Ом},$$

$$Z_{1I} + 2Z_{0I} + Z_{1\epsilon i\partial z} + 2Z_{0\epsilon i\partial z} = 4,15 + j185,4 + 2 \cdot j248 - j672 - 2 \cdot j1018 = (4,15 - j2026,6) \text{ Ом},$$

$$Z_{1\epsilon i\partial z} + 2Z_{0\epsilon i\partial z} = -j672 - 2 \cdot j1018 = -j2708 \text{ Ом},$$

$$Z_{1I} + 2Z_{2I} = 4,15 + j185,4 + 2(4,15 + j204) = (12,45 + j593,4) \text{ Ом},$$

$$Z_{1II} + 2Z_{2II} = 8,23 + j130,2 + 2(4,15 + j122,9) = (16,53 + j376) \text{ Ом},$$

$$Z_{1I} - Z_{0I} = 4,15 + j185,4 - j248 = (4,15 - j62,6) \text{ Ом},$$

$$Z_{1II} - Z_{0II} = 8,23 + j130,2 - j242,6 = (8,23 - j112,4) \text{ Ом},$$

$$Z_{1I} + 2Z_{2I} + 3Z_{1\delta\delta z} = 4,15 + j185,4 + 2(4,15 + j204) + 3(-j672) = \\ = (12,45 - j1422,6) \text{ Ом},$$

$$3Z_{1\delta\delta z} = 3(-j672) = -j2016 \text{ Ом},$$

$$Z_{1I} - Z_{0I} + Z_{1\delta\delta z} - Z_{0\delta\delta z} = 4,15 + j185,4 - j248 - j672 - (-j1018) = \\ = (4,15 + j283,4) \text{ Ом},$$

$$Z_{1\delta\delta z} - Z_{0\delta\delta z} = -j672 - (-j1018) = j346 \text{ Ом},$$

$$\dot{E}'_{AII} - \dot{E}'_{AI} = 233 - j110,8 - 284,6 - j83 = (-51,65 - j193,8) \text{ кВ}.$$

Обчислені значення підставляємо в рівняння (2.8) - (2.11):

$$-j18,6\dot{I}_{A2M} - (4,08 + j7,3)\dot{I}_{A2N} + (4,15 + j681,4)\dot{I}_{0M} - (8,23 + \\ + j615,4)\dot{I}_{0N} = (-51,65 - j193,8) \text{ кВ}, \quad (2.12)$$

$$-j18,6\dot{I}_{A2M} + (4,15 - j2026,6)\dot{I}_{0M} - j2708\dot{I}_{0N} = -284,65 - j83 = \\ = 296,5e^{j196,3} \text{ кВ}, \quad (2.13)$$

$$(12,45 + j593,4)\dot{I}_{A2M} - (16,53 + j376)\dot{I}_{A2N} + (4,15 - j62,6)\dot{I}_{0M} - \\ - (8,23 - j112,4)\dot{I}_{0N} = (-51,65 - j193,8) \text{ кВ}, \quad (2.14)$$

$$(12,45 - j1422,6)\dot{I}_{A2M} - j2016\dot{I}_{A2N} + (4,15 + j283,4)\dot{I}_{0M} + \\ + j346\dot{I}_{0N} = -284,65 - j83 = 296,5e^{j196,3} \text{ кВ}. \quad (2.15)$$

Вирішуємо чотири рівняння (2.12) - (2.15) з комплексними числами методом Гауса, заснованим на послідовному виключенні невідомих, поки не буде отримано одне рівняння з одним невідомим. З метою спрощення записів нижче в позначеннях струмів опускаємо індекс фази A , яка є особливою й прийнята за розрахункову. Для більшої точності обчислення робимо на мікрокалькуляторі. У результаті розв'язку цих чотирьох рівнянь (розв'язання опускаємо) одержуємо:

$$\dot{I}_{2M} = -0,2406 - j0,0063 = 0,2407e^{-j178,5} \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{2N} = 0,2146 - j0,1532 = 0,2635e^{-j35,5} \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{0M} = -0,1571 - j0,015 = 0,1577e^{j185,5} \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{0N} = 0,1485 - j0,09455 = 0,1762e^{-j32,5} \text{ кА.}$$

Перевіримо правильність розв'язку чотирьох рівнянь (2.12) - (2.15) за допомогою підстановки в одне з рівнянь, наприклад у рівняння (2.13), обчислених значень струмів $\dot{I}_{2M}$, $\dot{I}_{2N}$, $\dot{I}_{0M}$ і $\dot{I}_{0N}$:

$$\begin{aligned} & -j18,6(-0,2406 - j0,0063) + (4,15 - j2026,6)(-0,1571 - j0,015) - \\ & -j2708(0,1485 - j0,09455) = j4,475 - 0,0117 - 0,652 - j0,0062 + j318,4 - \\ & -30,4 - j402,14 - 256 = -287,17 - j79,33 = 297,5e^{j195,5} \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Порівнюючи отриманий результат з рівністю (2.13), ми бачимо їхній збіг - розв'язок рівнянь виконаний правильно.

Струми прямої послідовності $\dot{I}_{1M}$ й $\dot{I}_{1N}$ у місцях розриву фази A на лінії з боку M і з боку N (рис.2.12) визначаємо за формулами (2.5) і (2.6):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1M} &= -(\dot{I}_{2M} + \dot{I}_{0M}) = 0,2406 + j0,0063 + 0,1571 + j0,015 = \\ &= (0,3977 + j0,0213) \text{ кА,} \\ \dot{I}_{1N} &= -(\dot{I}_{2N} + \dot{I}_{0N}) = -0,2146 + j0,1532 + 0,1485 + j0,09455 = \\ &= (-0,3631 + j0,2477) \text{ кА.} \end{aligned}$$

Струми фази A всіх послідовностей у відгалуженні (у ємності лінії) визначаємо за формулою (2.7):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1\text{відг}} &= -(\dot{I}_{1M} + \dot{I}_{1N}) = -0,3977 - j0,0213 + 0,3631 - j0,2477 = \\ &= (-0,0346 - j0,269) \text{ кА,} \\ \dot{I}_{2\text{відг}} &= -(\dot{I}_{2M} + \dot{I}_{2N}) = 0,2496 + j0,0063 - 0,2146 + j0,1532 = \\ &= (0,026 + j0,1595) \text{ кА,} \\ \dot{I}_{0\text{відг}} &= -(\dot{I}_{0M} + \dot{I}_{0N}) = 0,1571 + j0,015 - 0,1485 + j0,09455 = \\ &= (0,0086 + j0,1095) \text{ кА.} \end{aligned}$$

2-6. При двосторонньому відключенні фази A лінії 500 кВ (рис.2.8 і рис.2.10) обчислити з урахуванням ємності лінії симетричні складові напруг на шинах M і N (точки R і Q), на обох кінцях лінії (у точках розриву S і P), а також повні фазні напруги на шинах M . Дані струмів обчислено в задачі 2-5, а параметри схеми наведені на рис.2.10.

Розв'язок. Визначаємо симетричні складові напруги фази A у точці d лінії (рис.2.10 і рис.2.12) точкою, що є точкою приєднання відгалуження (ємності) відповідно до Т-подібної схеми заміщення. Ці напруги визначаються падінням напруги на опорах відгалуження в схемах відповідних послідовностей:

$$\dot{U}_{A1\delta\delta z} = -\dot{I}_{A1\delta\delta z} Z_{1\delta\delta z} = (0,0346 + j0,269)(-j672) = (180,7 - j23,25) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{A2\delta\delta z} = -\dot{I}_{A2\delta\delta z} Z_{2\delta\delta z} = (-0,026 + j0,1595)(-j672) = (-107,1 + j17,5) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0\delta\delta z} = -\dot{I}_{0\delta\delta z} Z_{0\delta\delta z} = (-0,086 - j0,1095)(-j1018) = (-111,5 + j8,75) \text{ кВ}.$$

Симетричні складові напруги фази A в точці S лінії (рис.2.10 і рис.2.12) визначаємо за наступними виразами:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1S} &= \dot{U}_{A1\delta\delta z} + \dot{I}_{A1M} 0,5Z_{1l} = 180,7 - j23,25 + (0,3977 + j0,0213)(4,15 + \\ &+ j57,4) = (181,13 - j0,362) \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2S} &= \dot{U}_{A2\delta\delta z} + \dot{I}_{A2M} 0,5Z_{2l} = -107,1 + j17,5 + (0,2406 - j0,0063)(4,15 + \\ &+ j57,4) = (-107,734 + j3,674) \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0S} &= \dot{U}_{0\delta\delta z} + \dot{I}_{0M} 0,5Z_{0l} = -111,5 + j8,75 + (-0,1571 - j0,015)j191 = \\ &= (-108,64 - j21,25) \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Симетричні складові напруги фази A в точці R лінії визначаємо за наступними виразами:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1R} &= \dot{E}'_{A1} - \dot{I}_{A1M} Z_{1M} = 284,65 + j83 + (0,3977 + 0,0213)j128 = \\ &= (287,37 + j32,1) \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{A2R} = -\dot{I}_{A2M} Z_{2M} = (0,2406 + 0,0063)j146,6 = (-0,923 + j35,2) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0R} = -\dot{I}_{0M} Z_{0M} = (0,1571 + j0,015)j57 = (-0,855 + j8,95) \text{ кВ}.$$

Визначаємо повні напруги фаз на шинах M (точка R на рис.2.10 і рис.2.12):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AM} &= \dot{U}_{A1R} + \dot{U}_{A2R} + \dot{U}_{0R} = 287,37 + j32,1 - 0,923 + j35,2 - 0,855 + j8,95 = \\ &= 285,592 + j76,25 = 295,5e^{j15} \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BM} &= a^2 \dot{U}_{A1R} + a \dot{U}_{A2R} + \dot{U}_{0R} = (-0,5 - j0,867)(287,37 + j32,1) + (-0,5 + \\ &+ j0,867)(-0,923 + j35,2) + (-0,855 + j8,95) = -146,724 - j274,5 = \\ &= 311,5e^{-j118} \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{CM} &= a \dot{U}_{A1R} + a^2 \dot{U}_{A2R} + \dot{U}_{0R} = (-0,5 + j0,867)(287,37 + j32,1) + (-0,5 - \\ &- j0,867)(-0,923 + j35,2) + (-0,855 + j8,95) = -146,724 - j274,5 = \\ &= 266e^{j122} \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Визначаємо повні напруги фаз A , B і C на лінії біля шин M (точка S на рис.2.10 і рис.2.12):

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AS} &= \dot{U}_{A1S} + \dot{U}_{A2S} + \dot{U}_{0S} = 181,13 - j0,362 - 107,734 + j3,674 - 108,64 - \\ &- j21,25 = -35,244 - j17,938 = 39,7e^{j207} \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Напруги фаз B і C на лінії біля шин M (точка S) дорівнюють напругам цих фаз на шинах, тому що фази B і C не мають розриву. Перевіримо це твердження:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BS} &= a^2 \dot{U}_{A1S} + a \dot{U}_{A2S} + \dot{U}_{0S} = (-0,5 - j0,867)(181,13 - j0,362) + (-0,5 + \\ &+ j0,867)(-107,734 + j3,674) + (-108,64 - j21,25) = -148,844 - j273,3 = \\ &= 311e^{-j118,5} \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{CS} &= a \dot{U}_{A1S} + a^2 \dot{U}_{A2S} + \dot{U}_{0S} = (-0,5 + j0,867)(181,13 - j0,362) + (-0,5 - \\ &- j0,867)(-107,734 + j3,674) + (-108,64 - j21,25) = -141,836 + j227,5 = \\ &= 267,5e^{j122} \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Порівняння результатів розрахунків напруг фаз B і C на шинах M показує їхнє співпадіння.

Симетричні складові напруги фази A в точці P лінії визначаємо за виразами:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A1P} &= \dot{U}_{A1\delta\delta_2} + \dot{I}_{A1N} 0,5Z_{1л} = 180,7 - j23,25 + (-0,3631 + j0,2477)(4,15 + \\ &+ j57,4) = (164,994 - j43,022) \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A2P} &= \dot{U}_{A2\delta\delta_2} + \dot{I}_{A2N} 0,5Z_{2л} = -107,1 + j17,5 + (0,2146 - j0,1532)(4,15 + \\ &+ j57,4) = (-97,409 + j28,194) \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{0P} &= \dot{U}_{0\delta\delta_2} + \dot{I}_{0N} 0,5Z_{0л} = -111,5 + j8,75 + (0,1485 - j0,09455)j191 = \\ &= (-93,4 + j37,15) \text{ кВ}.\end{aligned}$$

2-7. При двосторонньому відключенні фази *A* лінії Л 500 кВ (рис.2.13) визначити симетричні складові струмів на обоїх її кінцях з урахуванням ємнісної провідності (лінії).

Вихідні дані наведені в [2] і зазначені на рис.2.13.

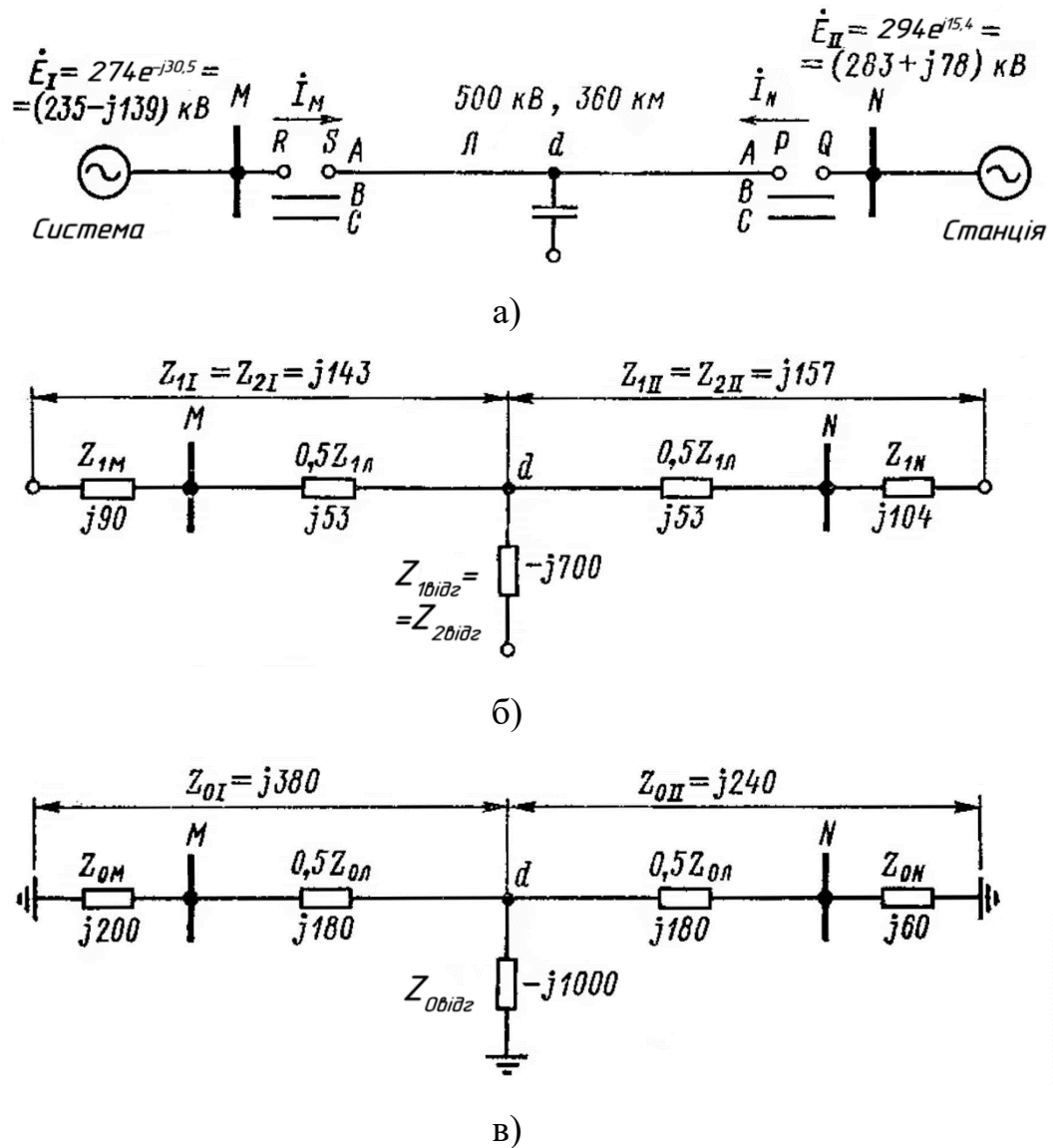


Рис.2.13. До задачі 2-7. Схеми електропередачі 500 кВ: *а* - вихідна, *б* - заміщення прямої (без ЕРС) і зворотної послідовності, *в* - нульової. (Значення опорів, приведені до напруги 500 кВ, зазначені в омах.)

Розв'язок. Розрахунки виконуємо за методом, наведеним в [9].
Комплексна схема заміщення для випадку двостороннього відключення однієї фази лінії з урахуванням її ємнісної провідності наведена на

рис.2.12. У цій схемі заміщення згідно з умовою задачі слід прийняти $Z_{1M} = Z_{2M}$ й $Z_{1N} = Z_{2N}$. Одержуємо:

$$\dot{I}_{A1M} = -\dot{I}_{A2M} - \dot{I}_{0M}, \quad (2.16)$$

$$\dot{I}_{A1N} = -\dot{I}_{A2N} - \dot{I}_{0N}, \quad (2.17)$$

$$\dot{I}_{A1\delta\delta_2} = -\dot{I}_{A1M} - \dot{I}_{A1N}, \quad (2.18)$$

$$\dot{I}_{A2\delta\delta_2} = -\dot{I}_{A2M} - \dot{I}_{A2N}, \quad (2.19)$$

$$\dot{I}_{0\delta\delta_2} = -\dot{I}_{0M} - \dot{I}_{0N}. \quad (2.20)$$

З рівностей (2.16) – (2.20) випливає, що для визначення симетричних складових усіх струмів необхідно обчислити струми $\dot{I}_{A2M}$, $\dot{I}_{A2N}$, $\dot{I}_{0M}$ і $\dot{I}_{0N}$. Згідно аналізу, наведеному в [9], при рівності опорів прямої і зворотної послідовності всіх елементів струми $\dot{I}_{0M}$ й $\dot{I}_{0N}$ обчислюються розв'язком наступних двох рівнянь, у яких для спрощення запису опущений індекс фази A в струмах і ЕРС:

$$(Z_{1I} + 2Z_{0I})\dot{I}_{0M} - (Z_{1II} + 2Z_{0II})\dot{I}_{0N} = \dot{E}_I - \dot{E}_{II}, \quad (2.21)$$

$$(Z_{1I} + 2Z_{0I} + Z_{1\delta\delta_2} + 2Z_{0\delta\delta_2})\dot{I}_{0M} + (Z_{1\delta\delta_2} + 2Z_{0\delta\delta_2})\dot{I}_{0N} = -\dot{E}_I. \quad (2.22)$$

Підставляємо чисельні значення в рівняння (2.21) і (2.22) відповідно до даних, наведених на рис.2.13:

$$(j143 + 2 \cdot j380)\dot{I}_{0M} - (j157 + 2 \cdot j240)\dot{I}_{0N} = 283 + j78 - 235 + j139$$

або

$$j903\dot{I}_{0M} - j637\dot{I}_{0N} = (48 + j217) \text{ кВ}, \quad (2.23)$$

$$(j143 + 2 \cdot j380 - j700 - 2 \cdot j1000)\dot{I}_{0M} + (-j700 - 2 \cdot j1000)\dot{I}_{0N} = -235 + j139$$

або

$$-j1797\dot{I}_{0M} - j2700\dot{I}_{0N} = (-235 + j139) \text{ кВ}. \quad (2.24)$$

У результаті розв'язку рівнянь (2.23) і (2.24) одержуємо:

$$\dot{I}_{0M} = 0,139 - j0,078 = 0,1594e^{-j29,3} \text{ кА}, \quad (2.25)$$

$$\dot{I}_{0N} = -0,1441 - j0,0351 = 0,1483e^{j193,7} \text{ кА.} \quad (2.26)$$

Обчисливши $\dot{I}_{0M}$ та $\dot{I}_{0N}$, значення $\dot{I}_{2M}$ й $\dot{I}_{2N}$ визначаємо з наступних двох рівнянь [9]:

$$3Z_{1I}\dot{I}_{2M} - 3Z_{1II}\dot{I}_{2N} + (Z_{1I} - Z_{0I})\dot{I}_{0M} - (Z_{1II} - Z_{0II})\dot{I}_{0N} = \dot{E}_{II} - \dot{E}_I, \quad (2.27)$$

$$3(Z_{1I} + Z_{1\delta})\dot{I}_{2M} + 3Z_{1\delta}\dot{I}_{2N} + (Z_{1II} - Z_{0I} + Z_{1\delta} + Z_{0\delta})\dot{I}_{0M} + \\ + (Z_{1\delta} - Z_{0\delta})\dot{I}_{0N} = -\dot{E}_I. \quad (2.28)$$

У рівняння (2.27) і (2.28) підставляємо значення струмів $\dot{I}_{0M}$ і $\dot{I}_{0N}$ з (2.25) і (2.26) та дані опорів і ЕРС, наведені на рис.2.13:

$$3 \cdot j143\dot{I}_{2M} - 3 \cdot j157\dot{I}_{2N} + (j143 - j380)(0,139 - j0,078) - (j157 - j240)(-0,1441 - j0,0351) = 283 + j78 - 235 + j139;$$

розкриваючи дужки, одержуємо:

$$j429\dot{I}_{2M} - j471\dot{I}_{2N} = (63,59 + j261,97) \text{ кВ,} \quad (2.29)$$

$$3(j143 - j700)\dot{I}_{2M} + 3(-j700)\dot{I}_{2N} + (j143 - j380 - j700 + j1000)(0,139 - j0,078) + (-j700 + j1000)(-0,1441 - j0,0351) = -235 + j139$$

або

$$-j1671\dot{I}_{2M} - j2100\dot{I}_{2N} = (-250,45 + j173,44) \text{ кВ.} \quad (2.30)$$

У результаті розв'язку рівнянь (2.29) і (2.30) знаходимо

$$\dot{I}_{2M} = 0,2775 - j0,149 = 0,3145e^{-j28,4} \text{ кА,}$$

$$\dot{I}_{2N} = -0,3036 - j0,0007 = 0,3038e^{j180} \text{ кА.}$$

Інші струми, показані на комплексній схемі заміщення, визначаємо з виразів (2.16) – (2.20) за обчисленими струмами $\dot{I}_{2M}$, $\dot{I}_{2N}$, $\dot{I}_{0M}$ і $\dot{I}_{0N}$:

$$\dot{I}_{1M} = -\dot{I}_{2M} - \dot{I}_{0M} = -0,2775 + j0,149 - 0,139 + j0,078 = (-0,4165 + j0,227) \text{ кА,}$$

$$\dot{I}_{1N} = -\dot{I}_{2N} - \dot{I}_{0N} = 0,3036 + j0,0007 + 0,1441 + j0,0351 = (0,4477 + j0,0358) \text{ кА,}$$

$$\dot{I}_{1\delta} = -\dot{I}_{1M} - \dot{I}_{1N} = 0,4165 - j0,227 - 0,4477 - j0,0358 = \\ = (-0,0312 - j0,2628) \text{ кА,}$$

$$\dot{I}_{2\partial\partial z} = -\dot{I}_{2M} - \dot{I}_{2N} = -0,2775 + j0,149 + 0,3036 + j0,0007 = \\ = (0,0261 + j0,1497) \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{0\partial\partial z} = -\dot{I}_{0M} - \dot{I}_{0N} = -0,139 + j0,078 + 0,1441 + j0,0351 = \\ = (0,0051 + j0,1131) \text{ кА}.$$

Повні струми фаз B і C лінії визначаються підсумовуванням струмів прямої, зворотної й нульової послідовності відповідних фаз за відомими виразами методу симетричних складових [10].

Для перевірки правильності виконаних обчислень підставимо значення $\dot{I}_{0M}$ і $\dot{I}_{0N}$, у рівність (2.24), а $\dot{I}_{2M}$ і $\dot{I}_{2N}$ - у рівність (2.29):

$$-j1797(0,139 - j0,078) - j2700(-0,1441 - j0,0351) = -j250 - 140,3 + \\ + j389 - 94,8 = (-235,1 + j139) \text{ кВ}, \quad (2.31)$$

$$j429(0,2775 - j0,149) - j471(-0,3036 - j0,0007) = j119 + 63,9 + \\ + j143 - 0,33 = (63,57 + j262) \text{ кВ}. \quad (2.32)$$

Результати (2.31) і (2.24), (2.32) і (2.29) збігаються, тобто обчислення виконані правильно.

Результати розв'язку цього завдання збігаються з даними, наведеними в задачі 2-1 [2].

Розв'язання даної задачі простіше за розв'язання задачі 2-5. У цій задачі двічі вирішувалися два рівняння (2.21), (2.22) і (2.27), (2.28) із двома невідомими, у той час як у задачі 2-5 вирішувалися чотири рівняння із чотирма невідомими. Зазначене спрощення розв'язання викликане тим, що в цій задачі опори всіх елементів у схемах прямої і зворотної послідовності прийняті однаковими. Це спрощення можливо, тому що похибка перебуває в допустимих межах.

2-8. За даними розрахунку струмів, наведеного в задачі 2-7, визначити симетричні складові напруги на шинах 500 кВ M і N , на лінії біля шин M і N , повздовжні напруги між точками R і S , P і Q (рис.2.13), а

також повні фазні напруги на шинах M та на лінії в точці S при двосторонньому відключенні фази A лінії.

Розв'язок. Визначаємо симетричні складові напруги в заданих точках за відомими ЕРС, струмами і опорами окремих елементів обходом віток у схемі кожної послідовності, починаючи з нульових потенціалів. Використовуємо комплексну схему всіх послідовностей, наведену на рис.2.12; значення ЕРС і опорів, необхідні для розрахунків, беремо за рис.2.13.

Визначаємо напруги фази A всіх послідовностей на шинах M (точка R):

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_I - \dot{I}_{A1M} Z_{1M} = 235 - j139 - (-0,4165 + j0,227)j90 = 235 - j139 + j37,4 + 20,4 = (255,4 - j101,6) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2M} Z_{2M} = -(0,2775 - j0,149)j90 = -13,4 - j24,95 = 28,3e^{j241,8} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{I}_{0M} Z_{0M} = -(0,139 - j0,078)j200 = -15,6 - j27,8 = 32e^{j241,7} \text{ кВ}.$$

Знаходимо напруги фази A всіх послідовностей у точці d лінії. Вони визначаються як падіння напруги на ємності лінії (представлений Т-подібною схемою заміщення):

$$\dot{U}_{A1d} = -\dot{I}_{A1\epsilon id\epsilon} Z_{1\epsilon id\epsilon} = -(-0,0312 - j0,2628)(-j700) = (184 - j21,8) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{A2d} = -\dot{I}_{A2\epsilon id\epsilon} Z_{2\epsilon id\epsilon} = -(0,0261 + j0,1497)(-j700) = (-105 + j18,3) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0d} = -\dot{I}_{0\epsilon id\epsilon} Z_{0\epsilon id\epsilon} = -(0,0051 + j0,1131)(-j1000) = (-113,1 + j5,1) \text{ кВ}.$$

Визначаємо напруги фази A всіх послідовностей на лінії біля підстанції M (точка S на рис.2.12 і рис.2.13):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1S} &= \dot{U}_{A1d} + \dot{I}_{A1M} 0,5Z_{1n} = 184 - j21,8 + (-0,4165 + j0,227)j53 = 172 - j43,9 = \\ &= 177,5e^{-j14,5} \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2S} &= \dot{U}_{A2d} + \dot{I}_{A2M} 0,5Z_{2n} = -105 + j18,3 + (0,2775 - j0,149)j53 = -97,1 + j33 = \\ &= 102,5e^{j161,2} \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0S} &= \dot{U}_{0d} + \dot{I}_{0M} 0,5Z_{0n} = -113,1 + j5,1 + (0,139 - j0,078)j180 = -99,1 + j30,1 = \\ &= 103,3e^{j173,2} \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Визначаємо симетричні складові повздовжніх напруг між точками R і S фази A в місці розриву:

$$\dot{U}_{A1RS} = \dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A1S} = 255,4 - j101,6 - 172 + j43,9 = (83,4 - j57,7) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{A2RS} = \dot{U}_{A2M} - \dot{U}_{A2S} = -13,4 - j24,95 + 97,1 - j33 = (83,7 - j57,95) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0RS} = \dot{U}_{0M} - \dot{U}_{0S} = -15,6 - j27,8 + 99,1 - j30,1 = (83,5 - j57,9) \text{ кВ}.$$

Обчислені значення симетричних складових у місці розриву (між точками R і S), рівні, отже, розрахунки проведені правильно.

Визначаємо напруги фази A всіх послідовностей на шинах N (точка Q на рис.2.12 і рис.2.13) за виразами:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1N} &= \dot{E}_{1I} - \dot{I}_{A1N} Z_{1N} = 283 + j78 - (0,4477 + j0,0358) j104 = 286,72 + j31,4 = \\ &= 288e^{j6,3} \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{A2N} = -\dot{I}_{A2N} Z_{2N} = -(-0,3036 - j0,0007) j104 = -0,0728 + j31,6 = 31,6e^{j90} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0N} = -\dot{I}_{0N} Z_{0N} = -(-0,1441 - j0,0351) j60 = -2,1 + j8,64 = 8,91e^{j103,6} \text{ кВ}.$$

Визначаємо напруги фази A всіх послідовностей на лінії біля підстанції N (точка P):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1P} &= \dot{U}_{A1d} + \dot{I}_{A1N} 0,5Z_{1n} = 184 - j21,8 + (0,4477 + j0,0358) j53 = 182,1 + j1,9 = \\ &= 182,2e^{j0} \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2P} &= \dot{U}_{A2d} + \dot{I}_{A2N} 0,5Z_{2n} = -105 + j18,3 + (-0,3036 - j0,0007) j53 = -104,963 + \\ &+ j2,23 = 105e^{j179} \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0P} &= \dot{U}_{0d} + \dot{I}_{0N} 0,5Z_{0n} = -113,1 + j5,1 + (-0,1441 - j0,0351) j180 = -106,8 - \\ &- j20,8 = 108,6e^{j191} \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Визначаємо симетричні складові повздовжніх напруг між точками P і Q фази A в місці розриву:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1PQ} &= \dot{U}_{A1P} - \dot{U}_{A1N} = 182,1 + j1,9 - 286,72 - j31,4 = -104,62 - j29,5 = \\ &= 108,7e^{j195,8} \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2PQ} &= \dot{U}_{A2P} - \dot{U}_{A2N} = -104,963 + j2,23 + 0,0728 - j31,6 = \\ &= (-104,8902 - j29,37) \text{ кВ}, \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{0PQ} = \dot{U}_{0P} - \dot{U}_{0N} = -106,8 - j20,8 + 2,1 - j8,64 = (-104,7 - j29,44) \text{ кВ.}$$

Визначаємо фазні напруги на шинах підстанції M :

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AM} &= \dot{U}_{A1M} + \dot{U}_{A2M} + \dot{U}_{0M} = 255,4 - j101,6 - 13,4 - j24,95 - 15,6 - j27,8 = \\ &= 226,4 - j154,35 = 274e^{-j34,3} \text{ кВ,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BM} &= \dot{U}_{B1M} + \dot{U}_{B2M} + \dot{U}_{0M} = a^2\dot{U}_{A1M} + a\dot{U}_{A2M} + \dot{U}_{0M} = (-0,5 - j0,867)(255,4 - \\ &- j101,6) + (-0,5 + j0,867)(-13,4 - j24,95) - 15,6 - j27,8 = -203,15 - j197,13 = \\ &= 282,5e^{-j136} \text{ кВ,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{CM} &= \dot{U}_{C1M} + \dot{U}_{C2M} + \dot{U}_{0M} = a\dot{U}_{A1M} + a^2\dot{U}_{A2M} + \dot{U}_{0M} = (-0,5 + j0,867)(255,4 - \\ &- j101,6) + (-0,5 - j0,867)(-13,4 - j24,95) - 15,6 - j27,8 = 70,1 + j268,07 = \\ &= 276,5e^{j104,6} \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Визначаємо фазні напруги на лінії в точці S :

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AS} &= \dot{U}_{A1S} + \dot{U}_{A2S} + \dot{U}_{0S} = 172 - j43,9 - 97,1 + j33 - 99,1 + j30,1 = \\ &= -24,2 + j19,2 = 30,85e^{j141,5} \text{ кВ,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BS} &= a^2\dot{U}_{A1S} + a\dot{U}_{A2S} + \dot{U}_{0S} = (-0,5 - j0,867)(172 - j43,9) + (-0,5 + \\ &+ j0,867)(-97,1 + j33) - 99,1 + j30,1 = (-203,15 - j197,55) \text{ кВ,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{CS} &= a\dot{U}_{A1S} + a^2\dot{U}_{A2S} + \dot{U}_{0S} = (-0,5 + j0,867)(172 - j43,9) + (-0,5 - \\ &- j0,867)(-97,1 + j33) - 99,1 + j30,1 = (-69,95 + j268,65) \text{ кВ.}\end{aligned}$$

Фазні напруги в точці S фаз B і C дорівнюють напругам цих фаз на шинах M , обчисленим вище. Розрахунки виконані правильно, оскільки обчислені напруги фаз B і C у точках M (на шинах) і S (на лінії біля шин M) збігаються.

2-9. На рис.2.14 наведена схема електропередачі потужності в енергосистему II від двох електростанцій I і III по лінії 220 кВ. Лінія MN має відгалуження в точці d , до якої підключена електростанція III . За вихідним даними, наведеними нижче, виконати розрахунки нормального режиму, необхідного для наступного розрахунків неповнофазного режиму.

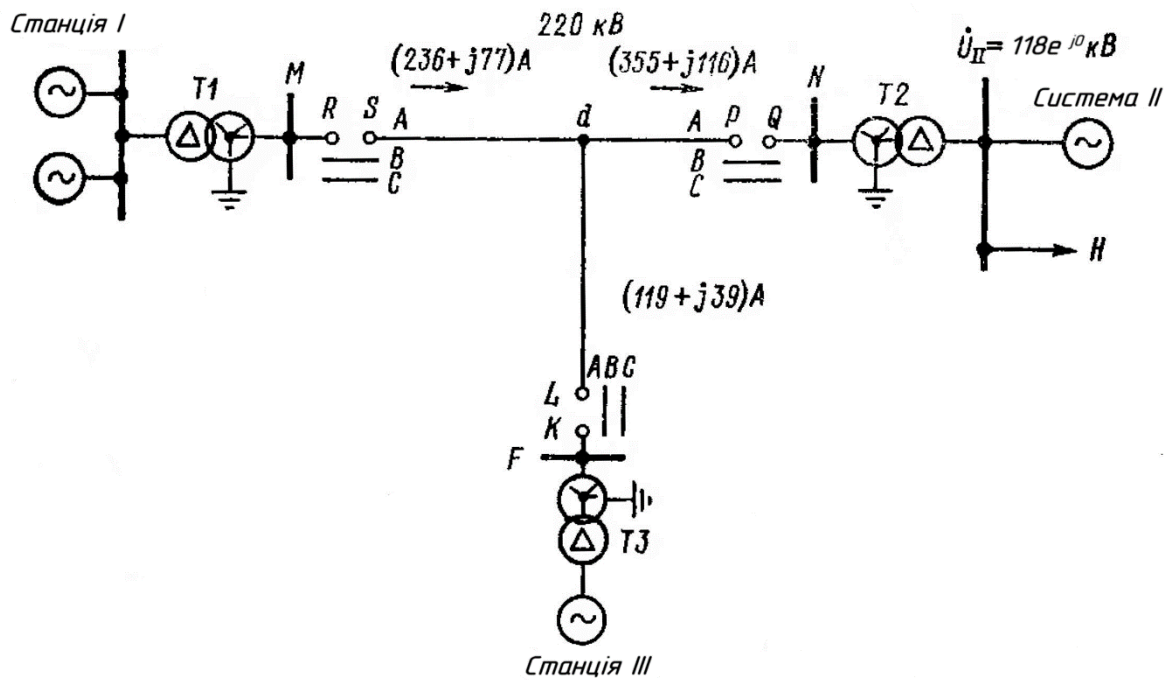


Рис.2.14. До задачі 2-9. Вихідна схема електропередачі по лінії з відгалуженням.

Вихідні дані. Електростанція I:

генератори 2×50 МВт, $\cos \varphi = 0,85$, $U_{ном} = 10,5$ кВ, $x_{*d}'' = 0,134$,
 $x_{*d}' = x_{*q}' = x_*' = 0,2$, $x_{*2} = 0,164$

трансформатор T1: 125 МВА, 10,5/242 кВ, $u_k = 12,7\%$.

Лінія 220 кВ: довжини ділянок $dM = 100$ км, $dL = 20$ км, $dN = 40$ км,
на всіх ділянках $x_{пит} = 0,4$ Ом/км, струми на ділянках наведені на рис.2.14;

трансформатор T2: 160 МВА, 220/121 кВ, $u_k = 13\%$.

Система II:

встановлена потужність $S_{вст} = 2300$ МВА, $x_{*d}' = 0,2$, $x_{*2} = x_{*d}'$

навантаження H: $S_H = 2000$ МВА, $\cos \varphi_H = 0,85$;

напруга на шинах 110 кВ $U_{II} = 118$ кВ.

Електростанція III:

генератор 50 МВт, $\cos \varphi = 0,85$, $U_{ном} = 10,5$ кВ, $x_{*d}'' = 0,134$,
 $x_{*d}' \approx x_{*q}' = x_*' = 0,2$, $x_{*2} = 0,164$

трансформатор $T3:63$ МВА, 10,5/231 кВ, $u_k = 12,5\%$.

При розрахунках нормального режиму визначається ЕРС генератора й системи за перехідними опорами. Можна приблизно вважати, що ці опори по повздовжній і поперечній осі генератора рівні між собою, тобто $x'_{*d} \approx x'_q = x'$. ЕРС генераторів у цьому випадку визначають за виразом

$$\dot{E}'_r = \dot{U} + j\dot{I}_r x'. \quad (2.33)$$

Ємністю лінії та намагнічуючими струмами трансформаторів можна знехтувати. Розрахунок виконується без врахування активних опорів окремих елементів (крім опору навантаження).

Розв'язок. Приймаємо напругу на шинах 110 кВ системи співпадаючою з дійсною віссю координат, тобто

$$\dot{U}_{II} = U_{II} e^{j0} = 118 e^{j0} \text{ кВ}. \quad (2.34)$$

Розрахунок нормального режиму полягає у визначенні струмів у всіх вітках схеми, напруг у вузлах енергосистем і на шинах підстанцій, а також ЕРС генераторів. У цьому випадку, оскільки задані струми, що протікають по лінії 220 кВ і по її відгалуженню, необхідно визначити струм від системи в навантаження Н, еквівалентний опір системи й навантаження до шин 110 кВ, напруги на шинах 220 кВ M , N і F , а також ЕРС (за перехідним опором) системи II і електростанцій I і III .

Оскільки нормальний режим є симетричним (трифазним, а отже, повнофазним), розрахунки виконуємо для фази A , при цьому струми і напруги фаз B і C будуть по модулю дорівнювати струму й напрузі фази A , а по фазі зміщені (убік відставання) на 120° і 240° відповідно.

Для спрощення записів нижче у всіх виразах опускаємо індекс фази A .

Визначаємо струм навантаження [11]:

$$\dot{I}_n = \frac{S_n^*}{\sqrt{3}U_{II}^*} = \frac{P_n - jQ_n}{\sqrt{3}U_{II}e^{-j\alpha}} = \frac{S_n \cos \varphi_n - jS_n \sin \varphi_n}{\sqrt{3}U_{II}e^{-j\alpha}} = \frac{2000 \cdot 0,85 - j2000 \cdot 0,53}{\sqrt{3} \cdot 118e^{j0}} =$$

$$= 8,32 - j5,2 = 9,82e^{-j32} \text{ кА},$$

де S^* й U^* - спряжені комплекси потужності й напруги.

Струм навантаження від системи дорівнює різниці струму навантаження й струму, що підтікає від електропередачі 220 кВ:

$$\dot{I}_{n,c} = \dot{I}_n - \dot{I}_{T2} = 8320 - j5200 - 646 - j212 = 7674 - j5412 = 9380e^{-j35} \text{ А}.$$

Визначаємо перехідний опір системи, приведений до напруги 115 кВ:

$$x'_c = \frac{x'_{*c}}{S_{вст}} = \frac{0,2 \cdot 115^2}{2300} = 1,148 \text{ Ом},$$

де $U = 115$ кВ - середня експлуатаційна напруга в мережі 110 кВ, зазвичай приймається в розрахунках.

Визначаємо фазну ЕРС системи за перехідним опором за формулою, аналогічній формулі (2.33):

$$\dot{E}'_c = \dot{U}_{II\phi} + j\dot{I}_{n,c}x'_c = 118000 : \sqrt{3} + 9380e^{-j35} \cdot 1,148e^{j90} = 68200 +$$

$$+ 9380e^{-j35} \cdot 1,148e^{j90} = 68200 + 9380 \cdot 1,148e^{j55} = 69200 + 6160 + j8810 =$$

$$= 74360 + j8810 = 74700e^{j6,8} \text{ В}.$$

Визначаємо опір навантаження S_n :

$$Z_n = \dot{U}_{II\phi} / \dot{I}_n = 118000 : (\sqrt{3} \cdot 9820e^{-j32}) = 6,94e^{j32} = (5,9 + j3,68) \text{ Ом}.$$

Об'єднуємо вітки системи з вітками навантаження в одну еквівалентну, використовуючи вирази:

$$\dot{E}'_{II} = \frac{\dot{E}'_c Z_n + \dot{E}'_n Z'_c}{Z_n + Z'_c} = \frac{74700e^{j6,8} \cdot 6,94e^{j32} + 0 \cdot j1,148}{5,9 + j3,68 + j1,148} = 67900e^{-j0,5} =$$

$$= (67900 - j590) \text{ В},$$

$$Z_{II} = \frac{Z_n Z'_c}{Z_n + Z'_c} = \frac{6,94e^{j32} \cdot 1,148e^{j90}}{7,62e^{j39,3}} = 1,046e^{j82,7} = (0,133 + j1,037) \text{ Ом}.$$

Приводимо ці величини до сторони 220 кВ:

$$E_{II220} = E'_{II} n_{T1} = 67900 e^{-j0,5} \cdot \frac{220}{121} = 123600 e^{-j0,5} = (123600 - j10680) \text{ В},$$

$$Z_{II220} = Z_{II} n_{T1}^2 = 1,046 e^{j82,7} \cdot \left(\frac{220}{121} \right)^2 = 3,46 e^{j82,7} = (0,441 + j3,43) \text{ Ом}.$$

Визначаємо опори трансформаторів і лінії електропередачі, приведені до напруги 220 кВ:

$$x_{T2} = \frac{u_{\kappa} U_{T2}^2}{S_{T2}} = \frac{0,13 \cdot 220^2}{160} = 39,3 \text{ Ом}, \quad x_{T3} = \frac{0,125 \cdot 231^2}{63} = 105,8 \text{ Ом},$$

$$x_{T1} = \frac{0,127 \cdot 242^2}{125} = 59,3 \text{ Ом}, \quad x_{ldN} = 40 \cdot 0,4 = 16 \text{ Ом},$$

$$x_{ldF} = 20 \cdot 0,4 = 8 \text{ Ом}, \quad x_{ldM} = 100 \cdot 0,4 = 40 \text{ Ом}.$$

Перехідні опори генераторів електростанцій *I* і *III*, приведені до напруги 220 кВ, визначаємо за виразом:

$$x' = \frac{x_* U_{ном.Г}^2}{\frac{P_{ном.Г}}{\cos \varphi_{ном.Г}}} n_T^2,$$

де x'_* - перехідний опір у відносних одиницях;

n_T - коефіцієнт трансформації трансформатора (від вищої напруги до нижчої).

Підставляючи в цю формулу чисельні значення для станцій *I* і *III*, отримуємо:

$$x'_I = \frac{0,2 \cdot 10,5^2}{\frac{2 \cdot 50}{0,85}} \left(\frac{242}{10,5} \right)^2 = 99,3 \text{ Ом},$$

$$x'_{III} = \frac{0,2 \cdot 10,5^2}{\frac{50}{0,85}} \left(\frac{231}{10,5} \right)^2 = 181,5 \text{ Ом}.$$

Визначаємо фазні напруги на шинах *N*, *M* і *F*, у точці *d* відгалуження лінії 220 кВ і ЕРС станцій *I* і *III* за перехідним опором, приведені до напруги 220 кВ:

$$\dot{U}_N = \dot{U}_{II\phi} n_{T2} + \dot{I}_{T2} Z_{T2} = \frac{118000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{220}{121} + (355 + j116) j39,3 = 124200 + j13950 - 4560 = 119640 + j13950 = 120300 e^{j6,6} \text{ В},$$

$$\dot{U}_d = \dot{U}_N + \dot{I}_{T2} Z_{ndN} = 119640 + j13950 + (355 + j116) j16 = (117785 + j19630) \text{ В},$$

$$\dot{U}_F = \dot{U}_d + \dot{I}_{T3} Z_{ndF} = 117785 + j19630 + (119 + j39) j8 = 117473 + j20582 = 119100 e^{j9,8} \text{ В},$$

$$\dot{E}'_{III} = \dot{U}_F + \dot{I}_{T3} j(x_{T3} + x'_{III}) = 117473 + j20582 + (119 + j39) j(105,8 + 181,5) = 106273 + j54732 = 119400 e^{j27,2} \text{ В},$$

$$\dot{U}_M = \dot{U}_d + \dot{I}_{T1} Z_{ndM} = 117785 + j19630 + (236 + j77) j40 = 114705 + j29070 = 118200 e^{j14,2} \text{ В},$$

$$\dot{E}'_I = \dot{U}_M + \dot{I}_{T1} j(x_{T1} + x'_I) = 114705 + j29070 + (236 + j77) j(59,3 + 99,3) = 102505 + j66470 = 122000 e^{j33} \text{ В}.$$

Результати розрахунків наведені на рис.2.15.

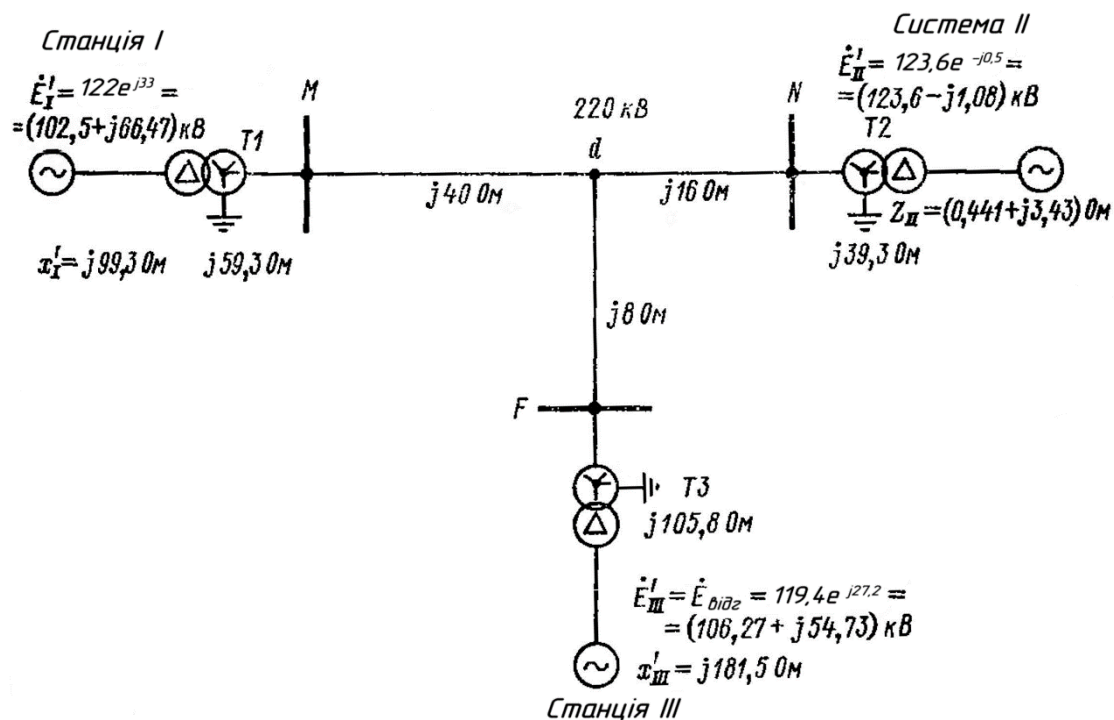


Рис.2.15. До задачі 2-9. Розрахункова схема нормального режиму. ЕРС. і опори приведено до напруги 220 кВ.

2-10. На рис.2.14 наведена схема електропередачі потужності в енергосистему II від електростанцій I і III по лінії 220 кВ. Визначити початкове значення симетричних складових перехідних струмів у лінії при тристоронньому відключенні фази A.

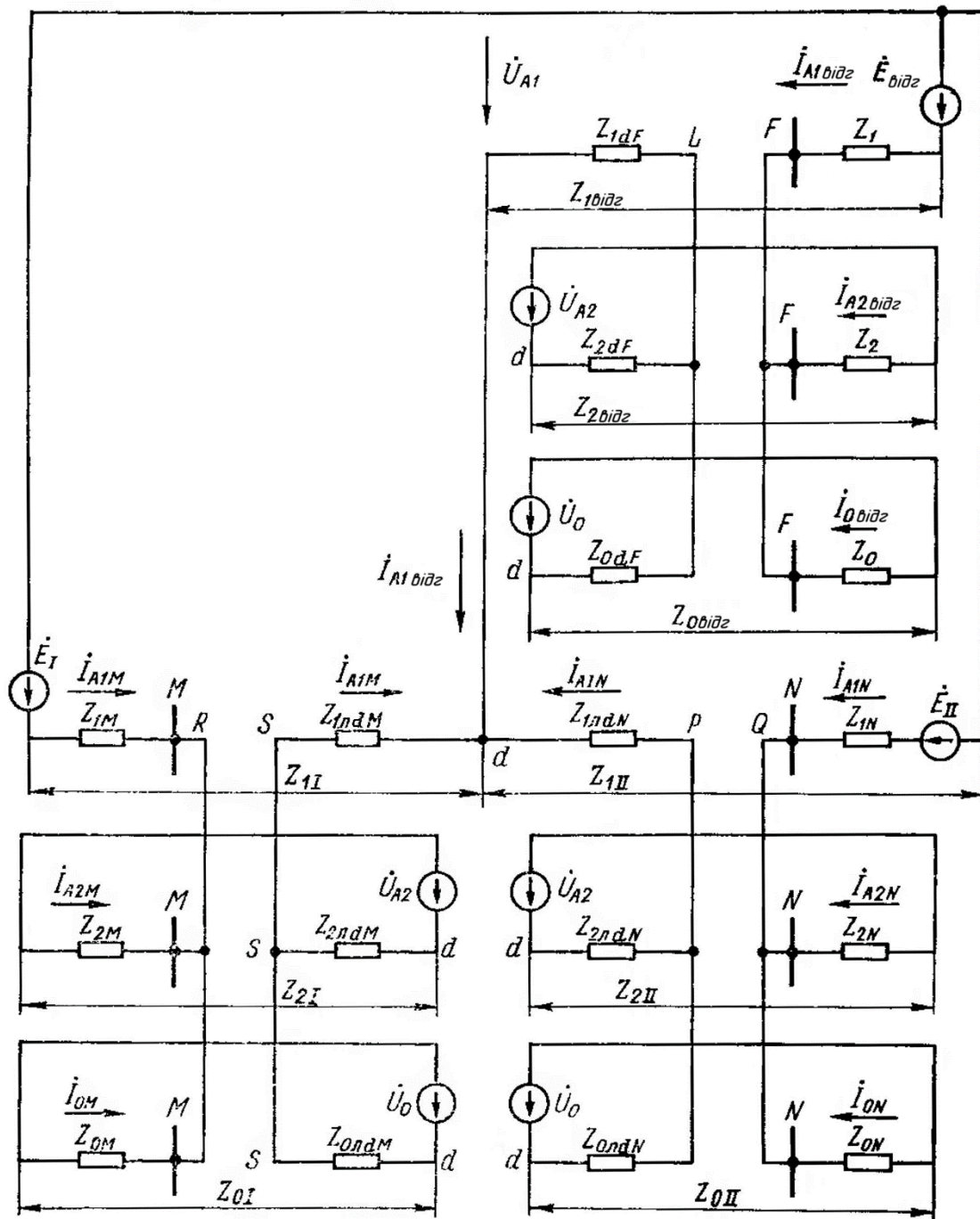


Рис.2.16. До задач 2-10 і 2-11. Комплексна схема заміщення неповнофазного режиму при тристоронньому відключенні однієї фази лінії з відгалуженням.

На рис.2.15 наведені перехідні ЕРС і опори прямої послідовності елементів передачі. При виконанні розрахунків ємністю лінії знехтувати, прийняти для всіх елементів опір зворотної послідовності рівним опору прямої послідовності, прийняти опір нульової послідовності лінії $x_{0,l} = 3,5x_{1,l}$.

Розв'язок. Розрахунки виконуємо методом, що наведений в [9]. Комплексна схема заміщення для неповнофазного режиму при тристоронньому відключенні однієї фази лінії з відгалуженням наведена на рис.2.16 (див. також задачу 2-5).

При рівності опорів прямої і зворотної послідовності струми $\dot{I}_{0M}$ та $\dot{I}_{0N}$ визначаються розв'язанням нижчеподаних рівнянь (2.35) і (2.36), Після цього визначаються струми $\dot{I}_{2M}$ та $\dot{I}_{2N}$ розв'язанням рівнянь (2.41) і (2.42) у даній задачі. Інші струми визначаються на підставі закону Кірхгофа для вузлів M , N і F за комплексною схемою на рис.2.16.

Спочатку обчислюємо допоміжні величини, необхідні для розрахунків, використовуючи дані, наведені на рис.2.15:

$$Z_{1M} = Z_{2M} = Z'_I + Z_{T1} = j(99,3 + 59,3) = j158,6 \text{ Ом},$$

$$Z_{0M} = Z_{T1} = j59,3 \text{ Ом},$$

$$Z_{1I} = Z_{2I} = Z_{1M} + Z_{1ldM} = j(158,6 + 40) = j198,6 \text{ Ом},$$

$$Z_{0I} = Z_{0M} + Z_{0ldM} = j(59,3 + 3,5 \cdot 40) = j199,3 \text{ Ом},$$

$$Z_{1N} = Z_{2N} = Z_{II} + Z_{T2} = 0,441 + j3,43 + j39,3 = (0,441 + j42,73) \text{ Ом},$$

$$Z_{0N} = Z_{T2} = j39,3 \text{ Ом},$$

$$Z_{1II} = Z_{2II} = Z_{1N} + Z_{1ldN} = 0,441 + j42,73 + j16 = 0,441 + j58,73 \approx j58,73 \text{ Ом},$$

$$Z_{0II} = Z_{0N} + Z_{0ldN} = j(39,3 + 3,5 \cdot 16) = j95,3 \text{ Ом},$$

$$Z_1 = Z_2 = Z'_{III} + Z_{T3} = j(181,5 + 105,8) = j287,3 \text{ Ом},$$

$$Z_0 = Z_{T3} = j105,8 \text{ Ом},$$

$$Z_{1\delta id\delta} = Z_{2\delta id\delta} = Z_1 + Z_{dF1} = j287,3 + j8 = j295,3 \text{ Ом},$$

$$Z_{0\epsilon idz} = Z_0 + Z_{dF0} = j(105,8 + 3,5 \cdot 8) = j133,8 \text{ Ом.}$$

Струми $\dot{I}_{0M}$ та $\dot{I}_{0N}$ визначаємо з наступних рівнянь:

$$(Z_{1I} + 2Z_{0I})\dot{I}_{0M} - (Z_{1II} + 2Z_{0II})\dot{I}_{0N} = \dot{E}'_{II} - \dot{E}'_I, \quad (2.35)$$

$$(Z_{1I} + 2Z_{0I} + Z_{1\epsilon idz} + 2Z_{0\epsilon idz})\dot{I}_{0M} + (Z_{1\epsilon idz} + 2Z_{0\epsilon idz})\dot{I}_{0N} = \dot{E}_{\epsilon idz} - \dot{E}'_I, \quad (2.36)$$

Підставивши чисельні значення в рівняння (2.35) і (2.36), знаходимо

$$(j198,6 + 2 \cdot j199,3)\dot{I}_{0M} - (j58,73 + 2 \cdot j95,3)\dot{I}_{0N} = (123,6 - j1,08 - 102,5 - j66,47) \text{ кВ}, \quad (2.37)$$

$$(198,6 + 2 \cdot j199,3 + 295,3 + 2 \cdot j133,8)\dot{I}_{0M} + (295,3 + 2 \cdot j133,8)\dot{I}_{0N} = (106,27 + j54,73 - 102,5 - j66,47) \text{ кВ}. \quad (2.38)$$

З рівнянь (2.37) і (2.38), виконуючи обчислення, отримуємо:

$$j597,2\dot{I}_{0M} - j249,33\dot{I}_{0N} = (21,1 - j67,55) \text{ кВ}, \quad (2.39)$$

$$j1160,1\dot{I}_{0M} + j562,9\dot{I}_{0N} = (3,77 - j11,74) \text{ кВ}. \quad (2.40)$$

У результаті розв'язання рівнянь (2.39) і (2.40) отримуємо:

$$\dot{I}_{0M} = (-0,0655 + j0,0205) \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{0N} = (0,114 + j0,0355) \text{ кА}.$$

Перевіримо правильність розв'язку рівнянь (2.39) і (2.40) підстановкою значень $\dot{I}_{0M}$ і $\dot{I}_{0N}$ в рівняння (2.40):

$$j1160,1(-0,0655 - j0,0205) + j562,9(0,114 + j0,0355) = -j76 + 23,8 + j64,2 - 20 = (3,8 - j11,8) \text{ кВ}.$$

Розрахунок виконаний правильно: результат збігається із правою частиною рівняння (2.40).

Після того як обчислені струми $\dot{I}_{0M}$ та $\dot{I}_{0N}$, струми $\dot{I}_{2M}$ та $\dot{I}_{2N}$ визначаються з наступних двох рівнянь [9]:

$$3Z_{1I}\dot{I}_{2M} - 3Z_{1II}\dot{I}_{2N} + (Z_{1I} - Z_{0I})\dot{I}_{0M} - (Z_{1II} - Z_{0II})\dot{I}_{0N} = \dot{E}'_{II} - \dot{E}'_I, \quad (2.41)$$

$$3(Z_{1I} + Z_{1\epsilon idz})\dot{I}_{2M} + 3Z_{1\epsilon idz}\dot{I}_{2N} + (Z_{1I} - Z_{0I} + Z_{1\epsilon idz} - Z_{0\epsilon idz})\dot{I}_{0M} + (Z_{1\epsilon idz} - Z_{0\epsilon idz})\dot{I}_{0N} = \dot{E}_{\epsilon idz} - \dot{E}'_I. \quad (2.42)$$

Підставляємо в (2.41) і (2.42) значення опорів і струмів $\dot{I}_{0M}$ і $\dot{I}_{0N}$

$$3 \cdot j198,6\dot{I}_{2M} - 3 \cdot j58,73\dot{I}_{2N} + j(198,6 - 199,3)(-0,0655 - j0,0205) - j(58,73 - 95,3)(0,114 + j0,0355) = \quad (2.43)$$

$$= (123,6 - j1,08 - 102,5 - j66,47) \text{ кВ},$$

$$3 \cdot j(198,6 + 295,3)\dot{I}_{2M} + 3 \cdot j295,3\dot{I}_{2N} + j(198,6 - 199,3 + 295,3 - 133,8)(-0,0655 - j0,0205) + j(295,5 - 133,8)(0,114 + j0,0355) = \quad (2.44)$$

$$= (106,27 + j54,73 - 102,5 - j66,47) \text{ кВ}.$$

Спростуємо рівняння (2.43) і (2.44):

$$j595,8\dot{I}_{2M} - j176\dot{I}_{2N} = (22,414 - j71,466) \text{ кВ}, \quad (2.45)$$

$$j1482\dot{I}_{2M} + j885,9\dot{I}_{2N} = (6,21 - j19,65) \text{ кВ}. \quad (2.46)$$

У результаті розв'язання рівнянь (2.45) і (2.46) одержуємо:

$$\dot{I}_{2M} = (-0,085 - j0,02656) \text{ кА}, \quad (2.47)$$

$$\dot{I}_{2N} = (0,12 + j0,0374) \text{ кА}. \quad (2.48)$$

Перевіримо правильність розв'язання рівнянь (2.45) і (2.46) підстановкою значень $\dot{I}_{2M}$ і $\dot{I}_{2N}$ з (2.47) і (2.48) в (2.46):

$$j1482(-0,085 - j0,02656) + j885,9(0,121 + j0,0374) = (-j126 + 39,4 + j106,4 - 33,2) = (6,2 - j19,6) \text{ кВ}.$$

Обчислення виконані правильно, тому що результат збігається із правою частиною рівняння (2.46).

Струми $\dot{I}_{1M}$ й $\dot{I}_{1N}$ визначаємо з умови рівності нулю повного струму розірваної фази A (рис.2.16):

$$\dot{I}_{1M} = -\dot{I}_{2M} - \dot{I}_{0M} = 0,085 + j0,02656 + 0,0655 + j0,0205 =$$

$$= (0,1505 + j0,04706) \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{1N} = -\dot{I}_{2N} - \dot{I}_{0N} = -0,12 - j0,0374 - 0,114 - j0,0355 = (-0,234 - j0,0729) \text{ кА}.$$

У відповідності зі схемами окремих послідовностей для лінії з відгалуженням, представленими на рис.2.11, струми всіх трьох послідовностей у відгалуженні визначаються виразом

$$\dot{I}_{\text{від}\alpha} = -\dot{I}_{M\alpha} - \dot{I}_{N\alpha},$$

де $\alpha = 1, 2, 0$ - номер послідовності.

Таким чином:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{1\text{від}2} &= -\dot{I}_{1M} - \dot{I}_{1N} = -0,1505 - j0,04706 + 0,234 + j0,729 = \\ &= (0,0835 + j0,02584) \text{ кА},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{2\text{від}2} &= -\dot{I}_{2M} - \dot{I}_{2N} = 0,085 + j0,02656 - 0,12 - j0,0374 = \\ &= (-0,035 - j0,01084) \text{ кА},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{0\text{від}2} &= -\dot{I}_{0M} - \dot{I}_{0N} = 0,0655 + j0,0205 - 0,114 - j0,0355 = \\ &= (-0,0485 - j0,015) \text{ кА}.\end{aligned}$$

2-11. У задачі 2-10 за вихідним даними, наведеними на рис.2.15, обчислені симетричні складові струмів у лінії *MFN* з відгалуженням у точці *d* при тристоронньому відключенні фази *A*. За значеннями цих складових, а також за даними, наведеними у задачі 2-10, обчислити симетричні складові напруг біля шин *M* і по обидва боки місць обриву (на шинах і на лінії) фази *A* на лінії із тристороннім живленням.

Для розглянутої лінії питома ємність у схемі прямої і зворотної послідовності

$$C_{\text{роб}} = C_0 + 3C_{\text{мф}} = 0,0086 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км},$$

де C_0 - питома ємність проводів відносно землі (у схемі нульової послідовності),

$C_{\text{мф}}$ - питома ємність між проводами (див. задачу 2-1 і 2-3);

$$C_0 = 0,0057 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км}, \quad \lambda = \frac{C_0}{C_{\text{роб}}} = \frac{0,0057 \cdot 10^{-6}}{0,0086 \cdot 10^{-6}} = 0,663.$$

Розв'язок. Для визначення напруг на шинах *M* та на лінії біля цих шин необхідно спочатку обчислити напруги симетричних складових на лінії в точці *d* відгалуження (рис.2.15 і рис.2.16). Напруга в будь-якій точці справної фази лінії, відключеної із трьох сторін, визначається відповідними напругами в цій точці на працюючих фазах і ємнісними

провідностями лінії в схемах прямої і нульової послідовності (див. задачу 2-3).

Фізично напруга на відключеній фазі лінії має місце внаслідок ємнісного зв'язку з фазами лінії, що залишилися в роботі, (вони перебувають під напругою й по них протікає струм навантаження).

Після обчислення симетричних складових напруг у точці d лінії визначаються напруги на лінії й на шинах зі схеми заміщення рис.2.16 за відомими струмами

$$\dot{I}_{0M} = (-0,0655 - j0,0205) \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{1M} = (0,1505 + j0,04706) \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{2M} = (-0,085 - j0,02656) \text{ кА}.$$

Необхідні значення опорів елементів і ЕРС станцій і системи беремо із задачі 2-10, у якій обчислювалися симетричні складові струмів.

Визначаємо симетричні складові напруги фази A в точці d відгалуження лінії за виразами, наведеними в [9]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{d1} &= \frac{1+\lambda}{2+\lambda} \left(\dot{E}_I' - Z_{1I} \dot{I}_{1M} + \frac{1}{1+\lambda} Z_{2I} \dot{I}_{2M} + \frac{\lambda}{1+\lambda} Z_{0I} \dot{I}_{0M} \right) = \\ &= \frac{1+0,663}{2+0,663} [102,5 + j66,47 - j198,6(0,1505 + j0,04706) + \\ &+ \frac{1}{1+0,663} \cdot j198,6(-0,085 - j0,02656) + \frac{0,663}{1+0,663} \cdot j199,3(-0,655 - \\ &- j0,0205)] = (72,7 + j13,23) \text{ кВ}, \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{d2} &= -\frac{1}{2+\lambda} \left(\dot{E}_I' - Z_{1I} \dot{I}_{1M} + Z_{2I} \dot{I}_{2M} - \lambda Z_{0I} \dot{I}_{0M} \right) = -\frac{1}{2+0,663} [102,5 + \\ &+ j66,47 - j198,6(0,1505 + j0,04706) + j198,6(-0,085 - \\ &- j0,02656) - 0,663 \cdot j199,3(-0,655 - j0,0205)] = (-42,9 - j10,6) \text{ кВ}, \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{d0} &= -\frac{1}{2+\lambda} \left(\dot{E}_I' - Z_{1I} \dot{I}_{1M} - Z_{2I} \dot{I}_{2M} + Z_{0I} \dot{I}_{0M} \right) = -\frac{1}{2+0,663} [102,5 + \\ &+ j66,47 - j198,6(0,1505 + j0,04706) - j198,6(-0,085 - \\ &- j0,02656) + j199,3(-0,655 - j0,0205)] = (-41,4 - j15,2) \text{ кВ}. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Якщо для реальних ліній коефіцієнт λ невідомий, то згідно [12] для ліній 220 - 500 кВ цей коефіцієнт можна приймати рівним приблизно 0,7. За обчисленими напругами симетричних складових у точці d відгалуження лінії відповідно до комплексної схеми заміщення, наведеної на рис.2.16, визначаємо симетричні складові напруг по обидві сторони місця розриву фази A лінії біля шин M .

Симетричні складові напруг на лінії біля шин M (у точці S) визначаються виразами

$$\begin{aligned}\dot{U}_{S1} &= \dot{U}_{d1} + \dot{I}_{1M} Z_{1ldM} = 72,7 + j13,23 + (0,1505 + j0,04706) j40 = \\ &= (70,82 + j19,25) \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{S2} &= \dot{U}_{d2} + \dot{I}_{2M} Z_{2ldM} = -42,9 - j10,6 + (-0,085 - j0,02656) j40 = \\ &= (-41,84 - j14,0) \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{S0} &= \dot{U}_{d0} + \dot{I}_{0M} Z_{0ldM} = -41,4 - j15,2 + (-0,0655 - j0,0205) j140 = \\ &= (-38,54 - j24,37) \text{ кВ}.\end{aligned}$$

Симетричні складові напруг на шинах M визначаються виразами

$$\begin{aligned}\dot{U}_{M1} &= \dot{E}'_I - \dot{I}_{1M} Z_{1M} = 102,5 + j66,47 - (0,1505 + j0,4706) j158,6 = \\ &= (109,95 + j42,57) \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{M2} = -\dot{I}_{2M} Z_{2M} = -(-0,085 - j0,02656) j158,6 = (-4,22 + j13,5) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{M0} = -\dot{I}_{0M} Z_{0M} = -(-0,0655 - j0,0205) j59,3 = (-1,215 + j3,88) \text{ кВ}.$$

Визначаємо повздовжні симетричні складові напруг у місці розриву біля шин M між точками R і S :

$$\begin{aligned}\dot{U}_{RS1} &= \dot{U}_{M1} - \dot{U}_{S1} = 109,95 + j42,57 - 70,82 - j19,25 = 39,13 + j23,37 = \\ &= 46,3e^{j31} \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{RS2} &= \dot{U}_{M2} - \dot{U}_{S2} = -4,22 + j13,5 + 41,84 + j13,99 = 37,62 + j27,44 = \\ &= 46,6e^{j36} \text{ кВ},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{RS0} &= \dot{U}_{M0} - \dot{U}_{S0} = -1,215 + j3,88 + 38,54 + j24,37 = 37,33 + j28,25 = \\ &= 46,9e^{j37} \text{ кВ}.\end{aligned}$$

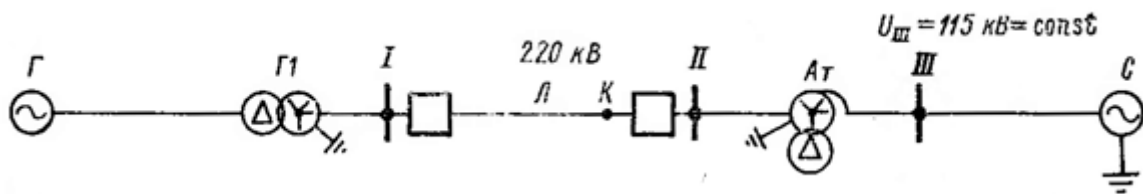
Аналогічно обчислюються напруги біля шин F і N . За симетричними складовими струмів і напруг можуть бути обчислені повні струми й напруги, а за ними і комплекси опорів.

Глава третя

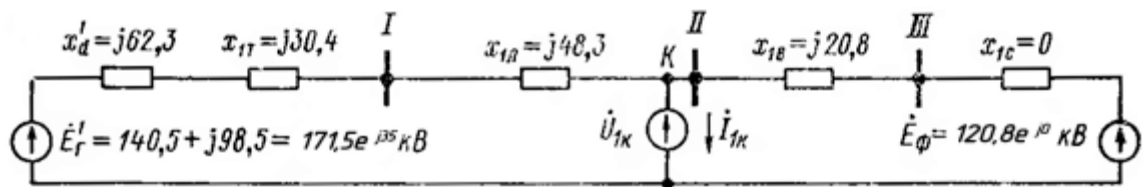
КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ З ОДНОЧАСНИМ ОБРИВОМ ФАЗ НА ЛІНІЯХ ІЗ ДВОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ

3-1. На рис.3.1,*а* наведена схема передачі потужності від електростанції *Г* у систему *С* по лінії *Л* 220 кВ. Напруга на шинах *III* 110 кВ у вузлі системи

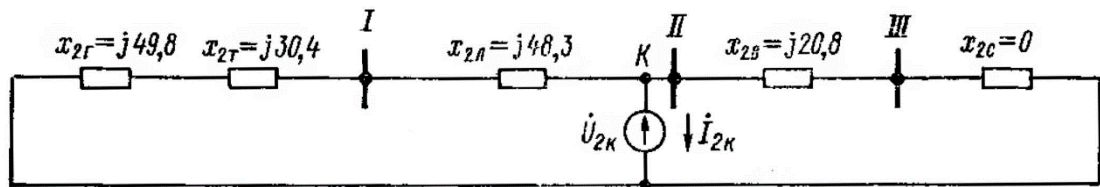
системи підтримується практично незмінною і рівною 115 кВ.



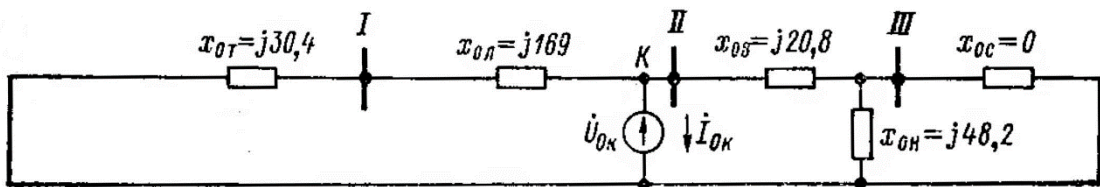
а)



б)



в)



г)

Рис.3.1. До задачі 3-1: *а* - вихідна схема, *б* - схема заміщення прямої послідовності, *в* - зворотної, *г* - нульової.
Значення опорів, приведені до ступеня напруги 220 кВ, зазначені в омах.

Для цієї схеми виконати розрахунки нормального режиму, за даними якого можна було б обчислювати початкові значення перехідного струму (діюче значення періодичної складової) при КЗ. Скласти схеми заміщення при КЗ на землю в мережі 220 кВ біля шин II (точка K) і вказати на особливості схеми нульової послідовності.

Вихідні дані.

Генератор Г:

235 МВА, $\cos\varphi = 0,85$, $U_{\text{ном}} = 11$ кВ, $x'_d = 25\%$, $x_2 = 20\%$.

Підвищувальний трансформатор Т:

250 МВА, 11/242 кВ, $u_k = 13\%$, ∇/Δ - 11.

Лінія Л:

$l = 115$ км, $x_{\text{літ}} = 0,42$ Ом/км, $x_{0\text{літ}} = 1,47$ Ом/км.

Понижувальний автотрансформатор АТ:

прохідна потужність 240 МВА, 220/121/11 кВ, ∇/Δ - 11,

$u_{\text{кВН-СН}} = 10,2\%$, $u_{\text{кВН-НН}} = 34,2\%$, $u_{\text{кСН-НН}} = 23,8\%$ - напруги КЗ (віднесені до прохідної потужності) між сторонами вищої й середньої, вищої й нижчої, середньої й нижчої напруги відповідно.

Потужність, передана у вузол системи на шини 110 кВ, $S = P + jQ = (220 + j44)$ МВА при напрузі 115 кВ. Нейтралі трансформатора, автотрансформатора й системи С заземлені наглухо.

Значення величин, що розраховуються, приводити до ступеня напруги 220 кВ. При обчисленні перехідної ЕРС генератора $\dot{E}'_G$ прийняти однаковими його перехідні опори по повздовжній і поперечній осі, тобто $x'_d \approx x'_q$ і $\dot{E}'_G = \dot{U} + j\dot{I}_G x'_d$.

Навантаження на стороні 11 кВ автотрансформатора відсутнє.

Розв'язок. Обчислюємо індуктивні опори всіх елементів схеми:
опори генератора

$$x'_d = \frac{x'_d \% U_{ном}^2}{100 S_{ном}} n_T^2 = \frac{25 \cdot 11^2}{100 \cdot 235} \left(\frac{242}{11} \right)^2 = 62,3 \text{ Ом},$$

$$x_{2Г} = \frac{20 \cdot 11^2}{100 \cdot 235} \left(\frac{242}{11} \right)^2 = 49,8 \text{ Ом};$$

трансформатора

$$x_T = \frac{u_{\kappa} \% U_{ном}^2}{100 S_{ном}} n_T^2 = \frac{13 \cdot 242^2}{100 \cdot 250} = 30,4 \text{ Ом};$$

лінії Л

$$x_{1л} = x_{1лн} l = 0,42 \cdot 115 = 48,3 \text{ Ом}, \quad x_{0л} = x_{0лн} l = 1,47 \cdot 115 = 169 \text{ Ом}.$$

Оскільки напруга на шинах 110 кВ вузла системи, до якого підключена електропередача, підтримується практично незмінною, то можна прийняти, що опори всіх послідовностей системи дорівнюють нулю, тобто $x_{1c} = x_{2c} = x_{0c} = 0$.

Визначаємо індуктивні опори автотрансформатора в схемі його заміщення у вигляді трипроменевої зірки. Опори променів вищої, середньої й нижчої напруг визначаємо за наступними виразами:

$$x_B = 0,5(u_{\kappa BH-CH} + u_{\kappa BH-HH} - u_{\kappa CH-HH}) \frac{U_{ном}^2}{100 S_{ном}} = 0,5(10,2 + 34,2 -$$

$$-23,8) \frac{220^2}{100 \cdot 240} = 20,8 \text{ Ом},$$

$$x_C = 0,5(u_{\kappa BH-CH} + u_{\kappa CH-HH} - u_{\kappa BH-HH}) \frac{220^2}{100 \cdot 240} = -0,2 \approx 0,$$

$$x_H = 0,5(u_{\kappa BH-HH} + u_{\kappa CH-HH} - u_{\kappa BH-CH}) \frac{220^2}{100 \cdot 240} = 48,2 \text{ Ом}.$$

Для визначення перехідної ЕРС генератора в нормальному режимі обчислимо струм в електропередачі, прийнявши напругу на шинах III 110 кВ співпадаючою з віссю дійсних, тобто

$$\dot{E}_{\phi} = \dot{U}_{III\phi} = U_{III\phi} e^{j0} = \frac{115}{\sqrt{3}} n_{AT} = \frac{115}{\sqrt{3}} \cdot \frac{220}{121} = 120,8 \text{ кВ}.$$

Струм в електропередачі [11]

$$\dot{I}_n = \frac{S^*}{\sqrt{3}U_{\text{мф}} n_{AT}} = \frac{220 - j44}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot \frac{220}{121}} = 0,608 - j0,1217 = 0,621e^{-j11,3} \text{ кА},$$

де S^* - спряжений комплекс трифазної потужності,

$\dot{I}_n$ - комплекс струму, приведений до ступеня напруги 220 кВ.

Фазну перехідну ЕРС генератора в нормальному режимі, приведену до ступеня напруги 220 кВ, визначаємо за виразом:

$$\dot{E}_\Gamma = \dot{U}_{\text{III}\phi} + \dot{I}_n Z_{1\Sigma} = \dot{U}_{\text{III}\phi} + j\dot{I}_n (x_{AT} + x_{1л} + x'_d) = 120,8 + (0,608 - j0,1217)j(20,8 + 48,3 + 30,4 + 62,3) = 140,5 + j98,5 = 171,5e^{j35} \text{ кВ}.$$

Визначимо також фазні й міжфазні напруги на кінцях лінії Л 220 кВ:

$$\dot{U}_{\text{II}\phi} = \dot{U}_{\text{III}\phi} + \dot{I}_n Z_{AT} = 120,8 + (0,608 - j0,1217)j20,8 = 123,33 + j12,65 = 123,8e^{j5,9} \text{ кВ},$$

$$U_{\text{II}\phi} = \sqrt{3} \cdot 123,8 = 214 \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{I\phi} = \dot{U}_{\text{III}\phi} + \dot{I}_n (Z_{AT} + Z_{1л}) = 120,8 + (0,608 - j0,1217)j(20,8 + 43,3) = 129,2 + j42 = 136e^{j18} \text{ кВ},$$

$$U_{I\phi} = \sqrt{3} \cdot 136 = 235 \text{ кВ}.$$

На рис.3.1 наведені схеми заміщення прямої, зворотної й нульової послідовності, на яких зазначені обчислені значення. У даній задачі ми з'ясували, що опір променя середньої напруги досить малий й практично може бути прирівняний до нуля, тобто ($x_c \approx 0$). У цьому випадку опір променя, з'єднаного із заземленою нейтраллю, $x_{0н}$ у схемі заміщення виявляється закороченим променем середньої напруги ($x_c \approx 0$), і тому струм нульової послідовності через нейтраль автотрансформатора протікати не буде. Таким чином, у схемах заміщення всіх послідовностей (рис.3.1) необхідно враховувати тільки опір променя вищої напруги автотрансформатора.

3-2. При відключенні вимикачем $B1$ (рис.3.2) фази A , яка металеві замкнулася на землю на відстані 35 км від шин I 220 кВ, обчислити початкові значення симетричних складових і повних перехідних струмів у місці КЗ і в неушкоджених фазах лінії.

Привести також розрахункові вирази при обриві фази A та металевому замиканні на землю фази B або C .

Розглядається складний вид ушкодження - однофазне КЗ з одночасним обривом тієї ж фази. Даний складний вид ушкодження може мати місце: при однофазному КЗ і каскадному (послідовному в часі) відключенні фази вимикачами $B1$ і $B2$; при неодноразовому включенні пристроями однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) фази A вимикачами $B1$ і $B2$ на стійке однофазне КЗ; при обриві проводу й замиканні на землю одного з його обірваних кінців.

Зазначені струми, а також напруги на кінцях лінії й на шинах I і II необхідні для аналізу роботи пристроїв релейного захисту й ОАПВ у зазначеному режимі передачі.

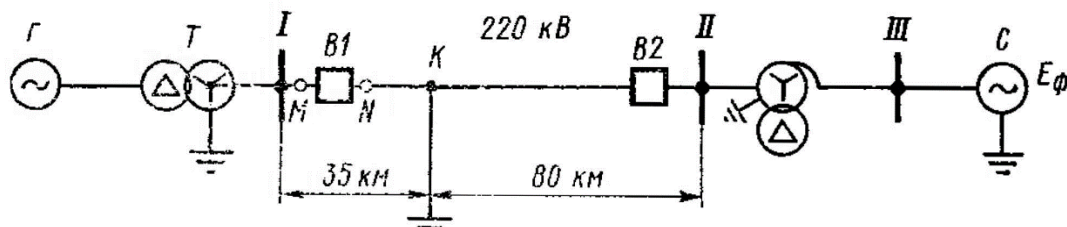


Рис.3.2. Вихідна схема для розрахунків коротких замикань із одночасним обривом фаз.

Вихідні дані елементів схеми передачі обчислено в задачі 3-1, крім ділянок лінії L від шин до місця однофазного КЗ.

Розв'язок. Розрахунки будь-якого складного виду ушкодження доцільно вести з використанням теорії симетричних складових. Задачу вирішуємо за допомогою розрахункових виразів, наведених нижче. Цей метод є універсальним.

На рис.3.3 наведені схеми заміщення прямої, зворотної й нульової послідовності для складного виду ушкодження.

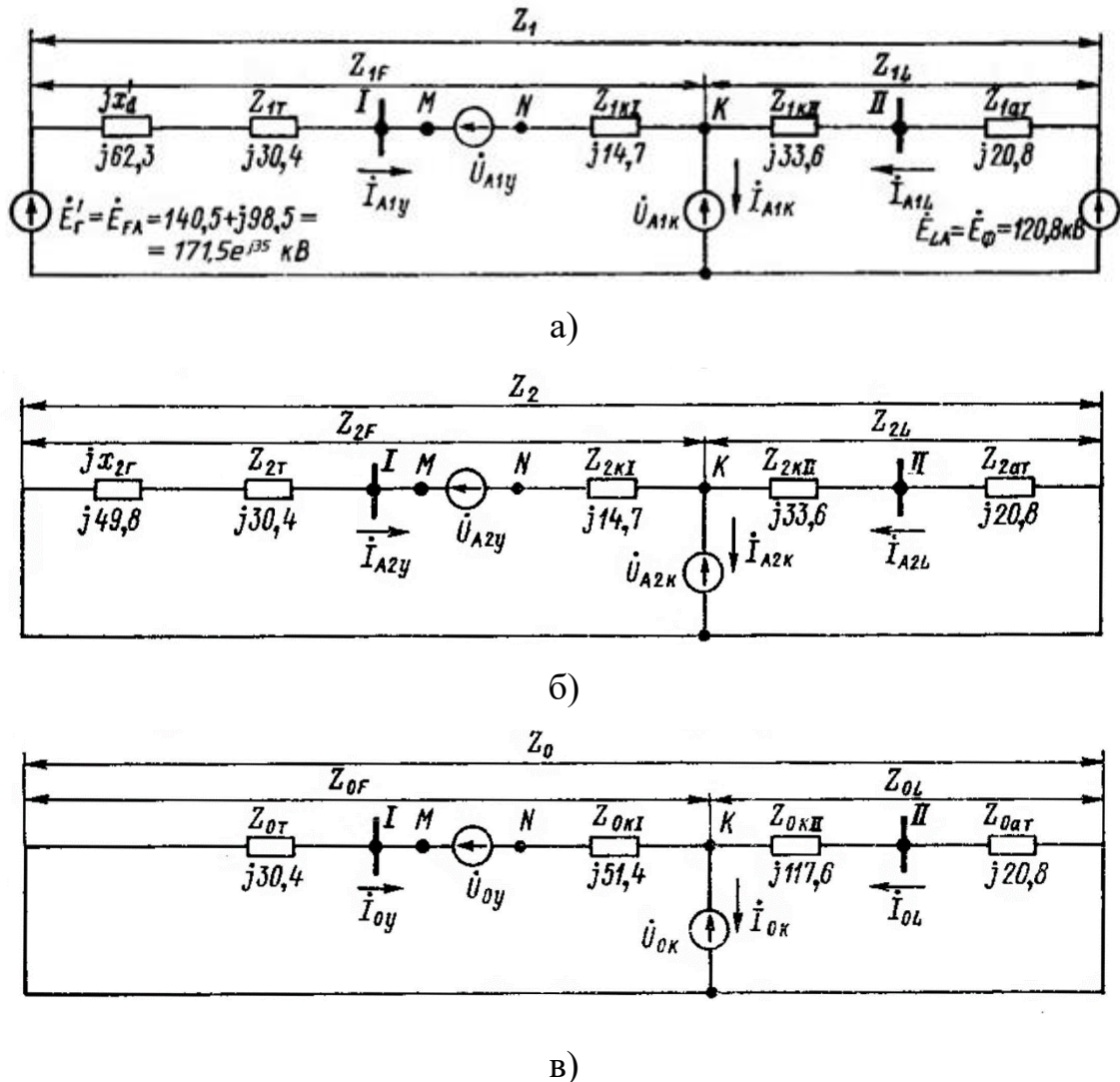


Рис.3.3. Схеми заміщення при КЗ на землю з одночасним обривом фаз на передачі (рис.3.2): а - прямої послідовності, б - зворотної, в - нульової.

Значення опорів, приведені до напруги 220 кВ, зазначені в омах.

Із цих схем випливає, що необхідно визначити дванадцять невідомих величин - по три симетричні складові струмів і напруг у кожному місці несиметрії (точка K і точки M та N):

$$\dot{I}_{1K}, \dot{I}_{2K}, \dot{I}_{0K}, \dot{U}_{1K}, \dot{U}_{2K}, \dot{U}_{0K}, \dot{I}_{1y}, \dot{I}_{2y}, \dot{I}_{0y}, \dot{U}_{1y}, \dot{U}_{2y} \text{ та } \dot{U}_{0y}.$$

Для визначення цих невідомих необхідно скласти 12 незалежних рівнянь.

Шість рівнянь складаються обходом контурів схем окремих послідовностей; виходить по два рівняння в схемі кожної послідовності, вони дають зв'язок між струмами й напругами однойменної послідовності. Інші шість рівнянь можуть бути складені із граничних умов для місць короткого замикання й обриву. У цьому випадку для місця замикання фази A на землю $\dot{U}_{Ak} = 0$, $\dot{I}_{Bk} = 0$, $\dot{I}_{Ck} = 0$; для місця обриву фази A : $\dot{I}_{Ay} = 0$, $\dot{U}_{By} = 0$, $\dot{U}_{Cy} = 0$.

В [2] наведені розв'язки цих 12 рівнянь і дані остаточні співвідношення як для розрахунків за заданими ЕРС генераторів, так і для розрахунків із застосуванням принципу накладання.

У наведених нижче формулах усі струми й напруги приведені до фази A , прийнятої в якості розрахункової:

$$\dot{I}_{1k} = \frac{Q\dot{E}_{LA}}{W} + \frac{(Z_{1L} - Z_{2L})\Delta\dot{E}}{Z_2 W} + \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})\Delta\dot{E}}{Z_0 W}, \quad (3.1)$$

$$\dot{I}_{1y} = \frac{(Z_{1L} - Z_{2L})\Delta\dot{E}_{LA}}{Z_2 W} + \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})\Delta\dot{E}_{LA}}{Z_0 W} + \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}\Delta\dot{E}}{W} - \frac{P\Delta\dot{E}}{Z_2 Z_0 W}, \quad (3.2)$$

$$\dot{I}_{2y} = \frac{(Z_{2L} - Z_{0L})\dot{I}_{1k} - Z_0\dot{I}_{1y}}{Z_2 + Z_0}. \quad (3.3)$$

Тут

$$Z_1 = Z_{1F} + Z_{1L}, \quad Z_2 = Z_{2F} + Z_{2L}, \quad Z_0 = Z_{0F} + Z_{0L},$$

$$\Delta\dot{E} = \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{LA}, \quad Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0}, \quad Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L},$$

$$W = QZ_A^{(1)} - \frac{(Z_{1L} - Z_{2L})^2}{Z_2} - \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})^2}{Z_0} - \frac{(Z_{2L} - Z_{0L})^2 Z_1}{Z_2 Z_0},$$

$$P = (Z_{2L} - Z_{0L})^2.$$

Обчислюємо необхідні для розрахунків величини (приведені до напруги 220 кВ):

$$x_{1kl} = x_{2kl} = l_{kl} x_{1num} = 35 \cdot 0,42 = 14,7 \text{ Ом},$$

$$x_{0\kappa I} = l_{\kappa I} x_{0num} = 35 \cdot 1,47 = 51,4 \text{ Ом},$$

$$x_{1\kappa II} = x_{2\kappa II} = l_{\kappa II} x_{1num} = 80 \cdot 0,42 = 33,6 \text{ Ом},$$

$$x_{0\kappa II} = l_{\kappa II} x_{0num} = 80 \cdot 1,47 = 117,6 \text{ Ом},$$

$$Z_{1F} = j(x_d' + x_{1T} + x_{1\kappa I}) = j(62,3 + 30,4 + 14,7) = j107,4 \text{ Ом},$$

$$Z_{2F} = j(x_{2T} + x_{2T} + x_{2\kappa I}) = j(49,8 + 30,4 + 14,7) = j94,9 \text{ Ом},$$

$$Z_{0F} = j(x_{2T} + x_{0\kappa I}) = j(30,4 + 51,4) = j81,8 \text{ Ом},$$

$$Z_{1L} = Z_{2L} = j(x_{1AT} + x_{1\kappa II}) = j(20,8 + 33,6) = j54,4 \text{ Ом},$$

$$Z_{0L} = j(x_{0AT} + x_{0\kappa II}) = j(20,8 + 117,6) = j138,4 \text{ Ом},$$

$$Z_1 = Z_{1F} + Z_{1L} = j(107,4 + 54,4) = j161,8 \text{ Ом},$$

$$Z_2 = Z_{2F} + Z_{2L} = j(94,9 + 54,4) = j149,3 \text{ Ом},$$

$$Z_0 = Z_{0F} + Z_{0L} = j(81,8 + 138,4) = j220,2 \text{ Ом},$$

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{LA} = 140,5 + j98,5 - 120,8 = 19,7 + j98,5 = 100,4e^{j78,7} \text{ кВ},$$

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} = 1 + \frac{j161,8}{j149,3} + \frac{j161,8}{j220,2} = 2,82,$$

$$Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L} = j(54,4 + 54,4 + 138,4) = j247,2 \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned} W &= QZ_A^{(1)} - \frac{(Z_{1L} - Z_{2L})^2}{Z_2} - \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})^2}{Z_0} - \frac{(Z_{2L} - Z_{0L})^2 Z_1}{Z_2 Z_0} = 2,82 \cdot j247,2 - \\ &- 0 - \frac{(j54,4 - j138,4)^2}{j220,2} - \frac{(j54,4 - j138,4)^2 j161,8}{j149,3 \cdot j220,2} = j696 - j32 - j34,7 = \\ &= j629,3 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$P = (Z_{2L} - Z_{0L})^2 = (j54,4 - j138,4)^2 = -7060 \text{ Ом}.$$

Підставляючи обчислені величини у вирази (3.1) - (3.3) і враховуючи, що в місці однофазного короткого замикання струми всіх трьох послідовностей рівні між собою, маємо:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1\kappa} = \dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{0\kappa} &= \frac{Q\dot{E}_{LA}}{W} + \frac{(Z_{1L} - Z_{2L})\Delta\dot{E}}{Z_2 W} + \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})\Delta\dot{E}}{Z_0 W} = \frac{2,82 \cdot 120,8}{j629,3} + 0 + \\ &+ \frac{(j54,4 - j138,4)(19,7 + j98,5)}{j220,2 \cdot j629,3} = -0,06 - j0,529 = 0,531e^{-j90,6} \text{ кА}. \end{aligned}$$

Струм у місці замикання фази A на землю

$$\dot{I}_{A\kappa} = 3\dot{I}_{A1\kappa} = 3 \cdot 0,531e^{-j90,6} = 1,593e^{-j90,6} \text{ кА}.$$

Струми з боку електростанції

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1y} &= \frac{(Z_{1L} - Z_{2L})\Delta\dot{E}_{LA}}{Z_2 W} + \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})\Delta\dot{E}_{LA}}{Z_0 W} + \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}\Delta\dot{E}}{W} - \frac{P\Delta\dot{E}}{Z_2 Z_0 W} = 0 + \\ &+ \frac{(j54,4 - j138,4)120,8}{j220,2 \cdot j629,3} + \left(\frac{1}{j149,3} + \frac{1}{j220,2} \right) \cdot \frac{j247,2(19,7 + j98,5)}{j629,3} - \\ &- \frac{-7060(19,7 + j98,5)}{j149,3 \cdot j220,2 \cdot j629,3} = 0,4014 - j0,007 = 0,4014e^{-j1} \text{ кА}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A2y} &= \frac{(Z_{2L} - Z_{0L})\dot{I}_{A1\kappa} - Z_0\dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \frac{(j54,4 - j138,4)(-0,06 - j0,529)}{j149,3 + j220,2} - \\ &- \frac{j220,2(0,4014 - j0,007)}{j149,3 + j220,2} = -0,2253 + j0,1246 = 0,256e^{j151} \text{ кА}. \end{aligned}$$

Струм нульової послідовності в місці розриву визначаємо з граничної умови

$$\dot{I}_{Ay} = \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = 0,$$

звідки

$$\begin{aligned} \dot{I}_{0y} &= -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -0,4014 + j0,007 + 0,2253 - j0,1246 = -0,1761 - j0,1176 = \\ &= 0,212e^{j213,7} \text{ кА}. \end{aligned}$$

Симетричні складові струму фази A в лінії з боку системи C визначаємо за обчисленими струмами і на підставі схем заміщення, наведених на рис.3.3.:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1L} &= \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = -0,06 - j0,529 - 0,4014 + j0,007 = -0,4614 - j0,522 = \\ &= 0,697e^{j228,5} \text{ кА}, \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2\kappa} - \dot{I}_{A2y} = -0,06 - j0,529 + 0,2253 - j0,1246 = 0,1653 - j0,6536 = 0,672e^{-j75,8} \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0\kappa} - \dot{I}_{0y} = -0,06 - j0,529 + 0,1761 + j0,1176 = 0,1161 - j0,4114 = 0,428e^{-j70,5} \text{ кА}.$$

Визначаємо повні струми фаз B і C у лінії з боку станції Γ :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{By} &= a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 - j0,867)(0,4014 - j0,007) + (-0,5 + \\ &+ j0,867)(-0,2253 + j0,1246) - 0,1761 - j0,1176 = -0,3781 - j0,7194 = \\ &= 0,811e^{j242,3} \text{ кА}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Cy} &= a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 + j0,867)(0,4014 - j0,007) + (-0,5 - \\ &- j0,867)(-0,2253 + j0,1246) - 0,1761 - j0,1176 = -0,15 + j0,3666 = \\ &= 0,396e^{j112,3} \text{ кА}. \end{aligned}$$

Для перевірки виконаних обчислень визначимо струми фаз B і C на іншому кінці лінії біля шин Π , які за модулем повинні бути рівні відповідно обчисленим струмам на лініях біля шин I , а за фазою (при прийнятих позитивних напрямках, вказаних на рис.3.3), зміщені на 180° :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BL} &= a^2 \dot{I}_{A1L} + a \dot{I}_{A2L} + \dot{I}_{0L} = (-0,5 - j0,867)(-0,4614 - j0,522) + (-0,5 + \\ &+ j0,867)(0,1653 - j0,6536) + 0,1161 - j0,4114 = 0,3771 + j0,7194 = \\ &= 0,811e^{j62,4} \text{ кА}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{CL} &= a \dot{I}_{A1L} + a^2 \dot{I}_{A2L} + \dot{I}_{0L} = (-0,5 + j0,867)(-0,4614 - j0,522) + (-0,5 - \\ &- j0,867)(0,1653 - j0,6536) + 0,1161 - j0,4114 = 0,1511 - j0,3666 = \\ &= 0,396e^{j292,4} \text{ кА}. \end{aligned}$$

Порівняння струмів фаз B і C на обох кінцях лінії показує їхню рівність за абсолютним значенням і зміщення за фазою на 180° , що підтверджує правильність проведених обчислень.

Для випадку обриву фази A та одночасного металевого замикання на землю фази B симетричні складові струмів фази A визначаються за виразами:

$$\dot{I}_{1\kappa} = \frac{Q\dot{E}_{LA}}{W} + \frac{(Z_{1L} - a^2 Z_{2L})\Delta\dot{E}}{Z_2 W} + \frac{(Z_{1L} - a Z_{0L})\Delta\dot{E}}{Z_0 W}, \quad (3.4)$$

$$\dot{I}_{1y} = \frac{(Z_{1L} - aZ_{2L})\Delta\dot{E}_{LA}}{Z_2W} + \frac{(Z_{1L} - a^2Z_{0L})\Delta\dot{E}_{LA}}{Z_0W} + \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}\right)\frac{Z_A^{(1)}\Delta\dot{E}}{W} - \frac{P\Delta\dot{E}}{Z_2Z_0W}, \quad (3.5)$$

$$\dot{I}_{2y} = \frac{(aZ_{2L} - a^2Z_{0L})\dot{I}_{1\kappa} - Z_0\dot{I}_{1y}}{Z_2 + Z_0}. \quad (3.6)$$

Тут

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{1F} + Z_{1L}, \quad Z_2 = Z_{2F} + Z_{2L}, \quad Z_0 = Z_{0F} + Z_{0L}, \\ \Delta\dot{E} &= \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{LA}, \quad Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0}, \quad Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L}, \\ a &= e^{j120} = -0,5 + j0,867, \quad a^2 = e^{j240} = -0,5 - j0,867, \\ W &= QZ_A^{(1)} - \frac{Z_{1L}^2 + Z_{1L}Z_{2L} + Z_{2L}^2}{Z_2} - \frac{Z_{1L}^2 + Z_{1L}Z_{0L} + Z_{0L}^2}{Z_0} - \\ &\quad - \frac{(Z_{2L}^2 + Z_{2L}Z_{0L} + Z_{0L}^2)Z_1}{Z_2Z_0}, \quad (3.7) \\ P &= Z_{2L}^2 + Z_{2L}Z_{0L} + Z_{0L}^2. \quad (3.8) \end{aligned}$$

Для випадку обриву фази А і одночасного металевого замикання на землю фази С у виразах (3.4) - (3.6) оператори фази a й a^2 слід поміняти місцями, а вирази (3.7) і (3.8) залишаються без змін.

Усі інші струми для цих випадків обчислюються як для обриву фази А та замикання на землю цієї ж фази, розглянутого в цій же задачі.

3-3. У задачі 3-2 виконані обчислення симетричних складових і повних струмів у лінії 220 кВ передачі, наведеній на рис.3.1 і рис.3.2, при замиканні фази А на лінії з одночасним обривом цієї ж фази на лінії біля шин І. За параметрами електропередачі, наведеними на рис.3.3, обчислити початкові значення симетричних складових і повних напруг на шинах І і ІІ та на лінії біля шин І.

Розв'язок. При відомих струмах, ЕРС генератора станції й ЕРС системи, а також опорах елементів схем заміщення всіх послідовностей легко обчислити напруги в заданих точках.

За схемами заміщення, наведеними на рис.3.3, і за обчисленими в задачі 3-2 струмах визначаємо напруги всіх послідовностей. Фазні напруги всіх послідовностей на шинах II рівні:

$$\dot{U}_{IIA1} = \dot{E}_{LA} - \dot{I}_{A1L} Z_{1aT} = 120,8 - (-0,4614 - j0,522) j20,8 = 109,96 + j9,6 = 110,3e^{j5} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{IIA2} = -\dot{I}_{A2L} Z_{2aT} = -(0,1653 - j0,6536) j20,8 = -13,6 - j3,44 = 14,03e^{j194,2} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{II0} = -\dot{I}_{0L} Z_{0aT} = -(0,1161 - j0,4114) j20,8 = -8,56 - j2,42 = 8,87e^{j195,8} \text{ кВ}.$$

Для визначення напруг на лінії в точці N (див. рис.3.3) обчислюємо спочатку фазні напруги всіх послідовностей у точці K замикання на землю:

$$\dot{U}_{A1K} = \dot{U}_{IIA1} - \dot{I}_{A1L} Z_{1kII} = 109,96 + j9,6 - (-0,4614 - j0,522) j33,6 = 92,43 + j25,1 = 95,6e^{j15,2} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{A2K} = \dot{U}_{IIA2} - \dot{I}_{A2L} Z_{2kII} = -13,6 - j3,44 - (0,1653 - j0,6536) j33,6 = -35,5 - j8,99 = 36,6e^{j194,2} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0K} = \dot{U}_{II0} - \dot{I}_{0L} Z_{0kII} = -8,56 - j2,42 - (0,1161 - j0,4114) j117,6 = -56,96 - j16,07 = 59,1e^{j195,8} \text{ кВ}.$$

Перевіримо проведені обчислення за умовою, що напруга фази A в точці K замикання на землю дорівнює нулю, тобто

$$\dot{U}_{AK} = \dot{U}_{A1K} + \dot{U}_{A2K} + \dot{U}_{0K} = 92,43 + j25,1 - 35,5 - j8,99 - 56,96 - j16,07 = -0,03 + j0,04 \approx 0.$$

Обчислюємо фазні напруги всіх послідовностей на лінії в точці N - у місці обриву фази A:

$$\dot{U}_{NA1} = \dot{U}_{A1K} + \dot{I}_{A1y} Z_{1kI} = 92,43 + j25,1 + (0,4014 - j0,007) j14,7 = 92,533 + j31 = 97,6e^{j18,6} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{NA2} = \dot{U}_{A2K} + \dot{I}_{A2y} Z_{2kI} = -35,5 - j8,99 + (-0,2253 + j0,1246) j14,7 = -37,33 - j12,3 = 39,3e^{j198,3} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{N0} = \dot{U}_{0K} + \dot{I}_{0y} Z_{0kI} = -56,96 - j16,07 + (-0,1761 - j0,1176) j51,4 = -50,91 - j25,13 = 56,8e^{j206,3} \text{ кВ}.$$

Визначаємо фазні напруги всіх послідовностей на шинах I 220 кВ, рівні напрузі в точці M у місці обриву фази A (рис.3.3):

$$\dot{U}_{IA1} = \dot{U}_{MA1} = \dot{E}_{FA} - \dot{I}_{A1y} (jx'_d + Z_{1T}) = 140,5 + j98,5 - (0,4014 - j0,007)(j62,3 + j30,4) = 139,851 + j61,3 = 152,5e^{j23,7} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{IA2} = \dot{U}_{MA2} = -\dot{I}_{A2y} (jx_{2T} + Z_{2T}) = -(-0,2253 + j0,1246)(j49,8 + j30,4) = 10 + j18,1 = 20,7e^{j61} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{I0} = \dot{U}_{M0} = -\dot{I}_{0y} Z_{0T} = -(-0,1761 - j0,1176)j30,4 = -3,58 + j5,36 = 6,44e^{j123,8} \text{ кВ}.$$

Для перевірки правильності виконаних обчислень визначимо повздовжні напруги всіх послідовностей у місці обриву фази A (тобто між точками M та N) $\dot{U}_{A1y}$, $\dot{U}_{A2y}$, $\dot{U}_{0y}$, (рис.3.3):

$$\dot{U}_{A1y} = \dot{U}_{MNA1} = \dot{U}_{MA1} - \dot{U}_{NA1} = 139,851 + j61,3 - 92,553 - j31 = (47,318 + j30,3) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{A2y} = \dot{U}_{MNA2} = \dot{U}_{MA2} - \dot{U}_{NA2} = 10 + j18,1 + 37,33 + j12,3 = (47,33 + j30,4) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0y} = \dot{U}_{MNO} = \dot{U}_{M0} - \dot{U}_{N0} = -3,58 + j5,36 + 50,91 + j25,13 = (47,33 + j30,49) \text{ кВ}.$$

Повздовжні напруги практично рівні між собою, виходить, обчислення виконані правильно.

За обчисленими значенням фазних напруг усіх послідовностей визначимо аналітично повні фазні напруги фаз A , B і C у заданих точках. Ці напруги можуть бути визначені також графічно (векторним додаванням напруг усіх трьох послідовностей кожної фази).

Визначаємо фазні напруги на шинах I :

$$\dot{U}_{IA} = \dot{U}_{MA} = \dot{U}_{IA1} + \dot{U}_{IA2} + \dot{U}_{I0} = 139,851 + j61,3 + 10 + j18,1 - 3,58 + j5,36 = 146,271 + j84,76 = 169e^{j30,2} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{IB} = \dot{U}_{MB} = a^2 \dot{U}_{IA1} + a \dot{U}_{IA2} + \dot{U}_{I0} = (-0,5 - j0,867)(139,851 + j61,3) + (-0,5 + j0,867)(10 + j18,1) - 3,58 + j5,36 = -41,11 - j146,97 = 152,7e^{j254,3} \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{IC} = \dot{U}_{MC} = a\dot{U}_{IA1} + a^2\dot{U}_{IA2} + \dot{U}_{I0} = (-0,5 + j0,867)(139,851 + j61,3) + (-0,5 - j0,867)(10 + j18,1) - 3,58 + j5,36 = -115,91 + j78,29 = 140e^{j145,9} \text{ кВ.}$$

Визначаємо фазні напруги на лінії в місці обриву в точці N (рис.3.3):

$$\dot{U}_{NA} = \dot{U}_{NA1} + \dot{U}_{NA2} + \dot{U}_{N0} = 92,533 + j31 - 37,33 - j12,3 - 50,91 - j25,13 = 4,293 - j6,43 = 7,73e^{j303,7} \text{ кВ.}$$

Напруги фаз B і C у точці N рівні таким на шинах I (або, що є однаковим, у точці M). Однак для перевірки обчислимо ці повні фазні напруги в точці N :

$$\dot{U}_{NB} = a^2\dot{U}_{NA1} + a\dot{U}_{NA2} + \dot{U}_{N0} = (-0,5 - j0,867)(92,533 + j31) + (-0,5 + j0,867)(-37,33 - j12,3) - 50,91 - j25,13 = (-40,95 - j147,98) \text{ кВ,}$$

$$\dot{U}_{NC} = a\dot{U}_{NA1} + a^2\dot{U}_{NA2} + \dot{U}_{N0} = (-0,5 + j0,867)(92,533 + j31) + (-0,5 - j0,867)(-37,33 - j12,3) - 50,91 - j25,13 = (-116,09 + j77,02) \text{ кВ.}$$

Напруги неушкоджених фаз B і C у точках M та N рівні за модулем й фазою. Це вказує на те, що обрахунки проведені правильно, оскільки в місці розриву фази A точки M та N (рис.3.2) у фазах B і C фізично перебувають в однакових умовах. Визначаємо напруги фаз A , B і C на шинах 220 кВ II :

$$\dot{U}_{IIA} = \dot{U}_{IIA1} + \dot{U}_{IIA2} + \dot{U}_{II0} = 109,96 + j9,6 - 13,6 - j3,44 - 8,56 - j2,42 = 87,8 + j3,74 = 87,9e^{j2,4} \text{ кВ,}$$

$$\dot{U}_{IIB} = a^2\dot{U}_{IIA1} + a\dot{U}_{IIA2} + \dot{U}_{II0} = (-0,5 - j0,867)(109,96 + j9,6) + (-0,5 + j0,867)(-13,6 - j3,44) - 8,56 - j2,42 = -45,44 - j112,6 = 121,2e^{j243} \text{ кВ,}$$

$$\dot{U}_{IIC} = a\dot{U}_{IIA1} + a^2\dot{U}_{IIA2} + \dot{U}_{II0} = (-0,5 + j0,867)(109,96 + j9,6) + (-0,5 - j0,867)(-13,6 - j3,44) - 8,56 - j2,42 = -68,04 + j101,6 = 122e^{j123,9} \text{ кВ.}$$

Слід вказати, що аналогічно розв'язкам, показаним у задачі 3-2, у даній задачі також можуть бути виконані розрахунки струмів і напруг при обриві фази A та замиканні на землю фази B або C у будь-якій точці лінії.

3-4. На лінії 220 кВ (рис.3.2) у точці K має місце двофазне КЗ (без землі) між фазами B та C при одночасному обриві фази A біля вимикача

ВІ. Для даного складного виду ушкодження обчислити початкові значення перехідних симетричних складових струмів і фазних напруг на обох кінцях лінії *Л* і в точці *К*.

Привести розрахункові вирази при замиканні між фазами *A* і *B* або *C* і *A* і одночасному обриві фази *A*.

Вихідні дані для розрахунків наведені на рис.3.3.

Розв'язок. Для визначення симетричних складових струмів використовуємо розрахункові формули, наведені в [2, 3]. Обчислюємо спочатку окремі елементи, що входять у ці формули, використовуючи величини, уже обчислені в задачі 3-2:

$$Z_A^{(2)} = Z_{1L} + Z_{2L} = j54,4 + j54,4 = j108,8 \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned} W = QZ_A^{(2)} - \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L}^2 - \frac{2Z_{1L}Z_{2L}}{Z_2} - \left(\frac{Z_1}{Z_2Z_0} + \frac{1}{Z_2} \right) Z_{2L}^2 = 2,82 \cdot j108,8 - \\ - \left(\frac{1}{j149,3} + \frac{1}{j220,2} \right) (j54,4)^2 - \frac{2 \cdot j54,4 \cdot j54,4}{j149,3} - \\ - \left(\frac{1}{j149,3 \cdot j220,2} + \frac{1}{j149,3} \right) (j54,4)^2 = j199,51 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Визначаємо симетричні складові струмів фази *A*.

Струм у місці КЗ

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1\kappa} = \frac{Q\dot{E}_{LA} + \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L} + \frac{Z_{2L}}{Z_2} \right] \Delta\dot{E}}{W} = \\ = \frac{2,82 \cdot 120,8 + \left[\left(\frac{1}{j149,3} + \frac{1}{j220,2} \right) j54,4 + \frac{j54,4}{j149,3} \right] (19,7 + j98,5)}{j199,51} = \\ = (0,482 - j1,807) \text{ кА}. \end{aligned}$$

Струм прямої послідовності в місці обриву

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1y} &= \frac{\left(\frac{Z_{1L} + Z_{2L}}{Z_2} + \frac{Z_{1L}}{Z_0} \right) \dot{E}_{LA} + \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_A^{(2)} - \frac{Z_{2L}^2}{Z_2 Z_0} \right] \Delta \dot{E}}{W} = \\ &= \frac{\left(\frac{j54,4 + j54,4}{j149,3} + \frac{j54,4}{j220,2} \right) 120,8}{j199,51} + \\ &+ \frac{\left[\left(\frac{1}{j149,3} + \frac{1}{j220,2} \right) j108,8 - \frac{(j54,4)^2}{j149,3 \cdot j220,2} \right] (19,7 + j98,5)}{j199,51} = \\ &= (0,56 - j0,704) \text{ кА}. \end{aligned}$$

Струм зворотної послідовності в місці обриву

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2y} &= -\frac{Z_{2L} \dot{I}_{1\kappa} + Z_0 \dot{I}_{1y}}{Z_2 + Z_0} = -\frac{j54,4(0,482 - j1,807) + j220,2(0,56 - j0,704)}{j149,3 + j220,2} = \\ &= (-0,405 + j0,685) \text{ кА}. \end{aligned}$$

Із граничних умов для місця обриву визначаємо струм нульової послідовності

$$\dot{I}_{0y} = -\dot{I}_{1y} - \dot{I}_{2y} = -0,56 + j0,704 + 0,405 - j0,685 = (-0,155 + j0,0187) \text{ кА}.$$

Із граничних умов для місця двофазного КЗ маємо:

$$\dot{I}_{2\kappa} = -\dot{I}_{1\kappa} = (-0,482 + j1,807) \text{ кА}, \quad \dot{I}_{0\kappa} = 0.$$

Зі схем заміщення окремих послідовностей (рис.3.3) визначаємо струми (симетричні складові) на лінії з боку шин II:

$$\dot{I}_{1L} = \dot{I}_{1\kappa} - \dot{I}_{1y} = 0,482 - j1,807 - 0,56 + j0,704 = (-0,078 - j1,103) \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{2L} = \dot{I}_{2\kappa} - \dot{I}_{2y} = -0,482 + j1,807 + 0,405 - j0,685 = (-0,077 + j1,122) \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{0L} = -\dot{I}_{0y} = (0,155 - j0,0187) \text{ кА}.$$

За обчисленими струмами визначаємо симетричні складові фазних напруг.

Напруги фази А на шинах 220 кВ I (точка М - місце обриву фази) рис.3.3,а рівні:

$$\dot{U}_{I1} = \dot{U}_{M1} = \dot{E}_{FA} - \dot{I}_{1y} (jx'_d + Z_{1T}) = 140,5 + j98,5 - (0,56 - j0,704)j(62,3 + 30,4) = (75,17 + j46,6) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{I2} = \dot{U}_{M2} = -\dot{I}_{2y} (jx_{2T} + Z_{2T}) = -(-0,405 + j0,685)j(49,8 + 30,4) = (54,94 + j32,48) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{I0} = \dot{U}_{M0} = -\dot{I}_{0y} Z_{0T} = -(-0,155 + j0,0187)j30,4 = (0,569 + j4,71) \text{ кВ}.$$

Напруги фази *A* на лінії біля шин *II* рівні:

$$\dot{U}_{II1} = \dot{E}_{LA} - \dot{I}_{1L} Z_{1AT} = 120,8 - (-0,078 - j1,103)j20,8 = (98 + j1,62) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{II2} = -\dot{I}_{2L} Z_{2AT} = -(-0,077 + j1,122)j20,8 = (23,2 + j1,6) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{II0} = -\dot{I}_{0L} Z_{0AT} = -(0,155 - j1,0187)j20,8 = (-0,389 - j3,22) \text{ кВ}.$$

Напруги фази *A* в точці КЗ рівні:

$$\dot{U}_{\kappa1} = \dot{U}_{II1} - \dot{I}_{1L} Z_{1\kappa II} = 98 + j1,62 - (-0,078 - j1,103)j33,6 = (60,9 + j4,24) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{\kappa2} = \dot{U}_{II2} - \dot{I}_{2L} Z_{2\kappa II} = 23,3 + j1,6 - (-0,077 + j1,122)j33,6 = (61 + j4,19) \text{ кВ}.$$

Ми визначили, що $\dot{U}_{\kappa1} = \dot{U}_{\kappa2}$. Дійсно, у місці двофазного КЗ ці напруги рівні одна одній. Отже, розрахунки зроблені правильно.

Повздовжня напруга нульової послідовності в точці *K*

$$\dot{U}_{0\kappa} = \dot{U}_{II0} - \dot{I}_{0L} Z_{1\kappa II} = -0,389 - j3,22 - (0,155 - j1,0187)j117,6 = (-2,589 - j21,45) \text{ кВ}.$$

Напруги фази *A* на лінії в місці обриву (точка *N*, рис.3.3) рівні:

$$\dot{U}_{N1} = \dot{U}_{1\kappa} + \dot{I}_{1y} Z_{1\kappa I} = 60,9 + j4,24 + (0,56 - j0,704)j14,7 = (71,24 + j12,47) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{N2} = \dot{U}_{2\kappa} + \dot{I}_{2y} Z_{2\kappa I} = 61 + j4,19 + (-0,405 + j0,685)j14,7 = (50,83 - j1,76) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{N0} = \dot{U}_{0\kappa} + \dot{I}_{0y} Z_{0\kappa I} = -2,589 - j21,45 + (-0,155 + j0,0187)j51,4 = (-3,549 - j29,42) \text{ кВ}.$$

Перевіряємо правильність обчислених напруг усіх послідовностей у точках обриву *M* та *N* за допомогою визначення повздовжніх напруг у місці обриву (між точками *M* і *N*, рис.3.2 і рис.3.3), які повинні бути рівні між собою:

$$\dot{U}_{1y} = \dot{U}_{MN1} = \dot{U}_{M1} - \dot{U}_{N1} = 75,17 + j46,6 - 71,24 - j12,47 = (3,93 + j34,13) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{2y} = \dot{U}_{MN2} = \dot{U}_{M2} - \dot{U}_{N2} = 54,94 + j32,48 - 50,93 + j1,76 = (4,01 + j34,24) \text{ кВ},$$

$$\dot{U}_{0y} = \dot{U}_{MN0} = \dot{U}_{M0} - \dot{U}_{N0} = 0,569 + j4,71 + 3,549 + j29,42 = (4,118 + j34,13) \text{ кВ}.$$

Значення повздовжніх напруг у місці обриву фази збігаються, що підтверджує правильність обчислень. Слід зазначити, що повздовжня напруга U_{0y} при $I_{0к} = 0$ можна визначити простіше, за виразом:

$$\dot{U}_{0y} = -\dot{I}_{0y} Z_0 = (-0,155 + j0,0187) j220,2 = (4,12 + j34,15) \text{ кВ}.$$

Для випадку замикання між фазами A і B і одночасного обриву фази A симетричні складові струмів фази A визначаються виразами:

$$\dot{I}_{1к} = \frac{Q\dot{E}_{LA} + \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L} + \frac{aZ_{2L}}{Z_2} \right] \Delta\dot{E}}{W}, \quad (3.9)$$

$$\dot{I}_{1y} = \frac{\left(\frac{Z_{1L} + a^2 Z_{2L}}{Z_2} + \frac{Z_{1L}}{Z_0} \right) \dot{E}_{LA} + \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_A^{(2)} + \frac{Z_{2L}^2}{Z_2 Z_0} \right] \Delta\dot{E}}{W}, \quad (3.10)$$

$$\dot{I}_{2y} = -\frac{a^2 Z_{2L} \dot{I}_{1к} + Z_0 \dot{I}_{1y}}{Z_2 + Z_0}, \quad (3.11)$$

де

$$W = QZ_A^{(2)} - \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L}^2 - \frac{Z_{1L} Z_{2L}}{Z_2} - \left(\frac{Z_1}{Z_2 Z_0} + \frac{1}{Z_2} \right) Z_{2L}^2. \quad (3.12)$$

Для випадку замикання між фазами C та A при одночасному обриві фази A в виразах (3.9) – (3.11) оператори фази a та a^2 слід поміняти місцями. Усі інші струми, а також усі напруги обчислюються як для замикання між фазами B і C і обриву фази A , розглянутого в цій задачі.

3-5. Обчислити початкове значення симетричних складових перехідних струмів у місці КЗ і по кінцях лінії 220 кВ (рис.3.2) при металевому замиканні на землю фази A та одночасному розриві фаз B і C біля вимикача BI .

Привести розрахункові вирази при розриві фаз B і C та замиканні на землю фази B або фази C .

Вихідні дані для розрахунків наведені на рис.3.3. Зазначений складний вид ушкодження може мати місце в процесі каскадного відключення КЗ релейним захистом і при відмові однієї фази вимикача $ВІ$.

Розв'язок. Симетричні складові струмів обчислюємо за розрахунковими виразами, наведеними в [2, 3]. Обчислюємо спочатку окремі елементи, що входять у ці вирази. Вихідні величини беремо з рис.3.3:

$$Z_1 + Z_2 + Z_0 = j(161,8 + 149,3 + 220,2) = j531,3 \text{ Ом},$$

$$Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L} = j(54,4 + 54,4 + 138,4) = j247,2 \text{ Ом},$$

$$S = (Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L})^2 - Z_A^{(1)}(Z_1 + Z_2 + Z_0) = (247,2)^2 - j247,2 \cdot j531,3 = 70200 \text{ Ом}.$$

Струм прямої послідовності в місці КЗ

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1\kappa} &= \frac{(\dot{E}_{LA} - \dot{E}_{FA})Z_A^{(1)} - \dot{E}_{LA}(Z_1 + Z_2 + Z_0)}{S} = \\ &= \frac{-(19,7 + j98,5)j247,2 - 120,8 \cdot j531,3}{70200} = 0,346 - j0,9823 = 1,042e^{-j70,6} \text{ кА}. \end{aligned}$$

Струм прямої послідовності в місці обриву

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1y} &= \frac{(\dot{E}_{LA} - \dot{E}_{FA})Z_A^{(1)} - \dot{E}_{LA}Z_A^{(1)}}{S} = \frac{-(19,7 + j98,5)j247,2 - 120,8 \cdot j247,2}{70200} = \\ &= 0,346 - j0,4953 = 0,604e^{-j55} \text{ кА}. \end{aligned}$$

Струми зворотної й нульової послідовності в місці КЗ фази A та в місці обриву фаз B і C визначаються із граничних умов для цих місць.

Для точки однофазного КЗ

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{0\kappa} = 0,346 - j0,9823 = 1,042e^{-j70,6} \text{ кА}.$$

Для місця обриву двох фаз B і C

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y} = 0,346 - j0,4953 = 0,604e^{-j55} \text{ кА}.$$

Струми I_y протікають по лінії з боку шин I (рис.3.3). Оскільки ми визначили, що симетричні складові струмів у місці обриву й у точці однофазного КЗ рівні між собою, вони також рівні між собою й у лінії з боку шин II (рис.3.3):

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{0L} = \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = 0,346 - j0,9823 - 0,346 + j0,4953 = -j0,487 = 0,487e^{-j90} \text{ кА.}$$

Для випадку розриву фаз B і C та замикання на землю фази B

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \frac{(\dot{E}_{LA} - \dot{E}_{FA})(Z_{1L} + a^2 Z_{2L} + a Z_{0L}) - \dot{E}_{LA}(Z_1 + Z_2 + Z_0)}{S}, \quad (3.13)$$

$$\dot{I}_{A1y} = \frac{(\dot{E}_{LA} - \dot{E}_{FA})(Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L}) - \dot{E}_{LA}(Z_{1L} + a Z_{2L} + a^2 Z_{0L})}{S}, \quad (3.14)$$

$$S = (Z_{1L} + a^2 Z_{2L} + a Z_{0L})(Z_{1L} + a Z_{2L} + a^2 Z_{0L}) - (Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L})(Z_1 + Z_2 + Z_0). \quad (3.15)$$

Для випадку розриву фаз B і C та замикання на землю фази C у виразах (3.9) - (3.11) оператори фази a та a^2 слід поміняти місцями.

Усі інші струми для цих випадків обчислюються як для розриву фаз B і C та замикання на землю фази A , розглянутого в цій задачі.

У задачі наведені розрахункові вирази для обриву фаз B і C та одночасного замикання на землю кожної з фаз A, B, C .

Для випадку, коли одна й та ж фаза є особливою для обох місць ушкодження, розрахунки струмів можна спростити. Так, у даній задачі фаза A є особливою для обох місць несиметрії, тому що в точці КЗ і в місці обриву ця фаза перебуває в умовах, відмінних від умов роботи двох інших фаз (B і C). При відсутності перехідного опору в місці КЗ, як це показано на рис.3.4, повні струми у фазі A з боку обриву ($\dot{I}_{Ay}$) і з боку підстанції II ($\dot{I}_{AL}$) підтікають до місця однофазного КЗ по незалежних контурах.

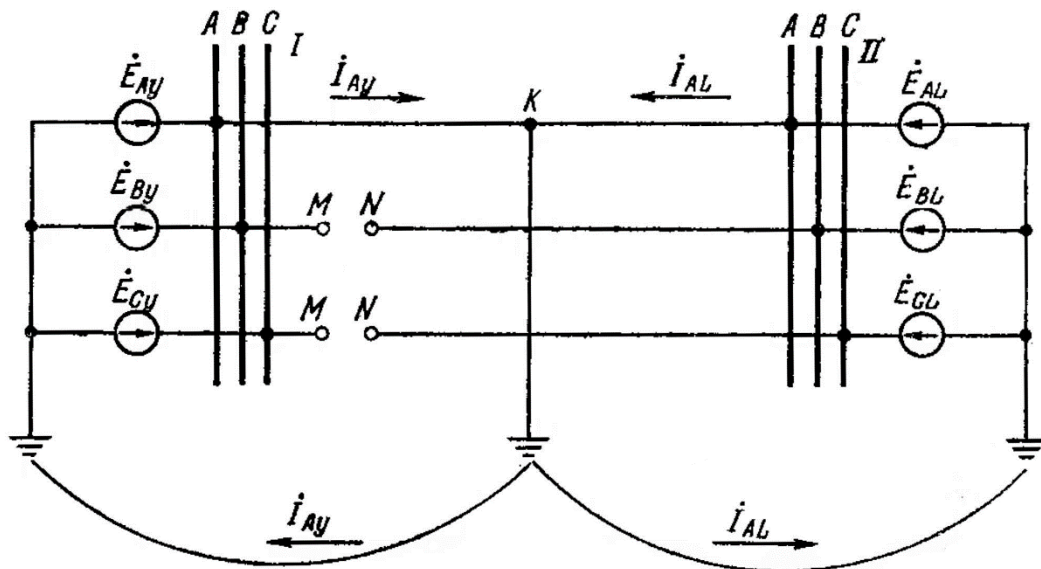


Рис.3.4. До задачі 3-5. Розподіл повних струмів при металевому замиканні фази *A* на землю з одночасним обривом фаз *B* і *C*.

Тому ці струми визначаються так само, як і струми однофазного КЗ у трифазному режимі при односторонньому живленні [1]:

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y} = \frac{\dot{E}_\Gamma' + \dot{E}_{FA}}{Z_{1F} + Z_{2F} + Z_{0F}},$$

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{0L} = \frac{\dot{E}_{LA}}{Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L}}.$$

Для перевірки раніше виконаних розрахунків струмів визначимо їх за цими рівняннями:

$$\dot{I}_{A1y} = \frac{140 + j98,5}{j(107,4 + 94,9 + 81,8)} = (0,346 - j0,493) \text{ кА},$$

$$\dot{I}_{A1L} = \frac{120,8}{j(54,4 + 54,4 + 138,4)} = -j0,489 \text{ кА}.$$

Порівняння результатів розрахунків показує, що вони виконані правильно.

Глава четверта

Система 110 кВ

ABC M N

$l = 40 \text{ км}$

ABC R T α β γ H

$S_{к.с}^{(3)} = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

$x_{1c} = x_{2c}$

$x_{0c} = 1,2 x_{1c}$

$x_{1л} = 0,40 \text{ М/км}$

$x_{0л} = 1,40 \text{ М/км}$

$S_T = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

115/11 кВ

$u_k = 10,5 \%$

$S_H = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

$x_{1H} = 120 \%$

$x_{2H} = 35 \%$

$x_{1H}'' = 35 \%$

$E_H'' = 85 \%$

Нейтраль понижуючого трансформатора T розземлена. ЕРС системи прийняти рівною базисній напрузі $U_6 = 115$ кВ.

Розв'язок. Трифазне КЗ в кінці лінії з обривом фази A може розглядатися як неповнофазний режим. Комплексна схема заміщення для заданих умов наведена на рис.4.2. При трифазному КЗ на лінії та розземленому трансформаторі T струми нульової послідовності не протікають (ємністю лінії 110 кВ звичайно нехтують), тому що відсутні замкнені електричні шляхи циркуляції. Тому на комплексній схемі заміщення показаний розрив у схемі нульової послідовності.

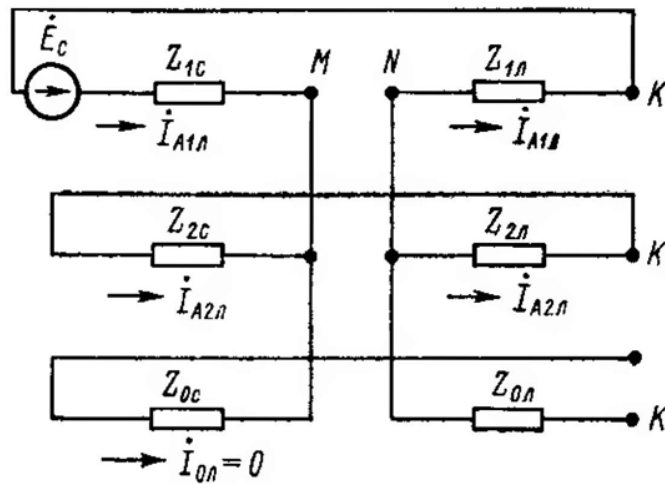


Рис.4.2. До задачі 4-1. Комплексна схема заміщення при трифазному КЗ в кінці лінії (рис.4.1), обриві фази та розземленій нейтралі трансформатора T .

За даними, наведеними на рис.4.1, обчислюємо опори системи й лінії:

$$Z_{1c} = Z_{2c} = jx_c = \frac{jU_{\phi}^2}{S_{K.3}^{(3)}} = \frac{j115^2}{2000} = j6,61 \text{ Ом},$$

$$Z_{0c} = 1,2 jx_c = 1,2 \cdot j6,61 = j7,93 \text{ Ом},$$

$$Z_{1l} = Z_{2l} = jlx_{l_{num}} = j40 \cdot 0,4 = j16 \text{ Ом},$$

$$Z_{0l} = jlx_{0_{num}} = j40 \cdot 1,4 = j56 \text{ Ом}.$$

З комплексної схеми заміщення визначаємо струм прямої послідовності фази A , приймаючи комплекс ЕРС системи співпадаючим з позитивною віссю уявних чисел:

$$\dot{I}_{A1l} = \frac{\dot{E}_c}{Z_{1c} + Z_{1l} + Z_{2c} + Z_{2l}} = \frac{j115000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{j(6,61+16+6,61+16)} = 1470 \text{ А}.$$

$$\text{Струм зворотної послідовності } \dot{I}_{A2l} = -\dot{I}_{A1l} = -1470 \text{ А}.$$

$$\text{Як зазначено вище, } \dot{I}_{0l} = 0.$$

Визначаємо напруги прямої і зворотної послідовності на лінії в точці N :

$$\dot{U}_{A1N} = \dot{I}_{A1l} Z_{1l} = 1470 \cdot j16 = j23500 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2N} = \dot{I}_{A2L} Z_{2L} = -1470 \cdot j16 = -j23500 \text{ В.}$$

Визначаємо напруги прямої і зворотної послідовності на шинах у точці M :

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_c - \dot{I}_{A1L} Z_{1c} = \frac{j115000}{\sqrt{3}} - 1470 \cdot j6,61 = j(66500 - 9700) = j56800 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2L} Z_{2c} = -(-1470)j6,61 = j9700 \text{ В.}$$

Перевіряємо правильність розрахунків визначенням повздовжніх напруг прямої і зворотної послідовності в місці обриву, які повинні бути рівні між собою:

$$\dot{U}_{A1MN} = \dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A1N} = j(56800 - 23500) = j33300 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2MN} = \dot{U}_{A2M} - \dot{U}_{A2N} = j(9700 + 23500) = j33200 \text{ В.}$$

Обчислення виконані правильно. Фазні струми й напруги визначені графічно на рис.4.3. З векторних діаграм випливає:

$$\dot{I}_A = 0; \quad \dot{I}_B = 2520e^{-j90} \text{ А,} \quad \dot{I}_C = 2520e^{j90} \text{ А,}$$

$$\dot{U}_{AM} = 66500e^{j90} \text{ В,} \quad \dot{U}_{BM} = 52000e^{-j40} \text{ В,} \quad \dot{U}_{CM} = 52000e^{j220} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{AN} = 0, \quad \dot{U}_{BN} = 40600e^{j0} \text{ В,} \quad \dot{U}_{CN} = 40600e^{j180} \text{ В.}$$

Якщо не враховувати ємнісний зв'язок між проводами лінії, то напруга на обірваній фазі дорівнює нулю, оскільки з однієї сторони лінії ця фаза відключена, а з іншого - напруга в точці K трифазного КЗ дорівнює нулю. Зазначене підтверджується розрахунками й геометричною побудовою.

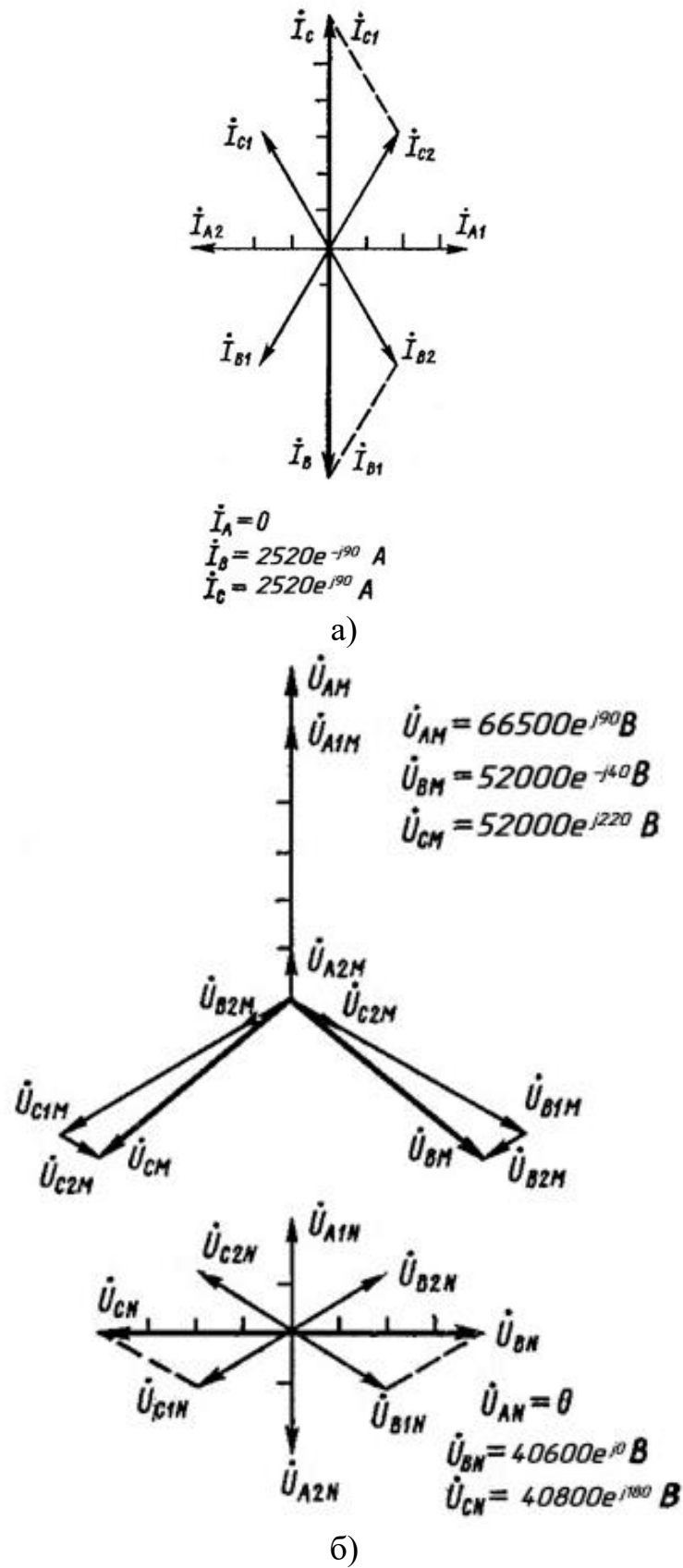


Рис.4.3. До задачі 4-1. Векторні діаграми: а - струмів у лінії, масштаб 1 под = 400 А; б - напруг на шинах (точка М) і на лінії в точці N (рис.4.1), масштаб 1 под = 10000 В.

При необхідності визначення початкового значення надперехідного струму, що підтікає від навантаження H підстанції до точки трифазного КЗ, слід застосувати формулу [1]:

$$\dot{I}_H'' = \frac{\dot{E}_H''}{f(x_H'' + x_T)},$$

де $x_H'' = 0,35$ й $\dot{E}_H'' = 0,85$ (надперехідна реактивність і ЕРС, віднесені до повної робочої потужності узагальненого навантаження).

4-2. Для схеми передачі, наведеної на рис.4.1, при заземленій нейтралі трансформатора T визначити початкові значення надперехідних симетричних складових струмів у лінії й напруг на шинах M та на лінії біля шин M (точка N) при трифазному КЗ в кінці лінії й при обриві фази A . Порівняти дані, отримані для розземленої нейтралі трансформатора T , з результатами розрахунків, наведеними в задачі 4-1 для заземленої нейтралі. Використовувати розраховані в задачі 4-1 опори системи й лінії.

Розв'язок. При заземленні нейтралі трансформатора T у випадку трифазного КЗ з обривом фази (рис.4.1) струми нульової послідовності протікають по замкненому контуру. Вони протікають від системи по лінії через точку K трифазного КЗ і далі через трансформатор T із заземленою нейтраллю, вертаючись через землю до заземлених нейтралей трансформаторів і автотрансформаторів системи. Для зазначеного випадку комплексна схема заміщення представлена на рис.4.4. У цій схемі на відміну від схеми на рис.4.2 попередньої задачі нульова послідовність має замкнений контур.

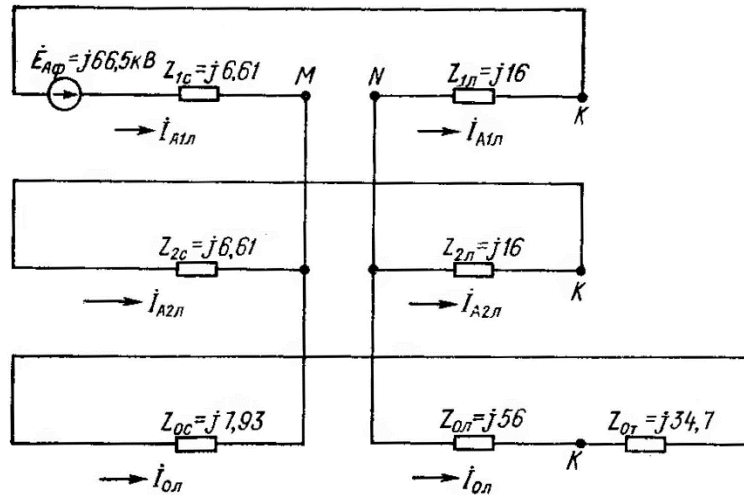


Рис.4.4. До задачі 4-2. Комплексна схема заміщення при трифазному КЗ в кінці лінії (рис.4.1), обриві фази й заземленій нейтралі трансформатора.

Обчислюємо опір трансформатора, приведений до напруги 115 кВ:

$$Z_T = \frac{u_k U_{ном.Т}^2}{S_{ном.Т}} = \frac{0,105 \cdot 115^2}{40} = 34,7 \text{ Ом.}$$

На схемі заміщення наведені опори, взяті із задачі 4-1. На підставі цієї схеми визначаємо симетричні складові струмів у лінії:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1л} &= \frac{\dot{E}_{A\phi}}{Z_{1c} + Z_{1л} + \frac{(Z_{2c} + Z_{2л})(Z_{0c} + Z_{0л} + Z_{0T})}{Z_{2c} + Z_{2л} + Z_{0c} + Z_{0л} + Z_{0T}}} = \\ &= \frac{j66500}{j(6,61+16) + \frac{j(6,61+16)j(7,93+56+34,7)}{j(6,61+16+7,93+56+34,7)}} = 1622 \text{ A,} \\ \dot{I}_{A2л} &= -\dot{I}_{A1л} \frac{Z_{0c} + Z_{0л} + Z_{0T}}{Z_{2c} + Z_{2л} + Z_{0c} + Z_{0л} + Z_{0T}} = -1622 \frac{j(7,93+56+34,7)}{j(6,61+16+7,93+56+34,7)} = \\ &= -1320 \text{ A,} \\ \dot{I}_{0л} &= -\dot{I}_{A1л} - \dot{I}_{A2л} = -1622 + 1320 = -302 \text{ A.} \end{aligned}$$

Напруги всіх послідовностей на шинах M рівні:

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_{A\phi} - \dot{I}_{A1л} Z_{1c} = j66500 - 1622 \cdot j6,61 = j(66500 - 10700) = j55800 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2л} Z_{2c} = -(-1320) \cdot j6,61 = j8720 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{I}_{0M} Z_{0c} = -(-302) \cdot j7,93 = j2400 \text{ В.}$$

Напруги всіх послідовностей на лінії в точці N місця обриву рівні:

$$\dot{U}_{A1N} = \dot{I}_{A1l} Z_{1l} = 1622 \cdot j16 = j25900 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2N} = \dot{I}_{A2l} Z_{2l} = -1320 \cdot j16 = -j21100 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0N} = \dot{I}_{0l} (Z_{0T} + Z_{0l}) = -302 \cdot j(34,7 + 56) = -j27400 \text{ В.}$$

Для перевірки виконаних обчислень визначаємо повздовжні напруги всіх послідовностей у місці розриву фази A між точками M та N (рис.4.1 і рис.4.4), які повинні бути однакові за модулем й фазою:

$$\dot{U}_{A1MN} = \dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A1N} = j(55800 - 25950) = j29850 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2MN} = \dot{U}_{A2M} - \dot{U}_{A2N} = j(8720 + 21100) = j29820 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0MN} = \dot{U}_{0M} - \dot{U}_{0N} = j(2400 + 27400) = j29800 \text{ В.}$$

Обчислення правильні, бо повздовжні напруги в місці обриву практично рівні між собою.

Струми й напруги при трифазному КЗ на лінії з обривом однієї фази та із заземленою нейтраллю трансформатора T порівняємо зі струмами й напругами при таких же умовах, але при розземленій нейтралі трансформатора T . Порівняння показує, що при заземленій нейтралі в лінії протікають струми нульової послідовності й внаслідок цього мають місце напруги нульової послідовності на шинах і на лінії.

При цьому для заданих параметрів схеми передачі (рис.4.1) струми прямої послідовності трохи збільшуються (на 10%), а струми зворотної послідовності трохи зменшуються (на 10%).

4-3. На електропередачі 110 кВ (рис.4.1), що працює двома фазами, мало місце трифазне КЗ на стороні 11 кВ трансформатора із заземленою нейтраллю. Визначити початкові надперехідні струми всіх послідовностей у лінії.

Вихідні дані. Початкове значення ЕРС системи $E_{c\phi} = 66500 \text{ В}$, опори, приведені до напруги 115 кВ, $Z_{1c} = Z_{2c} = j6,61 \text{ Ом}$, $Z_{0c} = j7,93 \text{ Ом}$,

$$Z_{1л} = Z_{2л} = j16 \text{ Ом}, Z_{0л} = j56 \text{ Ом}, Z_{1Т} = Z_{2Т} = Z_{0Т} = j34,7 \text{ Ом}.$$

Розв'язок. Для даного випадку вірна комплексна схема заміщення, наведена на рис.4.4, якщо послідовно з опором лінії в схемах прямої і зворотної послідовності включений опір трансформатора. Даний розв'язок аналогічний розв'язку задачі 4-2.

У цьому випадку результуючі опори схеми заміщення (приведені до місця обриву - до точок M та N) для окремих послідовностей рівні:

$$Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} = Z_{1c} + Z_{1л} + Z_{1Т} = j(6,61 + 16 + 34,7) = j57,31 \text{ Ом},$$

$$Z_{0\Sigma} = Z_{0c} + Z_{0л} + Z_{0Т} = j(7,93 + 56 + 34,7) = j98,63 \text{ Ом}.$$

Струми всіх послідовностей визначаються зі схеми заміщення (рис.4.4) за обчисленими результуючими опорами.

Струм прямої послідовності в лінії

$$\dot{I}_{A1л} = \frac{\dot{E}_{сф}}{Z_{1\Sigma} + \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}} = \frac{j66500}{j57,31 + \frac{j57,31 \cdot j98,63}{j(57,31 + 98,63)}} = \frac{j66500}{j(57,31 + 36,3)} = 710 \text{ А}.$$

Струм зворотної послідовності в лінії

$$\dot{I}_{A2л} = -\dot{I}_{A1л} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} = -710 \frac{j98,63}{j(57,31 + 98,63)} = -449 \text{ А}.$$

Струм нульової послідовності в лінії

$$\dot{I}_{0л} = \dot{I}_{A1л} - \dot{I}_{A2л} = -710 + 449 = -261 \text{ А}.$$

За обчисленими струмами можуть бути визначені напруги всіх послідовностей і повні напруги всіх фаз у будь-якій точці схеми, а також повні фазні струми в лінії й на стороні 11 кВ трансформатора.

4-4. На електропередачі, що перебуває в неповнофазному режимі (відключена фаза A біля шин M - рис.4.1), мало місце замикання на землю фази B на відстані 5 км від шин R через перехідний опір $r_{п} = 10 \text{ Ом}$. Навантаження на підстанції в неповнофазному режимі рівне 20 МВА. Нейтраль понижуючого трансформатора T заземлена. Визначити усталені

струми всіх послідовностей на обох кінцях лінії, а також повні струми фаз В і С на початку лінії.

Вихідні дані. ЕРС системи $\dot{E}_{FA} = j66500$ В. Опори окремих елементів, приведені до напруги 115 кВ, рівні:

системи $Z_{1c} = Z_{2c} = j6,61$ Ом, $Z_{0c} = j7,93$ Ом,

ділянок лінії $Z_{1NK} = Z_{2NK} = j14$ Ом, $Z_{0NK} = j49$ Ом,

$Z_{1KR} = Z_{2KR} = j2$ Ом, $Z_{0KR} = j7$ Ом,

трансформатора Т $Z_{1T} = Z_{2T} = Z_{0T} = j34,7$ Ом.

Опори навантаження $Z_{1H} = jx_{1H} = 120\%$, $Z_{2H} = jx_{2H} = 35\%$.

Розв'язок. На рис.4.5 наведені схеми заміщення: прямої (рис.4.5,б), зворотної (рис.4.5,в) і нульової (рис.4.5,г) послідовності при КЗ через перехідний опір з одночасним обривом фази.

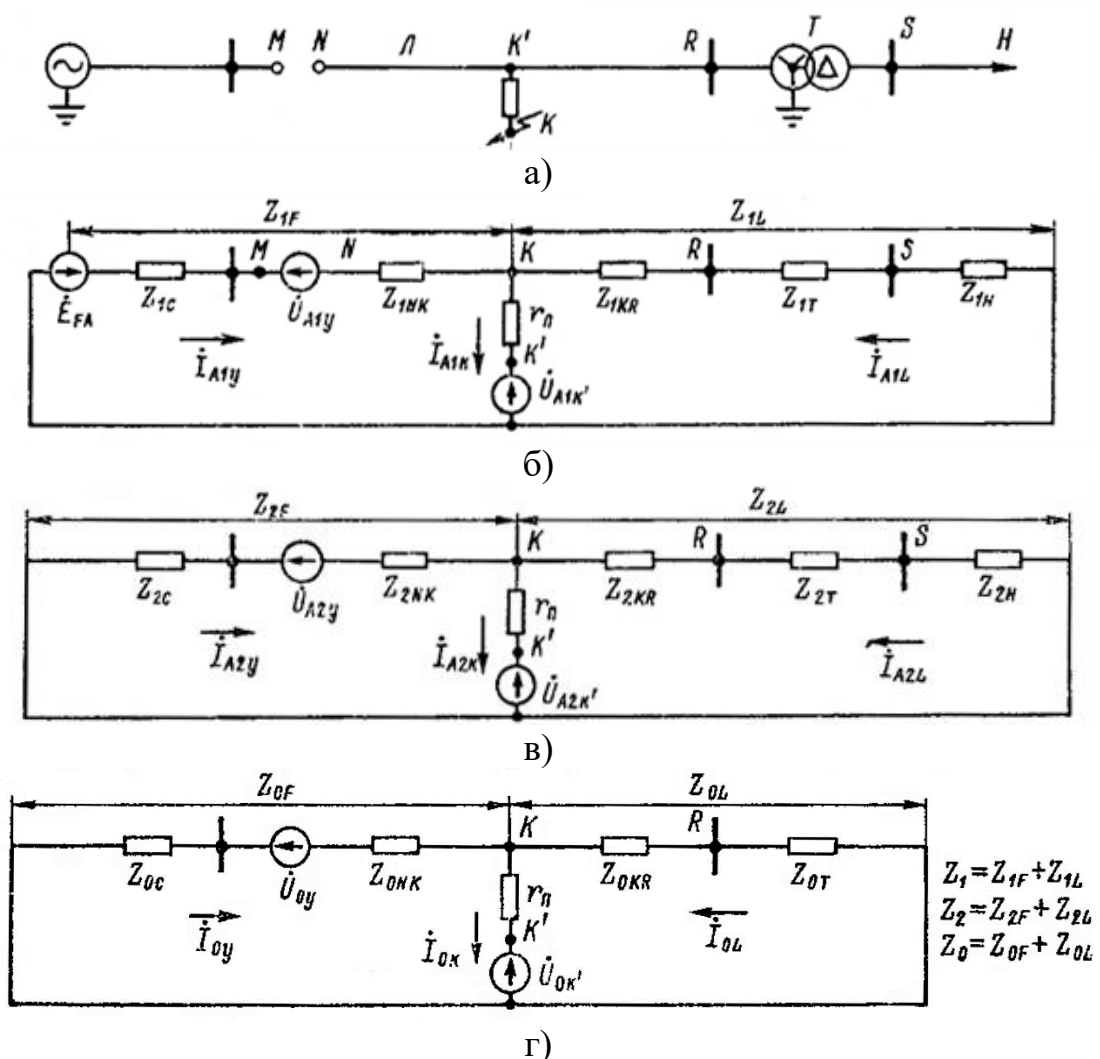


Рис.4.5. До задачі 4-4. Розрахункові схеми при КЗ через перехідний опір

з одночасним обривом фази: *a* – пояснювальна схема, *б* - схема заміщення прямої послідовності, *в* - зворотної, *г* - нульової.

Визначаємо опори прямої і зворотної послідовності навантаження *H*, приведені до напруги 115 кВ:

$$Z_{1H} = jx_{1H} = \frac{jx_{1H} \% U_{\phi}^2}{100 S_H} = \frac{j120 \cdot 115^2}{100 \cdot 20} = j793 \text{ Ом},$$

$$Z_{2H} = jx_{2H} = \frac{j35 \cdot 115^2}{100 \cdot 20} = j231 \text{ Ом}.$$

У цій задачі приведемо розрахункові вирази для струмів при замиканні на землю фази *A*, *B* або *C* та одночасному обриві фази *A* й використовуємо їх у наступних задачах.

При замиканні фази *B* на землю через перехідний опір r_n і одночасному обриві фази *A* (рис.4.5) струми всіх послідовностей визначаються виразами [2]:

$$\dot{I}_{A1K} = \dot{E}_{FA} \left(\frac{Z_{1L} - a^2 Z_{2L}}{Z_2 W} + \frac{Z_{1L} - a Z_{0L}}{Z_0 W} \right), \quad (4.1)$$

$$\dot{I}_{B1K} = \dot{I}_{B2K} = \dot{I}_{B0K} = a^2 \dot{I}_{A1K} = a \dot{I}_{A2K} = \dot{I}_{A0K}, \quad (4.2)$$

$$\dot{I}_{A1Y} = \dot{E}_{FA} \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}}{W} - \frac{P}{Z_2 Z_0 W} \right], \quad (4.3)$$

$$\dot{I}_{A2Y} = \frac{(a Z_{2L} - a^2 Z_{0L}) \dot{I}_{A1K} - Z_0 \dot{I}_{A1Y}}{Z_2 + Z_0}, \quad (4.4)$$

де $a = -0,5 + j0,867$, $a^2 = -0,5 - j0,867$.

За умовою рівності нулю струму фази *A* в місці обриву

$$\dot{I}_{Ay} = \dot{I}_{A1Y} + \dot{I}_{A2Y} + \dot{I}_{0Y} = 0, \text{ звідки } \dot{I}_{0Y} = -\dot{I}_{A1Y} - \dot{I}_{A2Y}. \quad (4.5)$$

Зі схем заміщення окремих послідовностей (рис.4.5) визначаємо струми праворуч від точки *K* на підставі закону Кірхгофа:

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1K} - \dot{I}_{A1Y}, \quad (4.6)$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2K} - \dot{I}_{A2Y}, \quad (4.7)$$

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0\kappa} - \dot{I}_{0y}. \quad (4.8)$$

У формулах (4.1) - (4.4) прийняті позначення окремих елементів, показані на рис.4.5.

Для умов даної задачі (замикання на землю фази B з одночасним обривом фази A) виконуємо наступні обчислення:

$$Z_{1F} = Z_{1c} + Z_{1NK} = j(6,61 + 14) = j20,61 \text{ Ом}, \quad (4.9)$$

$$Z_{2F} = Z_{2c} + Z_{2NK} = j(6,61 + 14) = j20,61 \text{ Ом}, \quad (4.10)$$

$$Z_{0F} = Z_{0c} + Z_{0NK} = j(7,93 + 49) = j56,93 \text{ Ом}, \quad (4.11)$$

$$Z_{1L} = Z_{1H} + Z_{1T} + Z_{1KR} = j(793 + 34,7 + 2) = j829,7 \text{ Ом}, \quad (4.12)$$

$$Z_{2L} = Z_{2H} + Z_{2T} + Z_{2KR} = j(231 + 34,7 + 2) = j267,7 \text{ Ом}, \quad (4.13)$$

$$Z_{0L} = Z_{0T} + Z_{0KR} = j(34,7 + 7) = j41,7 \text{ Ом}, \quad (4.14)$$

$$Z_1 = Z_{1F} + Z_{1L} = j(20,61 + 829,7) = j850,31 \text{ Ом}, \quad (4.15)$$

$$Z_2 = Z_{2F} + Z_{2L} = j(20,61 + 267,7) = j288,31 \text{ Ом}, \quad (4.16)$$

$$Z_0 = Z_{0F} + Z_{0L} = j(56,93 + 41,7) = j98,63 \text{ Ом}, \quad (4.17)$$

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} = 1 + \frac{j850,31}{j288,31} + \frac{j850,31}{j98,63} = 12,58, \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} Z_A^{(1)} &= Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L} + 3r_n = j(829,7 + 267,7 + 41,7) + 3 \cdot 10 = \\ &= 30 + j1139,1 \text{ Ом}, \end{aligned} \quad (4.19)$$

для замикання на землю фази B або C

$$\begin{aligned}
W = QZ_A^{(1)} - & \left[\frac{Z_{1L}^2 + Z_{1L}Z_{2L} + Z_{2L}^2}{Z_2} + \frac{Z_{1L}^2 + Z_{1L}Z_{0L} + Z_{0L}^2}{Z_0} + \right. \\
& \left. + \frac{(Z_{2L}^2 + Z_{2L}Z_{0L} + Z_{0L}^2)Z_1}{Z_2Z_0} \right] = 12,58(30 + j1139,1) - \\
& - \left[\frac{(j829,7)^2 + j829,7 \cdot j267,7 + (j267,7)^2}{j288,31} + \right. \\
& \left. + \frac{(j829,7)^2 + j829,7 \cdot j41,7 + (j41,7)^2}{j98,63} + \right. \\
& \left. + \frac{(j267,7)^2 + j267,7 \cdot j41,7 + (j41,7)^2}{j288,31 \cdot j98,63} j850,1 \right] = 378 + j1052 = \\
& = 1117e^{j70} \text{ Ом},
\end{aligned} \tag{4.20}$$

для замикання на землю фази A

$$W = QZ_A^{(1)} - \left[\frac{(Z_{1L} - Z_{2L})^2}{Z_2} + \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})^2}{Z_0} + \frac{(Z_{2L} - Z_{0L})^2 Z_1}{Z_2 Z_0} \right], \tag{4.21}$$

для замикання на землю фази B або C

$$\begin{aligned}
P = Z_{2L}^2 + Z_{2L}Z_{0L} + Z_{0L}^2 &= (j267,7)^2 + j267,7 \cdot j41,7 + (j41,7)^2 = \\
&= -84610 \text{ Ом}^2,
\end{aligned} \tag{4.22}$$

для замикання на землю фази A

$$P = (Z_{2L} - Z_{0L})^2. \tag{4.23}$$

У виразах (4.1), (4.2) і (4.4) при замиканні на землю фази C ясно, що слід a й a^2 поміняти місцями, а при замиканні на землю фази A - a й a^2 замінити одиницею.

Підставляючи обчислені значення окремих членів у формули (4.1) і (4.3), одержуємо:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{E}_{FA} \left(\frac{Z_{1L} - a^2 Z_{2L}}{Z_2 W} + \frac{Z_{1L} - a Z_{0L}}{Z_0 W} \right) &= j66500 \left[\frac{j829,7 - (-0,5 - j0,867)j267,7}{j288,31 \cdot 1117e^{j70}} + \right. \\
& \left. + \frac{j829,7 - (-0,5 + j0,867)j41,7}{j98,63 \cdot 1117e^{j70}} \right] = 660 + j268,6 = 711e^{j22} \text{ А},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A1y} &= \dot{E}_{FA} \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}}{W} - \frac{P}{Z_2 Z_0 W} \right] = \\
&= j66500 \left[\left(\frac{1}{j288,31} + \frac{1}{j98,63} \right) \frac{(30 + j1139,1)}{1117e^{j70}} - \frac{-84610}{j288,31 \cdot j98,63 \cdot 1117e^{j70}} \right] = \\
&= 708,3 + j231,7 = 745e^{j18} \text{ A.}
\end{aligned}$$

З формули (4.2) визначаємо струми зворотної й нульової послідовності в місці КЗ:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A2\kappa} &= a \dot{I}_{A1\kappa} = e^{j120} \cdot 711e^{j22} = 711e^{j142} = (-560 + j437) \text{ A,} \\
\dot{I}_{0\kappa} &= a^2 \dot{I}_{A1\kappa} = e^{j240} \cdot 711e^{j22} = 711e^{j262} = (-99 - j704) \text{ A.}
\end{aligned}$$

Струм зворотної послідовності в місці обриву визначаємо за формулою (4.4):

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A2y} &= \frac{(aZ_{2L} - a^2 Z_{0L}) \dot{I}_{A1\kappa} - Z_0 \dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \frac{(e^{j120} \cdot j267,7 - e^{j240} \cdot j41,7) \cdot 711e^{j22}}{j288,31 + j98,63} - \\
&- \frac{j98,63 \cdot 745e^{j18}}{j288,31 + j98,63} = -555,3 + j320 = 641e^{j150} \text{ A.}
\end{aligned}$$

Струм I_{0y} визначаємо за виразом (4.5):

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{0y} &= -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -708,3 - j231,7 + 555,3 - j320 = -153 - j551,7 = \\
&= 574e^{j254,5} \text{ A.}
\end{aligned}$$

Струми праворуч від місця КЗ визначаємо за виразами (4.6) - (4.8):

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A1L} &= \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = 660 + j268,6 - 708,3 - j231,7 = -48,3 + j36,9 = 61,6e^{j142,6} \text{ A,} \\
\dot{I}_{A2L} &= \dot{I}_{A2\kappa} - \dot{I}_{A2y} = -560 + j437 + 555,3 - j320 = -4,7 + j117 = 117,1e^{j92} \text{ A,} \\
\dot{I}_{0L} &= \dot{I}_{0\kappa} - \dot{I}_{0y} = -99 - j704 + 153 + j551,7 = 54 - j152,3 = 161,7e^{-j70,5} \text{ A.}
\end{aligned}$$

Визначаємо повні струми фаз B і C на початку лінії:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{B\pi} &= a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = e^{j240} \cdot 745e^{j18} + e^{120} \cdot 641e^{j150} - 153 - j551,7 = \\
&= -308 - j1900,7 = 1922e^{j261} \text{ A,} \\
\dot{I}_{C\pi} &= a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = e^{j120} \cdot 745e^{j18} + e^{j240} \cdot 641e^{j150} - 153 - j551,7 = \\
&= -152 + j267,3 = 307e^{j119,7} \text{ A.}
\end{aligned}$$

4-5. У задачі 4-4 обчислені струми при замиканні на землю через перехідний активний опір $r_{\pi} = 10$ Ом фази B та при обриві фази A на лінії (рис.4.5). За вихідним даними, наведеними у задачі 4-4, і за обчисленими струмами визначити значення встановлених напруг усіх послідовностей на шинах M і R , а також на лінії в точці КЗ K та в точці N у місці обриву. Задані струми:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1K} &= (660 + j268) \text{ A}, \quad \dot{I}_{A2K} = (-560 + j437) \text{ A}, \quad \dot{I}_{0K} = (-99 - j704) \text{ A}, \\ \dot{I}_{A1y} &= (708,3 + j231,7) \text{ A}, \quad \dot{I}_{A2y} = (-555,3 + j320) \text{ A}, \quad \dot{I}_{0y} = (-153 - j551,7) \text{ A}, \\ \dot{I}_{A1L} &= (-48,3 + j36,9) \text{ A}, \quad \dot{I}_{A2L} = (-4,7 + j117) \text{ A}, \quad \dot{I}_{0L} = (54 - j152,3) \text{ A}. \end{aligned}$$

Розв'язок. Використовуючи схеми всіх послідовностей, показані на рис.4.5, і дані, обраховані в задачі 4-4, а також значення ЕРС системи, визначаємо напруги в заданих точках.

Напруги прямої послідовності в точках K , N і M рівні

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A1K} &= -\dot{I}_{A1L} Z_{1L} = -(-48,3 + j36,9) \cdot j829,7 = (30600 + j40100) \text{ В}, \\ \dot{U}_{A1N} &= \dot{U}_{A1K} + \dot{I}_{A1y} Z_{1NK} = 30600 + j40100 + (708,3 + j231,7) \cdot j14 = \\ &= (27360 + j50000) \text{ В}, \\ \dot{U}_{A1M} &= \dot{E}_{FA} - \dot{I}_{A1y} Z_{1c} = j66500 - (708,3 + j231,7) \cdot j6,61 = (1530 + j61820) \text{ В}. \end{aligned}$$

Напруги зворотної й нульової послідовності в точках K , N і M рівні:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2K} &= -\dot{I}_{A2L} Z_{2L} = -(-4,7 + j117) \cdot j267,7 = (31300 + j1260) \text{ В}, \\ \dot{U}_{A2N} &= \dot{U}_{A2K} + \dot{I}_{A2y} Z_{2NK} = 31300 + j1260 + (-555,3 + j320) \cdot j14 = \\ &= (26820 - j6500) \text{ В}, \\ \dot{U}_{A2M} &= -\dot{I}_{A2y} Z_{2c} = -(-555,3 + j320) \cdot j6,61 = (2115 + j3670) \text{ В}, \\ \dot{U}_{0K} &= -\dot{I}_{0L} Z_{0L} = -(54 - j152,3) \cdot j41,7 = (-6360 - j2250) \text{ В}, \\ \dot{U}_{0N} &= \dot{U}_{0K} + \dot{I}_{0y} Z_{0NK} = -6360 - j2250 + (-153 - j551,7) \cdot j49 = \\ &= (20640 - j9750) \text{ В}, \\ \dot{U}_{0M} &= -\dot{I}_{0y} Z_{0c} = -(-153 - j551,7) \cdot j7,93 = (-4380 + j1213) \text{ В}. \end{aligned}$$

Визначаємо повздовжні напруги всіх послідовностей у місці обриву фази A на лінії (тобто між точками M і N), вони повинні бути рівні між собою. Цим обрахунком проводиться перевірка правильності розрахунків струмів усіх послідовностей (задача 4-4) і напруг усіх послідовностей на шинах M і на лінії в точці N біля шин M (розрахунки проведені у даній задачі):

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A1y} &= \dot{U}_{A1MN} = \dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A1N} = 1530 + j61820 - 27360 - j50000 = \\ &= (-25830 + j11820) \text{ В},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A2y} &= \dot{U}_{A2MN} = \dot{U}_{A2M} - \dot{U}_{A2N} = 2115 + j3670 - 26820 + j6500 = \\ &= (-24705 + j10170) \text{ В},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{0y} &= \dot{U}_{0MN} = \dot{U}_{0M} - \dot{U}_{0N} = -4380 + j1213 - 20640 + j9750 = \\ &= (-25020 + j10963) \text{ В}.\end{aligned}$$

Повздовжні напруги всіх послідовностей у місці обриву фази A на лінії практично рівні. Отже, розрахунки струмів і напруг у задачі 4-4 і в даній виконані правильно.

Напруги всіх послідовностей на шинах R 110 кВ рівні:

$$\dot{U}_{A1R} = -\dot{I}_{A1L} (Z_{1h} + Z_{1T}) = -(-48,3 + j36,9) \cdot j(793 + 34,7) = (30550 + j40000) \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2R} = -\dot{I}_{A2L} (Z_{2h} + Z_{2T}) = -(-4,7 + j117) \cdot j(231 + 34,7) = (31100 + j1250) \text{ В},$$

$$\dot{U}_{0R} = -\dot{I}_{0L} Z_{0T} = -(54 - j152,3) \cdot j34,7 = (-5290 - j1870) \text{ В}.$$

Визначаємо повні фазні напруги на шинах M :

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AM} &= \dot{U}_{A1M} + \dot{U}_{A2M} + \dot{U}_{0M} = 1530 + j61820 + 2115 + j3670 - 4380 + j1213 = \\ &= -753 + j66703 = 66705e^{j90,6} \text{ В},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BM} &= a^2 \dot{U}_{A1M} + a \dot{U}_{A2M} + \dot{U}_{0M} = (-0,5 - j0,867)(1530 + j61820) + \\ &+ (-0,5 + j0,867)(2115 + j3670) - 4380 + j1213 = 44218 - j31027 = \\ &= 54000e^{-j35} \text{ В},\end{aligned}$$

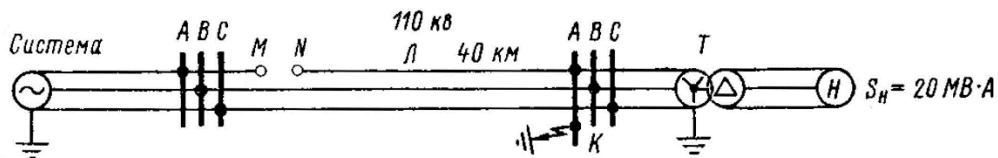
$$\begin{aligned}\dot{U}_{CM} &= a \dot{U}_{A1M} + a^2 \dot{U}_{A2M} + \dot{U}_{0M} = (-0,5 + j0,867)(1530 + j61820) + \\ &+ (-0,5 - j0,867)(2115 + j3670) - 4380 + j1213 = -59802 - j32037 = \\ &= 67700e^{j208} \text{ В}.\end{aligned}$$

Зробимо ще одну перевірку, обчисливши напругу фази B у точці N , яка повинна дорівнювати напрузі в точці M , оскільки на цій фазі немає обриву й, отже, точки M і N мають той самий потенціал:

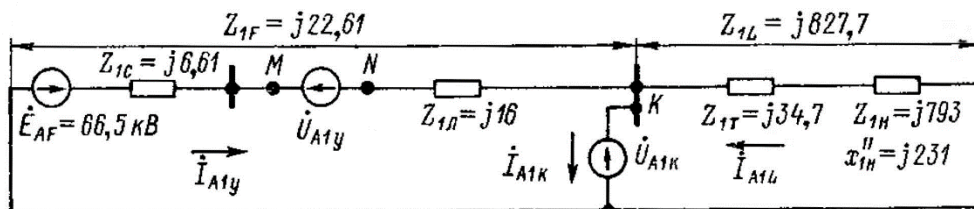
$$\begin{aligned}\dot{U}_{BN} &= a^2 \dot{U}_{A1N} + a \dot{U}_{A2N} + \dot{U}_{0N} = (-0,5 - j0,867)(27360 + j50000) + \\ &+ (-0,5 + j0,867)(26820 - j6500) + 20640 - j9750 = 42530 - j32000 = \\ &= 53200e^{-j37} \text{ В.}\end{aligned}$$

Обчислені напруги фази B у точках M і N за схемами заміщення окремих послідовностей (рис.4.5) практично збігаються за модулем й фазою.

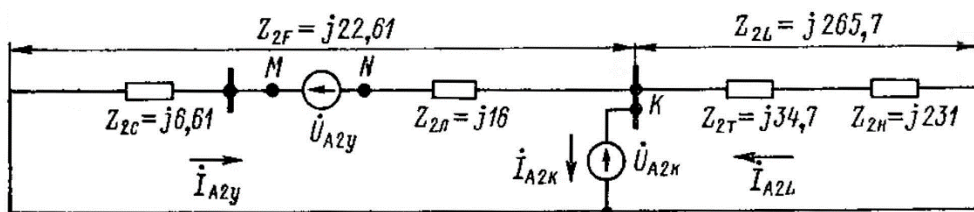
4-6. На рис.4.6 наведена вихідна схема електропередачі й схеми заміщення окремих послідовностей.



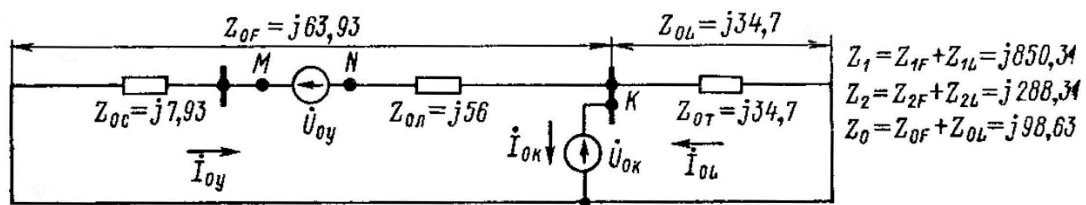
а)



б)



в)



г)

Рис.4.6. Розрахункові схеми при КЗ з одночасним обривом фази:
 а - вихідна схема, б - схема заміщення прямої послідовності,
 в - зворотної, г - нульової.

Значення опорів приведені до напруги 115 кВ.

На схемі дані опори елементів, приведені до напруги 115 кВ і обчислені в задачі 4-4. Нейтраль трансформатора T заземлена. При металевому замиканні на землю фази A в кінці лінії й обриві цієї фази на початку лінії визначити симетричні складові струмів в усталеному режимі КЗ у лінії й з боку навантаження, а також повні струми в лінії як з урахуванням, так і без урахування навантажувальних опорів на приймаючій підстанції.

Зазначений вид ушкодження може мати місце при тривалій роботі лінії двома фазами й металевому замиканні на землю фази на приймаючій підстанції або при неуспішному ОАПВ, коли КЗ у цих режимах ліквідувалося резервними захистами з витримкою часу.

Розв'язок. Для розв'язання даної задачі використовуємо розрахункові формули (4.1) - (4.8), (4.18), (4.19), (4.21) і (4.23), наведені в задачі 4-4; при цьому у формулах (4.1), (4.2) і (4.4) a й a_2 замінюються одиницею, а у формулі (4.19) приймається $r_{\Pi} = 0$. У випадку коли не враховуються навантажувальні опори, у зазначених вище виразах приймається $Z_{1L} = Z_{2L} = \infty$.

Розглянемо випадок, коли враховуються навантажувальні опори приймаючої підстанції. Обчислюємо значення окремих членів, що

входять у формули (4.1) і (4.3), для чого використовуємо дані, наведені на схемах заміщення окремих послідовностей (рис.4.6).

За формулами (4.18), (4.19), (4.21) і (4.23) задачі 4-4 знаходимо:

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} = 1 + \frac{j850,31}{j288,31} + \frac{j850,31}{j98,63} = 12,58,$$

$$Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L} + 3r_n = j(829,7 + 267,7 + 41,7) + 3 \cdot 10 = \\ = 30 + j1139,1 \text{ Ом},$$

$$W = QZ_A^{(1)} - \left[\frac{(Z_{1L} - Z_{2L})^2}{Z_2} + \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})^2}{Z_0} + \frac{(Z_{2L} - Z_{0L})^2 Z_1}{Z_2 Z_0} \right] = 12,58 \cdot j1128,1 - \\ - \left[\frac{(j827,7 - j265,7)^2}{j288,31} + \frac{(j827,7 - j34,7)^2}{j98,63} + \frac{(j265,7 - j34,7)^2 j850,31}{j288,31 \cdot j98,63} \right] = \\ = j5128 \text{ Ом},$$

$$P = (Z_{2L} - Z_{0L})^2 = (j265,7 - j34,7)^2 = -53400 \text{ Ом}^2.$$

Визначаємо струми в місці замикання фази А на землю за формулою (4.1), у якій a й a^2 заміняємо одиницею:

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{E}_{FA} \left(\frac{Z_{1L} - Z_{2L}}{Z_2 W} + \frac{Z_{1L} - Z_{0L}}{Z_0 W} \right) = j66500 \left[\frac{j827,7 - j265,7}{j288,31 \cdot j5128} + \frac{j827,7 - j34,7}{j98,63 \cdot j5128} \right] = \\ = 129,6 \text{ А}.$$

$$\text{Для точки К однофазного КЗ } \dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{0\kappa} = \dot{I}_{A1\kappa} = 129,6 \text{ А}.$$

Симетричні складові струмів у лінії визначаємо за формулами (4.3), (4.4) і (4.5) задачі 4-4, при цьому у формулі (4.4) a й a^2 заміняємо одиницею:

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{E}_{FA} \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}}{W} - \frac{P}{Z_2 Z_0 W} \right] = j66500 \left[\left(\frac{1}{j288,31} + \frac{1}{j98,63} \right) \frac{j1128,1}{j5128} - \right. \\ \left. - \frac{-53400}{j288,31 \cdot j98,63 \cdot j5128} \right] = 174,5 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2y} = \frac{(Z_{2L} - Z_{0L}) \dot{I}_{A1\kappa} - Z_0 \dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \frac{j(265,7 - 34,7)129,6 - j98,63 \cdot 174,5}{j288,31 + j98,63} = \\ = 32,7 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{0y} = -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -174,5 - 32,7 = -207,2 \text{ A.}$$

Струми з боку навантаження визначаємо за формулами (4.6) - (4.8) задачі 4-4:

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = 129,6 - 174,5 = -44,9 \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2\kappa} - \dot{I}_{A2y} = 129,6 - 32,7 = 86,9 \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0\kappa} - \dot{I}_{0y} = 129,6 + 207,2 = 336,8 \text{ A.}$$

Повні струми фаз *B* і *C* у лінії рівні:

$$\dot{I}_{Bл} = \dot{I}_{By} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 - j0,867)174,5 + (-0,5 + j0,867)32,7 - 207,2 = -310,8 - j123 = 334,5e^{j201,6} \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{Cл} = \dot{I}_{Cy} = a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 + j0,867)174,5 + (-0,5 - j0,867)32,7 - 207,2 = -310,8 + j123 = 334,5e^{j158,4} \text{ A.}$$

Розглянемо випадок, коли навантажувальні опори приймаючої підстанції не враховуються. При цьому $Z_{1L} = \infty$ й $Z_{2L} = \infty$. Підставляючи значення $Z_{1L} = \infty$, $Z_{2L} = \infty$ у наведені вище вирази, одержуємо:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1\kappa} = \dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{0\kappa} &= \frac{\dot{E}_{FA}}{Z_{1F} + Z_{2F} + 4Z_{0F} + 9Z_{0L} + 3r_n} = \\ &= \frac{j66500}{j22,61 + j22,61 + 4 \cdot j63,93 + 9 \cdot j34,9 + 3 \cdot 0} = 108,5 \text{ A,} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{A1\kappa} = 108,5 \text{ A,} \quad \dot{I}_{0y} = -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -2\dot{I}_{A1\kappa} = -217 \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0\kappa} - \dot{I}_{0y} = 108,5 - (-217) = 325,5 \text{ A.}$$

Оскільки $Z_{1L} = \infty$ й $Z_{2L} = \infty$, то $\dot{I}_{1L} = 0$ й $\dot{I}_{2L} = 0$. Повні струми фаз *B* і *C* у лінії рівні:

$$\dot{I}_{Bл} = \dot{I}_{By} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 - j0,867)108,5 + (-0,5 + j0,867)108,5 - 217 = -325,5 \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{Cл} = \dot{I}_{Cy} = a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 + j0,867)108,5 + (-0,5 - j0,867)108,5 - 217 = -325,5 \text{ A.}$$

Результати розрахунків представлені в табл.4.1.

Якщо навантажувальні опори не враховуються, то струми прямої і зворотної послідовності в лінії значно відрізняються за модулем від струмів при врахуванні опорів навантаження. Тому при КЗ на землю з одночасним обривом фази необхідно враховувати опір навантаження на приймаючій підстанції. За даними струмів і опорів усіх послідовностей можуть бути обчислені симетричні складові й повні напруги в окремих точках електропередачі аналогічно тому, як це виконано в задачі 4-5.

Таблиця 4.1

Результати розрахунків

Струми	Абсолютні значення, А	
	з урахуванням навантаження	без урахування навантаження
I_{A1B}	174,5	108,5
I_{A2B}	32,7	108,5
I_{0B}	207,2	217
I_{A1L}	44,9	0
I_{A2L}	86,9	0
I_{0L}	336,9	325,5
$I_{Bл}$	334,5	325,5
$I_{Cл}$	334,5	325,5
$I_{Aл}$	0	0

4-7. За даними, наведеними на рис.4.6, визначити початкові значення надперехідних струмів симетричних складових у лінії, що працювала двома фазами B і C , та з боку навантаження H при металевому замиканні фази A на землю на шинах 110 кВ понижуючої підстанції. Розрахунки виконати приблизно, без врахування зсуву фаз між надперехідною ЕРС навантаження й ЕРС системи.

Розв'язок. У наближеному розрахунку враховують узагальнене навантаження у надперехідному режимі [1] індуктивним опором, рівним $x_{1H}'' = x_{2H}'' = 35\%$ і ЕРС E_H'' , рівною 85%. Величини віднесені до повної номінальної потужності навантаження й до середньої напруги

$U_{cp} = 10,5$ кВ шин, до яких вона приєднана. Значення опорів, наведені на рис.4.6, обчислено в задачі 4-4. Оскільки у надперехідному режимі індуктивні опори прямої і зворотної послідовності навантаження приймають однаковими, то опори, зазначені на схемах заміщення цих послідовностей (рис.4.6,б і в), при розв'язанні даної задачі слід прийняти однаковими, тобто

$$Z_{1n}'' = Z_{2n} = j231 \text{ Ом}, \quad Z_{1L} = Z_{2L} = j265,7 \text{ Ом}, \quad Z_1 = Z_2 = j288,3 \text{ Ом}.$$

Обчислюємо надперехідну ЕРС навантаження, приведену до напруги 115 кВ і співпадаючу за фазою з ЕРС системи:

$$\dot{E}_{\phi.n}'' = \frac{j0,85U_{cp}n_T}{\sqrt{3}} = \frac{j0,85 \cdot 10,5 \cdot 115}{\sqrt{3} \cdot 11} = j54 \text{ кВ}.$$

Ця ЕРС повинна бути прикладена за опором навантаження Z_{1n}'' , показаним у схемі прямої послідовності на рис.4.6,б.

Розв'язок даної задачі виконуємо за формулами, наведеними у задачі 3-2 для ліній із двостороннім живленням. Оскільки обрив і КЗ мають місце на одній і тій же фазі А, у цих формулах слід прийняти $a = 1$, $a = 1$, $a^2 = 1$ і $\dot{E}_{\phi.n}'' = \dot{E}_{LA}$.

Обчислюємо елементи, що входять у зазначені рівняння, використовуючи дані, наведені на рис.4.6 і в даній задачі:

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{LA} = \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{\phi.n}'' = j(66,5 - 54) = j12,5 \text{ кВ},$$

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} = 1 + \frac{j288,3}{j288,3} + \frac{j288,3}{j98,63} = 4,92,$$

$$Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L} = j(265,7 + 265,7 + 34,7) = j566,1 \text{ Ом},$$

$$W = QZ_A^{(1)} - \frac{2(Z_{1L} - Z_{0L})^2}{Z_0} = 4,92 \cdot j566,1 - \frac{2(j265,7 - j34,7)^2}{j98,63} = j1700 \text{ Ом},$$

$$P = (Z_{2L} - Z_{0L})^2 = (j265,7 - j34,7)^2 = -53400 \text{ Ом}^2.$$

Струми $\dot{I}_{A1\kappa}$, $\dot{I}_{A1y}$ і $\dot{I}_{A2y}$ обчислюємо за формулами (3.1), (3.2) і (3.3)

задачі 3-2, враховуючи, що $Z_1 = Z_2$, $a = 1$ і $a^2 = 1$. Таким чином, у місці замикання фази A на землю

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{0\kappa} &= \frac{Q\dot{E}_{LA}}{W} + \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})\Delta\dot{E}}{Z_0 W} = \frac{4,92 \cdot j54000}{j1700} + \\ &+ \frac{(j265,7 - j34,7)j12500}{j98,63 \cdot j1700} = 173,5 \text{ A}, \\ \dot{I}_{A1y} &= \frac{(Z_{1L} - Z_{0L})\dot{E}_{LA}}{Z_0 W} + \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}\Delta\dot{E}}{W} - \frac{P\Delta\dot{E}}{Z_2 Z_0 W} = \frac{j(265,7 - 34,7)j54000}{j98,63 \cdot j1700} + \\ &+ \left(\frac{1}{j288,3} + \frac{1}{j98,63} \right) \frac{j566,1 \cdot j12500}{j1700} - \frac{53400 \cdot j12500}{j288,3 \cdot j98,63 \cdot j1700} = 144,73 \text{ A}, \\ \dot{I}_{A2y} &= \frac{(Z_{2L} - Z_{0L})\dot{I}_{A1\kappa} - Z_0 \dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \frac{j(265,7 - 34,7)173,5 - j98,63 \cdot 144,73}{j288,3 + j98,63} = \\ &= 66,9 \text{ A}.\end{aligned}$$

Струм нульової послідовності в місці розриву визначаємо із граничної умови рівності нулю повного струму фази A в цьому місці:

$$\dot{I}_{0y} = -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -144,73 - 66,9 = -211,63 \text{ A}.$$

Надперехідні симетричні складові струмів, що підтікають до місця КЗ з боку навантаження, визначаємо за обчисленими струмами і на підставі схем заміщення окремих послідовностей, наведених на рис.4.6:

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = 173,5 - 144,73 = 28,77 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2\kappa} - \dot{I}_{A2y} = 173,5 - 66,9 = 106,6 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0\kappa} - \dot{I}_{0y} = 173,5 - (-211,63) = 385,13 \text{ A}.$$

4-8. За даними рис.4.6 для усталеного режиму КЗ з урахуванням навантаження H обчислити симетричні складові напруг на шинах 110 кВ живлячої й приймаючої підстанцій при обриві фази A на живлячій підстанції й одночасному замиканні на землю цієї ж фази на приймаючій

підстанції. Нейтраль трансформатора T не заземлена. Визначити також напруги симетричних складових у точці N (початок лінії).

Розв'язок. При розземленій нейтралі трансформатора T (рис.4.6) струми нульової послідовності через його обмотки 110 кВ протікати не будуть, отже, $\dot{I}_{0L} = 0$ і $Z_{0L} = \infty$.

$$\text{У цьому випадку } \dot{I}_{0\kappa} = \dot{I}_{0y} + \dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0y}.$$

Для визначення симетричних складових напруг у заданих точках обчислюємо спочатку симетричні складові струмів [2]. Обчислюємо попередньо значення окремих елементів, що входять у розрахункові вирази:

$$Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0F} = j(827,7 + 265,7 + 63,93) = j1157,33 \text{ Ом},$$

$$W_A = Z_A^{(1)} + 2Z_{1L} + Z_1 + (Z_A^{(2)} + 2Z_L) \frac{Z_1}{Z_2} - \frac{(Z_{1L} - Z_{2L})^2}{Z_2} = j(1157,33 + 2 \cdot 827,7 + 850,31) + j(1157,33 + 2 \cdot 265,7) \frac{j850,31}{j288,31} - \frac{(j827,7 - j265,7)^2}{j288,31} = j7548 \text{ Ом}.$$

Струми всіх послідовностей у місці замикання фази A на землю

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{0\kappa} = \left(\frac{Z_{1L} - Z_{2L}}{Z_2} - 1 \right) \frac{\dot{E}_{FA}}{W_A} = \left(\frac{j(827,7 - 265,7)}{j288,31} - 1 \right) \frac{j66500}{j7548} = 8,36 \text{ А}.$$

Струми всіх послідовностей на початку лінії в місці обриву:

$$\dot{I}_{A1y} = \left(\frac{Z_A + 2Z_{2L}}{Z_2} + 1 \right) \frac{\dot{E}_{FA}}{W_A} = \left(\frac{j(1157,33 + 2 \cdot 265,7)}{j288,31} + 1 \right) \frac{j66500}{j7548} = 60,4 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2y} = -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{0y} = \dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{0\kappa} = -60,4 - 8,36 = -68,76 \text{ А}, \quad \dot{I}_{0y} = \dot{I}_{0\kappa} = 8,36 \text{ А}.$$

Визначаємо струми, що підтікають до місця КЗ праворуч (рис.4.6), тобто з боку навантаження:

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = 8,36 - 60,4 = -52,04 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2\kappa} - \dot{I}_{A2y} = 8,36 - (-68,76) = 77,12 \text{ А}.$$

За обчисленими струмами і даними, наведеними на схемі (рис.4.6), визначаємо напруги всіх послідовностей. Напруги на шинах 110 кВ приймаючої підстанції, тобто в місці КЗ, рівні:

$$\dot{U}_{A1\kappa} = -\dot{I}_{A1L} Z_{1L} = -(-52,04) j827,7 = j43000 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2\kappa} = -\dot{I}_{A2L} Z_{2L} = -77,12 \cdot j265,7 = -j20500 \text{ В}.$$

Напруга нульової послідовності в місці КЗ визначаємо з умови, що напруга фази *A* в цьому місці дорівнює нулю.

$$\text{Таким чином, } \dot{U}_{A\kappa} = \dot{U}_{A1\kappa} + \dot{U}_{A2\kappa} + \dot{U}_{0\kappa} = 0, \text{ звідки}$$

$$\dot{U}_{0\kappa} = -\dot{U}_{A1\kappa} - \dot{U}_{A2\kappa} = -j43000 + j20500 = -j22500 \text{ В}.$$

Напруги на шинах живлячої підстанції рівні:

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_{FA} - \dot{I}_{A1y} Z_{1c} = j66500 - j60,4 \cdot j6,61 = j66101 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2y} Z_{2c} = -(-68,76) \cdot j6,61 = j454 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{I}_{0y} Z_{0c} = -8,36 \cdot j7,93 = -j66,3 \text{ В}.$$

Визначаємо напруги на лінії в точці *N* (місце обриву):

$$\dot{U}_{A1N} = \dot{U}_{A1\kappa} + \dot{I}_{A1y} Z_{1l} = j43000 + 60,4 \cdot j16 = j43966 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2N} = \dot{U}_{A2\kappa} + \dot{I}_{A2y} Z_{2l} = -j20500 - (-68,76) j16 = -j21600 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{0N} = \dot{U}_{0\kappa} + \dot{I}_{0y} Z_{0l} = -j22500 + 8,36 \cdot j56 = -j22032 \text{ В}.$$

Перевіряємо виконані обчислення, визначаючи повздовжні напруги всіх послідовностей у місці обриву (точки *M* і *N*); вони повинні бути однакові за модулем та фазою:

$$\dot{U}_{A1y} = \dot{U}_{A1MN} = \dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A1N} = j66101 - j43966 = j22135 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2y} = \dot{U}_{A2MN} = \dot{U}_{A2M} - \dot{U}_{A2N} = j454 + j21600 = j22054 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{0y} = \dot{U}_{0MN} = \dot{U}_{0M} - \dot{U}_{0N} = -j66,3 + j22032 = j21965,7 \text{ В}.$$

Обчислення виконані правильно тому, що повздовжні напруги всіх послідовностей виявилися практично рівними між собою. За обчисленими даними симетричних складових струмів і напруг можуть бути обчислені

повні струми й напруги, а отже, електричні величини, що підводяться до пристроїв релейного захисту.

4-9. За рис.4.6 для усталеного режиму КЗ з урахуванням навантаження H обчислити симетричні складові струмів у місці обриву й праворуч від точки КЗ та симетричні складові напруг на шинах живлячої підстанції при двофазному КЗ між фазами A і B в кінці лінії й одночасному обриві фази A на початку лінії. Нейтраль трансформатора T заземлена.

Розв'язок. Обчислення виконуємо за формулами, наведеними у задачі 3-5 для лінії із двостороннім живленням, у яких приймається ЕРС $\dot{E}_L = 0$, оскільки в усталеному режимі КЗ на лінії з одностороннім живленням ЕРС навантаження, приєднаного до приймаючої підстанції, дорівнює нулю. У цьому випадку зазначені в задачі 3-5 розрахункові вирази при замиканні між фазами A і B спрощуються:

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \left(\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L} + \frac{aZ_{2L}}{Z_2} \right) \frac{\dot{E}_{FA}}{W}, \quad (4.24)$$

$$\dot{I}_{A1y} = \left(\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_A^{(2)} - \frac{Z_{2L}^2}{Z_2 Z_0} \right) \frac{\dot{E}_{FA}}{W}, \quad (4.25)$$

$$\dot{I}_{A1y} = - \frac{a^2 Z_{2L} \dot{I}_{A1\kappa} + Z_0 \dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0}, \quad (4.26)$$

де

$$Z_A^{(2)} = Z_{1L} + Z_{2L} + 2r_n, \quad (4.27)$$

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0}. \quad (4.28)$$

При замиканні між фазами A і B , а також між фазами C і A

$$W = QZ_A^{(2)} - \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L}^2 - \frac{Z_{1L}Z_{2L}}{Z_2} + \left(\frac{Z_1}{Z_2 Z_0} + \frac{1}{Z_2} \right) Z_{2L}^2 \right], \quad (4.29)$$

при замиканні між фазами B і C

$$W = QZ_A^{(2)} - \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L}^2 - \frac{2Z_{1L}Z_{2L}}{Z_2} + \left(\frac{Z_1}{Z_2Z_0} + \frac{1}{Z_2} \right) Z_{2L}^2 \right], \quad (4.30)$$

Значення опорів наведені на рис.4.6.

Вирази (4.24) - (4.26) можна також використовувати при замиканнях між фазами C і A або B і C та обриві фази A . Для цього в наведених виразах при замиканні між фазами C і A слід a й a^2 поміняти місцями, а при замиканні між фазами B і C - a й a^2 замінити одиницею.

Обчислюємо окремі елементи у формулах (4.27) - (4.29):

$$Z_A^{(2)} = Z_{1L} + Z_{2L} + 2r_n = j(827,7 + 265,7) + 0 = j1093,4 \text{ Ом},$$

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} = 1 + \frac{j850,31}{j288,31} + \frac{j850,31}{j98,63} = 12,58,$$

$$\begin{aligned} W = QZ_A^{(2)} - \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L}^2 - \frac{Z_{1L}Z_{2L}}{Z_2} + \left(\frac{Z_1}{Z_2Z_0} + \frac{1}{Z_2} \right) Z_{2L}^2 \right] = 12,58 \cdot j1093,4 - \\ - \left[\left(\frac{1}{j288,31} + \frac{1}{j98,63} \right) (j827,7)^2 - \frac{j827,7 \cdot j265,7}{j288,31} + \right. \\ \left. + \left(\frac{j850,31}{j288,31 \cdot j98,63} + \frac{1}{j288,31} \right) (j265,7)^2 \right] = j2881 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Обчислюємо значення струмів $\dot{I}_{A1\kappa}$, $\dot{I}_{A1y}$ і $\dot{I}_{A2y}$ за формулами (4.24) – (4.26):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1\kappa} = \left(\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_{1L} + \frac{aZ_{2L}}{Z_2} \right) \frac{\dot{E}_{FA}}{W} = \left[\left(\frac{1}{j288,31} + \frac{1}{j98,63} \right) j827,7 + \right. \\ \left. + \frac{(-0,5 + j0,867)j265,7}{j288,31} \right] \frac{j66500}{j2881} = (11,25 - 0,461 + j0,798) \cdot 23,1 = \\ = 249 + j18,5 = 250e^{j4,2} \text{ А}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1y} = \left(\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) Z_A^{(2)} - \frac{Z_{2L}^2}{Z_2Z_0} \right) \frac{\dot{E}_{FA}}{W} = \left[\left(\frac{1}{j288,31} + \frac{1}{j98,63} \right) j1093,4 - \right. \\ \left. - \frac{(j265,7)^2}{j288,31 \cdot j98,63} \right] \frac{j66500}{j2881} = 286 \text{ А}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A2y} &= -\frac{a^2 Z_{2L} \dot{I}_{A1\kappa} + Z_0 \dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \\ &= -\frac{(-0,5 - j0,867)j265,7(249 + j18,5) + j98,63 \cdot 286}{j288,31 + j98,63} = \\ &= 1,6 + j154,35 = 154e^{j89,4} \text{ А.}\end{aligned}$$

Визначаємо струми зворотної й нульової послідовності в точці двофазного КЗ із граничних умов:

$$\dot{I}_{C\kappa} = \dot{I}_{C1\kappa} + \dot{I}_{C2\kappa} = 0, \quad (4.31)$$

$$\dot{I}_{0\kappa} = \dot{I}_{0y} + \dot{I}_{0L} = 0. \quad (4.32)$$

З формули (4.31) випливає, що $\dot{I}_{C1\kappa} = a\dot{I}_{A1\kappa} = -\dot{I}_{C2\kappa} = -a^2\dot{I}_{A2\kappa}$,

звідки

$$\dot{I}_{A1\kappa} = -a\dot{I}_{A2\kappa} \quad (4.33)$$

або

$$\dot{I}_{A2\kappa} = -a^2\dot{I}_{A1\kappa}. \quad (4.34)$$

Підставляємо чисельне значення $\dot{I}_{A1\kappa}$ в (4.33):

$$\dot{I}_{A2\kappa} = (-0,5 - j0,867)(249 + j18,5) = 108,5 + j225,25 = 250e^{j64,3} \text{ А.}$$

Визначаємо струм нульової послідовності в місці розриву фази A з умови:

$$\dot{I}_{Ay} = \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = 0,$$

звідки

$$\dot{I}_{0y} = -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -286 - 1,6 - j154,35 = -287,6 - j154,35 = 326e^{j208,3} \text{ А.}$$

Симетричні складові струмів праворуч від точки КЗ визначаємо на підставі закону Кірхгофа для цього вузла:

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = 249 + j18,5 - 286 = -37 + j18,5 = 41,5e^{j153,5} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2\kappa} - \dot{I}_{A2y} = 108,5 + j225,25 - 1,6 - j154,35 = 106,9 + j70,9 = 128e^{j33,5} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0\kappa} - \dot{I}_{0y} = 0 + 287,6 + j154,35 = 326e^{j28,3} \text{ А.}$$

Визначаємо симетричні складові напруг на шинах 110 кВ живлячої підстанції за виразами:

$$\dot{U}_{A1} = \dot{E}_{FA} - \dot{I}_{A1y} Z_{1c} = j66500 - 286 \cdot j6,61 = j66500 - j1890 = j64610 \text{ В},$$

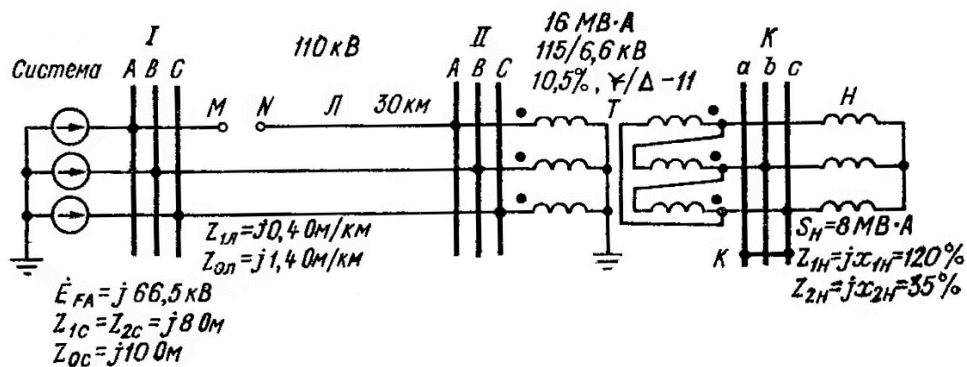
$$\dot{U}_{A2} = -\dot{I}_{A2y} Z_{2c} = -(1,6 + j154,35) j6,61 = 1020 - j10,6 = 1020e^{-j0,6} \text{ В},$$

$$\dot{U}_0 = -\dot{I}_{0y} Z_{0c} = -(-287,6 - j154,35) j7,93 = -1225 + j2280 = 2560e^{j118,3} \text{ В}.$$

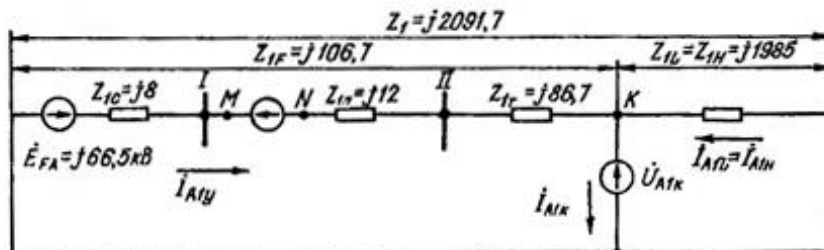
Глава п'ята

КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ НА СТОРОНІ ТРИКУТНИКА ПОНИЖУВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З ОДНОЧАСНИМ ОБРИВОМ ФАЗ НА ЛІНІЇ З ОДНОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ

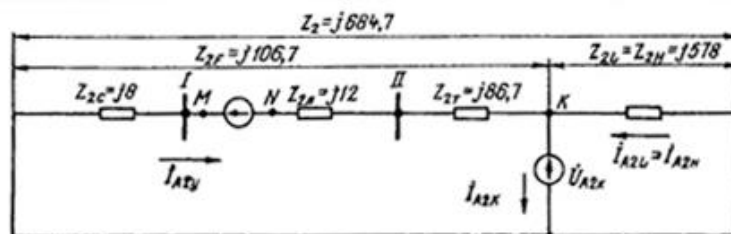
5-1. На рис.5.1,а наведена вихідна схема електропередачі, згідно якій енергія від системи передається навантаженню H по фазах B і C лінії $Л$ 110 кВ через понижуючий трансформатор T з наглухо заземленою нейтраллю.



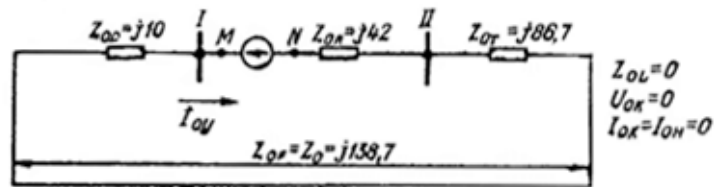
а)



б)



в)



г)

Рис.5.1. До задач 5-1 – 5-5: *а* – вихідна схема одностороннього живлення навантаження, *б* – схема заміщення прямої послідовності, *в* – зворотної, *г* – нульової при обриві фази *А* на лінії й двофазному КЗ за трансформатором.

За умовами обмеження впливу струмів нульової послідовності мережі 110 кВ на лінії зв'язку навантаження *Н* на приймаючій підстанції знижено до 8 МВА. Визначити усталені струми всіх послідовностей і повні струми в лінії 110 кВ і на стороні 6 кВ трансформатора при двофазному металевому КЗ між фазами *а* і *с* на шинах 6 кВ і за обчисленим даними побудувати векторні діаграми струмів.

Розв'язок. У табл.5.1 наведені співвідношення симетричних складових струмів і напруг при замиканні на землю на стороні заземленої зірки й замиканні двох фаз на стороні трикутника трансформатора із групою з'єднання Y/Δ - 11.

Якщо на стороні заземленої зірки прийняти $I_0 = 0$ й $U_0 = 0$, то, порівнюючи струми й напруги в місці ушкодження при однофазних КЗ на стороні зірки трансформатора зі струмами й напругами при двофазних КЗ на стороні трикутника трансформатора (табл.5.1), можемо встановити наступне: при замиканнях на стороні трикутника трансформатора із групою з'єднання Y/Δ - 11 між фазами *с* і *а*, *а* і *б*, *б* і *с* використовуються розрахункові вирази для замикань на землю на стороні зірки трансформатора із заземленою нейтраллю відповідно фаз *А*, *В* і *С*.

Співвідношення симетричних складових струмів і напруг при КЗ

Вид короткого замикання	Фази	Співвідношення в місцях ушкоджень для випадку, коли за основну прийнята фаза A	
		для струмів	для напруг
Замикання на землю однієї фази на стороні заземленої зірки трансформатора	A	$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_0$	$\dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_0 = 0$
	B	$a^2 \dot{I}_{A1} = a \dot{I}_{A2} = \dot{I}_0$	$a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} + \dot{U}_0 = 0$
	C	$a \dot{I}_{A1} = a^2 \dot{I}_{A2} = \dot{I}_0$	$a \dot{U}_{A1} + a^2 \dot{U}_{A2} + \dot{U}_0 = 0$
Замикання між двома фазами на стороні трикутника трансформатора $\nabla/\Delta - 11$	$b \text{ і } c$	$\dot{I}_{A1} = a \dot{I}_{A2}, \quad \dot{I}_0 = 0$	$\dot{U}_{A1} = -a \dot{U}_{A2}$
	$c \text{ і } a$	$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2}, \quad \dot{I}_0 = 0$	$\dot{U}_{A1} = -\dot{U}_{A2}$
	$a \text{ і } b$	$\dot{I}_{A1} = a^2 \dot{I}_{A2}, \quad \dot{I}_0 = 0$	$\dot{U}_{A1} = -a^2 \dot{U}_{A2}$

Примітки. 1. $a = -0,5 + j0,867$; $a^2 = -0,5 - j0,867$.

2. Струми й напруги сторони трикутника трансформатора приведені до сторони заземленої зірки за допомогою їхнього повороту на -30° для прямої послідовності й на $+30^\circ$ для зворотної.

Тому для умов даної задачі (міжфазне КЗ на стороні трикутника й обрив фази на стороні зірки трансформатора) можна використовувати розрахункові вирази, наведені в задачі 4-4 для обриву фази A і одночасного замикання на землю однієї з фаз A , B або C , якщо в цих виразах прийняти (рис.5.1):

$$Z_{0L} = 0, \quad Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + 2r_n.$$

Обчислені за поданими виразами значення струмів і напруг вірні для сторони 110 кВ (сторона зірки трансформатора).

Для визначення значень струмів і напруг на стороні 6 кВ трикутника трансформатора необхідно струми й напруги прямої послідовності повернути на 30° , зворотної – на -30° :

$$\dot{I}_{a1} = e^{j30} \dot{I}_{A1} n_T, \quad \dot{U}_{a1} = e^{j30} \dot{U}_{A1} \frac{1}{n_T}, \quad (5.1)$$

$$\dot{I}_{a2} = e^{-j30} \dot{I}_{A2} n_T, \quad \dot{U}_{a2} = e^{-j30} \dot{U}_{A2} \frac{1}{n_T}, \quad (5.2)$$

де величини з індексом a відносяться до сторони трикутника, а з індексом A - до сторони зірки трансформатора;

n_T - коефіцієнт трансформації трансформатора T ;

$\dot{U}_{a1}, \dot{U}_{a2}$ - фазні напруги відносно нейтральної точки системи на стороні 6 кВ трансформатора;

$\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}$ - фазні напруги відносно землі на стороні 110 кВ трансформатора.

За вихідним даними (рис.5.1,а) обчислюємо приведені до напруги 110 кВ опори для схем заміщення окремих послідовностей. Опори навантаження

$$Z_{1n} = Z_{1L} = j \frac{z_{1n} \% U_{ном}^2}{100 S_n} = j \frac{120 \cdot 115^2}{100 \cdot 8} = j1985 \text{ Ом},$$

$$Z_{2n} = Z_{2L} = j \frac{35 \cdot 115^2}{100 \cdot 8} = j578 \text{ Ом}.$$

Опори трансформатора й лінії

$$Z_{1T} = Z_{2T} = Z_{0T} = j \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 16} = j86,7 \text{ Ом},$$

$$Z_{1l} = Z_{2l} = 30 \cdot j0,4 = j12 \text{ Ом}, \quad Z_{0l} = 30 \cdot j1,4 = j42 \text{ Ом}.$$

Загальні опори (усіх послідовностей) системи, лінії й трансформатора до точки КЗ рівні (рис.5.1):

$$Z_{1F} = Z_{2F} = Z_{1c} + Z_{1l} + Z_{1T} = j(8 + 12 + 86,7) = j106,7 \text{ Ом},$$

$$Z_{0F} = Z_{0c} + Z_{0l} + Z_{0T} = j(10 + 42 + 86,7) = j138,7 \text{ Ом}.$$

Сумарні опори в схемі кожної послідовності:

$$Z_1 = Z_{1F} + Z_{1L} = j(106,7 + 1985) = j2091,7 \text{ Ом},$$

$$Z_2 = Z_{2F} + Z_{2L} = j(106,7 + 578) = j684,7 \text{ Ом},$$

$$Z_0 = Z_{0F} = j138,7 \text{ Ом}.$$

Обчислені величини нанесені на рис.5.1.

Як вказувалося вище, при замиканні між фазами a і c на стороні трикутника трансформатора можна використовувати розрахункові вирази, наведені в задачі 4-4 для замикання на землю фази A на стороні цього трансформатора при наступних умовах:

$$\dot{I}_{0\kappa} = 0, \quad \dot{U}_{0\kappa} = 0, \quad Z_{0L} = 0, \quad Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + 2r_n. \quad (5.3)$$

Підставляючи ці значення у формули (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.18), (4.21) і (4.23) задачі 4-4 і враховуючи, що при замиканні фази A на землю й обриві цієї фази в цих формулах a й a^2 слід замінити одиницею, отримуємо:

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{E}_{FA} \left(\frac{Z_{1L} - Z_{2L}}{Z_2 W} + \frac{Z_{1L}}{Z_0 W} \right), \quad (5.4)$$

$$\dot{I}_{A1\kappa} = a \dot{I}_{A2\kappa}, \quad (5.5)$$

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{E}_{FA} \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}}{W} - \frac{P}{Z_2 Z_0 W} \right], \quad (5.6)$$

$$\dot{I}_{A2y} = \frac{Z_{2L} \dot{I}_{A1\kappa} - Z_0 \dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0}, \quad (5.7)$$

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0}, \quad (5.8)$$

$$W = Q Z_A^{(1)} - \left[\frac{(Z_{1L} - Z_{2L})^2}{Z_2} + \frac{Z_{1L}^2}{Z_0} + \frac{Z_{2L}^2 Z_1}{Z_2 Z_0} \right], \quad (5.9)$$

$$P = Z_{2L}^2. \quad (5.10)$$

У формулах (5.4) - (5.7) струми приведені до сторони зірки трансформатора.

Визначаємо окремі елементи у формулах (5.3), (5.8), (5.9) і (5.10):

$$Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + 2r_n = j(1985 + 578) + 0 = j2563 \text{ Ом},$$

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} = 1 + \frac{j2091,7}{j684,7} + \frac{j2091,7}{j138,7} = 19,12,$$

$$W = QZ_A^{(1)} - \left[\frac{(Z_{1L} - Z_{2L})^2}{Z_2} + \frac{Z_{1L}^2}{Z_0} + \frac{Z_{2L}^2 Z_1}{Z_2 Z_0} \right] = 19,12 \cdot j2563 - \left[\frac{(j1985 - j578)^2}{j684,7} + \frac{(j1985)^2}{j138,7} + \frac{(j578)^2 \cdot j2091,7}{j684,7 \cdot j138,7} \right] = j10470 \text{ Ом},$$

$$P = Z_{2L}^2 = (j578)^2 = -334000 \text{ Ом}^2.$$

Обчислюємо струми за формулами (5.4) - (5.7):

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{E}_{FA} \left(\frac{Z_{1L} - Z_{2L}}{Z_2 W} + \frac{Z_{1L}}{Z_0 W} \right) = j66500 \left(\frac{j1985 - j578}{j684,7 \cdot j10470} + \frac{j1985}{j138,7 \cdot j10470} \right) = 103,85 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A1\kappa} = a \dot{I}_{A2\kappa} = 103,85 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{E}_{FA} \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}}{W} - \frac{P}{Z_2 Z_0 W} \right] = j66500 \left[\left(\frac{1}{j684,7} + \frac{1}{j138,7} \right) \frac{j2563}{j10470} - \frac{-334000}{j684,7 \cdot j138,7 \cdot j10470} \right] = 143,73 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2y} = \frac{Z_{2L} \dot{I}_{A1\kappa} - Z_0 \dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \frac{j578 \cdot 103,85 - j138,7 \cdot 143,73}{j684 + j138,7} = 48,8 \text{ А}.$$

Струм нульової послідовності в лінії визначаємо з умови рівності нулю струму обірваної фази A , тобто

$$\dot{I}_{Ay} = \dot{I}_{A1y} + \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = 0,$$

звідки

$$\dot{I}_{0y} = \dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -143,73 - 48,8 = -192,53 \text{ А}.$$

Даний струм нульової послідовності протікає по лінії 110 кВ і по обмотках трансформатора 110 кВ, з'єднаного у зірку, і не трансформується на сторону 6 кВ, замикаючись в обмотках трансформатора, з'єднаних у трикутник.

Струми прямої і зворотної послідовності, що підтікають до місця КЗ від навантаження H , приведені до сторони зірки трансформатора, визначаємо зі схем заміщення (рис.5.1,б і рис.5.1,в):

$$\dot{I}_{A1n} = \dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = 103,85 - 143,73 = -39,88 \text{ А.}$$

Знак мінус показує, що струм має напрямок, прямо протилежний тому, який показано на рис.5.1,б, тобто при двофазному КЗ струм прямої послідовності від точки КЗ притікає до навантаження);

$$\dot{I}_{A2n} = \dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2\kappa} - \dot{I}_{A2y} = 103,85 - 48,8 = 55,05 \text{ А.}$$

Як вказувалося вище, струм нульової послідовності в місці двофазного КЗ і в навантаженні H дорівнює нулю.

Визначаємо повні струми фаз B і C , що протікають у лінії 110 кВ:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Bn} &= \dot{I}_{B1y} + \dot{I}_{B2y} + \dot{I}_{0y} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 - j0,867)143,73 + \\ &+ (-0,5 + j0,867)48,8 - 192,53 = -288,79 - j82,4 = 300e^{j196} \text{ А,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Cn} &= \dot{I}_{C1y} + \dot{I}_{C2y} + \dot{I}_{0y} = a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 + j0,867)143,73 + \\ &+ (-0,5 - j0,867)48,8 - 192,53 = -288,79 + j82,4 = 300e^{j164} \text{ А.} \end{aligned}$$

Визначаємо симетричні складові струмів на стороні 6 кВ (трикутника) трансформатора за формулами (5.1) і (5.2):

$$\dot{I}_{a1T} = e^{j30} \dot{I}_{A1y} n_T = (0,867 + j0,5)143,73 \frac{115}{6,6} = 2170 - j1250 = 2500e^{j30} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{a2T} = e^{-j30} \dot{I}_{A2y} n_T = (0,867 - j0,5)48,8 \frac{115}{6,6} = 736 - j424 = 850e^{-j30} \text{ А.}$$

Визначаємо повні струми на стороні 6 кВ трансформатора:

$$\dot{I}_{aT} = \dot{I}_{a1T} + \dot{I}_{a2T} = 2170 + j1250 + 736 - j424 = 2906 + j826 = 3020e^{j15,8} \text{ А,}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{bT} &= a^2 \dot{I}_{a1T} + a \dot{I}_{a2T} = (-0,5 - j0,867)(2170 + j1250) + \\ &+ (-0,5 + j0,867)(736 - j424) = -j1654 \text{ А,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{cT} &= a \dot{I}_{a1T} + a^2 \dot{I}_{a2T} = (-0,5 + j0,867)(2170 + j1250) + \\ &+ (-0,5 - j0,867)(736 - j424) = -2906 + j829 = 3020e^{j164,2} \text{ А.} \end{aligned}$$

Для перевірки правильності виконаних обчислень визначимо повні струми в місці двофазного КЗ, при цьому спочатку обчислимо повні струми з боку навантаження, приведені до сторони трикутника трансформатора:

$$\dot{I}_{aH} = \dot{I}_{a1H} + \dot{I}_{a2H} = e^{j30} \dot{I}_{A1H} n_T + e^{-j30} \dot{I}_{A2H} n_T = e^{j30} (-39,88) \frac{115}{6,6} + e^{-j30} 55,05 \frac{115}{6,6} = 227 - j827 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{bH} = a^2 \dot{I}_{a1H} + a \dot{I}_{a2H} = e^{j240} e^{j30} \dot{I}_{A1H} n_T + e^{j120} e^{-j30} \dot{I}_{A2H} n_T = e^{j270} (-39,88) \frac{115}{6,6} + e^{j90} 55,05 \frac{115}{6,6} = j1654 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{cH} = a \dot{I}_{a1H} + a^2 \dot{I}_{a2H} = e^{j120} e^{j30} \dot{I}_{A1H} n_T + e^{j240} e^{-j30} \dot{I}_{A2H} n_T = e^{j150} (-39,88) \frac{115}{6,6} + e^{j210} 55,05 \frac{115}{6,6} = (-227 - j827) \text{ A}.$$

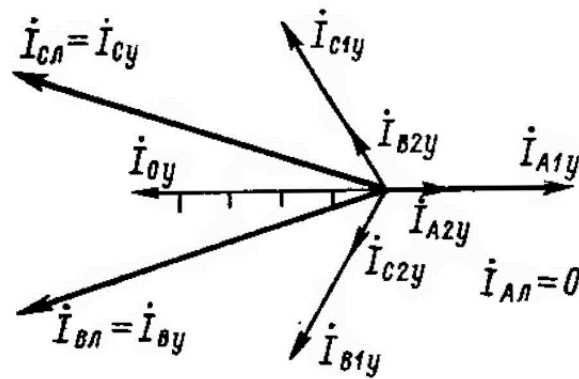
Повні струми в місці двофазного КЗ дорівнюють сумі струмів трансформатора T і навантаження H :

$$\dot{I}_{aK}^{(2)} = \dot{I}_{aT} + \dot{I}_{aH} = 2906 + j826 + 227 - j827 = (3133 - j1) \text{ A},$$

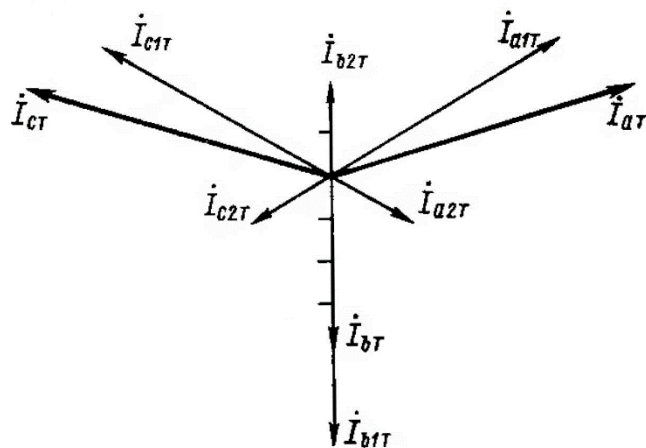
$$\dot{I}_{bK}^{(2)} = \dot{I}_{bT} + \dot{I}_{bH} = -j1654 + j1654 = 0,$$

$$\dot{I}_{cK}^{(2)} = \dot{I}_{cT} + \dot{I}_{cH} = -2906 + j829 - 227 - j827 = (-3133 + j2) \text{ A}.$$

Значення цих струмів показують, що розрахунки зроблені правильно, оскільки при двофазному КЗ між фазами a і c повний струм фази b у місці КЗ дорівнює нулю, а повні струми фаз a і c рівні за модулем й зсунуті за фазо. на 180° . За обчисленим даними побудовані векторні діаграми струмів, наведені на рис.5.2. Слід вказати, що повні струми фаз і струми прямої і зворотної послідовності на стороні трикутника трансформатора можуть бути визначені графічно.



а)



б)

Рис.5.2. До задачі 5-1. Векторні діаграми струмів:
a - у лінії, масштаб 1 под = 40 А; *б* - на стороні 6 кВ трансформатора,
масштаб 1 под = 400 А

5-2. На рис.5.1 наведена вихідна неповнофазна схема й схеми всіх послідовностей, на яких зазначені опори та ЕРС системи. При двофазному КЗ на шинах 6 кВ (сторона трикутника трансформатора) між фазами *a* і *c* визначити усталені струми всіх послідовностей і повні струми в лінії та у місці КЗ у випадку, коли не враховується навантаження *H* приймаючої підстанції. Зрівняти отримані результати з

результатами розв'язку задачі 5-1, у якій для аналогічних умов враховане навантаження H . Показати на трилінійній схемі принциповий розподіл повних струмів за умови, що коефіцієнт трансформації трансформатора дорівнює одиниці.

Розв'язок. У цьому випадку (замикання між фазами a і c на стороні трикутника й обрив фази A на стороні зірки трансформатора) можна використовувати розрахункові вирази, наведені в задачі 5-1, у яких слід прийняти (якщо не враховувати навантаження H)

$$Z_{1H} = Z_{1L} = \infty, \quad Z_{2H} = Z_{2L} = \infty. \quad (5.11)$$

Підставляючи ці значення у формули (5.3), (5.4), (5.6) - (5.10) задачі 5-1, після відповідних спрощень, отримуємо вираз для струмів у лінії (на стороні зірки трансформатора):

$$\dot{I}_{A1y} = \frac{\dot{E}_{FA}}{Z_{1F} + Z_{2F} + 4Z_{0F}} = \frac{j66500}{j(106,7 + 106,7 + 4 \cdot 138,7)} = 86,6 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{A1y} = 86,6 \text{ A}, \quad \dot{I}_{0y} = -2\dot{I}_{A1y} = -2 \cdot 86,6 = -173,2 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{Bl} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 - j0,867)86,6 + (-0,5 + j0,867)86,6 - 173,2 = -259,8 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{Cl} = a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = (-0,5 + j0,867)86,6 + (-0,5 - j0,867)86,6 - 173,2 = -259,8 \text{ A}.$$

Струми прямої і зворотної послідовності на стороні трикутника 6 кВ трансформатора визначаються за допомогою повороту струмів на стороні зірки відповідно на кут $+30^\circ$ і -30° за формулами (5.1) і (5.2) задачі 5-1:

$$\dot{I}_{a1T} = e^{j30} \dot{I}_{A1y} n_T = (0,867 + j0,5)86,6 \frac{115}{6,6} = 1309 + j755 = 1510e^{j30} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{a2T} = e^{-j30} \dot{I}_{A2y} n_T = (0,867 - j0,5)86,6 \frac{115}{6,6} = 1309 - j755 = 1510e^{-j30} \text{ A}.$$

Струми нульової послідовності з боку зірки не мають місця в лінійних проводах сторони трикутника, оскільки замикаються в останньому.

Повні струми фаз на стороні трикутника трансформатора рівні:

$$\dot{I}_{aT} = \dot{I}_{a1T} + \dot{I}_{a2T} = 1309 + j755 + 1309 - j755 = 2618 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{bT} = a^2 \dot{I}_{a1T} + a \dot{I}_{a2T} = e^{j240} e^{j30} \cdot 1510 + e^{j120} e^{-j30} \cdot 1510 = -j1510 + j1510 = 0,$$

$$\dot{I}_{cT} = a \dot{I}_{a1T} + a^2 \dot{I}_{a2T} = e^{j120} e^{j30} \cdot 1510 + e^{j240} e^{-j30} \cdot 1510 = -2618 \text{ A}.$$

Струми в місці КЗ дорівнюють струмам, що протікають на стороні 6 кВ трансформатора, оскільки струми з боку навантаження дорівнюють нулю (навантаження не враховується).

Обчислення виконані правильно тому, що ми визначили, що струми фаз a і c у місці двофазного КЗ рівні за модулем й зсунуті за фазою на 180° , а струм фази b (неушкодженої фази) дорівнює нулю, тобто отримані значення відповідають граничним умовам у точці двофазного КЗ

У табл.5.2 наведені абсолютні значення струмів у лінії й на стороні трикутника трансформатора при врахуванні навантаження (за даними задачі 5-1) і у випадку, коли навантаження не враховується.

Порівняння цих даних показує, що без врахування навантаження струми в лінії I_1 , I_0 і у фазах зменшуються на 40, 10, 13% відповідно, а струми зворотної послідовності збільшуються на 77%. Таке ж співвідношення виходить для струмів, що протікають на стороні 6 кВ (трикутника) трансформатора. Таким чином, можна зробити висновок, що при розрахунках уставок захистів, що використовують фільтри прямої, зворотної й нульової послідовності, необхідно в розрахунках неповнофазних режимів урахувати навантаження.

За даними задач 5-1 і 5-2 (див. табл.5.2) слідує, що при обриві фази A на лінії (на стороні зірки трансформатора) і одночасному КЗ між фазами a і c на стороні трикутника трансформатора із групою з'єднання

∇/Δ - 11 струми у фазах B і C лінії рівні між собою як при врахуванні навантаження, так і без його врахування.

Таблиця 5.2

Абсолютні значення струмів при врахуванні та неврахуванні навантаження

Позначення струмів	у лінії 110 кВ		на стороні 6 кВ трансформатора	
	при врахуванні навантаження	без врахування навантаження	при врахуванні навантаження	без врахування навантаження
I_1	143,73	86,6	2500	1510
I_2	48,8	86,6	850	1510
I_0	192,5	173,2	0	0
I_A	0	0	-	-
I_B	300	259,8	-	-
I_C	300	259,8	-	-
I_a	-	-	3020	2618
I_b	-	-	1654	0
I_c	-	-	3020	2618

Це впливає також з розподілу струмів для даних умов (рис.5.3) у випадку, коли коефіцієнт трансформації трансформатора дорівнює одиниці. Наведений розподіл струмів впливає з рівності магніторушійних сил (за абсолютним значенням) обмоток вищої й нижчої напруги кожної фази трансформатора. Для трансформаторів із групою з'єднання обмоток ∇/Δ - 11, у яких коефіцієнт трансформації дорівнює одиниці, число витків обмотки, з'єднаної в трикутник, в $\sqrt{3}$ рази більше числа витків обмотки, з'єднаної в зірку, тому

$$I_{\omega} = I_{\tau.\phi} \sqrt{3},$$

$$\text{звідки } I_{\tau.\phi} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\omega},$$

де $I_{\tau.\phi}$ - струм в обмотці трансформатора, з'єднаний в трикутник.

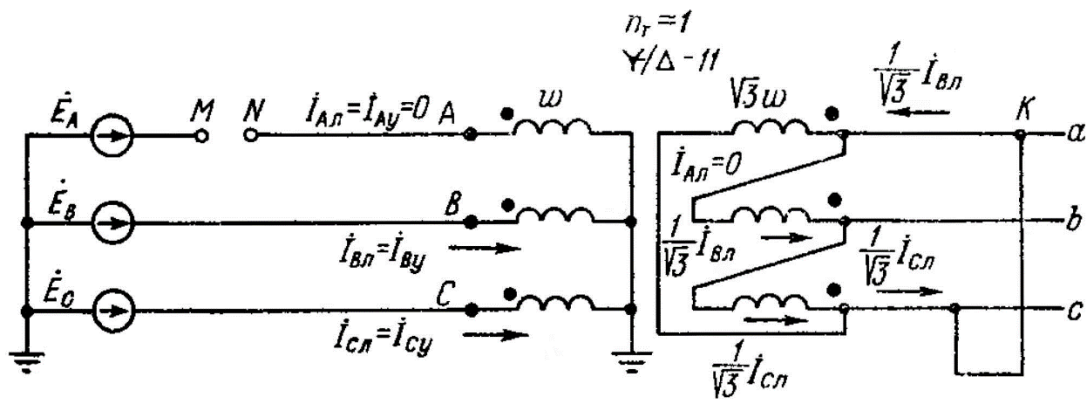


Рис.5.3. До задачі 5-2. Розподіл повних струмів при КЗ між фазами a і c на стороні трикутника трансформатора $\text{Y}/\Delta - 11$ при одночасному обриві фази A на живлячій лінії.

Навантаження приймаючої підстанції не враховується.

5-3. Для схеми, представленої на рис.5.1, обчислити усталені струми всіх послідовностей і повні струми в лінії 110 кВ (сторона зірки трансформатора) при двофазних КЗ на шинах 6 кВ приймаючої підстанції (сторона трикутника трансформатора) між фазами a і b , b і c . За отриманим даними й даними задачі 5-1 скласти порівняльну таблицю струмів у лінії для всіх випадків двофазних КЗ на стороні трикутника трансформатора з одночасним обривом фази A на стороні зірки трансформатора.

Розв'язок. Як уже було зазначено в задачі 5-1, якщо на стороні заземленої зірки прийняти $I_0 = 0$ та $U_0 = 0$, то при замиканнях на стороні трикутника трансформатора із групою з'єднання $\text{Y}/\Delta - 11$ між фазами c і a , a і b , b і c використовуються розрахункові вирази для замикань на землю на стороні зірки трансформатора із заземленою нейтраллю відповідно фаз A , B і C .

Застосовуючи це положення до умов даної задачі, розрахунки двофазних КЗ на стороні трикутника з одночасним обривом фази A на стороні зірки трансформатора виконуємо за формулами, наведеними у задачі 4-4 для випадку обриву фази A з одночасним замиканням на землю однієї з фаз A , B або C ; при цьому приймаємо (рис.5.1):

$$Z_{0L} = 0, \quad Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + 2r_n. \quad (5.12)$$

Обчислені за поданими формулами значення струмів вірні для сторони 110 кВ (сторона зірки трансформатора), тобто вони є шуканими струмами лінії.

Використовуючи формули (5.12) даної задачі й формули (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.18), (4.20) і (4.22) задачі 4-4, після спрощення отримуємо, розрахункові вирази для замикання між фазами a і b .

$$\text{Із задачі 5-1 } Q = 19,12; \quad Z_A^{(1)} = 2563 \text{ Ом.}$$

Визначаємо попередньо деякі члени розрахункових виразів:

$$W = QZ_A^{(1)} - \left[\frac{Z_{1L}^2 + Z_{1L}Z_{2L} + Z_{2L}^2}{Z_2} + \frac{Z_{1L}^2}{Z_0} + \frac{Z_{2L}^2 Z_1}{Z_2 Z_0} \right] = 19,12 \cdot j2563 -$$

$$- \left[\frac{(j1985)^2 + j1985 \cdot j578 + (j578)^2}{j684,7} + \frac{(j1985)^2}{j138,7} + \frac{(j578)^2 \cdot j2091,7}{j684,7 \cdot j138,7} \right] =$$

$$= j5437 \text{ Ом,}$$

$$P = Z_{2L}^2 = (j578)^2 = -334000 \text{ Ом}^2.$$

Приводимо розрахункові вирази при замиканні між фазами a і b для струмів, приведених до сторони зірки трансформатора:

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \frac{\dot{E}_{FA}}{W} \left(\frac{Z_{1L} - a^2 Z_{2L}}{Z} + \frac{Z_{1L}}{Z_0} \right) = \frac{j66500}{j5437} \left[\frac{j1985 - (-0,5 - j0,867)j578}{j684,7} + \right.$$

$$\left. + \frac{j1985}{j138,7} \right] = (215,66 + j8,96) \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{A1y} = \frac{\dot{E}_{FA}}{W} \left[\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}}{W} - \frac{P}{Z_2 Z_0} \right] = \frac{j66500}{j5437} \left[\left(\frac{1}{j684,7} + \frac{1}{j138,7} \right) j2563 - \right.$$

$$\left. - \frac{334000}{j684,7 \cdot j138,7} \right] = 276,3 \text{ A,}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A2y} &= \frac{aZ_{2L}\dot{I}_{A1\kappa} - Z_0\dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \\ &= \frac{(-0,5 + j0,867)j578(215,66 + j8,96) - j138,7 \cdot 276,3}{j684 + j138,7} = \\ &= -127,44 + j127,86 = 180e^{j135} \text{ A},\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{0y} = -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -276,3 + 127,44 - j127,86 = (-148,86 - j127,86) \text{ A}.$$

Струми у фазах B і C лінії рівні:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{Bl} = \dot{I}_{By} &= a^2\dot{I}_{A1y} + a\dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = e^{j240} \cdot 276,3 + e^{j120} \cdot 180e^{j135} - 148,86 - j127,86 = \\ &= -333,61 - j540,86 = 638e^{j238,3} \text{ A},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{Cl} = \dot{I}_{Cy} &= a\dot{I}_{A1y} + a^2\dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = e^{j120} \cdot 276,3 + e^{j240} \cdot 180e^{j135} - 148,86 - j127,86 = \\ &= -114,01 + j158,74 = 195e^{j125,7} \text{ A}.\end{aligned}$$

При замиканні між фазами b і c на стороні трикутника струми $\dot{I}_{A1\kappa}$ та $\dot{I}_{A2y}$, приведені до сторони зірки трансформатора, визначаються за наведеними у цій задачі виразах, але в них a й a^2 слід поміняти місцями. Струми $\dot{I}_{0y}$, $\dot{I}_{Bl}$ і $\dot{I}_{Cl}$ визначаються за наведеними у цій задачі виразах. Таким чином,

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A1\kappa} &= \frac{\dot{E}_{FA}}{W} \left(\frac{Z_{1L} - aZ_{2L}}{Z} + \frac{Z_{1L}}{Z_0} \right) = \frac{j66500}{j5437} \left[\frac{j1985 - (-0,5 + j0,867)j578}{j684,7} + \right. \\ &\left. + \frac{j1985}{j138,7} \right] = (215,66 - j8,96) \text{ A},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A2y} &= \frac{a^2Z_{2L}\dot{I}_{A1\kappa} - Z_0\dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \\ &= \frac{(-0,5 - j0,867)j578(215,66 + j8,96) - j138,7 \cdot 276,3}{j684 + j138,7} = \\ &= -127,44 - j127,86 = 180e^{j225} \text{ A},\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{0y} = -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -276,3 + 127,44 + j127,86 = (-148,86 + j127,86) \text{ A}.$$

Струм $\dot{I}_{A1y}$ визначений вище.

$$\dot{I}_{Bl} = \dot{I}_{By} = a^2 \dot{I}_{A1y} + a \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = e^{j240} \cdot 276,3 + e^{j120} \cdot 180e^{j225} - 148,86 + j127,86 = -114,01 - j158,74 = 195e^{j234,3} \text{ А},$$

$$\dot{I}_{Cl} = \dot{I}_{Cy} = a \dot{I}_{A1y} + a^2 \dot{I}_{A2y} + \dot{I}_{0y} = e^{j120} \cdot 276,3 + e^{j240} \cdot 180e^{j225} - 148,86 + j127,86 = -333,61 + j540,86 = 638e^{j121,7} \text{ А}.$$

За обчисленими значенням струмів і даним задачі 5-1 складена порівняльна табл.5.3 струмів у лінії при обриві на ній фази A і одночасному КЗ між фазами a і b , b і c , c і a на стороні трикутника трансформатора (рис.5.1,а) з урахуванням навантаження H .

Таблиця 5.3

Порівняльна таблиця струмів у лінії при обриві фази і одночасному міжфазному КЗ

Фази лінії	Струми в лінії L , А, при обриві на ній фази A і одночасному КЗ на стороні трикутника трансформатора T (рис.5.1) між фазами		
	a і b	b і c	c і a
A	0	0	0
B	$638e^{j238,3}$	$195e^{j234,3}$	$300e^{j196}$
C	$195e^{j125,7}$	$638e^{j121,7}$	$300e^{j164}$

5-4. При КЗ між фазами a і c (рис.5.1) на стороні трикутника трансформатора T була відмова у відключенні фази A на лінії L з боку джерела живлення. Визначити для цих умов усталені струми всіх послідовностей і повні струми фаз лінії, а також показати принциповий розподіл повних струмів у трансформаторі T , у якого коефіцієнт трансформації дорівнює одиниці. Вихідні дані зазначені на рис.5.1.

Розв'язок. Відмова у відключенні фази A рівнозначна обриву фаз B і C , тому розрахунки виконуємо для випадку обриву фаз B і C на стороні зірки (на лінії) і одночасного КЗ між фазами a і c на стороні трикутника трансформатора T (рис.5.1). Як це докладно пояснено в задачі 5-1, замість замикання між двома фазами на стороні трикутника трансформатора можна розглядати однофазні КЗ на стороні заземленої зірки

трансформатора, якщо на цій стороні прийняти $\dot{I}_0 = 0$ й $\dot{U}_0 = 0$. При цьому розрахункові вирази для замикань на землю фази A , B і C на стороні зірки відповідно відносяться й до замикань на стороні 6 кВ трикутника трансформатора ∇/Δ - 11 між фазами c і a , a і b , b і c . Таким чином, у даній задачі можна скористатися розрахунковими виразами для замикання на землю однієї фази з одночасним обривом фаз B і C , якщо прийняти $Z_{0L} = 0$, $Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + 2r_n$.

Ці розрахункові вирази можуть бути отримані з рівнянь (3.13) і (3.14), наведених у задачі 3-5 для лінії із двостороннім живленням, якщо в них прийняти $\dot{E}_L = 0$, $Z_{0L} = 0$, $Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + 2r_n$.

Крім того, у формулах (3.13), (3.14) і (3.15) задачі 3-5 впливає для перетворених умов даної задачі (обрив фаз B і C та замикання на землю фази A на лінії) замінити a й a^2 одиницею.

Підставляючи наведені вище значення у формули (3.13), (3.14) і (3.15) задачі 3-5 для лінії із двостороннім живленням, одержуємо наступні розрахункові вирази для усталених струмів у лінії (на стороні зірки трансформатора) з одностороннім живленням при замиканні між фазами a і c на стороні трикутника й одночасному обриві фази A на стороні зірки трансформатора:

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \frac{-\dot{E}_{FA}(Z_{1L} + Z_{2L})}{(Z_{1L} + Z_{2L})^2 - (Z_{1L} + Z_{2L})(Z_1 + Z_2 + Z_0)} = \frac{\dot{E}_{FA}}{Z_{1F} + Z_{2F} + Z_{0F}}, \quad (5.13)$$

$$\dot{I}_{A1y} = \frac{-\dot{E}_{FA}(Z_{1L} + Z_{2L})}{(Z_{1L} + Z_{2L})^2 - (Z_{1L} + Z_{2L})(Z_1 + Z_2 + Z_0)} = \frac{\dot{E}_{FA}}{Z_{1F} + Z_{2F} + Z_{0F}}, \quad (5.14)$$

де

$$Z_\alpha = Z_{\alpha F} + Z_{\alpha L} \quad (\alpha = 1, 2, 0).$$

З виразів (5.13) і (5.14) випливає, що

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{I}_{A1y}. \quad (5.15)$$

Далі із граничної умови в точці замикання фази A на землю знаходимо:

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{0\kappa}. \quad (5.16)$$

Із граничної умови в місці обриву фаз B і C на лінії маємо

$$\dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y}. \quad (5.17)$$

Порівнюючи між собою формули (5.15), (5.16), (5.17), одержуємо:

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{A1y} = \dot{I}_{A2y} = \dot{I}_{0y} = \frac{\dot{E}_{FA}}{Z_{1F} + Z_{2F} + Z_{0F}} = \frac{j66500}{j(106,7 + 106,7 + 138,7)} = 189 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{A\kappa} = \dot{I}_{Ay} = 3 \cdot 189 = 567 \text{ A}. \quad (5.18)$$

З розподілу струмів, наведених на рис.5.1, і рівності (5.18) випливає, що

$$\dot{I}_{A\alpha L} = \dot{I}_{A\alpha\kappa} - \dot{I}_{A\alpha y} = 0, \quad (5.19)$$

де $\alpha = 1, 2$ - номер послідовності.

З формул (5.17) - (5.19) випливає, що струми всіх послідовностей і повні струми всіх фаз для заданих умов праворуч від місця замикання двох фаз, тобто з боку навантаження, дорівнюють нулю.

На рис.5.4 показаний принциповий розподіл повного струму при замиканні між фазами a і c на стороні трикутника трансформатора ∇/Δ -11 (коефіцієнт трансформації трансформатора дорівнює одиниці) при одночасному обриві фаз B і C на стороні зірки.

З даного розподілу струму також видно, що струми з боку навантаження дорівнюють нулю.

Струм КЗ на стороні 6 кВ (трикутника) трансформатора визначається за виразом

$$\dot{I}_{aT} = \dot{I}_{cT} = \frac{\dot{I}_{Ay} n_T}{\sqrt{3}} = \frac{567}{\sqrt{3}} \cdot \frac{115}{6,6} = 5710 \text{ A}.$$

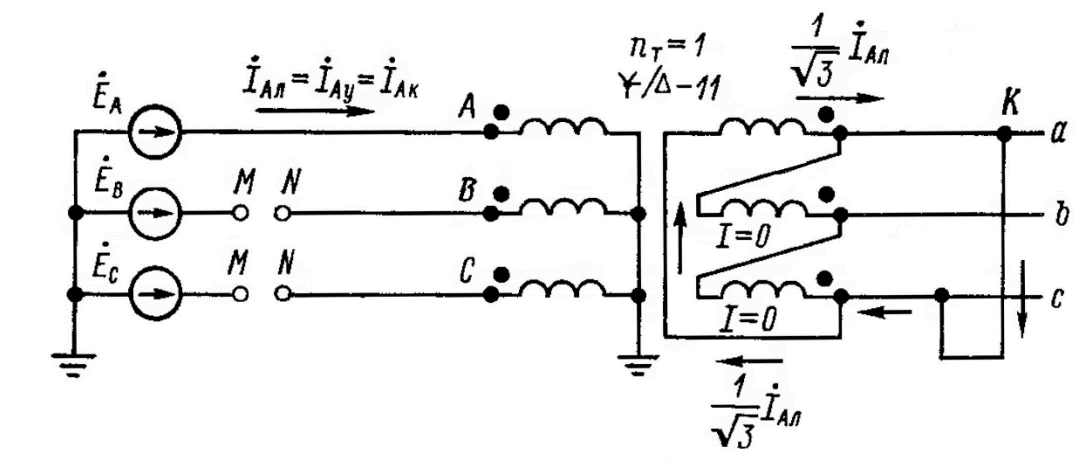


Рис.5.4. До задачі 5-4. Розподіл повного струму при КЗ між фазами a і c на стороні трикутника трансформатора й одночасному обриві фаз B і C на живлячій лінії.

5-5. За даними, наведеними на рис.5.1, визначити початкові значення симетричних складових надперехідних струмів у лінії, що працює фазами B і C , струмів з боку навантаження H при металевому замиканні між фазами a і c на шинах 6 кВ. Розрахунки виконати приблизно, без врахування зсуву фаз між надперехідною ЕРС навантаження й ЕРС системи.

Розв'язок. У задачі 5-1 відзначалося, що для розрахунків струмів при замиканні між фазами a і c на стороні трикутника трансформатора й при одночасному обриві фази A на лінії (рис.5.1) можна використовувати розрахункові вирази для замикання на землю фази A на стороні зірки трансформатора з одночасним обривом фази A на лінії з боку джерела живлення, якщо в них прийняти

$$Z_{0L} = 0, \quad \dot{U}_{0\kappa} = 0, \quad \dot{I}_{0\kappa} = 0. \quad (5.20)$$

Крім того, оскільки розглядається початкове значення струмів надперехідного режиму КЗ, при якому враховується надперехідна ЕРС навантаження, слід використовувати розрахункові вирази, наведені в задачі 3-2 для ліній з двостороннім живленням, прийнявши умови (5.20) даної задачі.

Визначаємо надперехідну ЕРС навантаження, приведену до сторони 110 кВ:

$$\dot{E}_{\phi 1H}'' = \dot{E}_L = \frac{j0,85U_{cp}}{\sqrt{3}} n_{cp} = \frac{j0,85 \cdot 6,3 \cdot 115}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = j53,9 \text{ кВ.}$$

Вважаємо, що надперехідний індуктивний опір узагальненого навантаження підстанції $x_{1H}'' = x_{2H} = 35\%$.

У задачі 5-1 опір x_{2H} обчислений й нанесений на схему зворотної послідовності (рис.5.1) і, крім цього, обчислені всі необхідні опори для розв'язку даної задачі. Значення цих опорів нанесені на схеми заміщення окремих послідовностей (рис.5.1).

Оскільки $x_{1H}'' = x_{2H}$, схеми прямої і зворотної послідовності збігаються, тобто $Z_{1L} = Z_{2L} = j578 \text{ Ом}$ й $Z_1 = Z_2 = j684,7 \text{ Ом}$.

Таким чином, при розв'язанні даної задачі можна використовувати схеми, наведені на рис.5.1, якщо в схемі заміщення прямої послідовності праворуч від опору $Z_{1L} = Z_{1H}'' = Z_{2L}$ ввімкнути надперехідну ЕРС навантаження $\dot{E}_{\phi 1H}''$.

Обчислюємо окремі елементи, що входять у вирази задачі 3-2, з урахуванням умов (5.20) даної задачі: при цьому використовуємо дані, наведені на рис.5.1, і значення $\dot{E}_{\phi 1H}'' = j53,9 \text{ кВ}$:

$$Q = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} = 1 + \frac{j684,7}{j684,7} + \frac{j684,7}{j138,7} = 6,94,$$

$$Z_A^{(1)} = Z_{1L} + Z_{2L} + Z_{0L} = j578 + j578 + 0 = j1156 \text{ Ом},$$

$$W = QZ_A^{(1)} - \frac{2Z_{1L}^2}{Z_0} = 6,94 \cdot j1156 - \frac{2 \cdot (j578)^2}{j138,7} = j3200 \text{ Ом},$$

$$P = Z_{2L}^2 = (j578)^2 = -334000 \text{ Ом}^2,$$

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{LA} = \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{\phi 1H}'' = j(66,5 - 53,9) = j12,6 \text{ кВ.}$$

Струм прямої послідовності в місці двофазного КЗ, приведений до сторони зірки трансформатора, визначаємо за формулою (3.1) задачі 3-2 з урахуванням того, що $Z_{1L} = Z_{2L}$ й $Z_{0L} = 0$:

$$\dot{I}_{A1\kappa} = \frac{Q\dot{E}_{LA}}{W} + \frac{Z_{1L}\Delta\dot{E}}{Z_0W} = \frac{6,94 \cdot j53900}{j3200} + \frac{j578 \cdot j12600}{j138,7 \cdot j3200} = 133,4 \text{ A.}$$

Струм зворотної послідовності в місці КЗ

$$\dot{I}_{A2\kappa} = \dot{I}_{A1\kappa} = 133,4 \text{ A.}$$

Струми прямої і зворотної послідовності в місці обриву фази визначаємо за виразами (3.2) і (3.3) задачі 3-2:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1y} = & \frac{Z_{1L}\dot{E}_{LA}}{Z_0W} + \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0} \right) \frac{Z_A^{(1)}\Delta\dot{E}}{W} - \frac{P\Delta\dot{E}}{Z_2Z_0W} = \frac{j578 \cdot j53900}{j138,7 \cdot j3200} + \\ & + \left(\frac{1}{j684,7} + \frac{1}{j138,7} \right) \cdot \frac{j1156 \cdot j12600}{j3200} - \frac{334000 \cdot j12600}{j684,7 \cdot j138,7 \cdot j3200} = 111,14 \text{ A,} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{A2y} = \frac{Z_{2L}\dot{I}_{A1\kappa} - Z_0\dot{I}_{A1y}}{Z_2 + Z_0} = \frac{j578 \cdot 133,4 - j138,7 \cdot 111,14}{j684,7 + j138,7} = 75,1 \text{ A.}$$

Струм нульової послідовності в місці обриву

$$\dot{I}_{0y} = -\dot{I}_{A1y} - \dot{I}_{A2y} = -111,14 - 75,1 = -186,24 \text{ A.}$$

Струми симетричних складових у лінії дорівнюють струмам у місці обриву:

$$\dot{I}_{A1л} = \dot{I}_{A1y} = 111,14 \text{ A,} \quad \dot{I}_{A2л} = \dot{I}_{A2y} = 75,1 \text{ A,} \quad \dot{I}_{0л} = \dot{I}_{0y} = -186,24 \text{ A.}$$

Струми симетричних складових, що підтікають до місця КЗ з боку навантаження й приведені до сторони зірки, визначаються зі схем заміщення прямої і зворотної послідовності (рис.5.1):

$$\dot{I}_{A1н} = \dot{I}_{A1\kappa} - \dot{I}_{A1y} = 133,4 - 111,14 = 22,26 \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{A2н} = \dot{I}_{A2\kappa} - \dot{I}_{A2y} = 133,4 - 75,1 = 58,3 \text{ A.}$$

Як ми вже відзначали, струм нульової послідовності на стороні 6 кВ дорівнює нулю.

Струми прямої і зворотної послідовності, що притікають від навантаження до місця КЗ на стороні трикутника трансформатора, рівні:

$$\dot{I}_{a1H} = \dot{I}_{A1H} e^{j30} n_T = 22,26 \frac{115}{6,6} e^{j30} = 388 e^{j30} \text{ А},$$

$$\dot{I}_{a2H} = \dot{I}_{A2H} e^{-j30} n_T = 58,3 \frac{115}{6,6} e^{-j30} = 1017 e^{-j30} \text{ А}.$$

Глава шоста

ДВА ОДНОЧАСНІ КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ НА ПІДСТАНЦІЯХ З КОРОТКОЗАМИКАЧАМИ

Виведені автором основні рівняння, за допомогою яких вирішуються задачі даної глави, даються в додатку.

6-1. У додатку на рис.ДІ.1 наведена вихідна схема одностороннього живлення понижуючої підстанції T 35/11 кВ по лінії $Л$ 35 кВ. Мережа 35 кВ працює з ізольованою нейтраллю. Підстанція T підключена до лінії за допомогою трифазного віддільника $Від$ і тому для ліквідації ушкоджень у трансформаторі на стороні вищої напруги встановлені короткозамикачі $Kз$ на фазах B і C . Визначити початкові значення надперехідних симетричних складових струмів у лінії й на стороні 35 кВ трансформатора, а також напруг у місцях ушкоджень і на шинах живлячої підстанції при двох одночасних коротких замиканнях у точці M між фазами B і C і в точці N (на стороні трикутника) між фазами b і c .

Вихідні дані. Система: $\dot{E}_A = \frac{j37}{\sqrt{3}}$ кВ, опори прямої і зворотної послідовності системи до шин 35 кВ живлячої підстанції, приведені до напруги 35 кВ, $Z_{1c} = Z_{2c} = j3,4$ Ом.

Лінія $Л$: довжина лінії $l = 12$ км, питомі опори $Z_{1лнм} = Z_{2лнм} = j0,4$ Ом/км.

Трансформатор T : потужність $S_{НОМ} = 16$ МВА, напруга 35/11 кВ, напруга короткого замикання $u_k = 8\%$, група з'єднань Υ/Δ - 11.

При розрахунках навантаження H не враховуємо.

Розв'язок. Визначаємо опір лінії $Л$ (Z_L) і опір трансформатора T (Z_T), приведені до напруги 35 кВ:

$$Z_{1л} = Z_{2л} = Z_{1лнм} l = j0,4 \cdot 12 = j4,8 \text{ Ом},$$

$$Z_T = \frac{j u_k U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{j0,08 \cdot 35^2}{16} = j6,12 \text{ Ом},$$

Сума опорів прямої і зворотної послідовності системи й лінії:

$$Z_1 = Z_2 = Z = Z_{1c} + Z_{1l} = j(3,4 + 4,8) = j8,2 \text{ Ом},$$

Схеми заміщення прямої і зворотної послідовності при двох одночасних коротких замиканнях у точках M і N (рис.ДІ.1) без врахування навантаження H на підстанції представлено на рис.ДІ.2, a і b .

За виведеними у додатку рівняннями (ДІ.23) - (ДІ.33) обчислюємо симетричні складові струмів і напруг у заданих вітках і точках схем прямої і зворотної послідовності (рис.ДІ.2). Симетричні складові струмів у місці включення двофазного короткозамикача (точка M на рис.ДІ.1 і рис.ДІ.2) обчислюємо за формулами (ДІ.23) і (ДІ.25):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1M} &= \frac{\dot{E}_A(2Z_T - aZ)}{Z(4Z_T + Z)} = \frac{j37000[2 \cdot j6,12 - j8,2(-0,5 + j0,867)]}{\sqrt{3} \cdot j8,2(4 \cdot j6,12 + j8,2)} = 1305 - j566 = \\ &= 1420e^{-j23,5} \text{ А}, \end{aligned}$$

$$\text{де } a = e^{j120} = -0,5 + j0,867, \quad a^2 = e^{j240} = -0,5 - j0,867,$$

$$\dot{I}_{A2M} = -\dot{I}_{A1M} = -1305 + j566 = 1420e^{j156,5} \text{ А}.$$

Струми на стороні 35 кВ трансформатора T обчислюємо за формулами (ДІ.24) і (ДІ.26):

$$\dot{I}_{A1N} = \frac{\dot{E}_A(1+a)}{4Z_T + Z} = \frac{j37000(-0,5 + j0,867)}{\sqrt{3} \cdot (4 \cdot j6,12 + j8,2)} = 327 + j566 = 655e^{j60} \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2N} = a^2 \dot{I}_{A1N} = e^{j240} \cdot 655e^{j60} = 655e^{j300} = (327 - j566) \text{ А}.$$

Струми в лінії визначаємо за формулами (ДІ.27) і (ДІ.28):

$$\dot{I}_{A1l} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N} = 1305 - j566 + 327 + j566 = 1632 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2l} = \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N} = -1305 + j566 + 327 - j566 = -978 \text{ А}.$$

Напруги в місці включення двофазного короткозамикача (точка M) обчислюємо за формулою (ДІ.29):

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{U}_{A2M} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1l}Z = j\frac{37000}{\sqrt{3}} - 1632 \cdot j8,2 = j8000 \text{ В}.$$

Напруги в місці двофазного короткого замикання (точка N на рис.ДІ.1 і рис.ДІ.2) на стороні 11 кВ, приведені до сторони зірки трансформатора обчислюємо за формулами (ДІ.30) і (ДІ.31):

$$\dot{U}_{A1N} = \dot{U}_{A1M} - \dot{I}_{A1N} Z_T = j8000 - (327 + j566)j6,12 = 3460 + j6000 = 6930e^{j60} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2N} = -a^2 \dot{U}_{A1N} = -e^{j240} \cdot 6930e^{j60} = -6930e^{j300} = 6930e^{j120} = (-3465 + j6000) \text{ В}.$$

Ці ж напруги на стороні 11 кВ трикутника трансформатора обчислюємо за формулами (ДІ.2) і (ДІ.4):

$$\dot{U}_{a1N} = \frac{1}{n_T} \dot{U}_{A1N} e^{j30} = \frac{1}{35/11} 6930e^{j60} e^{j30} = 2180e^{j90} = j2180 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{a2N} = \frac{1}{n_T} \dot{U}_{A2N} e^{-j30} = \frac{1}{35/11} 6930e^{j120} e^{-j30} = 2180e^{j90} = j2180 \text{ В}.$$

Напруги на шинах 35 кВ живлячої підстанції обчислюємо за виразами (ДІ.32) і (ДІ.33):

$$\dot{U}_{A1u} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1u} Z_{1c} = j \frac{37000}{\sqrt{3}} - 1632 \cdot j3,4 = j15860 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2u} = -\dot{I}_{A2u} Z_{2c} = -(-978)j3,4 = j3325 \text{ В}.$$

Повні струми й напруги можуть бути обчислені за відомими виразами методу симетричних складових [1].

6-2. За даними задачі 6-1 визначити початкові значення надперехідних симетричних складових струмів у лінії L і напруг на шинах 35 кВ на живлячій і приймаючій підстанціях (рис.ДІ.1) при двох одночасних коротких замиканнях: трифазному на стороні 10 кВ і двофазному між фазами B і C на стороні 35 кВ трансформатора T (включення короткозамикача). При розрахунках впливом навантаження H на приймаючій підстанції знехтувати.

Розв'язок. Схеми заміщення прямої і зворотної послідовності при двох одночасних коротких замиканнях у точках M і N (рис.ДІ.1) наведено на рис.ДІ.2, а і б. Із задачі 6-1

$$\dot{E}_A = j \frac{37000}{\sqrt{3}} = j21400 \text{ В}, \quad Z_{1c} = Z_{2c} = j3,4 \text{ Ом}, \quad Z_{1л} = Z_{2л} = j4,8 \text{ Ом},$$

$$Z_T = j6,12 \text{ Ом}, \quad Z_1 = Z_2 = Z = Z_{1c} + Z_{1л} = j8,2 \text{ Ом}.$$

Струми в місці двофазного короткого замикання на стороні 35 кВ (точка M на рис.ДІ.1) визначаємо за формулою (ДІ.34):

$$\dot{I}_{A1M} = \frac{\dot{E}_A}{2Z} = \frac{j21400}{2 \cdot j8,2} = 1305 \text{ А}, \quad \dot{I}_{A2M} = -\dot{I}_{A1M} = -1305 \text{ А}.$$

Струми на стороні 11 кВ у точці N трифазного короткого замикання, приведені до сторони 35 кВ трансформатора T обчислюємо за формулою (ДІ.35):

$$\dot{I}_{A1N} = \frac{\dot{E}_A}{2(Z + Z_T)} = \frac{j21400}{2 \cdot j(8,2 + 6,12)} = 746 \text{ А}, \quad \dot{I}_{A2N} = \dot{I}_{A1N} = 746 \text{ А}.$$

Струми в лінії L обчислюємо за формулами (ДІ.27) і (ДІ.28):

$$\dot{I}_{A1л} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N} = 1305 + 746 = 2051 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{A2л} = \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N} = -1305 + 746 = -559 \text{ А}.$$

Напруги симетричних складових на шинах живлячої підстанції обчислюємо за формулами (ДІ.32) і (ДІ.33) (див. також рис.ДІ.2):

$$\dot{U}_{A1ш} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1л} Z_{1c} = j21400 - 2051 \cdot j3,4 = j21400 - j6970 = j14430 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2ш} = -\dot{I}_{A2л} Z_{2c} = -(-559) j3,4 = j1900 \text{ В}.$$

Напруги симетричних складових на стороні 35 кВ приймаючої підстанції обчислюємо за формулою (ДІ.37):

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{U}_{A2M} = \dot{I}_{A1N} Z_T = 746 \cdot j6,12 = j4580 \text{ В}.$$

Для перевірки правильності обчислених напруг у точці M визначимо їх за наступними виразами (див. рис.ДІ.2):

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1л} (Z_{1c} + Z_{1л}) = j21400 - 2051 \cdot j(3,4 + 4,8) = j4580 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2л} (Z_{2c} + Z_{2л}) = -(-559) \cdot j(3,4 + 4,8) = j4580 \text{ В}.$$

6-3. Розв'язати задачу 6-2, використовуючи комплексну схему заміщення.

Розв'язок. Обчислення симетричних складових струмів при двох одночасних КЗ (рис.ДІ.1): двофазного в точці M і трифазного в точці N - можна виконати за допомогою комплексної схеми заміщення, складеної за місцем двофазного КЗ, розглядаючи опір трансформатора від місця двофазного КЗ (точка M) до місця трифазного КЗ (точка N) у схемах окремих послідовностей як навантаження [13,14].

У точці N трифазного КЗ напруги всіх фаз дорівнюють нулю. На рис.6.1 наведена комплексна схема заміщення для особливої фази A , складена за місцем двофазного КЗ з урахуванням трифазного КЗ.

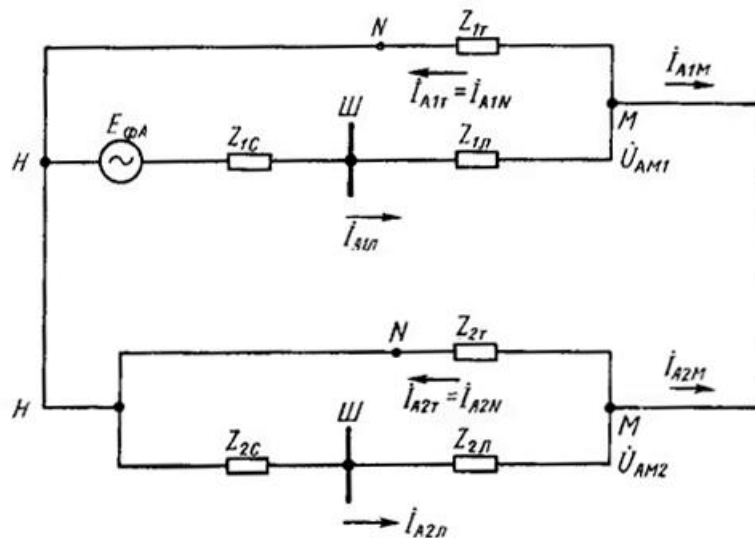


Рис.6.1. До задачі 6-3. Комплексна схема заміщення при двофазному КЗ у точці M і одночасному з ним трифазному КЗ у точці N (рис.ДІ.1).

Поєднуючи вітки трансформатора з вітками системи в схемі прямої послідовності, обчислюємо еквівалентну ЕРС:

$$\dot{E}_e = \frac{\dot{E}_\phi Z_{1T} + \dot{E}_T (Z_{1c} + Z_{1l})}{Z_{1c} + Z_{1l} + Z_{1T}} = \frac{j37000}{\sqrt{3}} j6,12 + 0 = j9140 \text{ В.}$$

Визначаємо результуючі опори прямої і зворотної послідовності до точки двофазного КЗ:

$$Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} = \frac{(Z_{1c} + Z_{1l})Z_{1T}}{Z_{1c} + Z_{1l} + Z_{1T}} = \frac{j(3,4 + 4,8)j6,12}{j(3,4 + 4,8 + 6,12)} = j3,5 \text{ Ом.}$$

З комплексної схеми заміщення визначаємо струми прямої і зворотної послідовності в місці двофазного КЗ [1]:

$$\dot{I}_{A1M} = -\dot{I}_{A2M} = \frac{\dot{E}_e}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}} = \frac{j9140}{j(3,5 + 3,5)} = 1303 \text{ A}, \quad \dot{I}_{A2M} = -1303 \text{ A}.$$

У місці двофазного КЗ напруги прямої і зворотної послідовності рівні між собою:

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{U}_{A2M} = \dot{I}_{A1M} Z_{2\Sigma} = 1303 \cdot j3,5 = j4570 \text{ В}.$$

Зі схеми на рис.6.1 визначаємо струм прямої послідовності в лінії:

$$\dot{I}_{A1L} = \frac{\dot{E}_\phi - \dot{U}_{A1M}}{Z_{1c} + Z_{1L}} = \frac{j\frac{37000}{\sqrt{3}} - j4570}{j(3,4 + 4,8)} = 2050 \text{ A}.$$

Напруга прямої послідовності на шинах III системи

$$\dot{U}_{A1u} = \dot{E}_\phi - \dot{I}_{A1L} Z_{1c} = j\frac{37000}{\sqrt{3}} - 2050 \cdot j3,4 = j14430 \text{ В}.$$

Зі схеми на рис.6.1 визначаємо струм зворотної послідовності в лінії:

$$\dot{I}_{A2L} = -\frac{\dot{U}_{A2M}}{Z_{2c} + Z_{2L}} = -\frac{j4570}{j(3,4 + 4,8)} = -558 \text{ A}.$$

Напруга зворотної послідовності на шинах III системи

$$\dot{U}_{A2u} = -\dot{I}_{A2L} Z_{2c} = -(-558) j3,4 = j1900 \text{ В}.$$

Струми на стороні 35 кВ трансформатора

$$\dot{I}_{A1N} = \dot{I}_{A1T} = \frac{\dot{U}_{A1M}}{Z_{1T}} = \frac{j4570}{j6,12} = 745 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{A2N} = \dot{I}_{A2T} = \frac{\dot{U}_{A2M}}{Z_{2T}} = \frac{j4570}{j6,12} = 745 \text{ A}.$$

Струми в трансформаторі можна обчислити також на підставі першого закону Кірхгофа для вузлів M:

$$\dot{I}_{A1T} = \dot{I}_{A1L} - \dot{I}_{A1M} = 2050 - 1303 = 747 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{A2T} = \dot{I}_{A2L} - \dot{I}_{A2M} = -558 - (-1303) = 745 \text{ A}.$$

Порівняння результатів обчислень симетричних складових струмів і напруг за допомогою комплексної схеми заміщення для даної задачі з результатами розв'язку задачі 6-2 за формулами, наведеними у додатку, дає повний збіг.

6-4. На рис. ДІ.3 наведена схема живлення однострансформаторної понижуючої підстанції 110/35/11 кВ по лінії 110 кВ. Мережа 110 кВ працює із глухозаземленою нейтраллю. Трансформатор T підключається до лінії за допомогою автоматичного віддільника $Від$. Для ліквідації ушкоджень у трансформаторі відключенням вимикача B з боку живлячої підстанції на його стороні 110 кВ установлений короткозамикач $Kз$ на фазі A .

Визначити симетричні складові струмів у лінії $Л$ і на стороні 110 кВ трансформатора, а також напруг на початку й в кінці лінії при двох одночасних КЗ: двофазному між a і b на стороні трикутника трансформатора й однофазному на фазі A на його стороні 110 кВ.

Вихідні дані. Система: $\dot{E}_A = j66,5 \text{ кВ}$, $Z_{1c} = Z_{2c} = j8,25 \text{ Ом}$, $Z_{0c} = j11 \text{ Ом}$.

Лінія $Л$: довжина $l = 16 \text{ км}$, $Z_{1\text{ном}} = Z_{2\text{ном}} = j0,4 \text{ Ом/км}$, $Z_{0\text{ном}} = j1,4 \text{ Ом/км}$.

Трансформатор T : $S_{\text{ном}} = 40 \text{ МВА}$, 110/35/11 кВ, $\text{Y}/\text{Y}/\Delta - 0-11$, $u_{\text{кВН-СН}} = 10,5\%$, $u_{\text{кВН-НН}} = 17\%$, $u_{\text{кСН-НН}} = 6\%$.

Навантаження трансформатора: розрахунки виконуємо без врахування навантажень на сторонах нижчої й середньої напруги трансформатора.

Розв'язок. Визначаємо опори лінії:

$$Z_{1л} = Z_{2л} = lZ_{1\text{ном}} = 16 \cdot j0,4 = j6,4 \text{ Ом},$$

$$Z_{0л} = lZ_{0\text{ном}} = 16 \cdot j1,4 = j22,4 \text{ Ом}.$$

Сума опорів системи й лінії

$$Z = Z_1 = Z_2 = Z_{1c} + Z_{1л} = j(8,25 + 6,4) = j14,65 \text{ Ом},$$

$$Z_0 = Z_{0c} + Z_{0л} = j(11 + 22,4) = j33,4 \text{ Ом}.$$

Визначаємо опори променів зірки (приведені до напруги 110 кВ) у схемі заміщення триобмоткового трансформатора:

$$Z_{TB} = j0,5(u_{кВН-НН} + u_{кВН-СН} - u_{кСН-НН}) \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} = j0,5(0,17 + 0,105 - 0,06) \frac{110^2}{40} = j32,5 \text{ Ом},$$

$$Z_{TC} = j0,5(0,105 + 0,06 - 0,17) \frac{110^2}{40} = -j0,756 \text{ Ом},$$

$$Z_{TH} = j0,5(0,17 + 0,06 - 0,105) \frac{110^2}{40} = j18,9 \text{ Ом}.$$

Оскільки розглядаються короткі замикання на сторонах вищої й нижчої напруги триобмоткового трансформатора, то в схемах заміщення окремих послідовностей еквівалентні опори трансформатора

$$Z_T = Z_{0T} = Z_{TB} + Z_{TH} = j(32,5 + 18,9) = j51,4 \text{ Ом}.$$

Як відзначалося на початку глави, струми й напруги обчислюємо за формулами, наведеними у додатку.

Симетричні складові струмів у місці замикання на землю фази *A* (точка *M* на рис.ДІ.3) визначимо за формулою (ДІ.50), у якій оператори *a* та *a*² міняємо місцями:

$$\dot{I}_{A1M} = \frac{\dot{E}_A(Z_0 + Z_T) \left[Z(a - a^2) + 2aZ_T \right]}{(Z_0 + Z_T) \left[Z^2(2a - a^2 - 1) + 4aZZ_T \right] + 2aZ_0Z_T(Z + Z_T)}.$$

Обчислюємо окремі елементи цього виразу:

$$Z_0 + Z_T = j(33,4 + 51,4) = j84,8 \text{ Ом},$$

$$Z(a - a^2) + 2aZ_T = j14,65(-0,5 + j0,867 + 0,5 + j0,867) + 2(-0,5 + j0,867)j51,4 = (-114,35 - j51,4) \text{ Ом},$$

$$Z^2(2a - a^2 - 1) + 4aZZ_T = (j14,65)^2(-1 + j1,73 + 0,5 + j0,867 - 1) + 4(-0,5 + j0,867)j14,65 \cdot j51,4 = (1828 - j3168) \text{ Ом}^2,$$

$$2aZ_0Z_T(Z + Z_T) = 2(-0,5 + j0,867)j33,4 \cdot j51,4 \cdot j(14,65 + 51,4) = (196000 + j113200) \text{ Ом}^3.$$

Ці елементи підставляємо у вираз для струму $\dot{I}_{A1M}$:

$$\dot{I}_{A1M} = \frac{j66500 \cdot j84,8(-114,35 - j51,4)}{j84,8(1828 - j3168) + 196000 + j113200} = \frac{707 \cdot 10^6 e^{j24,3}}{536 \cdot 10^3 e^{j30}} = 1320 e^{-j5,7} = (1312 - j131) \text{ А.}$$

Струми зворотної й нульової послідовності в місці замикання фази A на землю (точка M) дорівнюють струму прямої послідовності в цій же точці [1]:

$$\dot{I}_{A2M} = \dot{I}_{0M} = \dot{I}_{A1M} = 1312 - j131 = 1320 e^{-j5,7} \text{ А.}$$

Струми прямої і зворотної послідовності на стороні 110 кВ трансформатора обчислюємо за формулами (ДІ.51) і (ДІ.53), у яких оператор a^2 замінили на оператор a :

$$\dot{I}_{A1N} = \frac{1}{(1+a)Z} \left[\dot{E}_A - \dot{I}_{A1M} \left(2Z + \frac{Z_0 Z_T}{Z_0 + Z_T} \right) \right] = \frac{1}{(1-0,5 + j0,867)j14,65} [j66500 - 1320 e^{-j5,7} \left(2 \cdot j14,65 + \frac{j33,4 \cdot j51,4}{j(33,4 + 51,4)} \right)] = 430 + j120 = 445 e^{j15,6} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{A2N} = a \dot{I}_{A1N} = e^{j120} \cdot 445 e^{j15,6} = 445 e^{j135,6} = (-319 + j312) \text{ А.}$$

Струми прямої і зворотної послідовності в лінії визначаємо за формулами (ДІ.5) і (ДІ.6) (див. також рис. ДІ.2, a і b):

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N} = 1312 - j131 + 430 + j120 = 1742 - j11 = 1742 e^{-j0,4} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N} = 1312 - j131 - 319 + j312 = 993 + j181 = 1010 e^{j10,3} \text{ А.}$$

Напруги прямої, зворотної й нульової послідовності в кінці лінії в місці замикання фази A на землю (точка M) визначаємо за формулами (ДІ.19), (ДІ.54) і (ДІ.55) відповідно:

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1L} Z = j66500 - (1742 - j11)j14,65 = -161 + j41000 = 41000 e^{j90,2} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2L} Z = -(993 + j181)j14,65 = 2660 - j14530 = 14770 e^{-j79,7} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A2M} = 161 - j41000 - 2660 + j14530 = -2499 - j26470 = 26550 e^{j264,7} \text{ В.}$$

Струм нульової послідовності на стороні 110 кВ трансформатора обчислюємо за формулою (ДІ.56):

$$\dot{I}_{0N} = \frac{\dot{U}_{0M}}{Z_T} = \frac{26550e^{j264,7}}{j51,4} = 516e^{j174,7} = (-513 + j47,6) \text{ А.}$$

Струм у лінії

$$\dot{I}_{0л} = \dot{I}_{0M} + \dot{I}_{0N} = 1312 - j131 - 513 + j47,6 = 799 - j83,4 = 805e^{-j6} \text{ А.}$$

6-5. На рис.ДІ.4 наведена схема живлення однотрансформаторної понижуючої підстанції без вимикача на стороні вищої напруги. На схемі показане двофазне КЗ на стороні незаземленої зірки (35 кВ). За вихідними даними системи, лінії й триобмоткового понижуючого трансформатора, наведеними у задачі 6-4, визначити симетричні складові струмів у лінії L при двох одночасних коротких замиканнях: двофазному між фазами b і c на стороні 35 кВ трансформатора й замиканні на землю фази A на стороні 110 кВ (ввімкнення короткозамикача $Kз$).

Розв'язок. Для даного виду складного КЗ на рис.ДІ.2,*a,б* і рис.ДІ.5 наведені схеми заміщення прямої, зворотної й нульової послідовності відповідно. Струми прямої послідовності в точці M замикання фази A на землю й струми на стороні 110 кВ трансформатора обчислюємо за формулами (ДІ.63) - (ДІ.65), у яких оператор a замінюється одиницею.

Попередньо за формулами (ДІ.39) і (ДІ.40) обчислюємо опори триобмоткового трансформатора між сторонами 110 і 35 кВ і між сторонами 110 і 11 кВ у його схемі заміщення у вигляді трипроменевої зірки:

$$Z_{1T} = Z_{2T} = Z_T = Z_{TB} + Z_{TC} = j(32,5 - 0,756) = j31,744 \text{ Ом,}$$

$$Z_{0T} = Z_{TB} + Z_{TH} = j(32,5 + 18,9) = j51,4 \text{ Ом.}$$

Із задачі 6-4 виписуємо необхідні дані:

$$\dot{E}_A = j66500 \text{ В, } Z = Z_{1c} + Z_{1л} = j14,65 \text{ Ом, } Z_0 = Z_{0c} + Z_{0л} = j33,4 \text{ Ом,}$$

Таким чином, струми прямої послідовності

$$\dot{I}_{A1M} = \frac{\dot{E}_A (Z_0 + Z_{0T})}{Z_0 Z_{0T} + 2Z (Z_0 + Z_{0T})} = \frac{j66500 \cdot j(33,4 + 51,4)}{j33,4 \cdot j51,4 + 2 \cdot j14,65 \cdot j(33,4 + 51,4)} = 1343 \text{ A},$$

$$\dot{I}_{A1N} = \frac{\dot{E}_A}{2(Z + Z_T)} = \frac{j66500}{2 \cdot j(14,65 + 31,744)} = 717 \text{ A}.$$

У місці однофазного КЗ струми прямої, зворотної й нульової послідовності рівні між собою, тобто $\dot{I}_{A1M} = \dot{I}_{A2M} = \dot{I}_{0M} = 1343 \text{ A}$.

Струм зворотної послідовності на стороні 110 кВ трансформатора визначається за формулою (ДІ.65), у якій оператор a замінюється одиницею: $\dot{I}_{A2N} = -\dot{I}_{A1N} = -717 \text{ A}$.

Для визначення струму нульової послідовності в лінії необхідно спочатку обчислити струми прямої і зворотної послідовності в лінії й напруги всіх послідовностей у точці M замикання фази A на землю.

Струми прямої і зворотної послідовності в лінії обчислюємо за формулами (ДІ.5) і (ДІ.6):

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N} = 1343 + 717 = 2060 \text{ A}.$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N} = 1343 - 717 = 626 \text{ A}.$$

Напруги симетричних складових у точці M обчислюємо за формулами (ДІ.19), (ДІ.54) і (ДІ.55):

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1L} Z = j66500 - 2060 \cdot j14,65 = j66500 - j30200 = j36300 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2L} Z = -626 \cdot j14,65 = -j9160 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A2M} = -j36300 + j9160 = -j27140 \text{ В}.$$

Струм нульової послідовності в лінії визначаємо за наступним виразом (див. рис. ДІ.5):

$$\dot{I}_{0L} = -\frac{\dot{U}_{0M}}{Z_{0L} + Z_{0c}} = -\frac{\dot{U}_{0M}}{Z_0} = -\frac{-j27140}{j33,4} = 812 \text{ A}.$$

6-6. На рис. ДІ.4 наведена схема живлення однострансформаторної понижуючої підстанції без вимикача на стороні вищої напруги. Визначити симетричні складові струмів у лінії L і напруг на шинах 110

кВ живлячої підстанції і підстанції, яку живлять, при двох одночасних КЗ: трифазному на стороні незаземленої зірки (35 кВ, точка N) і замиканні на землю фази A в точці M на стороні 110 кВ триобмоткового трансформатора.

Вихідні дані. Система: $\dot{E}_A = j66,5$ кВ, $Z_{1c} = Z_{2c} = j8,25$ Ом, $Z_{0c} = j11$ Ом.

Лінія L : $Z_{1l} = Z_{2l} = j6,4$ Ом, $Z_{0l} = j22,4$ Ом.

Трансформатор T : опори трансформатора в його схемі заміщення у вигляді трипроменевої зірки при даних видах КЗ

$$Z_{1T} = Z_{2T} = Z_T = Z_{TB} + Z_{TC} = j(32,5 - 0,756) = j31,744 \text{ Ом},$$

$$Z_{0T} = Z_{TB} + Z_{TH} = j(32,5 + 18,9) = j51,4 \text{ Ом}.$$

Розрахунки виконуємо без урахування навантажень на сторонах середньої й нижчої напруг трансформатора.

Розв'язок. Сума опорів системи й лінії до точки однофазного КЗ:

$$Z = Z_1 = Z_2 = Z_{1c} + Z_{1l} = j(8,25 + 6,4) = j14,65 \text{ Ом},$$

$$Z_0 = Z_{0c} + Z_{0l} = j(11 + 22,4) = j33,4 \text{ Ом}.$$

Струми симетричних складових у місці замикання на землю фази A обчислюємо за формулою (ДІ.60):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1M} = \dot{I}_{A2M} = \dot{I}_{0M} &= \frac{\dot{E}_A}{2Z + \frac{Z_0 Z_{0T} (Z + Z_T)}{Z_T (Z_0 + Z_{0T})}} = \\ &= \frac{j66500}{2 \cdot j14,65 + \frac{j33,4 \cdot j51,4 \cdot j(14,65 + 31,744)}{j31,744 \cdot j(33,4 + 51,4)}} = 1130 \text{ А}. \end{aligned}$$

Струми прямої і зворотної послідовності на стороні 110 кВ трансформатора обчислюємо за формулами (ДІ.61) і (ДІ.62):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1N} = \dot{I}_{A1M} \left[\frac{Z_0 Z_{0T}}{Z_T (Z_0 + Z_{0T})} + \frac{Z}{Z + Z_T} \right] &= \\ = 1130 \left[\frac{j33,4 \cdot j51,4}{j31,744 \cdot j(33,4 + 51,4)} + \frac{j14,65}{j(14,65 + 31,744)} \right] &= 1078 \text{ А}, \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{A2N} = -\dot{I}_{A1M} \frac{Z}{Z + Z_T} = -1130 \frac{j14,65}{j(14,65 + 31,744)} = -356 \text{ A.}$$

Струми в лінії й напруги на шинах 110 кВ живлячої підстанції та підстанції, яку живлять, визначаємо на підставі схем заміщення прямої, зворотної й нульової послідовності, наведених на рис.ДІ.2 і рис.ДІ.5:

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N} = 1130 + 1078 = 2208 \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N} = 1130 - 356 = 774 \text{ A,}$$

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0M} \frac{Z_{0T}}{Z + Z_{0T}} = 1130 \frac{j51,4}{j(33,4 + 51,4)} = 686 \text{ A,}$$

$$\dot{U}_{A1u} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1L} Z_{1c} = j66500 - 2208 \cdot j8,25 = j48270 \text{ B,}$$

$$\dot{U}_{A2u} = -\dot{I}_{A2L} Z_{2c} = -774 \cdot j8,25 = -j6380 \text{ B,}$$

$$\dot{U}_{0u} = -\dot{I}_{0L} Z_{0c} = -686 \cdot j11 = -j7560 \text{ B,}$$

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1L} Z = j66500 - 2208 \cdot j14,65 = j34100 \text{ B,}$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2L} Z = -774 \cdot j14,65 = -j11330 \text{ B,}$$

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{I}_{0L} Z_0 = -686 \cdot j33,4 = -j22900 \text{ B.}$$

Перевіримо правильність обрахунків визначенням повної фазної напруги в точці *M* металевого КЗ на землю; воно повинне бути рівне нулю:

$$\dot{U}_{AM} = \dot{U}_{A1M} + \dot{U}_{A2M} + \dot{U}_{0M} = j34100 - j11330 - j22900 = -130 \text{ B} \approx 0.$$

Розрахунки виконані вірно й з достатньою для практики точністю.

6-7. За даними, наведеними у задачі 6-6, обчислити симетричні складові струмів у лінії *L* (рис.ДІ.4) при двох одночасних КЗ: трифазному на стороні 35 кВ (точка *N*) і замиканні на землю фази *A* на стороні 110 кВ триобмоткового трансформатора (точка *M*) за умови, що його нейтраль на стороні 110 кВ не заземлена.

Розв'язок. При незаземленій нейтралі трансформатора на стороні 110 кВ струми нульової послідовності через цю нейтраль протікати не можуть (рис.ДІ.5), тому

$$\dot{I}_{0N} = 0, \quad (6.1)$$

$$Z_{0T} = \infty. \quad (6.2)$$

У цьому випадку з (ДІ.57) отримуємо

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0M}. \quad (6.3)$$

Підставляючи (6.2) і (6.3) в (ДІ.60) і (ДІ.61), після деяких спрощень одержуємо наступні розрахункові формули (див. рис.ДІ.2 і рис.ДІ.5), за якими і обчислюємо шукані значення струмів:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1M} = \dot{I}_{A2M} = \dot{I}_{0L} &= \frac{\dot{E}_A Z_T}{2Z Z_T + Z_0 Z + Z_0 Z_T} = \\ &= \frac{j66500 \cdot j31,744}{2 \cdot j14,65 \cdot j31,744 + j33,4 \cdot j14,65 + j33,4 \cdot j31,744} = 850 \text{ A}, \\ \dot{I}_{A1N} = \dot{I}_{A1M} \left(\frac{Z_0}{Z_T} + \frac{Z}{Z + Z_T} \right) &= 850 \left(\frac{j33,4}{j31,744} + \frac{j14,65}{j14,65 + j31,744} \right) = 1160 \text{ A}, \\ \dot{I}_{A2N} = -\dot{I}_{A1M} \frac{Z}{Z + Z_T} &= -850 \frac{j14,65}{j14,65 + j31,744} = -268 \text{ A}, \\ \dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N} &= 850 + 1160 = 2010 \text{ A}, \\ \dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N} &= 850 - 268 = 582 \text{ A}. \end{aligned}$$

При незаземленій нейтралі трансформатора (див. задачу 6-6) струми в лінії менші, ніж при заземленій нейтралі. Зменшення струмів усіх послідовностей у лінії при незаземленій нейтралі трансформатора має місце внаслідок збільшення сумарного опору нульової послідовності відносно місця ввімкнення короткозамикача. Ступінь зменшення струмів залежить від відношення Z_T/Z і Z_0/Z , де $Z = Z_{1c} + Z_{1L}$, $Z_0 = Z_{0c} + Z_{0L}$.

При $Z_T/Z < 3$ і $Z_0/Z > 1$ має місце істотне зменшення струму однофазного КЗ у лінії. Це повинно враховуватися при розрахунках уставок струмових захистів нульової послідовності ліній, до яких підключені трансформатори з однофазними короткозамикачами. В [15] наведені наближені криві зменшення струму однофазного КЗ у лінії для розглянутого випадку залежно від відношення Z_T/Z і Z_0/Z .

6-8. Розв'язати задачу 6-6, використовуючи комплексну схему заміщення. Порівняти розв'язок з результатами розрахунків задачі 6-6.

Розв'язок. Для випадку двох одночасних КЗ - однофазного в точці M і трифазного в точці N - розрахунки можна також виконати за допомогою комплексної схеми заміщення, складеної за місцем однофазного КЗ, розглядаючи опір Z_T трансформатора як навантаження.

Така комплексна схема заміщення наведена на рис.6.2; за нею визначаємо результуючі опори всіх послідовностей до точки M однофазного КЗ:

$$Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} = \frac{(Z_{1c} + Z_{1l})Z_T}{Z_{1c} + Z_{1l} + Z_T} = \frac{j(8,25 + 6,4) \cdot j31,744}{j(8,25 + 6,4 + 31,744)} = j10 \text{ Ом},$$

$$Z_{0\Sigma} = \frac{(Z_{0c} + Z_{0l})Z_{0T}}{Z_{0c} + Z_{0l} + Z_{0T}} = \frac{j(11 + 22,4) \cdot j51,4}{j(11 + 22,4 + 51,4)} = j20,2 \text{ Ом}.$$

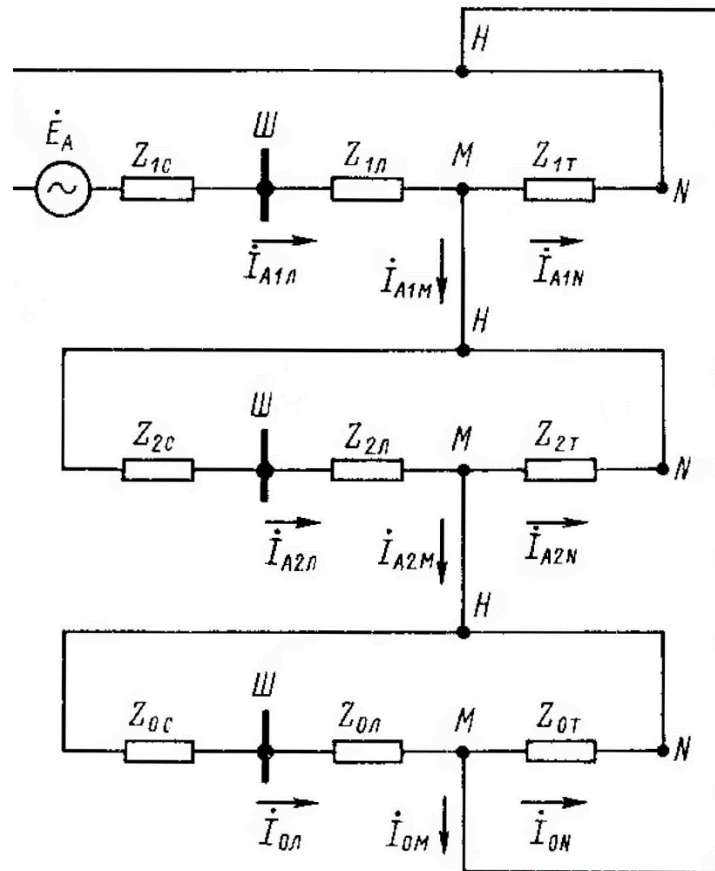


Рис.6.2. До задачі 6-8. Комплексна схема заміщення при однофазному КЗ у точці M і одночасному з ним трифазному КЗ у точці N (рис.ДІ.4).

Поєднуючи в схемі прямої послідовності вітки навантаження з вітками системи в одну еквівалентну [1], отримаємо

$$\dot{E}_e = \frac{\dot{E}_A Z_T + 0(Z_{1c} + Z_{1l})}{Z_{1c} + Z_{1l} + Z_T} = \frac{j66500 \cdot j31,744}{j(8,25 + 6,4 + 31,744)} = j45500 \text{ В.}$$

Визначаємо струми симетричних складових у точці M однофазного КЗ:

$$\dot{I}_{A1M} = \dot{I}_{A2M} = \dot{I}_{0M} = \frac{\dot{E}_e}{j(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})} = \frac{j45500}{j(10 + 10 + 20,2)} = 1130 \text{ А.}$$

Напруги всіх послідовностей у точці M на шинах 110 кВ підстанції, яку живлять (рис.6.2):

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{I}_{A1M} (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}) = 1130 \cdot j(10 + 20,2) = j34200 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2M} Z_{2\Sigma} = -1130 \cdot j10 = -j11300 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{I}_{0M} Z_{0\Sigma} = -1130 \cdot j20,2 = -j22850 \text{ В.}$$

Симетричні складові струмів у лінії визначаємо за виразами, які складені на підставі комплексної схеми заміщення:

$$\dot{I}_{A1l} = \frac{\dot{E}_A - \dot{U}_{A1M}}{Z_{1c} + Z_{1l}} = \frac{j66500 - j34200}{j(8,25 + 6,4)} = 2205 \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{A2l} = -\frac{\dot{U}_{A1M}}{Z_{2c} + Z_{2l}} = -\frac{-j11300}{j(8,25 + 6,4)} = 772 \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{0l} = -\frac{\dot{U}_{0M}}{Z_{0c} + Z_{0l}} = -\frac{-j22850}{j(11 + 22,4)} = 684 \text{ А.}$$

Напруги симетричних складових на шинах 110 живлячої підстанції:

$$\dot{U}_{A1u} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1l} Z_{1c} = j66500 - 2205 \cdot j8,25 = -j48300 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2u} = -\dot{I}_{A2l} Z_{2c} = -772 \cdot j8,25 = -j6370 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0u} = -\dot{I}_{0l} Z_{0c} = -684 \cdot j11 = -j7450 \text{ В.}$$

Результати розрахунків даної задачі, виконаних на підставі комплексної схеми заміщення, і результати розрахунків, проведених в задачі 6-6 за рівняннями, наведеними у додатку, збігаються.

6-9. На рис.ДІ.6 наведена схема живлення однотрансформаторної понижуючої підстанції, на якій показано замикання між фазами B і C на стороні вищої напруги (у зоні дії диференціального захисту трансформатора). При дії захисту трансформатора вмикається короткозамикач K_3 , установлений на фазі A . У цьому випадку в одному місці (точка M на рис.ДІ.6) утворюється однофазно-двофазне КЗ. За вихідним даними системи, лінії L і трансформатора T , наведеними у задачі 6-6, обчислити симетричні складові струмів в лінії й напруг на шинах 110 кВ живлячої підстанції при однофазно-двофазному КЗ в кінці лінії, у точці M (рис.ДІ.6). При розрахунках не враховувати струми навантаження на сторонах середньої й нижчої напруги трансформатора.

Розв'язок. На рис.ДІ.7,а,б і рис.ДІ.5 наведені відповідно схеми заміщення прямої, зворотної й нульової послідовності для однофазно-двофазного КЗ, в одній точці M , показаного на рис.ДІ.6 без врахування навантажень на сторонах середньої й нижчої напруги трансформатора. Обчислення виконуємо за формулами додатку. Струм прямої послідовності в місці КЗ обчислюємо за формулою (ДІ.78):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1M} &= \frac{\dot{E}_A [4Z(Z_0 + Z_{0T}) + Z_0 Z_{0T}]}{4Z^2(Z_0 + Z_{0T}) + 2ZZ_0 Z_{0T}} = \\ &= \frac{j66500[4 \cdot j14,65 \cdot j(33,4 + 51,4) + j33,4 \cdot j51,4]}{4 \cdot j^2 \cdot 14,65^2 \cdot j(33,4 + 51,4) + 2 \cdot j14,65 \cdot j33,4 \cdot j51,4} = \\ &= \frac{j66500(4960 + 1716)}{j72800 + j50200} = 3605 \text{ А.} \end{aligned}$$

Оскільки навантаження на понижуючій підстанції не враховується, то струми прямої і зворотної послідовності в лінії рівні відповідно струмам у місці КЗ

$$\dot{I}_{A1L} = \dot{I}_{A1M} = 3605 \text{ А}, \quad \dot{I}_{A2L} = \dot{I}_{A2M}.$$

Напруги прямої і зворотної послідовності в точці КЗ визначаємо за формулами (ДІ.71) і (ДІ.73)

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{U}_{A2M} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1M} Z = j66500 - 3605 \cdot j14,65 = j66500 - j52800 = j13700 \text{ В.}$$

Струм зворотної послідовності в лінії й у точці КЗ обчислюємо за формулами (П74) і (ДІ.79), які отримані на основі схем заміщення (рис.ДІ.7,б)

$$\dot{I}_{A2n} = \dot{I}_{A2M} = -\frac{\dot{U}_{A2M}}{Z} = -\frac{j13700}{j14,65} = -925 \text{ А.}$$

Напругу нульової послідовності в точці КЗ визначаємо за формулою (ДІ.70):

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A2M} = -j13700 - j13700 = -j27400 \text{ В.}$$

Струм нульової послідовності в лінії визначаємо за формулою (ДІ.75):

$$\dot{I}_{0n} = -\frac{\dot{U}_{0M}}{Z_0} = -\frac{-j27400}{j33,4} = 820 \text{ А.}$$

Напруги симетричних складових на шинах 110 кВ живлячої підстанції визначаємо за формулами (ДІ.80) - (ДІ.82) і схемами окремих послідовностей:

$$\dot{U}_{A1u} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1M} Z_{1c} = j66500 - 3605 \cdot j8,25 = j66500 - j29750 = j36750 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2u} = -\dot{I}_{A2M} Z_{2c} = -(-925) \cdot j8,25 = j7620 \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0u} = -\dot{I}_{0n} Z_{0c} = -820 \cdot j11 = -j9020 \text{ В.}$$

Глава сьома

ПОДВІЙНІ ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

7-1. Обчислити початкові значення симетричних складових струмів у лініях $Л1$, $Л2$ (рис.7.1), струмів від системи (вітки FP), а також напруг у точках M , N і на шинах P при подвійному замиканні на землю через перехідні опори $R_{\pi} = 10$ Ом у мережі з малим струмом замикання на землю й з одностороннім живленням.

Вихідні дані наведені на рис.7.1, при цьому довжини ліній зазначені від шин P до точок M і N .

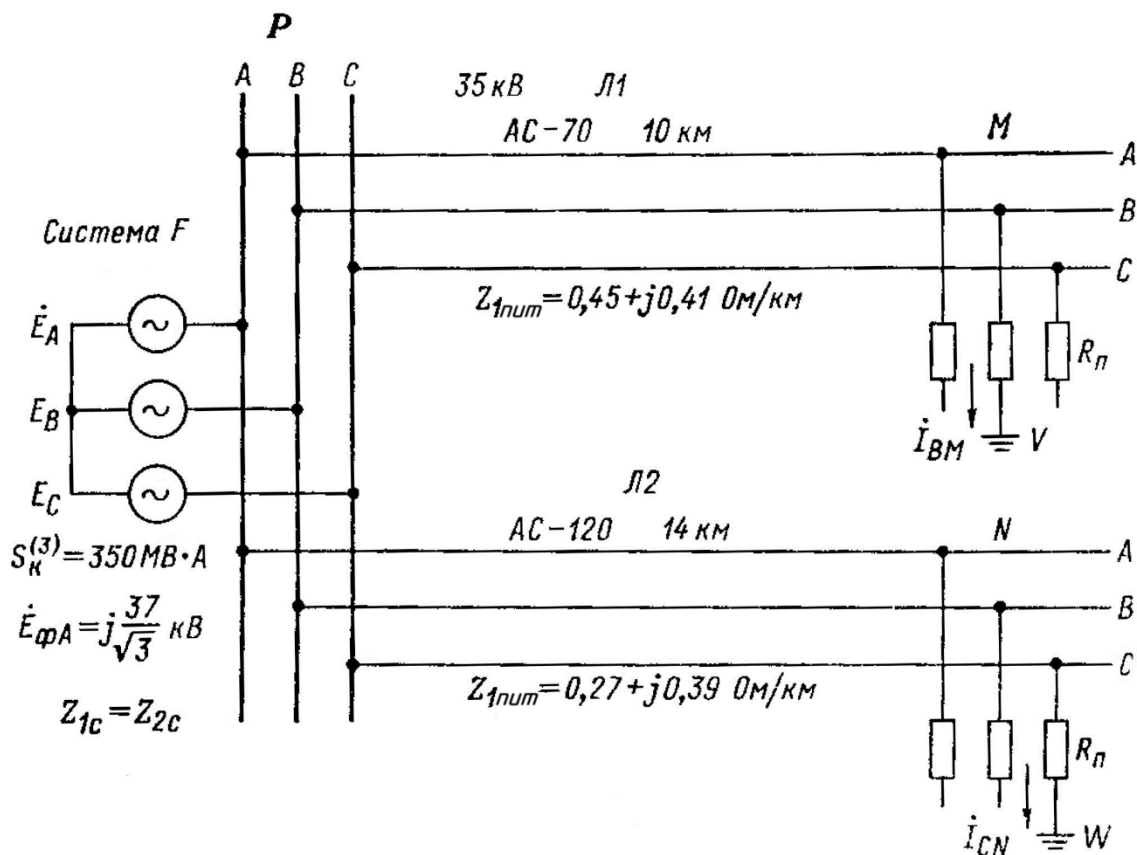


Рис.7.1. До задачі 7-1. Вихідна схема мережі 35 кВ.

Для обох ліній $Z_{0\text{пит}} = 3Z_{1\text{пит}}$.

При розрахунках не враховувати струми навантаження і ємнісні струми ліній.

Розв'язок. На лінії ЛІ у точці М замкнена на землю через перехідний опір фаза В, а на лінії Л2 у точці N замкнена на землю також через перехідний опір фаза С (рис.7.1).

Для віток MV і NW відповідно вірні наступні граничні умови:

$$\dot{I}_{AM} = \dot{I}_{CM} = 0, \quad \dot{U}_{BV} = 0, \quad \dot{U}_{BM} = \dot{I}_{BM} R_n. \quad (7.1)$$

Для відгалуження NW

$$\dot{I}_{AN} = \dot{I}_{BN} = 0, \quad \dot{U}_{CW} = 0, \quad \dot{U}_{CN} = \dot{I}_{CN} R_n. \quad (7.2)$$

Замкнений контур для протікання струмів ушкодження $\dot{I}_{BM}$ й $\dot{I}_{CN}$ створюється в точках V і W замикання на землю через перехідні опори, тому при прийнятих позитивних напрямках цих струмів виконується рівність

$$\dot{I}_{BM} = -\dot{I}_{CN}. \quad (7.3)$$

Прийнявши неушкоджену (особливу) фазу А за розрахункову й виразивши рівняння (7.1) - (7.3) через симетричні складові, одержимо розрахункові вирази для струмів і напруг у заданих ділянках мережі [16].

Схеми заміщення всіх послідовностей наведені на рис.7.2. Із цих схем випливає, що в вітці FP (системи) протікають струми прямої і зворотної послідовності, оскільки нейтраль у мережі 35 кВ ізолювана, а в вітках PMV і PNW - струми прямої, зворотної й нульової послідовності. Обчислюємо опори окремих елементів мережі.

Опори прямої і зворотної послідовності системи до шин Р рівні:

$$Z_{1c} = Z_{2c} = jU_{mf} / S_{к.з}^{(3)} = j37^2 / 350 = j3,91 \text{ Ом.}$$

Опори ліній ЛІ і Л2 до точок М і N відповідно рівні:

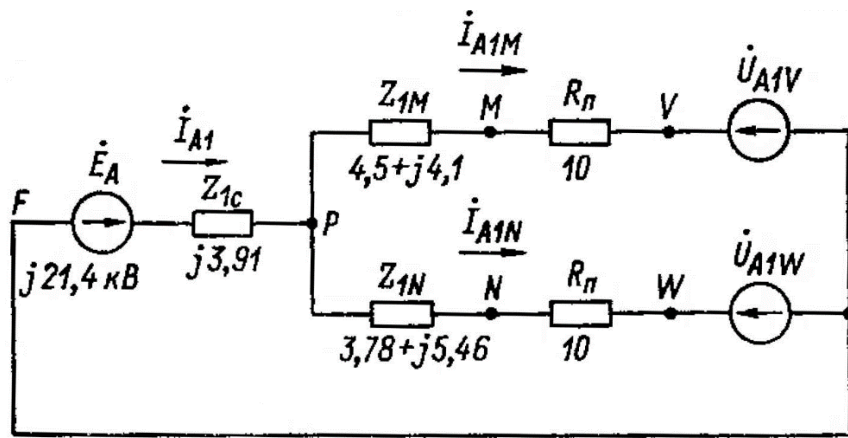
$$Z_{1M} = Z_{2M} = Z_{1um} l_{.л1} = (0,45 + j0,41) \cdot 10 = (4,5 + j4,1) \text{ Ом,}$$

$$Z_{0M} = 3Z_{1M} = 3(4,5 + j4,1) = (13,5 + j12,3) \text{ Ом,}$$

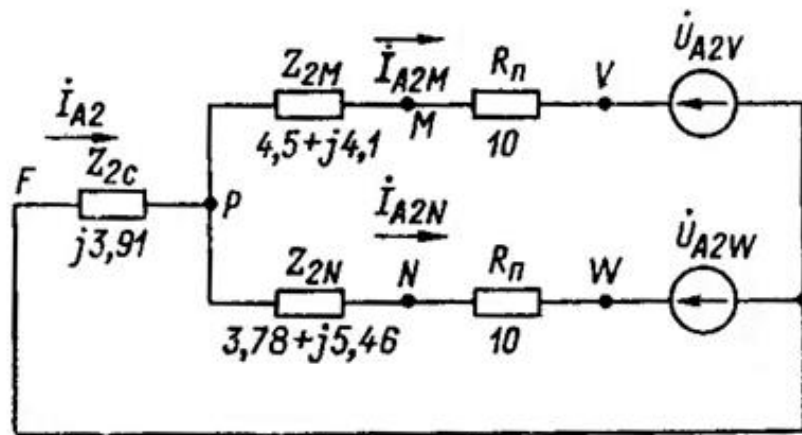
$$Z_{1N} = Z_{2N} = Z_{1um} l_{.л2} = (0,27 + j0,39) \cdot 14 = (3,78 + j5,46) \text{ Ом,}$$

$$Z_{0N} = 3Z_{1N} = 3(3,78 + j5,46) = (11,33 + j16,36) \text{ Ом.}$$

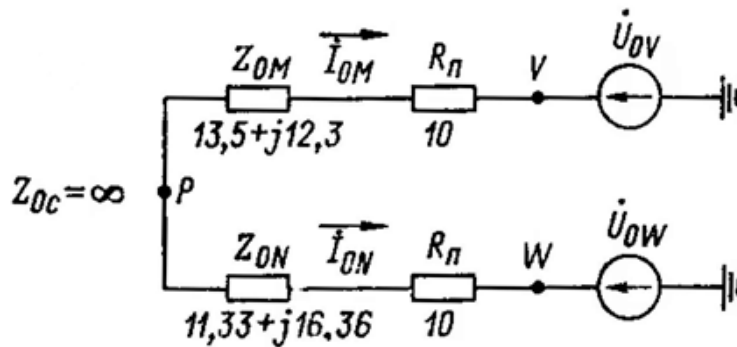
Обчислені значення нанесені на схеми заміщення (рис.7.2).



а)



б)



в)

Рис.7.2. До задачі 7-1. Схеми заміщення при подвійному замиканні на землю (рис.7.1): а - прямої послідовності, б - зворотної, в – нульової. Значення опорів зазначені в омах.

Визначаємо струм нульової послідовності в лінії $ЛІ$ (вітка PMV)

$$\dot{I}_{0M} = \frac{(a^2 - a)\dot{E}_A}{6Z_{1c} + 2Z_{1M} + 2Z_{1N} + Z_{0M} + Z_{0N} + 6R_n} = \frac{-j\sqrt{3} \cdot j21400}{D},$$

де

$$D = 6 \cdot j3,91 + 2(4,5 + j4,1) + 2(3,78 + j5,46) + 13,5 + j12,3 + 11,33 + j16,36 + 6 \cdot 10 = 101,39 + j71,23,$$

$$\text{тобто } \dot{I}_{0M} = \frac{37000}{101,39 + j71,23} = (244 - j171) = 298e^{-j35} \text{ А.}$$

Струми прямої і зворотної послідовності на всіх ділянках мережі визначаються через струм $\dot{I}_{0M}$.

Струми в лінії $Л1$ (вітка PMV):

$$\dot{I}_{A1M} = a\dot{I}_{0M} = e^{j120} \cdot 298e^{-j35} = 298e^{j85} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{A2M} = a^2\dot{I}_{0M} = e^{j240} \cdot 298e^{-j35} = 298e^{j205} \text{ А.}$$

Струми в лінії $Л2$ (вітка PNW):

$$\dot{I}_{A1N} = -a^2\dot{I}_{0M} = -e^{j240} \cdot 298e^{-j35} = 298e^{j25} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{A2N} = -a\dot{I}_{0M} = -e^{j120} \cdot 298e^{-j35} = 298e^{-j95} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{0N} = -\dot{I}_{0M} = -298e^{-j35} = 298e^{j145} \text{ А.}$$

Струми від системи (вітка FP):

$$\dot{I}_{A1} = (a - a^2)\dot{I}_{0M} = j\sqrt{3} \cdot 298e^{-j35} = 516e^{j55} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{A2} = (a^2 - a)\dot{I}_{0M} = -j\sqrt{3} \cdot 298e^{-j35} = 516e^{-j125} \text{ А.}$$

Ми визначили, що $\dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{A2}$ або $\dot{I}_A = 0$. Це підтверджує, що розрахунки струмів виконані правильно. Дійсно, при $Z_1 = Z_2$, неврахуванні струмів навантаження й відсутності струмів нульової послідовності в вітці FP струм у неушкодженій фазі в цій вітці повинен дорівнювати нулю.

Визначаємо напруги всіх послідовностей на шинах P :

$$\dot{U}_{A1P} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1}Z_{1c} = j21400 - 516e^{j55} \cdot j3,91 = 1655 + j20243 = 20300e^{j85,4} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{A2P} = -\dot{I}_{A2}Z_{2c} = -516e^{-j125} \cdot j3,91 = -1655 + j1157 = 2020e^{j145} \text{ В,}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{0P} &= -a^2 \dot{E}_A + \dot{I}_{0M} (3Z_{1c} + 2Z_{1M} + Z_{0M} + 3R_n) = -e^{j240} \cdot j21400 + \\ &+ 298e^{-j35} [3 \cdot j3,91 + 2(4,5 + j4,1) + 13,5 + j12,3 + 3 \cdot 10] = 21400e^{j150} + \\ &+ 298e^{-j35} (52,5 + j32,23) = 21400e^{j150} + 15650e^{-j35} + 9600e^{j55} = \\ &= -250 + j9620 = 9620e^{j91,5} \text{ В.}\end{aligned}$$

Напруга всіх послідовностей у точці M лінії $Л1$:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A1M} &= \dot{U}_{A1P} - \dot{I}_{A1M} Z_{1M} = 1655 + j20243 - 298e^{j85} \cdot 6,08e^{j42,3} = 2755 + j18803 = \\ &= 19000e^{j81,7} \text{ В,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A2M} &= \dot{U}_{A2P} - \dot{I}_{A2M} Z_{2M} = -1655 + j1157 - 298e^{j205} \cdot 6,08e^{j42,3} = -957 + j2837 = \\ &= 2985e^{j108,6} \text{ В,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{0M} &= \dot{U}_{0P} - \dot{I}_{0M} Z_{0M} = -250 + j9620 - 298e^{-j35} \cdot 18,24e^{j42,3} = -5610 + j8928 = \\ &= 10520e^{j122} \text{ В.}\end{aligned}$$

Напруги всіх послідовностей у точці N лінії $Л2$:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A1N} &= \dot{U}_{A1P} - \dot{I}_{A1N} Z_{1N} = 1655 + j20243 - 298e^{j25} \cdot 6,65e^{j55,3} = 1323 + j18293 = \\ &= 18330e^{j86} \text{ В,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A2N} &= \dot{U}_{A2P} - \dot{I}_{A2N} Z_{2N} = -1655 + j1157 - 298e^{-j95} \cdot 6,65e^{j55,3} = -3185 + j2424 = \\ &= 3880e^{j142,7} \text{ В,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{0N} &= \dot{U}_{0P} - \dot{I}_{0N} Z_{0N} = -250 + j9620 - 298e^{j145} \cdot 19,95e^{j55,3} = 5330 + j11690 = \\ &= 12800e^{j65,5} \text{ В.}\end{aligned}$$

Для перевірки виконаних обчислень можна визначити напругу фази B у точці V або фази C у точці W . Ці напруги повинні бути рівні нулю. Для визначення напруги фази B у точці V обчислюємо симетричні складові напруг у цій точці:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A1V} &= \dot{U}_{A1M} - \dot{I}_{A1M} R_n = 2755 + j18803 - 298e^{j85} \cdot 10 = 2495 + j15843 = \\ &= 16000e^{j81} \text{ В,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A2V} &= \dot{U}_{A2M} - \dot{I}_{A2M} R_n = -957 + j2827 - 298e^{j205} \cdot 10 = 1743 + j4087 = \\ &= 4430e^{j67} \text{ В,}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{0V} &= \dot{U}_{0M} - \dot{I}_{0M} R_n = -5600 + j8928 - 298e^{-j35} \cdot 10 = -8040 + j10638 = \\ &= 13330e^{j127} \text{ В.}\end{aligned}$$

Повна напруга фази B у точці V

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BV} &= \dot{U}_{B1V} + \dot{U}_{B2V} + \dot{U}_{0V} = a^2 \dot{U}_{A1V} + a \dot{U}_{A2V} + \dot{U}_{0V} = e^{j240} \cdot 16000 e^{j81} + \\ &+ e^{j120} \cdot 4430 e^{j67} - 8040 + j10638 = 12450 - j10050 - 4300 - j540 - 8040 + \\ &+ j10638 \approx 0.\end{aligned}$$

За обчисленими симетричними складовими можна визначити повні струми в лініях і струми від системи, а також напруги на шинах P за відомими формулами [17].

7-2. Обчислити початкові значення симетричних складових струмів у лінії PG (рис.7.3) і напруг на шинах P і G при подвійному металевому замиканні на землю на одиночній лінії PG із двостороннім живленням у мережі з ізольованою нейтраллю. Вихідні дані наведені на рис.7.3.

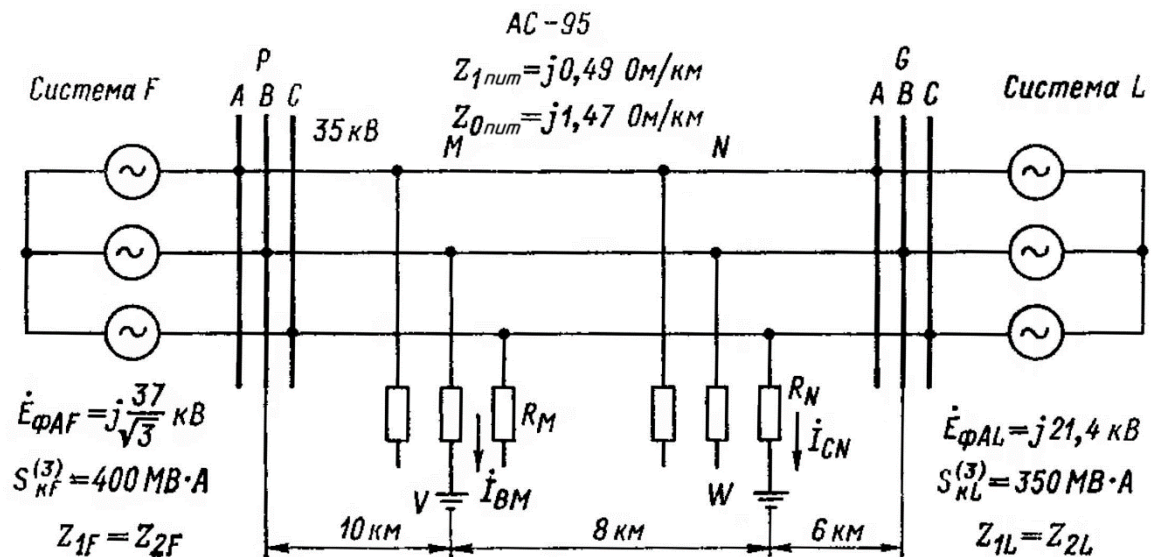
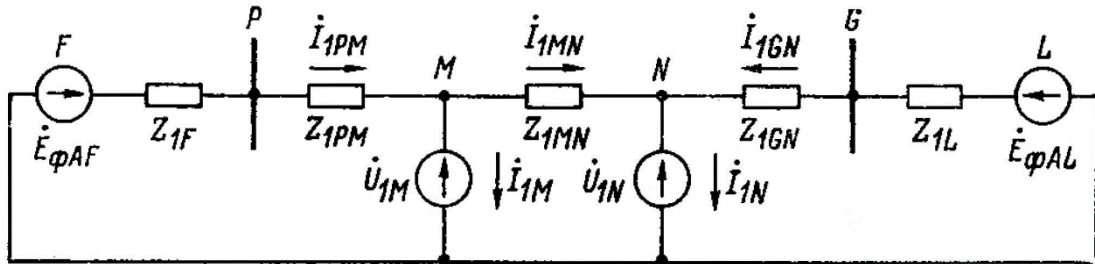


Рис.7.3. До задачі 7-2. Вихідна схема.

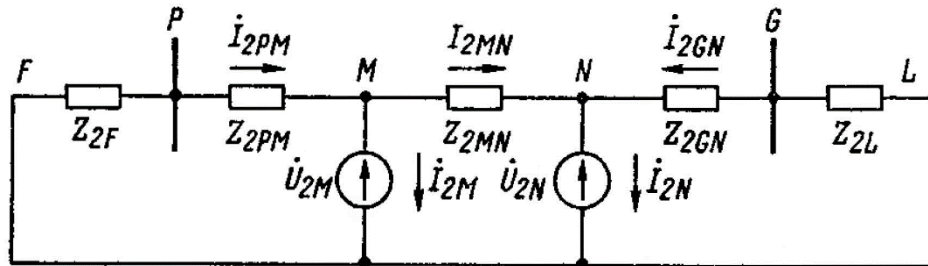
Розв'язок. Наведені в задачі 7-1 рівняння (7.1) - (7.3) граничних умов для віток MV і NW вірні й у розглянутому випадку подвійного замикання на землю через перехідні опори на одиночній лінії із двостороннім живленням. Виразивши струми й напруги в (7.1) - (7.3) через симетричні складові особливої фази A , отримаємо розрахункові вирази, наведені в [16].

Струми на окремих ділянках лінії й напруги на шинах P і G визначаємо за цими розрахунковими виразами.

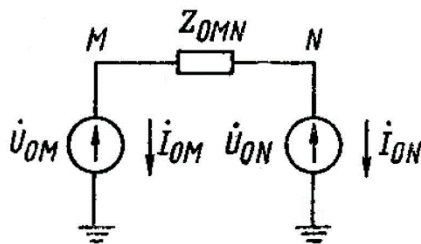
На схемах заміщення всіх послідовностей (рис.7.4) для схеми рис.7.3 нанесені струми й напруги в місцях замикання на землю й струми на ділянках лінії.



а)



б)



в)

Рис.7.4. До задачі 7-2. Схеми заміщення при подвійному замиканні на землю (рис.7.3): а - прямої послідовності, б - зворотної, в – нульової.

Визначаємо спочатку струм нульової послідовності $\dot{I}_{0M}$, оскільки в розрахункових виразах струми виражені через параметри схеми й струм $\dot{I}_{0M}$.

Визначаємо опори окремих елементів схем заміщення, приймаючи для спрощення повні опори систем F і L і лінії за індуктивні.

Опори систем F і L приведені до ступеня напруги 35 кВ:

$$Z_{1F} = jx_{1F} = jU_{\text{мф}}^2 / S_{\kappa F}^{(3)} = j37^2 / 400 = j3,42 \text{ Ом},$$

$$Z_{1L} = jx_{1L} = jU_{\text{мф}}^2 / S_{\kappa L}^{(3)} = j37^2 / 350 = j3,91 \text{ Ом}.$$

Опори ділянок лінії рівні:

$$Z_{1PM} = Z_{2PM} = Z_{\text{ліній}} l_{PM} = j0,49 \cdot 10 = j4,9 \text{ Ом},$$

$$Z_{1MN} = Z_{2MN} = Z_{\text{ліній}} l_{MN} = j0,49 \cdot 8 = j3,92 \text{ Ом},$$

$$Z_{0MN} = Z_{\text{ліній}} l_{MN} = j1,47 \cdot 8 = j11,76 \text{ Ом},$$

$$Z_{1RN} = Z_{2RN} = Z_{\text{ліній}} R_{RN} = j0,49 \cdot 6 = j2,94 \text{ Ом}.$$

Опори ділянок схеми рівні:

$$Z_{1FM} = Z_{2FM} = Z_{1F} + Z_{1PM} = j(3,42 + 4,9) = j8,32 \text{ Ом},$$

$$Z_{1LN} = Z_{2LN} = Z_{1L} + Z_{1RN} = j(3,91 + 2,94) = j6,85 \text{ Ом},$$

$$Z_{1\Sigma} = Z_{1FM} + Z_{1MN} + Z_{1LN} = j(8,32 + 3,92 + 6,85) = j19,09 \text{ Ом}.$$

Струм нульової послідовності

$$\begin{aligned} \dot{I}_{0M} &= \frac{\dot{E}_{\phi A} (a^2 - a) Z_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} [3(R_M + R_N) + Z_{0MN}] + 6Z_{1FM} Z_{1LN} + 2Z_{1MN} (Z_{1FM} + Z_{1LN})} = \\ &= \frac{j21400(-j\sqrt{3})j19,09}{j19,09 \cdot j11,76 + 6 \cdot j8,32 \cdot j6,85 + 2 \cdot j3,92(j8,32 + j6,85)} = \\ &= -j706000 : (224 + 342 + 119) = -j1030 \text{ А}. \end{aligned}$$

Оскільки за умовою задачі в точках M і N мають місце металеві замикання на землю, то перехідні опори R_M і R_N (рис.7.3) дорівнюють нулю й точки V і W відповідно збігаються із точками M і N .

Нижчеподані розрахункові вирази віднесені до фази A , яка за умовою задачі є особливою. Для спрощення записів нижче й на рис.7.4 опускаємо індекс цієї фази в симетричних складових струмів і напруг.

Нейтралі систем F і L ізольовані, тому на ділянках FM і LN протікають тільки струми прямої і зворотної послідовності, а на ділянці MN - струми прямої, зворотної й нульової послідовності.

Струми прямої і зворотної послідовності фази A в лінії з боку системи F :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{PM} &= \frac{\dot{I}_{0M} [aZ_{1MN} + (a - a^2)Z_{1LN}]}{Z_{1\Sigma}} = \\ &= \frac{-j1030 [(-0,5 + j0,867)j3,92 + j\sqrt{3} \cdot j6,85]}{j19,09} = 828e^{j7,3} \text{ А}, \\ \dot{I}_{2PM} &= \frac{-\dot{I}_{0M} [(a - a^2)Z_{1LN} - a^2Z_{1MN}]}{Z_{1\Sigma}} = \\ &= \frac{j1030 [j\sqrt{3} \cdot j6,85 - (-0,5 - j0,867)j3,92]}{j19,09} = 828e^{j127,7} \text{ А}. \end{aligned}$$

Струми прямої і зворотної послідовності фази A в лінії з боку системи L

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1GN} &= \frac{\dot{I}_{0M} [(a - a^2)Z_{1FM} - a^2Z_{1MN}]}{Z_{1\Sigma}} = \\ &= \frac{-j1030 [j\sqrt{3} \cdot j8,32 - (-0,5 - j0,867)j3,92]}{j19,09} = 964e^{-j6,3} \text{ А}, \\ \dot{I}_{2GN} &= \frac{-\dot{I}_{0M} [(a - a^2)Z_{1FM} + aZ_{1MN}]}{Z_{1\Sigma}} = \\ &= \frac{j1030 [j\sqrt{3} \cdot j8,32 + (-0,5 + j0,867)j3,92]}{j19,09} = 964e^{j186,3} \text{ А}. \end{aligned}$$

Ми визначили, що на ділянках PM і GM $\dot{I}_2 = -\dot{I}_1$ або $\dot{I}_A = 0$. Це підтверджує правильність виконаних обрахунків. Дійсно, на ділянках PM і GM $\dot{I}_0 = 0$, тому при $Z_1 = Z_2$ й неврахуванні струмів навантаження струм у неущожденій фазі на цих ділянках повинен бути рівний нулю.

Струми прямої, зворотної й нульової послідовності фази A на ділянці MN лінії:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{1MN} &= \frac{-\dot{I}_{0M}(aZ_{1FM} + a^2Z_{1LN})}{Z_{1\Sigma}} = \\ &= \frac{j1030[(-0,5 + j0,867)j8,32 + (-0,5 - j0,867)j6,85]}{j19,09} = 413e^{j260,4} \text{ А},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{2MN} &= \frac{-\dot{I}_{0M}(a^2Z_{1FM} + aZ_{1LN})}{Z_{1\Sigma}} = \\ &= \frac{j1030[(-0,5 - j0,867)j8,32 + (-0,5 + j0,867)j6,85]}{j19,09} = 413e^{j279,6} \text{ А},\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{0MN} = -\dot{I}_{0M} = j1030 \text{ А}.$$

Для перевірки правильності проведених розрахунків можна визначити повний струм фази A в відгалуженні M або N . Ці струми повинні бути рівні нулю.

На підставі струморозподілів, наведених на схемах заміщення (рис.7.4), попередньо знаходимо симетричні складові струмів у відгалуженні M :

$$\dot{I}_{1M} = \dot{I}_{1PM} - \dot{I}_{1MN} = 822 + j105,8 + 69 + j408,5 = (891 + j514,3) \text{ А},$$

$$\dot{I}_{2M} = \dot{I}_{2PM} - \dot{I}_{2MN} = -821,5 + j105,8 - 69 + j408,5 = (-890,5 + j514,3) \text{ А}.$$

Повний струм фази A в відгалуженні M

$$\dot{I}_{AM} = \dot{I}_{1M} + \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{0M} = 891 + j514,3 - 890,5 + j514,3 - j1030 \approx 0.$$

Обчислення виконані правильно.

Струми від систем F і L рівні відповідно струмам у лінії з боку шин P і G , тобто

$$\dot{I}_{1F} = \dot{I}_{1PM}, \quad \dot{I}_{2F} = \dot{I}_{2PM} \quad \text{та} \quad \dot{I}_{1L} = \dot{I}_{1GN}, \quad \dot{I}_{2L} = \dot{I}_{2GN}.$$

Симетричні складові напруг фази A на шинах P і G :

$$\begin{aligned}\dot{U}_{1P} &= \dot{E}_{\phi AF} - \dot{I}_{1PM}Z_{1F} = j21400 - (822 + j105,8)j3,42 = 362 + j18590 = \\ &= 18600e^{j88,9} \text{ В},\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{2P} = -\dot{I}_{2PM} Z_{2F} = -828e^{j172,7} \cdot 3,42e^{j90} = 361 + j2810 = -2830e^{j262,7} \text{ В},$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0M} = \dot{U}_{0P} &= -a^2 \dot{E}_{\phi AF} + \dot{I}_{0M} \left[\frac{(2Z_{1MN} + 3Z_{1LN})Z_{1FM}}{Z_{1\Sigma}} + 3R_M \right] = \\ &= (0,5 + j0,867)j21400 - j1030 \left[\frac{(2j3,92 + 3j6,85)j8,32}{j19,09} + 0 \right] = \\ &= -5800 + j10700 = 12170e^{j118,5} \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{1G} = \dot{E}_{\phi AL} - \dot{I}_{1GN} Z_{1L} = j21400 - (959,5 - j105,8)j3,91 = 17660e^{j91,3} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{2G} = -\dot{I}_{2GN} Z_{2L} = -964e^{j186,3} \cdot 3,91e^{j90} = -3770e^{j276,3} = (-416 + j3750) \text{ В},$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0N} = \dot{U}_{0G} &= -a^2 \dot{E}_{\phi AF} - \dot{I}_{0M} \left[\frac{(2Z_{1MN} + 3Z_{1FM})Z_{1LN}}{Z_{1\Sigma}} + 3R_N \right] = \\ &= (0,5 + j0,867)j21400 - j1030 \left[\frac{(2j3,92 + 3j8,32)j6,85}{j19,09} + 0 \right] = \\ &= 6420 + j10700 = 12500e^{j59} \text{ В}. \end{aligned}$$

На ділянках PM і GN лінії струми $\dot{I}_0 = 0$, тому, як показано вище, напруги $\dot{U}_0$ на шинах P і G відповідно рівні $\dot{U}_0$ в точках M і N (рис.7.3 і рис.7.4).

7-3. Обчислити початкові значення симетричних складових струмів у лініях PM , PG , GN і напруг на шинах P і G (рис.7.5) при подвійному замиканні на землю через перехідні активні опори в точці M фази B і в точці N фази C .

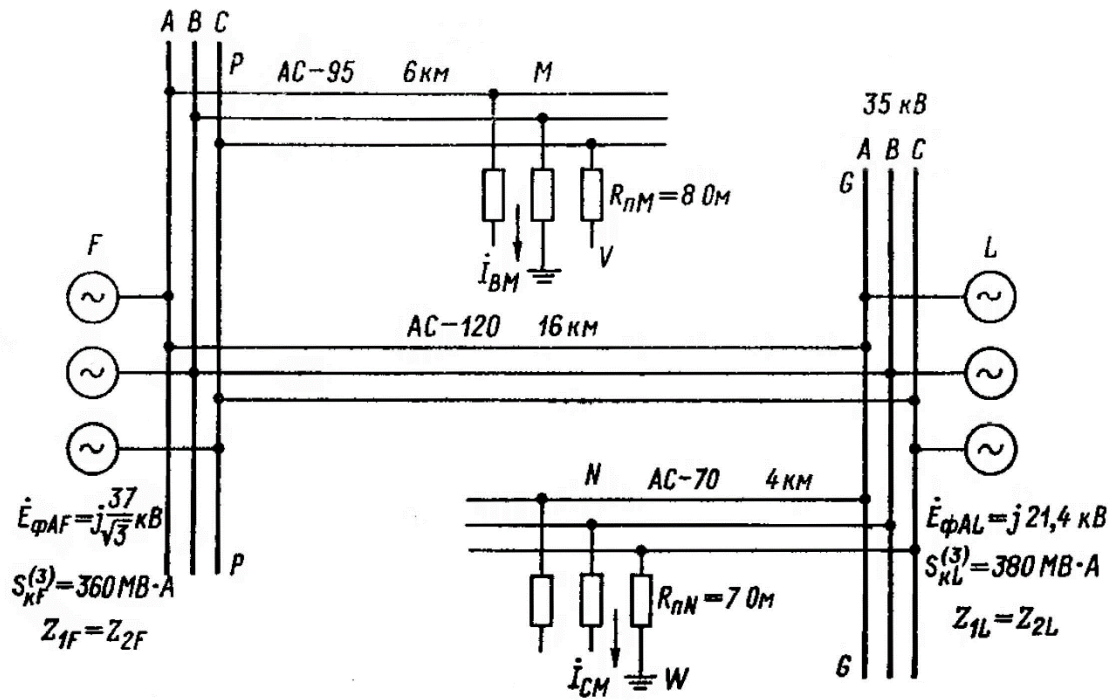


Рис.7.5. До задачі 7-3. Вихідна схема мережі 35 кВ.

Вихідні дані: питомі опори ліній PM , PG і GN відповідно рівні

$$\begin{aligned} Z_{1numPM} &= 0,34 + j0,4 = 0,525e^{j49,5} \text{ Ом/км}, \\ Z_{1numPG} &= 0,27 + j0,39 = 0,474e^{j55,3} \text{ Ом/км}, \\ Z_{1numGN} &= 0,45 + j0,41 = 0,606e^{j42,4} \text{ Ом/км}; \end{aligned}$$

опори нульової послідовності цих ліній рівні їхньому потроєному опору прямої послідовності; ЕРС систем F і L рівні за модулем й фазою, їх повні опори прийняти за індуктивні, розрахунки виконувати без урахування навантажень; вихідні дані мережі й системи наведені на рис.7.5, довжини ліній від точки M до шин P і від точки N до шин G відповідно рівні 6 і 4 км.

Розв'язок. Визначаємо повні опори ліній і систем F і L . Повні опори прямої (зворотної) і нульової послідовності ліній PM , PG і GN рівні:

$$Z_{1PM} = Z_{1numPM} l_{PM} = (0,34 + j0,4) \cdot 6 = 2,04 + j2,4 = 3,15e^{j49,5} \text{ Ом},$$

$$Z_{0PM} = 3Z_{1PM} = 3(2,04 + j2,4) = 6,12 + j7,2 = 9,45e^{j49,5} \text{ Ом},$$

$$Z_{1PG} = (0,27 + j0,39) \cdot 16 = 4,32 + j6,24 = 7,59e^{j55,3} \text{ Ом},$$

$$Z_{0PG} = 3Z_{1PG} = 3(4,32 + j6,24) = 12,96 + j18,72 = 22,77e^{j55,3} \text{ Ом},$$

$$Z_{1GN} = (0,45 + j0,41) \cdot 4 = 1,8 + j1,64 = 2,436e^{j42,4} \text{ OM},$$

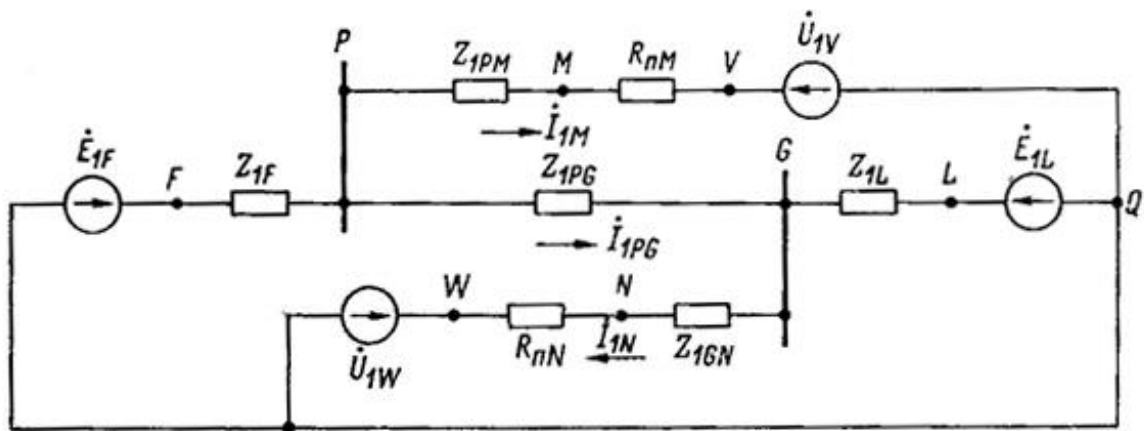
$$Z_{0GN} = 3Z_{1GN} = 3(1,8 + j1,64) = 5,4 + j4,92 = 7,31e^{j42,4} \text{ Ом.}$$

Опори прямої (зворотної) послідовності систем F і L рівні:

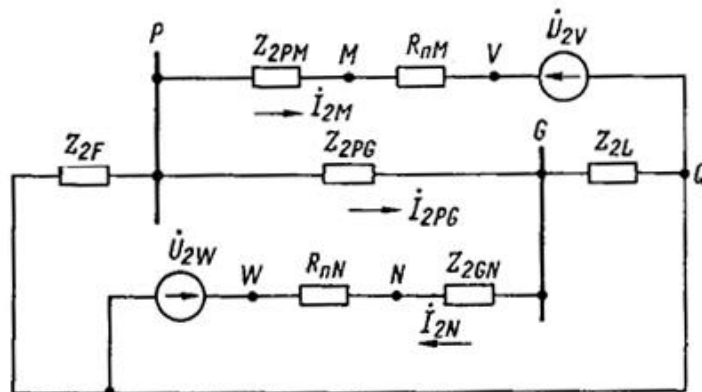
$$Z_{1F} = Z_{2F} = jU_{\mathcal{M}\phi}^2 / S_{\kappa F}^{(3)} = j37^2 / 360 = j3,8 \text{ Ом},$$

$$Z_{1L} = Z_{2L} = j37^2 / 380 = j3,6 \text{ Ом.}$$

На рис.7.6 наведені схеми заміщення подвійного замикання на землю в мережі за рис.7.5.



a)



6)

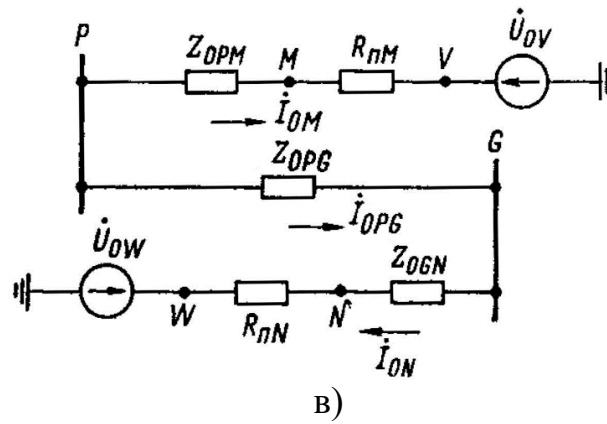
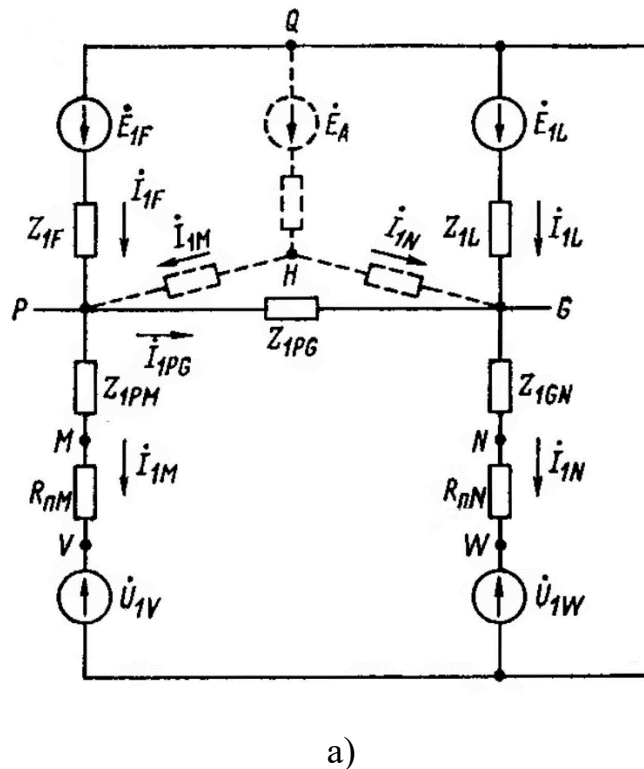
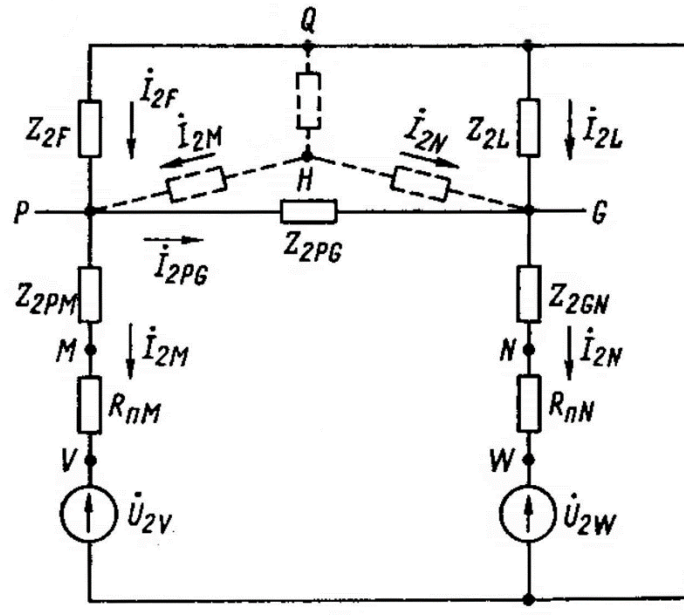


Рис.7.6. До задачі 7-3. Схеми заміщення при подвійному замиканні на землю (рис.7.5): а - прямої послідовності, б - зворотної, в- нульової.

Схема заміщення нульової послідовності складена з умови протікання струмів нульової послідовності по наступному замкненому контуру: V - земля - $WNGPMV$.

Схеми прямої і зворотної послідовності (рис.7.6,а і б) представлені в більш наочному вигляді на рис.7.7,а і б.





б)

Рис.7.7. Перетворення схем прямої і зворотної послідовності (рис.7.6).

Схему прямої послідовності із двома рівними ЕРС (рис.7.7,а) приводимо до схеми з однією ЕРС. Для цього трикутник QGP із двома рівними ЕРС перетворимо в еквівалентну зірку $QHGP$ [18] з однієї ЕРС $\dot{E}_A = \dot{E}_{1F} = \dot{E}_{1L}$, показану на рис.7.7,а штриховими лініями.

До схеми з одним джерелом живлення може бути приведена будь-яка складна система, що має рівні ЕРС декількох джерел живлення при будь-якому розташуванні місць ушкодження [16].

Трикутник QGP у схемі зворотної послідовності (рис.7.7,б) також перетворимо в еквівалентну зірку.

Опори променів зірки рівні:

$$Z_{1QH} = Z_{2QH} = \frac{Z_{1F} Z_{1L}}{Z_{1F} + Z_{1L} + Z_{1PG}} = \frac{j3,8 \cdot j3,6}{j3,8 + j3,6 + 4,32 + j6,24} = 0,957e^{j107,6} = (-0,289 + j0,913) \text{ Ом},$$

$$Z_{1HG} = Z_{2HG} = \frac{Z_{1L} Z_{1PG}}{Z_{1F} + Z_{1L} + Z_{1PG}} = \frac{j3,6(4,32 + j6,24)}{j3,8 + j3,6 + 4,32 + j6,24} = 1,91e^{j72,9} = (0,561 + j1,825) \text{ Ом},$$

$$Z_{1HP} = Z_{2HP} = \frac{Z_{1F} Z_{1PG}}{Z_{1F} + Z_{1L} + Z_{1PG}} = \frac{j3,8(4,32 + j6,24)}{j3,8 + j3,6 + 4,32 + j6,24} = 2,015e^{j72,9} = (0,593 + j1,927) \text{ Ом.}$$

Схеми заміщення прямої і зворотної послідовності з урахуванням перетворення трикутників QGP у зірки аналогічні схемам трипроменевої зірки з однією ЕРС, наведеним на рис.7.2 задачі 7-1.

Тому струми в даній схемі можемо визначити за розрахунковими виразами, наведеними у задачі 7-1, якщо в ньому у виразі для струму $\dot{I}_{0M}$ замінити Z_{1c} на Z_{1QH} , Z_{1M} на $Z_{1HP} + Z_{1PM}$, Z_{1N} на $Z_{1HG} + Z_{1GN}$, $Z_{0M} + Z_{0N}$ на $Z_{0PM} + Z_{0PG} + Z_{0GN}$, $6R_{\Pi}$ на $3R_{\Pi M} + 3R_{\Pi N}$.

Нижче всі розрахункові вирази наведені для неушкодженої особливої фази A , прийнятої за розрахункову.

З метою спрощення записів нижче індекс фази A в струмах і напругах буде опущений.

Визначаємо симетричні складові струмів на всіх ділянках мережі.

Струм нульової послідовності в лінії PM

$$\dot{I}_{0M} = (a^2 - a) \dot{E}_A / D,$$

де

$$D = 6Z_{1QH} + 2(Z_{1HP} + Z_{1PM}) + 2(Z_{1HG} + Z_{1GN}) + Z_{0PM} + Z_{0PG} + Z_{0GN} + 3R_{nM} + 3R_{nN} = 6(-0,289 + j0,913) + 2(0,593 + j1,927 + 2,04 + j2,4) + 2(0,561 + j1,825 + 1,8 + j1,64) + 6,12 + j7,2 + 12,96 + j18,72 + 5,4 + j4,92 + 3 \cdot 8 + 3 \cdot 7 = 93,5e^{j33,7},$$

$$\text{тобто } \dot{I}_{0M} = \frac{-j\sqrt{3} \cdot j21400}{93,5e^{j33,7}} = 396e^{-j33,7} = (330 - j220) \text{ А.}$$

Усі інші струми виражаються через струм $\dot{I}_{0M}$.

Струми прямої і зворотної послідовності в лінії PM і в вітці зірки HP (рис.7.7):

$$\dot{I}_{1M} = a \dot{I}_{0M} = e^{j120} \cdot 396e^{-j33,7} = 396e^{j86,3} = (25,5 + j395) \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{2M} = a^2 \dot{I}_{0M} = e^{j240} \cdot 396e^{-j33,7} = 396e^{j206,3} = (-355 - j175,3) \text{ А.}$$

Струми прямої і зворотної послідовності в лінії GN і в вітці зірки HG :

$$\dot{I}_{1N} = -a^2 \dot{I}_{0M} = -e^{j240} \cdot 396e^{-j33,7} = 396e^{j26,3} = (355 + j175,3) \text{ A},$$

$$\dot{I}_{2N} = -a \dot{I}_{0M} = -e^{j120} \cdot 396e^{-j33,7} = 396e^{j266,3} = (-25,5 - j395) \text{ A}.$$

Струми нульової послідовності в лініях PG і GN відповідно до прийнятих для них напрямків рівні:

$$\dot{I}_{0PG} = \dot{I}_{0N} = -\dot{I}_{0M} = 396e^{j146,3} = (-330 + j220) \text{ A}.$$

Струми прямої і зворотної послідовності в лінії PG і струми від систем F (вітка QP) і L (вітка QG) (рис.7.6 і рис.7.7) визначаємо за обчисленими струмами у вітках зірки, при цьому попередньо обчислимо струми цих послідовностей у промені QH зірки:

$$\dot{I}_{1QH} = \dot{I}_{1M} + \dot{I}_{1N} = 25,5 + j395 + 355 + j175,3 = 380,5 + j570,3 = 685e^{j55,5} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{2QH} = \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{2N} = -355 - j175,3 - 25,5 - j395 = -380,5 - j570,3 = 685e^{j235,5} \text{ A},$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1PG} &= \frac{\dot{I}_{1N} Z_{1GH} - \dot{I}_{1M} Z_{1PH}}{Z_{1PG}} = \frac{396e^{j26,3} \cdot 1,91e^{j72,9} - 396e^{j86,3} \cdot 2,015e^{j72,9}}{7,59e^{j55,3}} = \\ &= 96,9 - j33 = 102,5e^{-j19} \text{ A}, \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{1L} = \dot{I}_{1N} - \dot{I}_{1PG} = 355 + j175,3 - 96,9 + j33 = 258,1 + j208,3 = 332e^{j39} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{1F} = \dot{I}_{1M} + \dot{I}_{1PG} = 25,5 + j395 + 96,9 - j33 = 122,4 + j362 = 382e^{j71,3} \text{ A},$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2PG} &= \frac{\dot{I}_{2N} Z_{2GH} - \dot{I}_{2M} Z_{2PH}}{Z_{2PG}} = \frac{396e^{j266,3} \cdot 1,91e^{j72,9} - 396e^{j206,3} \cdot 2,015e^{j72,9}}{7,59e^{j55,3}} = \\ &= 99,6 - j23,7 = 102,4e^{-j13,4} \text{ A}, \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{2L} = \dot{I}_{2N} - \dot{I}_{2PG} = -25,5 - j395 - 99,6 + j23,7 = -125,1 - j371,3 = 392e^{j251,4} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{2F} = \dot{I}_{2M} + \dot{I}_{2PG} = -355 - j175,3 + 99,6 - j23,7 = -255,4 - j199 = 322e^{j218} \text{ A}.$$

За обчисленими значенням струмів усіх послідовностей визначаємо напруги прямої і зворотної послідовності на шинах P і G за схемами рис.7.6 і рис.7.7:

$$\dot{U}_{1P} = \dot{E}_{1F} - \dot{I}_{1F} Z_{1F} = j21400 - 382e^{j71,3} \cdot 3,8e^{j90} = 1373 + j20934 = 20960e^{j86,3} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{2P} = -\dot{I}_{2F} Z_{2F} = -322e^{j218} \cdot 3,8e^{j90} = -755 + j966 = 1223e^{j128} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{1G} = \dot{E}_{1L} - \dot{I}_{1L} Z_{1L} = j21400 - 332e^{j39} \cdot 3,6e^{j90} = 753 + j20470 = 20470e^{j87,9} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{2G} = -\dot{I}_{2L} Z_{2L} = -392e^{j251,4} \cdot 3,6e^{j90} = -1337 + j453 = -1410e^{j341,4} \text{ В}.$$

Для визначення напруг нульової послідовності $\dot{U}_{0P}$ й $\dot{U}_{0G}$ на шинах P і G необхідно спочатку обчислити ці напруги в точках V і W (рис.7.6,в).

Визначення $\dot{U}_{0V}$ й $\dot{U}_{0W}$ виконуємо з урахуванням граничних умов для напруг $\dot{U}_{BV}$ фази B у точці V і $\dot{U}_{CW}$ фази C у точці W , рівних нулю:

$$\dot{U}_{BV} = \dot{U}_{1BV} + \dot{U}_{2BV} + \dot{U}_{0V} = a^2 \dot{U}_{1V} + a \dot{U}_{2V} + \dot{U}_{0V} = 0$$

та

$$\dot{U}_{CW} = \dot{U}_{1CW} + \dot{U}_{2CW} + \dot{U}_{0W} = a \dot{U}_{1W} + a^2 \dot{U}_{2W} + \dot{U}_{0W} = 0,$$

звідки

$$\dot{U}_{0V} = -a^2 \dot{U}_{1V} - a \dot{U}_{2V}, \quad (7.4)$$

$$\dot{U}_{0W} = -a \dot{U}_{1W} - a^2 \dot{U}_{2W}. \quad (7.5)$$

Із цих виразів випливає, що для визначення напруг нульової послідовності в точках V і W необхідно обчислити напруги прямої і зворотної послідовності в цих точках:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1V} &= \dot{U}_{1P} - \dot{I}_{1M} (Z_{1PM} + R_{nM}) = 1373 + j20934 - 396e^{j86,3} (2,04 + j2,4 + 8) = \\ &= 2066 + j16934 = 17050e^{j83} \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{2V} &= \dot{U}_{2P} - \dot{I}_{2M} (Z_{2PM} + R_{nM}) = -755 + j966 - 396e^{j206,3} (2,04 + j2,4 + 8) = \\ &= 2365 + j3576 = 4290e^{j56,5} \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1W} &= \dot{U}_{1G} - \dot{I}_{1N} (Z_{1GN} + R_{nN}) = 753 + j20470 - 396e^{j26,3} (1,8 + j1,64 + 7) = \\ &= -2077 + j18345 = 18420e^{j96,5} \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{2W} &= \dot{U}_{2G} - \dot{I}_{2N} (Z_{2GN} + R_{nN}) = -1337 + j453 - 396e^{j266,3} (1,8 + j1,64 + 7) = \\ &= -1763 + j3973 = 4350e^{j114} \text{ В}. \end{aligned}$$

Підставивши ці значення в (7.3) і (7.4), знаходимо:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{0V} &= -a^2 \dot{U}_{1V} - a \dot{U}_{2V} = -e^{j240} \cdot 17050e^{j83} - e^{j120} \cdot 4290e^{j56,5} = -9350 + j10018 = \\ &= 13730e^{j133} \text{ В}, \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{0W} = -aU_{1W} - a^2\dot{U}_{2W} = -e^{j120} \cdot 18420e^{j96,5} - e^{j240} \cdot 4350e^{j114} = 10505 + j11375 = 15480e^{j47,2} \text{ В.}$$

Напруги на шинах P і G відповідно рівні:

$$\dot{U}_{0P} = \dot{U}_{0V} + \dot{I}_{0M}(Z_{0PM} + R_{nM}) = -9350 + j10018 + 396e^{-j33,7}(6,12 + j7,2 + 8) = -3110 + j9285 = 9790e^{j108,7} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{0G} = \dot{U}_{0W} + \dot{I}_{0N}(Z_{0GN} + R_{nN}) = 10505 + j11375 + 396e^{j146,3}(5,4 + j4,92 + 7) = 5345 + j12485 = 13600e^{j66,8} \text{ В.}$$

Слід зазначити, що можна було обчислити тільки одну з напруг $\dot{U}_{0V}$ або $\dot{U}_{0W}$, а напруги нульової послідовності на шинах P і G визначити за відомими опорами схеми заміщення нульової послідовності й струму $\dot{I}_{0M}$ (рис.7.6,в).

Для перевірки правильності виконаних обчислень напруг усіх послідовностей на шинах P і G визначимо струми в лінії PG за допомогою цих напруг і порівняємо їх з раніше обчисленими значеннями:

$$\dot{I}_{1PG} = \frac{\dot{U}_{1P} - \dot{U}_{1G}}{Z_{1PG}} = \frac{1373 + j20934 - 753 - j20470}{7,59e^{j55,3}} = 102,3e^{-j18,3} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_{2PG} = \frac{\dot{U}_{2P} - \dot{U}_{2G}}{Z_{2PG}} = \frac{-755 + j966 + 1337 - j453}{7,59e^{j55,3}} = 102,3e^{-j13,8} \text{ А,}$$

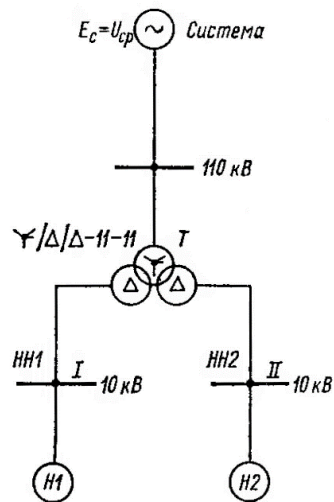
$$\dot{I}_{0PG} = \frac{\dot{U}_{0P} - \dot{U}_{0G}}{Z_{0PG}} = \frac{-3110 + j9285 - 5345 - j12485}{22,77e^{j55,3}} = 396e^{-j145,5} \text{ А.}$$

Отримані значення струмів збігаються з визначеними вище; це вказує, що обрахунки виконані правильно.

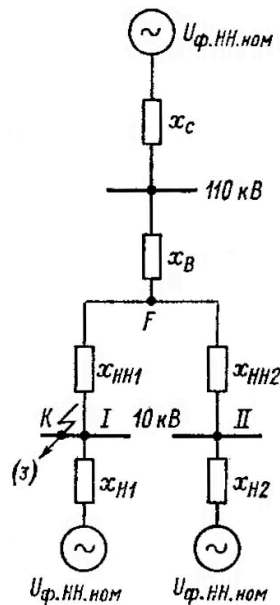
Глава восьма

КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ НА СТОРОНІ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРА

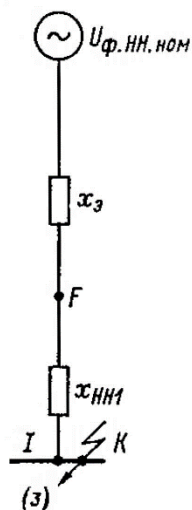
8-1. Обчислити максимальний і мінімальний усталений струм в обмотці вищої напруги (ВН) і у двох розщеплених обмотках нижчої напруги (НН) (рис.8.1,*a*) двообмоткового трансформатора з регулюванням напруги на стороні ВН під навантаженням (РПН) при металевому трифазному КЗ на одній із секцій 10 кВ.



а)



б)



в)

Рис.8.1. До задачі 8-1: а - вихідна схема, б - схема заміщення для визначення аварійних складових струмів трифазного КЗ, в - спрощена схема заміщення.

Вихідні дані: система C - потужність від системи при трифазному КЗ на шинах 110 кВ у максимальному режимі $S_{к.макс} = 900$ МВА, у мінімальному режимі $S_{к.мін} = 600$ МВА; трансформатор T - типу ТРДН, потужність $S_{ном.Т} = 25$ МВА, напруги $115 \pm 9 \times 1,78 / 10,5 / 10,5$ кВ, напруги короткого замикання при середньому (номінальному), крайньому позитивному й крайньому негативному положенні пристрою РПН і паралельному з'єднанні розщеплених обмоток НН відповідно рівні [19]: $u_{к.ВН-НН} = 10,5\%$, $u_{к.макс} = 11,72$, $u_{к.мін} = 9,84$; навантаження - повна потужність кожної секції шин 10 кВ становить половину номінальної потужності трансформатора, тобто $S_{Н1} = S_{Н2} = 12,5$ МВА, коефіцієнт потужності навантажень $\cos \varphi_{Н1} = \cos \varphi_{Н2} = 0,85$.

Розв'язок. Обчислення струмів трифазного КЗ на стороні НН трансформатора при наявності в нього РПН виконуємо методом накладання, який докладно наведений для даного випадку в [17].

Значення величин, що розраховуються, приводимо до сторони ВН трансформатора.

Для трансформаторів, у яких при перестановці регулятора відгалужень убік підвищення напруги (позитивну) u_k збільшується; максимальні струми на стороні регулювання мають місце на крайньому негативному ступені регулювання, при якому опір трансформатора $x_{T.мін}$ приведений до цієї сторони, мінімальний; мінімальні струми на стороні регулювання трансформатора мають місце на крайньому позитивному ступені регулювання, при якому його опір $x_{T.макс}$ максимальний.

Для трансформаторів, у яких при перестановці регулятора убік підвищення напруги (позитивну) u_k зменшується, визначити режими протікання через трансформатор максимальних і мінімальних струмів КЗ без проведення відповідних розрахунків не вдається. У цьому випадку обчислюють опори, що відповідають номінальному й прийнятим за позитивний й негативний ступені регулювання, і за ними визначають струми КЗ, що протікають по обмотках трансформатора.

Слід пам'ятати, що значення $u_{k.мін}$ і $u_{k.макс}$ на крайніх положеннях РПН віднесені до номінальної потужності трансформатора й напруг цих крайніх відгалужень.

Приведемо схему заміщення й розрахункові формули її опорів для двообмоткового трифазного трансформатора із двома розщепленими обмотками.

У такого трансформатора схема заміщення має вигляд трипроменевої зірки (аналогічно триобмотковому трансформатору) з опорами x_B , x_{HH1} і x_{HH2} (рис.8.1,6). При відомих u_k між трьома обмотками розглянутого трансформатора опори променів зірки можуть бути обчислені за формулами для триобмоткового трансформатора [1, 10, 17]. У даній задачі задані за ГОСТ тільки напруги КЗ між обмоткою ВН і

паралельно з'єднаними розщепленими обмотками НН, тобто u_k без розщеплення обмоток НН.

Тому для обчислення опорів променів еквівалентної зірки необхідно знати коефіцієнт розщеплення [17]

$$k_{розщ} = (x_{HH1} + x_{HH2}) / x_{BH-HH}, \quad (8.1)$$

де x_{BH-HH} - опір двообмоткового трансформатора без розщеплення, що визначається за u_{kBH-HH} , яке приводиться в ГОСТ. В [20] x_{BH-HH} називається наскрізним опором і позначається $x_{наскр}$.

Для трансформаторів різних типів і класів напруги $k_{розщ}$ і схеми заміщення наведені в [1, 20, 21, 22]. Для розглянутого трансформатора $k_{розщ} \approx 3,5$ [21]. З (8.1)

$$x_{HH1} + x_{HH2} = k_{розщ} x_{BH-HH} \quad (8.2)$$

або

$$u_{k.HH1} + u_{k.HH2} = k_{розщ} u_{k.BH-HH}. \quad (8.2a)$$

Оскільки розщеплені обмотки однакові й перебувають у рівних умовах, то з (8.2a)

$$u_{k.HH1} = u_{k.HH2} = 0,5 k_{розщ} u_{k.BH-HH}. \quad (8.3)$$

Поєднуючи секції $HH1$ і $HH2$ (рис.8.1,б) і враховуючи (8.3), знаходимо напругу КЗ променя зірки x_B (рис.8.1,б):

$$u_{k.B} = u_{k.BH-HH} - 0,25 k_{розщ} u_{k.BH-HH}. \quad (8.4)$$

За виразами (8.3) і (8.4) обчислюють напруги КЗ променів зірки двообмоткових трансформаторів (із РПН або без РПН) із двома розщепленими обмотками. За напругами КЗ променів зірки схеми заміщення обчислюють опори цих променів, приведені до напруг заданих відгалужень на стороні регулювання й до однієї номінальній потужності на всіх відгалуженнях пристрою РПН.

Приведемо необхідні розрахункові вирази для обчислення струмів КЗ двообмоткового трифазного трансформатора із РПН, але без

розщеплення обмоток. Ці розрахункові вирази будуть вірні для опорів променів зірки, приведених до сторони регулювання, для двообмоткових трифазних трансформаторів із РПН і з розщепленими обмотками й для триобмоткових трифазних трансформаторів із РПН на стороні ВН або СН. Слід зазначити, що на будь-якому ступені регулювання N , де N - число ступенів від середнього положення пристрою РПН, трансформатор на цій стороні має свої номінальні дані (на відміну від паспортних, при середньому положенні РПН) U_{TN} , I_{TN} , u_{kN} , x_{TN} , n_{TN} , за допомогою яких і проводять розрахунки при однаковій номінальній потужності трансформатора на всіх ступенях N [17].

Нехай на стороні регулювання (ВН) мало місце відхилення напруги від номінальної (середньої) на ступені N на $\pm \Delta U_{NPPH}$; тоді напруга на цій стороні

$$U_{T.BHN} = U_{T.BHном} \pm \Delta U_{NPPH} = U_{T.BHном} \left(1 \pm \frac{\Delta U_{NPPH}}{U_{T.BHном}} \right). \quad (8.5)$$

Позначимо відносну напругу при регулюванні, яка приводиться в технічних даних,

$$\Delta U_{NPPH} / U_{T.BHном} = \Delta U_{*NPPH}. \quad (8.6)$$

Підставляючи (8.6) в (8.5), одержуємо

$$U_{T.BHN} = U_{T.BHном} (1 \pm \Delta U_{*NPPH}). \quad (8.7)$$

За відомими значенням u_k , що приводяться в ГОСТ для номінального (середнього) положення пристрою РПН $u_{k.ном}$ і обох крайніх його положень $N_{крРПН}$ і $u_{k.кр}$, методом інтерполяцій знаходимо

$$u_{kN} \approx u_{k.ном} + \frac{(u_{k.кр} - u_{k.ном})N_{РПН}}{N_{кр.РПН}}. \quad (8.8)$$

У цьому виразі: а) при обчисленні u_{kN} на будь-якому положенні пристрою РПН слід підставляти абсолютне значення $u_{k.кр}$, відповідне до цього положення, б) величину в дужках необхідно брати з одержуванним, позитивним або негативним, знаком, в) $N_{кр}$ - максимальне число ступенів

у позитивну або негативну сторону від середнього положення РПН, г)
число ступенів

$$N_{РПН} = (U_{НРПН} - U_{Т.ВНном}) N_{крРПН} / (U_{Т.ВНном} \Delta U_{*крРПН}). \quad (8.9)$$

Опір трансформатора на ступені N сторони регулювання з урахуванням (8.7)

$$x_{Т.N} = \frac{u_{кN} \%U_{Т.ВНН}^2}{100S_{Т.ном}} = \frac{u_{кN} \%U_{Т.ВНном}^2 (1 \pm \Delta U_{*НРПН})^2}{100S_{Т.ном}}. \quad (8.10)$$

На ступені N регулятора струм

$$I_{Т.N} = \frac{S_{Т.ном}}{\sqrt{3}U_{Т.ВНН}} = \frac{S_{Т.ном}}{\sqrt{3}U_{Т.ВНном} (1 \pm \Delta U_{*НРПН})}, \quad (8.11)$$

коефіцієнт трансформації трансформатора

$$n_{Т.N} = \frac{U_{Т.ВНН}}{U_{Т.ННном}} = \frac{U_{Т.ВНном} (1 \pm \Delta U_{*НРПН})}{U_{Т.ННном}}. \quad (8.12)$$

При номінальній (середній) напрузі $\Delta U_{НРПН} = 0$, при цьому вирази (8.7) - (8.10) приймають звичайний вид для двообмоткового трифазного трансформатора без РПН.

Розрахунки струмів при КЗ за трансформаторами із РПН найкраще виконувати методом накладання аварійних складових струмів КЗ на струми навантаження трансформатора в режимі до КЗ. Аварійні складові струмів КЗ визначаються за напругою в точці КЗ, яке мало місце в режимі навантаження до моменту КЗ. При наявності РПН напруга до КЗ на стороні НН (або СН) забезпечується постійною і рівною $U_{ННном}$ незалежно від режиму навантаження.

Тому в схемі заміщення аварійних складових струмів КЗ (рис.8.1, а і б) показана ця напруга, яка прикладена до нульових точок не тільки генераторів, але й навантажень. Цим дана схема відрізняється від звичайних. При несиметричних КЗ ця схема є схемою прямої послідовності аварійних складових струмів КЗ.

Увесь розрахунок виконуємо для двох крайніх положень РПН, при яких мають місце максимальне й мінімальне значення струму при трифазному КЗ на шинах НН (10 кВ).

Напруги КЗ променів зірки (рис.8.1,б) на крайньому позитивному ступені РПН $u_{к.макс}$ і крайньому негативному $u_{к.мін}$ визначаємо за (8.3) і (8.4):

$$u_{к.НН1макс} = u_{к.НН2макс} = 0,5k_{розиц} u_{к.макс} = 0,5 \cdot 3,5 \cdot 11,72 = 20,5\%,$$

$$u_{к.Вмакс} = u_{к.макс} - 0,25k_{розиц} u_{к.макс} = 11,71 - 0,25 \cdot 3,5 \cdot 11,72 = 1,45\%,$$

$$u_{к.НН1мін} = u_{к.НН2мін} = 0,5 \cdot 3,5 \cdot 9,84 = 17,2\%,$$

$$u_{к.Вмін} = 9,84 - 0,25 \cdot 3,5 \cdot 9,84 = 1,23\%.$$

Максимальне значення на крайніх ступенях ($N_{кр} = 9$) пристрою РПН за умовою $\pm \Delta U_{*крРПН} = 9 \times 0,0178 = 0,16$ в.о.

Максимальні й мінімальні опори променів зірки, приведені до сторони регулювання, обчислюємо за (8.10):

$$x_{НН1макс} = x_{НН2макс} = \frac{u_{к.НН1макс} U_{Т.ВНном}^2 (1 + \Delta U_{*крРПН})^2}{100 S_{Т.ном}} = \frac{20,5 \cdot 115^2 \cdot (1 + 0,16)^2}{100 \cdot 25} = 146 \text{ Ом},$$

$$x_{Вмакс} = 1,45 \cdot 115^2 (1 + 0,16)^2 : (100 \cdot 25) = 10,33 \text{ Ом},$$

$$x_{НН1мін} = x_{НН2мін} = \frac{u_{к.НН1мін} U_{Т.ВНном}^2 (1 - \Delta U_{*крРПН})^2}{100 S_{Т.ном}} = \frac{17,2 \cdot 115^2 \cdot (1 - 0,16)^2}{100 \cdot 25} = 64,2 \text{ Ом},$$

$$x_{Вмін} = 1,23 \cdot 115^2 \cdot (1 - 0,16)^2 : (100 \cdot 25) = 4,59 \text{ Ом}.$$

Опір навантаження $H2$ в усталеному режимі, підключений до секції II 10 кВ, приблизно вважаємо індуктивним [1, 17] $x_{H2} = 120\%$.

Обчислюємо опір навантаження $H2$, приведенний до сторони ВН, тільки для крайнього негативного ступеня РПН. При обчисленні мінімальних струмів КЗ, що мають місце на крайньому позитивному

ступені пристрою, приймаємо, що навантаження в цьому режимі відсутнє, тобто $x_{H2} = \infty$ (холостий хід трансформатора):

$$x_{H2} = \frac{x_H \%U_{T.BHном}^2 (1 - \Delta U_{*крРПН})^2}{100S_{H2}} = \frac{120 \cdot 115^2 \cdot (1 - 0,16)^2}{100 \cdot 12,5} = 895 \text{ Ом.}$$

Опір навантаження HI не враховуємо. Це навантаження відділяється місцем трифазного металевого КЗ, і тому на спрощеній схемі заміщення (рис.8.1,в) воно не показане.

Опори системи в максимальному й мінімальному режимах

$$x_{с.макс} = U_{ср}^2 / S_{к.макс} = 115^2 / 900 = 14,7 \text{ Ом,}$$

$$x_{с.мін} = U_{ср}^2 / S_{к.мін} = 115^2 / 600 = 22 \text{ Ом.}$$

Максимальне значення аварійної складової струму КЗ має місце в максимальному режимі системи (при $x_{с.макс}$) і на крайньому негативному ступені пристрою РПН (при $x_{Т.мін}$). Спростуємо схему заміщення (рис.8.1,б) об'єднанням вітки системи з вітками навантаження $H2$ до точки F :

$$x_{е.мін} = \frac{(x_{с.макс} + x_{Вмін})(x_{H2} + x_{HH2мін})}{x_{с.макс} + x_{Вмін} + x_{H2} + x_{HH2мін}} = \frac{(14,7 + 4,59)(895 + 64,2)}{14,7 + 4,59 + 895 + 64,2} = 18,9 \text{ Ом.}$$

Приймаємо напругу на шинах 10 кВ постійною і рівною $U_{HHном}$.

Приводимо цю напругу до сторони ВН для крайнього негативного ступеня РПН за формулою (8.12). У цьому випадку аварійна складова струму, що протікає по обмотці НН1 (рис.8.1,в),

$$I_{ав.НН1макс}^{(3)} = \frac{U_{фВНном} (1 - \Delta U_{*крРПН})}{x_e + x_{НН1мін}} = \frac{115 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,16)}{\sqrt{3}(18,9 + 64,2)} = 671 \text{ А.}$$

Аварійна складова струму, що протікає на обмотці ВН,

$$I_{ав.ВНмакс}^{(3)} = \frac{x_e I_{ав.НН1макс}^{(3)}}{x_{с.макс} + x_{Вмін}} = \frac{18,9 \cdot 671}{14,7 + 4,59} = 656 \text{ А.}$$

Аварійна складова струму, що підтікає від навантаження $H2$ до місця КЗ,

$$I_{ав.Н2,макс}^{(3)} = I_{ав.НН1,макс}^{(3)} - I_{ав.ВНмакс}^{(3)} = 671 - 656 = 15 \text{ А.}$$

Для одержання дійсного струму необхідно значення аварійної складової струму в кожній вітці схеми заміщення геометрично скласти зі струмом навантаження, що протікав в кожній вітці до моменту КЗ

Як показує аналіз, з метою спрощення розрахунків для випадків КЗ за трансформаторами можливо алгебраїчне додавання аварійної складової струму КЗ до реактивної складової струму навантаження, при цьому похибка струму становить менш двох відсотків.

При розрахунках максимального струму КЗ, що протікає через трансформатор, слід уважати, що до КЗ навантаження в трансформатора відповідало його номінальній потужності. У цьому випадку

$$I_{к.Т.макс}^{(3)} = I_{ав.Т.макс}^{(3)} + I_{Т.ном} \sin \varphi_n. \quad (8.13)$$

Номінальний струм обмотки ВН при середньому положенні РПН ($\Delta U_{РПН} = 0$)

$$I_{Т.ВНном} = S_{Т.ном} / (\sqrt{3} U_{Т.ном}) = 25000 / (\sqrt{3} \cdot 115) = 125,5 \text{ А.}$$

Струм в обмотці ВН, через яку протікає весь струм навантаження за (8.13)

$$I_{к.ТВНмакс}^{(3)} = 656 + 125,5 \cdot 0,527 = 722 \text{ А.}$$

Через обмотку *НН1* протікає половина номінального струму обмотки ВН, тому струм в обмотці *НН1* з урахуванням (8.12)

$$\begin{aligned} I_{к.Т.НН1макс}^{(3)} &= \left(I_{ав.НН1макс}^{(3)} + 0,5 I_{Т.ном} \sin \varphi_{Н1} \right) \cdot \frac{U_{ВНном} (1 - \Delta U_{*крРПН})}{U_{ННном}} = \\ &= (671 + 0,5 \cdot 125,5 \cdot 0,527) \cdot \frac{115 \cdot (1 - 0,16)}{10,5} = 6480 \text{ А.} \end{aligned}$$

Струм навантаження в обмотці *НН2* у кілька разів більше аварійної складової в цій обмотці, що має протилежний напрямок, тому для цього випадку точніше дійсний струм визначати за наступною формулою (з урахуванням попереднього виразу):

$$I_{к.Т.НН2\max}^{(3)} = I_{H2} - I_{ав.Н2\max}^{(3)} = (0,5 \cdot 125,5 - 15) \cdot 115(1 - 0,16) : 10,5 = 440 \text{ А.}$$

Цей струм спрямований убік навантаження $H2$, а не до місця КЗ.

Мінімальні струми КЗ, що протікають через трансформатор, мають місце в мінімальному режимі системи й на крайньому позитивному ступені РПН (при $x_{Т\max}$).

У мінімальному режимі слід припустити роботу трансформатора на холостому ході ($I_{H1} = I_{H2} = 0$ і $x_{H1} = x_{H2} = \infty$), при цьому аварійні складові струмів КЗ у всіх обмоток трансформатора дорівнюють дійсним струмам, тобто

$$I_{к.Т.\min}^{(3)} = I_{ав.Т.\min}^{(3)}. \quad (8.14)$$

У цьому випадку при $x_{H2} = \infty$ зі схеми заміщення (рис.8.1,б)

$$I_{к.Т.ВН\min} = I_{к.Т.НН1\min} = \frac{U_{ф.ВНном}(1 + \Delta U_{*крРПН})}{x_{с.\min} + x_{В\max} + x_{НН1\max}}. \quad (8.15)$$

Підставляючи в (8.15) чисельні значення, одержуємо

$$I_{к.Т.ВН\min} = \frac{115000(1 + 0,16)}{\sqrt{3} \cdot (22 + 10,33 + 146)} = 432 \text{ А.}$$

В обмотці $НН1$ струм, приведений до НН,

$$\dot{I}_{к.Т.НН1\min} = 432 \cdot 115 \cdot (1 + 0,16) : 10,5 = 5500 \text{ А.}$$

У даній задачі обчислені граничні значення струмів, що протікають через трансформатор при металевому трифазному КЗ на його виводах НН.

За умовами роботи ізоляції електроустаткування в експлуатації обмежують тривало допустимі найбільші робочі напруги $U_{тр.доп}$ відповідно до ГОСТ 721-74. Так, для мережі 110 кВ $U_{тр.доп} = 126$ кВ. Тому в режимі підвищення напруги пристроєм РПН струми КЗ для релейного захисту слід рахувати за наведеними вище виразами для трансформаторів будь-яких класів для $U_{НРПН} = U_{тр.доп}$.

ЧАСТИНА II

СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ ЛІНИЙ 110 – 550 КВ

Глава дев'ята

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

9-1.

1. У даній главі дані вказівки з розрахунку східчастих струмових захистів нульової послідовності ліній 110 - 500 кВ відповідно до різних схем (одиначні, паралельні лінії, лінії з відгалуженнями).

Вказівки даються в повному обсязі. Однак у конкретних умовах залежно від призначення розрахунків цей обсяг може бути зменшений відповідно до відомчих регламентуючих матеріалів, наприклад еталонів проектів.

Наведені нижче вказівки з розрахунку дані застосовуються до безпосереднього використання результатів розрахунків струмів КЗ і повинні розглядатися як основа для автоматизованої програми розрахунків параметрів спрацьовування захисту на ЕОМ.

2. Розрахунки східчастого струмового захисту нульової послідовності в загальному випадку зводяться до визначення:

А) струму спрацьовування й витримок часу окремих ступенів захисту;

Б) необхідності використання в захисті реле напряму потужності;

В) чутливості захисту.

3. Розрахунки струмів КЗ для вибору струмів спрацьовування й перевірки чутливості захисту повинні проводитися з урахуванням зміни опорів трансформаторів (автотрансформаторів) при регулюванні напруги під навантаженням за допомогою пристрою РПН. При цьому максимальні й мінімальні значення опорів трансформаторів (автотрансформаторів) у

схемах заміщення прямої (зворотної) і нульової послідовностей повинні ухвалюватися по можливості з урахуванням реально використовуваних положень перемикача пристрою РПН. При виконанні орієнтовних розрахунків, наприклад для вибору принципів захистів, слід розглядати можливість неврахування з метою спрощення зазначеної зміни опору трансформаторів (автотрансформаторів).

Слід зазначити, що, як показали виміри, проведені деякими енергосистемами, опори нульової послідовності ряду трансформаторів (автотрансформаторів) x_{0T} виявляються помітно нижче їхніх опорів прямої послідовності x_{1T} і можуть становити приблизно $x_{0T} = (0,85-0,9) x_{1T}$.

4. Наведені в даній главі вказівки дані з припущенням, що трансформатори струму, використовувані для захисту, задовольняють кривим граничної кратності при 10%-ний похибці при струмах, рівних струму спрацьовування першого ступеню захисту, а для спрямованих захистів також і при струмах зовнішнього КЗ у напрямку, протилежному тому, який захищається.

5. Розглянутий нижче вибір параметрів спрацьовування даний стосується захистів, розміщених на типових панелях, що випускаються нині:

А) чотириступінчастої - для ліній 110 - 330 і 330 - 500 кВ, що мають живлення із двох і більш сторін;

Б) триступінчастої - для нетупикових ліній 110 - 220 кВ із одностороннім живленням;

В) двоступінчастої - для тупикових ліній 110 - 220 кВ.

У схемах цих захистів усі ступені, крім останнього, є струмовими відсічками й призначені в основному для дії при замиканнях на землю в межах лінії, що захищається, і на шинах протилежної підстанції. Останній

ступінь призначений в основному для здійснення резервування при замиканнях на землю на попередній лінії.

У схемах передбачена можливість виконання всіх ступенів захисту спрямованими. Однак у кожному ступені орган напряду потужності може бути виключений, якщо необхідність у ньому відсутня.

6. Наведені нижче вказівки по розрахунках дані з припущенням, що захисти виконуються спрямованими. Однак для підвищення надійності, а в ряді випадків також і чутливості захистів слід прагнути виконувати спрямованими тільки ті їх ступені, селективність яких при виконанні їх неспрямованими не забезпечується.

7. Розглянутий нижче, у главах 10-12, вибір параметрів спрацьовування даний для чотириступінчастого струмового спрямованого захисту.

У главі 10 розглянутий вибір параметрів спрацьовування захисту одиночних ліній, не зв'язаних взаємоіндукцією з іншими лініями. Вплив взаємоіндукції на вибір параметрів спрацьовування захисту розглянуто в главах 11 і 12.

Глава десята

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ ОДИНОЧНИХ ЛІНІЙ 110 - 500 КВ ІЗ ДВОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ БЕЗ ВІДГАЛУЖЕНЬ

10-1. Струм спрацьовування першого ступеня захисту при виконанні його без витримки часу вибирається за умовами відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту:

- А) при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції;
- Б) у короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодноразовому ввімкненні фаз вимикача, наприклад у циклі швидкодіючого автоматичного повторного включення (ШАПВ);
- В) у неповнофазному режимі, що виникає в циклі ОАПВ на лінії, що захищається.

Струм спрацьовування першого ступеня захисту, що обирають за умовою п.10-1,А, визначається за виразом

$$I_{0с.з}^I \geq k_{відб} 3I_{0з}, \quad (10.1)$$

де $3I_{0з}$ - максимальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції;

$k_{відб}$ - коефіцієнт відбудовування, що враховує похибку реле, помилки розрахунків, вплив аперіодичної складової й необхідний запас.

При використанні реле типу РТ-40 для ліній 110 - 220 кВ $k_{відб} = 1,3$, для ліній 330 - 500 кВ $k_{відб} = 1,4 - 1,5$; при використанні реле типу РНТ-560 для ліній 330 - 500 кВ $k_{відб} = 1,3$.

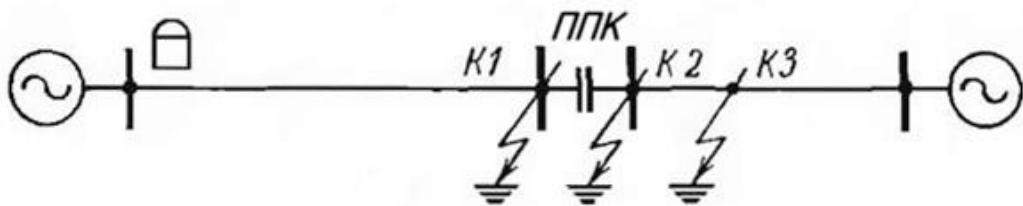
Збільшення значення $k_{відб}$ для ліній 330 - 500 кВ при використанні реле типу РТ-40 пов'язане з посиленням впливу аперіодичної складової у

первинному струмі, що обумовлене зростанням постійної часу цієї складової у мережах розглянутої напруги.

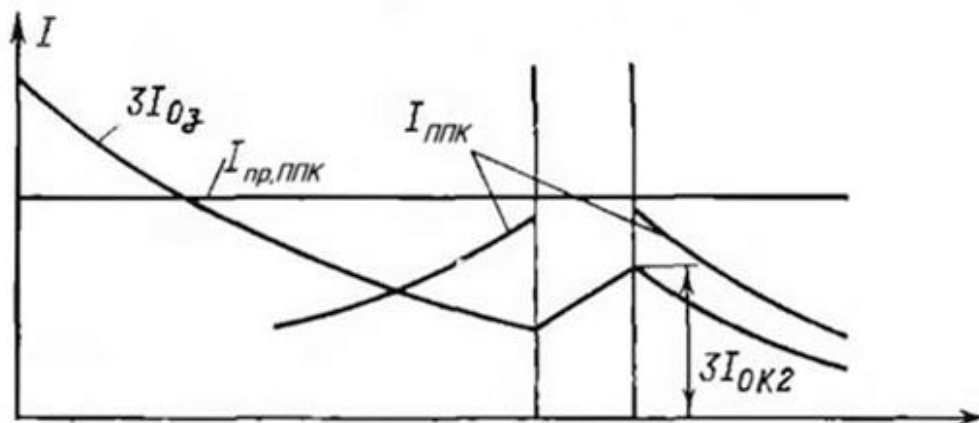
На лініях 500 кВ значної довжини, що мають пристрої поздовжньої ємнісної компенсації (ППК), визначення значення струму КЗ $3I_{03}$ у виразі (10.1) при розгляді п.10-1,А необхідно проводити з урахуванням наступного.

Пристрої поздовжньої ємнісної компенсації здійснюються за допомогою конденсаторних батарей, що вмикаються послідовно в кожну із трьох фаз лінії, що й компенсують у певній мері індуктивний опір останньої. У зв'язку із цим розрахунковим, тобто таким, що зумовлює більше значення струму $3I_{03}$, що проходить у місці установки захисту, може виявитися замикання на землю за ППК. Для захисту батарей від перенапруг установлюються розрядники. Коли напруга на конденсаторах перевищує гранично припустиме для них значення, розрядники пробиваються й шунтують батареї.

З урахуванням зазначеного струм $3I_{03}$, що проходить у місці установки захисту, для вихідної схеми (рис.10.1,а) повинен визначатися виходячи з наступного.



а)



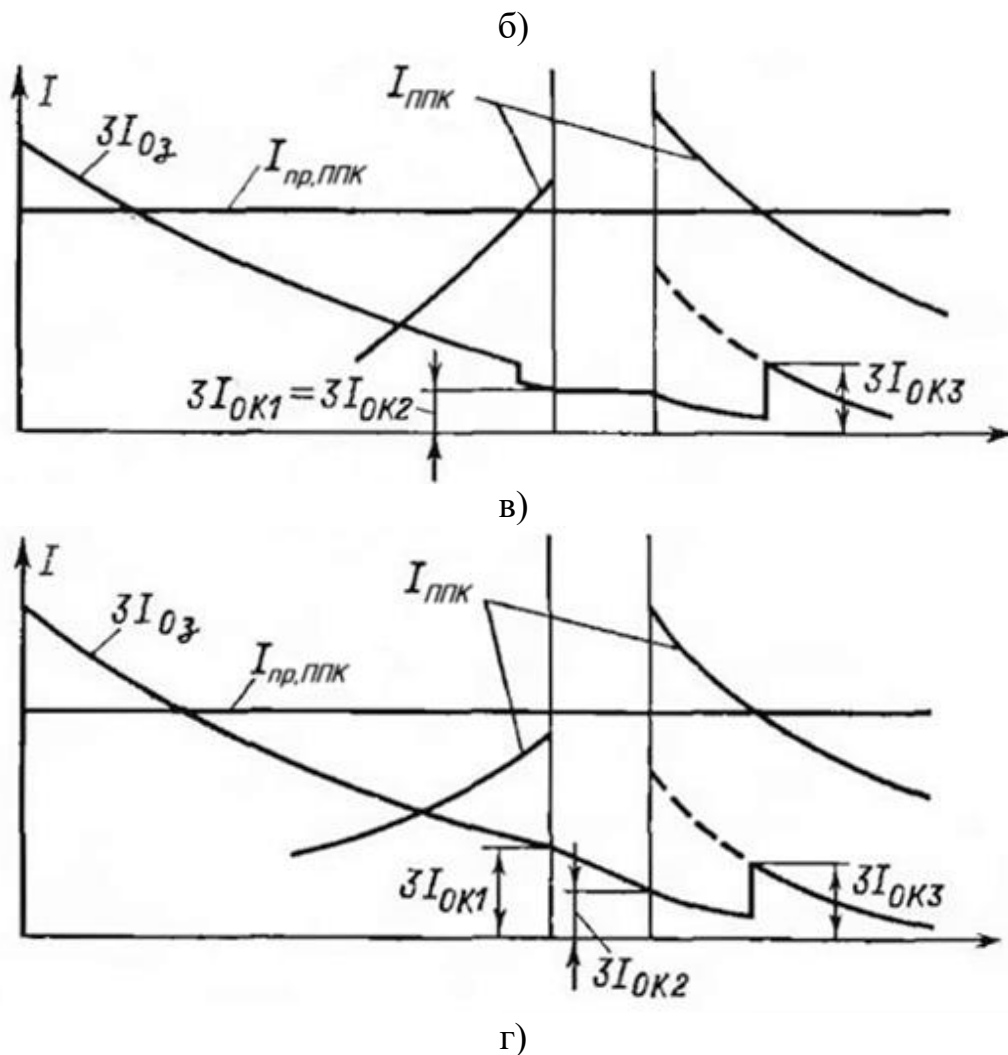


Рис.10.1. Визначення струму спрацьовування першого ступеня захисту при наявності на лінії ППК:

а – вихідна схема; *б* - якщо при замиканні на землю в точках *K1*, і *K2* розрядники не пробиваються; *в* - якщо при замиканні на землю в точках *K1* і *K2* розрядники пробиваються; *г* - якщо при замиканні на землю в точці *K3* розрядники пробиваються, а при замиканні на землю в точці *K1* не пробиваються;

$3I_{0з}$ - потроєний струм нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканнях на землю в розрахунковому режимі;

$I_{ППК}$ — повний фазний струм ($I_1 + I_2 + I_0$) в ППК при замиканнях на землю в розрахунковому режимі;

$I_{пр,ППК}$ - струм пробою розрядників ППК.

Якщо при замиканні на землю за ППК (у точці *K2* рис.10.1,*а*) розрядники, встановлені для захисту конденсаторних батарей ППК, не пробиваються (рис.10.1,*б*), то струм $3I_{0з}$ визначається при замиканні на землю за ППК (у точці *K2*).

Якщо при замиканні на землю як до ППК, так і за ППК (відповідно в точках $K1$ і $K2$ на рис.10.1,а) розрядники пробиваються (рис.10.1,в), то струм $3I_{03}$ визначається при замиканні на землю в одній з наступних точок (залежно від того, яка з них виявиться розрахунковою):

у точці $K1$ (до ППК) або в точці $K2$ (за ППК) при зашунтованому ППК;

на попередній лінії в точці $K3$ на рис.10.1,а (при ушкодженні в якій розрядники ППК уже не пробиваються).

Якщо при замиканні на землю за ППК (у точці $K2$) розрядники пробиваються, а при замиканні на землю до ППК (у точці $K1$) не пробиваються (рис.10.1,г), то струм $3I_{03}$ визначається при замиканні на землю в одній з наступних точок (розрахункової):

до ППК (у точці $K1$) при дешунтованому ППК;

на попередній лінії в точці, при ушкодженні в якій розрядники ППК уже не пробиваються (у точці $K3$ на рис.10.1,а).

Слід зазначити, що у випадках, коли розрядники пробиваються, при використанні швидкодіючих реле необхідно враховувати можливість спрацьовування реле струму першого ступеня при замиканні на землю за ППК до спрацьовування шунтуючого ППК розрядника.

Для виключення зайвого спрацьовування доцільно вводити в захист затримку порядку 40 мс.

При наявності на підстанції декількох паралельно включених мостів ППК зазначене значення струму $3I_{03}$ у точці $K2$ повинне визначатися для випадку відключення максимально можливого числа мостів.

З метою спрощення розрахунки струмів $K3$ при виборі уставок перших ступенів захисту у випадках, коли розрядники пробиваються, можна проводити для режиму шунтування ППК у всіх фазах через

незначну відмінність значень струмів, визначених у режимі шунтування ППК у всіх фазах і тільки в ушкодженій фазі.

Струм спрацьовування першого ступеня захисту, що обирається за умовою п.10-1,Б, визначається за виразом

$$I'_{0с.з} \geq k_{відб} 3I_{0неп}, \quad (10.2)$$

де $3I_{0неп}$ - максимальне значення потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача;

$k_{відб}$ - те ж, що у виразі (10.1).

Умова з п.10-1,Б не розглядається, якщо перший ступінь захисту відбудований за часом від неповнофазного режиму, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача $t_{с.з} > t_{в.різн}$ (наприклад, при дії на вихідне проміжне реле через реле часу); час різночасності включення фаз вимикача $t_{в.різн}$ залежить від типів вимикача і його привода.

При вимикачах із трифазним приводом захист із електромеханічними реле практично відбудований від розглянутого неповнофазного режиму власним часом спрацьовування захисту без додаткової затримки.

Для масляних вимикачів з пофазним електромагнітним приводом час різночасності ввімкнення фаз вимикача може бути прийнятий порядку 0,2с. Для повітряних вимикачів з пофазним приводом $t_{в.різн}$ слід uważати не менш 0,1 с.

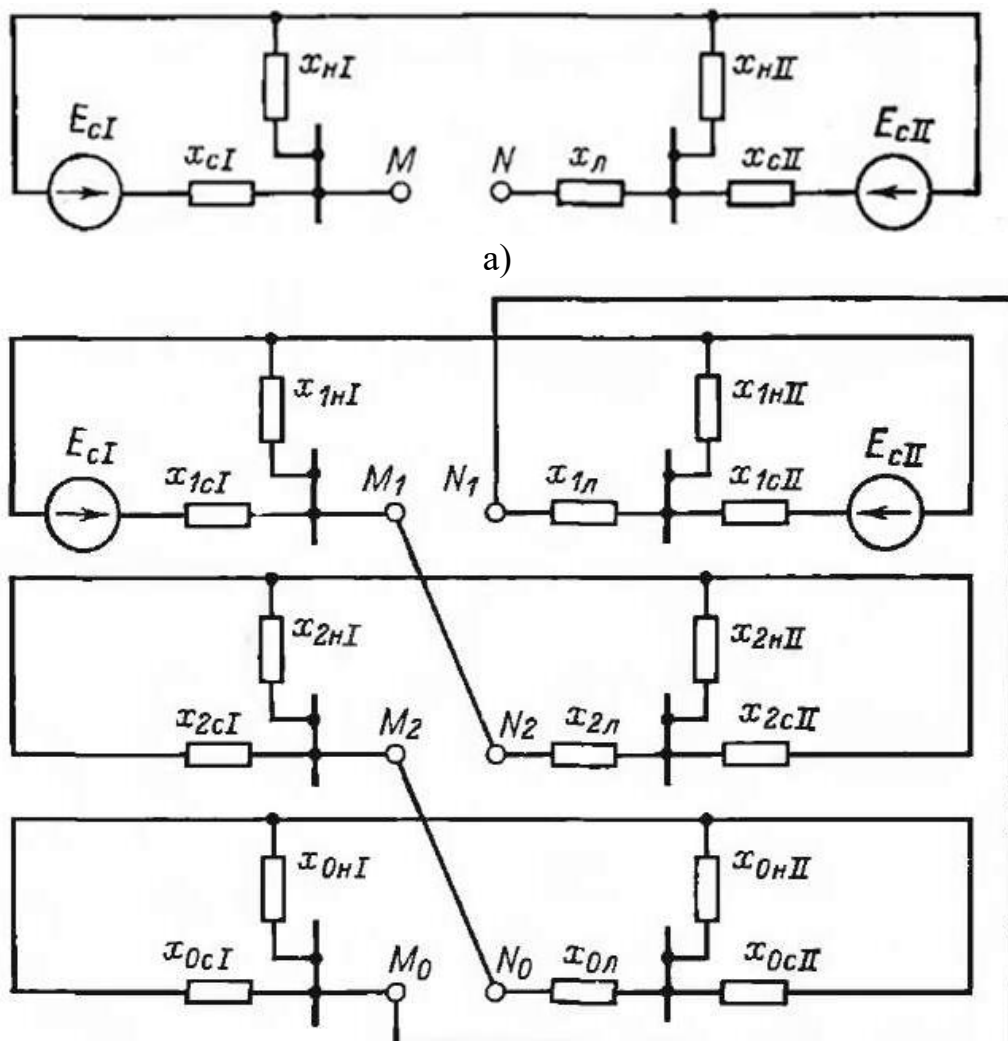
Струм спрацьовування першого ступеня захисту, що обирається за умовою з п.10-1,В, визначається за виразом (10.2), у якому $3I_{0неп}$ - максимальне значення потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає в циклі ОАПВ на лінії, що захищається.

Слід зазначити, що умова з п.10-1,В, як правило, є більш легшим, ніж умова з п.10-1,Б, при якій звичайно розглядається режим включення

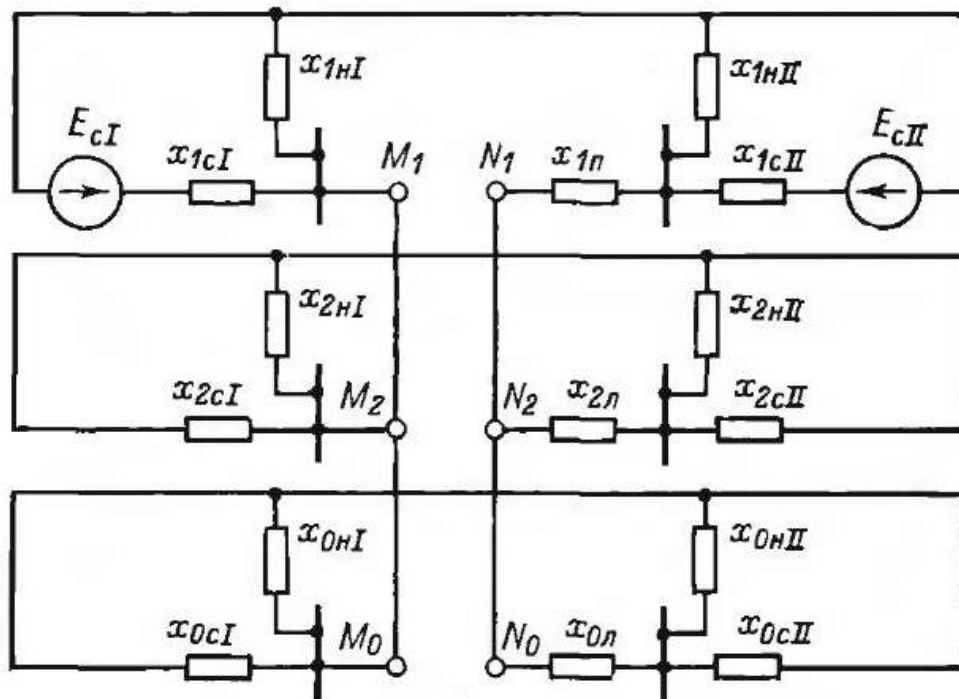
однієї фази (а не двох фаз, як за умови з п.10-1,В) і кут розбіжності ЕРС (див.нижче) більше. Тому умова з п.10-1,В повинна розглядатися в тих випадках, коли відбудовування струму спрацьовування захисту від неповнофазного режиму за п.10-1,Б не проводиться.

Відбудовування від струму в неповнофазному режимі в циклі ОАПВ на лінії, що захищається, не потрібно, якщо передбачається виведення з роботи першого ступеня на час циклу ОАПВ.

Потрошений струм нульової послідовності $3I_{0\text{неп}}$, що входить у вираз (10.2), може бути розрахований, наприклад, відповідно до рис.10.2, на якому наведені схеми заміщення й розрахункові вирази. При розрахунках зазначеного струму повинен ураховуватися максимальний кут розбіжності ЕРС, можливий у розглянутому режимі; допускається з метою спрощення приймати кут рівним 180° .



б)



в)

Рис.10.2. Визначення струму нульової послідовності в лінії при неповнофазних навантажувальних режимах: а - вихідна схема; б - схема заміщення при обриві двох фаз між точками М і N; в - схема заміщення при обриві однієї фази між точками М і N. Примітка. Еквівалентні ЕРС систем E_{cle} й E_{cIIe} визначаються за виразом

$$\dot{E}_{c.e} = \frac{\dot{E}_c x_{1n}}{x_{1c} + x_{1n}}.$$

Струм спрацьовування першого ступеня захисту, обраний виходячи з розглянутих вище умов, повинен перевірятися за умовою відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів (глава 12, п.12-1,А та додаток VI) у випадку, якщо в мережі, що захищається, можливе включення їх під напругу через розглянуту лінію.

10-2. Струм спрацьовування другого ступеня захисту (відсічка з витримкою часу) вибирається за умовами:

А) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю за попереднім автотрансформатором на стороні його суміжної напруги (примикаючої до мережі із глухозаземленою нейтраллю);

Б) узгодження з першим ступенем захисту попередньої лінії або захистом від замикань на землю попереднього автотрансформатора, встановленого на стороні суміжної напруги (останнє проводиться замість умови з п.10-2,Аув випадку, якщо це необхідно для підвищення чутливості захисту);

В) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає в циклі ОАПВ на лінії, що захищається або попередній лінії, а також у тривалому неповнофазному режимі на попередній лінії.

Відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі в циклі ОАПВ на лінії, що захищається або попередній лінії, за п.10-2,В не потрібно, якщо витримка часу розглянутого другого ступеня захисту перевищує час неповнофазного режиму в циклі ОАПВ; відбудовування від струму в неповнофазному режимі в циклі ОАПВ на лінії, що захищається, не потрібно також, якщо передбачається виведення з роботи розглянутого ступеня на час циклу ОАПВ.

З метою підвищення чутливості може виявитися доцільним узгоджувати другий ступінь не з першим (за п.10-2,Б), а із другим ступенем захисту попередньої лінії (рис.10.3, характеристика захисту 5).

Витримка часу другого ступеня захисту повинна бути узгоджена з витримками часу ступенів захистів попередніх елементів, з якими проводиться узгодження, - ліній (рис.10.3, характеристики захистів 1, 3, 5 і 7) або автотрансформаторів - з урахуванням витримки часу пристрою резервування при відмові вимикачів (ПРВВ).

У випадках, коли витримка часу другого ступеня захисту не перевищує 1 - 1,5 с, обраний за розглянутими вище умовами струм спрацьовування другого ступеня захисту перевіряється відповідно до

вказівок, наведених у п.10-8, за умовою відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при хитаннях або асинхронному ході. Слід зазначити, що зазначена умова може виявитися розрахунковою у досить рідких випадках.

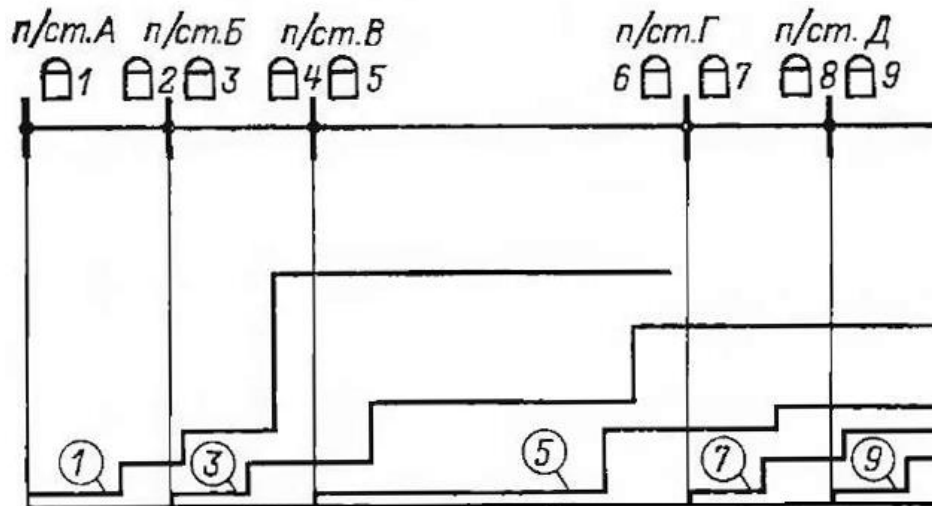


Рис.10.3. Приклад узгодження характеристик витримок часу струмових захистів.

10-3. *Струм спрацьовування третього ступеня* (відсічка з витримкою часу) вибирається за умовами:

А) узгодження із захистом попередньої лінії (із другим або третім його ступенем; останнє - у випадку, якщо при узгодженні із другим ступенем захисту попередньої лінії розглянутий третій ступінь не задовольняє вимогам чутливості) або захистом від замикань на землю попереднього автотрансформатора, встановленого на стороні суміжної напруги (з першим його ступенем, якщо другий ступінь розглянутого захисту відбудований від замикання на землю на шинах цієї напруги, або із другим його ступенем, якщо другий ступінь розглянутого захисту узгоджений з першим ступенем захисту автотрансформатора);

Б) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає в умовах, розглянутих у п.10-2,В.

Витримка часу третього ступеня захисту повинна бути узгоджена з витримками часу відповідних ступенів захистів попередніх елементів.

При цьому витримка часу ПРВВ ураховується, якщо ступінь захисту, попередня стосовно тієї, з якою проводиться узгодження, охоплює ділянку, що захищається, з коефіцієнтом чутливості менш 1,3. Допускається не враховувати витримку часу ПРВВ при наявності на попередній ділянці основного швидкодіючого захисту (наприклад, високочастотного).

Обраний за розглянутими вище умовами струм спрацьовування третього ступеня захисту перевіряється відповідно до вказівок, наведених у п.10-8 за умовою відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму:

при КЗ між трьома фазами за трансформаторами (автотрансформаторами) підстанцій даного й протилежного кінців лінії;

при хитаннях або асинхронному ході, якщо витримка часу розглянутого ступеня не перевищує 1,5 с, а також і при більших витримках часу - у випадках, коли період хитань перевищує витримку часу розглянутого ступеня (на міжсистемних транзитних зв'язках).

10-4. Струм спрацьовування другого ступеня захисту, що обирають за умовою відбудовування від замикання на землю за автотрансформатором протилежної підстанції відповідно до п.10-2,А, визначається за виразом

$$I_{0с.з}^{II} \geq k_{відб} 3I_{0з}, \quad (10.3)$$

де $3I_{0з}$ - максимальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю за автотрансформатором протилежної підстанції на стороні його, що примикає до мережі із глухозаземленою нейтраллю;

$k_{\text{відб}}$ - коефіцієнт відбудовування, прийнятий рівним: 1,3 - для лінії 330 - 500 кВ при використанні реле типу РТ-40; 1,2 - для всіх інших випадків.

Струм спрацьовування другого і третього ступенів захисту, що обирають за умовою узгодження із захистом попереднього елемента відповідно по пп.10-2,Б і 10-3,А, визначається за виразом

$$I_{0с.з} \geq k_{\text{відб}} 3I_{0\text{розр}}, \quad (10.4)$$

де $3I_{\text{розр}}$ - розрахунковий струм - максимальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки розглянутого захисту при замиканні на землю наприкінці зони ступенем, що захищається тим ступенем захисту попереднього елемента, з яким проводиться узгодження;

$k_{\text{відб}}$ — коефіцієнт відбудовування, що враховує похибку реле й необхідний запас, приймається рівним 1,1.

Для мереж радіальної конфігурації й кільцевих мереж з одиночними лініями без діагональних зв'язків (див.рис.ДП.1,а) розрахунковий струм $3I_{\text{розр}}$ може бути визначений аналітичним шляхом і вираз (10.4) матиме вид:

$$I_{0с.з} \geq k_{\text{відб}} k_{\text{стр}} I_{0с.з.\text{пін}}, \quad (10.5)$$

де $I_{0с.з.\text{пін}}$ - струм спрацьовування ступеня захисту попереднього елемента, з яким проводиться узгодження;

$k_{\text{стр}}$ - максимальний коефіцієнт струморозподілу (у схемі заміщення нульової послідовності) для лінії, що захищається, при замиканні на землю наприкінці зони що захищається тим ступенем захисту попереднього елемента, з яким проводиться узгодження, дорівнює відношенню струмів у місці установки розглянутого захисту й захисту, з яким проводиться узгодження.

Значення $k_{\text{стр}}$ для мереж радіальної конфігурації, а також для кільцевих мереж з одиночними лініями без діагональних з'єднань може

бути підраховане, виходячи зі схеми заміщення нульової послідовності мережі для замикання в будь-якій точці попередньої лінії (або для замикання на шинах), оскільки при переміщенні місця ушкодження по попередній лінії в розрахунковому режимі значення $k_{стр}$ залишається постійним.

При наявності на лініях ППК значення $k_{стр}$ повинне визначатися з урахуванням режиму роботи ППК.

У додатку II показано, що у кільцевих мережах з одиночними лініями без обхідних з'єднань розрахунковим режимом для визначення $k_{стр}$ являється режим каскадного відключення пошкодженої лінії (або одностороннє включення її від пристрою АПВ на неусунене пошкодження), оскільки при цьому $k_{стр}$ приймає найбільше значення, причому він не змінюється при переміщенні місця замикання по пошкодженій лінії.

Якщо при переміщенні місця замикання по пошкодженій лінії, із захистом якої проводиться узгодження, $k_{стр}$ змінює своє значення (наприклад, при наявності в ушкодженій лінії обхідного з'єднання в схемі заміщення нульової послідовності), застосування аналітичного способу не може бути рекомендоване через важкість визначення розрахункового значення $k_{стр}$; використання ж значення, отриманого аналітичним способом для випадку замикання на шинах, може привести до великого загрубіння захисту. Тому при зазначеній умові визначення розрахункового струму $3I_{розр}$, що входить у вираз (10.4), повинне проводитися графічним способом (рис.10.4).

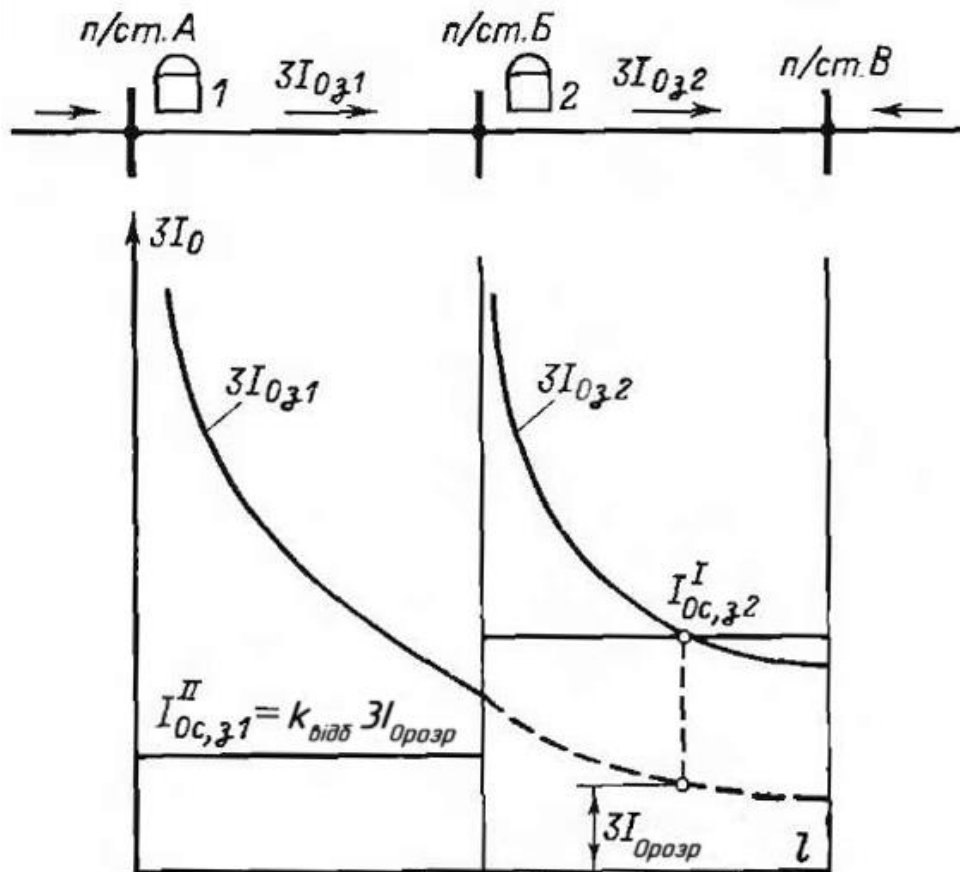


Рис.10.4. Визначення струму спрацьовування другого ступеня захисту графічним способом.

$I_{0с,з2}^I$ - струм спрацьовування першого ступеня захисту 2,

$I_{0с,з1}^{II}$ - струм спрацьовування другого ступеня захисту 1;

$3I_{0з1}$, $3I_{0з2}$ - потроєний струм нульової послідовності в місці установки захистів 1 і 2;

$3I_{0розр}$ - розрахунковий струм для визначення $I_{0с,з1}^{II}$;

$k_{відб}$ - коефіцієнт відбудовування.

Для вибору струму спрацьовування другого ступеня захисту, встановленого на одиночній лінії, при наявності паралельних ліній на попередній ділянці мережі (рис.10.5) розрахунковим може з'явитися режим роботи як обох паралельних ліній, так і однієї з них.

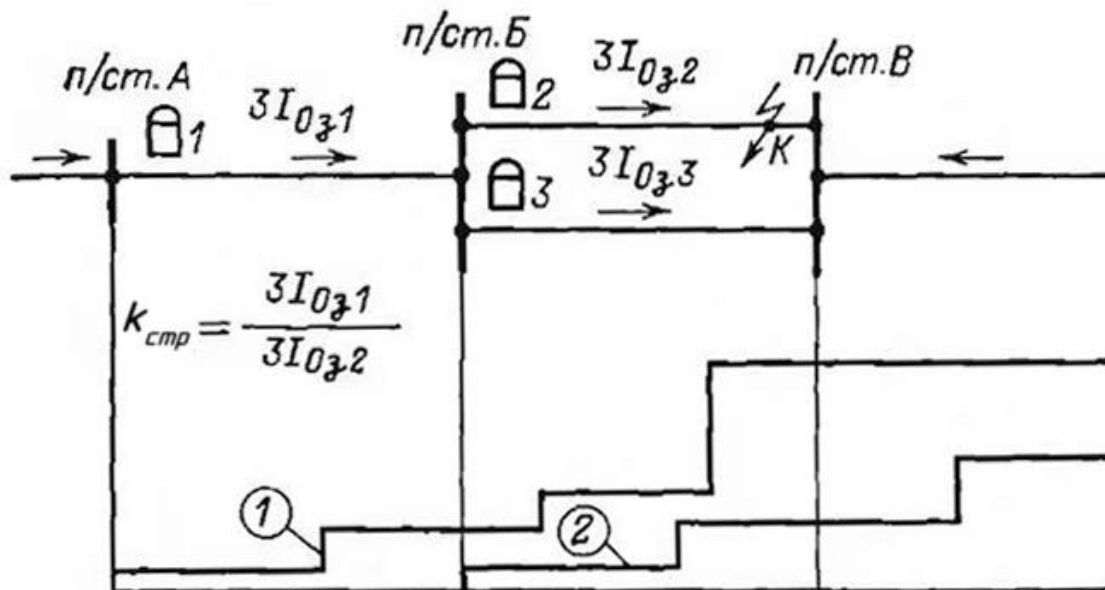


Рис.10.5. Визначення коефіцієнта струмозподілу $k_{стр}$ для вибору других ступенів захисту і характеристики витримок часу захистів.

Режим роботи однієї паралельної лінії є розрахунковим, якщо в режимі роботи двох паралельних ліній при замиканні наприкінці зони, що захищається першим ступенем захисту 2, струм нульової послідовності в неушкодженій паралельній лінії спрямований до шин *н/см.Б*; при напрямі зазначеного струму від шин *н/см.Б* у лінію розрахунковим є режим роботи обох паралельних ліній. В останньому випадку узгодження другого і третього ступенів з відповідними ступенями захистів попередньої ділянки проводиться так само, як для захистів паралельних ліній (глава 11, 11-5). При наявності на попередній ділянці струмового поперечного спрямованого захисту нульової послідовності (глава 11, 11-9) на додаток до розглянутого в главі 11, 11-5 повинне проводитися узгодження з першим ступенем захисту попередньої лінії при відключенні другої (паралельної) лінії попередньої ділянки.

Струм спрацьовування другого і третього ступенів захисту, що обирають відповідно за пп.10-2,В та 10-3,Б за умовою відбудовування від неповнофазного режиму, що виникає в умовах, розглянутих у п.10-2,В, визначається за (10.2), у якому $3I_{неп}$ - максимальне значення потрошеного

струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає в циклі ОАПВ на лінії, що захищається або попередній лінії, а також у тривалому неповнофазному режимі на попередній лінії;

$k_{\text{відб}}$ - те ж, що у виразі (10.3).

Струм спрацьовування другого і третього ступенів захисту перевіряється за умовою відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму відповідно до вказівок п.10-2 і п.10-3 за виразами (10.7) і (10.8), у яких $I_{\text{нб.у}}$ й $I_{\text{розр}}$ – відповідно струм небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму й розрахунковий струм при хитаннях або асинхронному ході або при зовнішньому КЗ за трансформатором (автотрансформатором).

10-5. Струм спрацьовування ступеня захисту, що має прискорення при включенні вимикача, додатково до зазначеного в пп.10-2 і 10-3 повинен бути відбудований від:

А) потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача по п.10-1,Б; дана умова не розглядається, якщо ступінь захисту, що прискорюється, відбудований за часом від зазначеного неповнофазного режиму (див.п.10-1);

Б) струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при несинхронному включенні, якщо воно можливо на лінії, що захищається.

Струм спрацьовування розглянутого ступеня захисту, що обирають за умовою з п.10-5,А, визначається за виразом (10.2), а захисту, що обирають за умовою з п.10-5,Б - за виразами (10.7) і (10.8), у яких $I_{\text{нб.у}}$ - струм небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при

несинхронному ввімкненню; $I_{розр}$ - розрахунковий струм несинхронного ввімкнення.

Умови з пп.10-5,А і 10-5,Б не повинні враховуватися для захисту, установленого на кінці, що вмикається першим, якщо розбіжність часу ввімкнення вимикачів обох кінців більше часу, на який уводиться захист по ланцюгу прискорення, і для захисту, установленого на кінці, що вмикається другим, якщо ланцюг прискорення на цьому кінці не введений в роботу (наприклад, коли він виконаний з контролем відсутності напруги на лінії).

При виборі струму спрацьовування ступеня захисту, що прискорюється, додатково до зазначених вище умов слід також розглядати умову відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів (глава 12, п.12-1,А й додаток VI), якщо в мережі, що захищається, можливе ввімкнення їх під напругу через розглянуту лінію. Зазначена умова для ліній 110 - 220 кВ розглядається у випадку, коли час дії захисту по ланцюгу прискорення неможливо виконати більшим максимального часу різночасності включення фаз вимикача.

Перераховані умови повинні також враховуватися при виборі струму спрацьовування ступеня захисту, що прискорюється за допомогою передачі дозволяючого сигналу по високочастотному каналу.

10-6. При обчисленні струму КЗ, що входить у вирази (10.1) і (10.3), у якості розрахункового приймається замикання на землю однієї або двох фаз залежно від того, при якому виді КЗ струм нульової послідовності в місці ушкодження (а виходить, і в місці установки захисту) має більше значення.

Відношення струмів нульової послідовності в місці ушкодження при замиканні на землю двох ($I_0^{(1,1)}$) і однієї ($I_0^{(1)}$) фази рівне:

$$\frac{I_0^{(1,1)}}{I_0^{(1)}} = \frac{2 + \frac{z_{0\Sigma}}{z_{1\Sigma}}}{1 + \frac{2z_{0\Sigma}}{z_{1\Sigma}}}, \quad (10.6)$$

де $z_{0\Sigma}$ і $z_{1\Sigma}$ – результуючі опори схем заміщення нульової і прямої (зворотної) послідовностей.

При $z_{0\Sigma} < z_{1\Sigma} I_0^{(1,1)} > I_0^{(1)}$, тобто розрахунковим є замикання на землю двох фаз.

При визначенні струму спрацьовування захисту за виразом (10.4) розрахунки в загальному випадку повинні проводитися також при замиканні на землю однієї або двох фаз залежно від того, при якому виді ушкодження розрахунковий струм у місці установки захисту більше, оскільки в мережі складної конфігурації коефіцієнт струморозподілу, а отже, розрахунковий струм залежать від довжини зони, що захищається, тобто від виду ушкодження.

10-7. Розрахунковий струм КЗ, що входить у вирази (10.1) і (10.3). а також коефіцієнт струморозподілу, що входить у вираз (10.5), повинні визначатися в можливих режимах, у яких вони мають максимальні значення.

При виборі розрахункового режиму слід урахувати, що при зовнішньому замиканні на землю струм нульової послідовності в місці установки захисту збільшується:

А) із збільшенням струму нульової послідовності в місці замикання на землю внаслідок зменшення еквівалентного опору схеми заміщення прямої (зворотної) послідовності (максимальний режим роботи);

Б) із збільшенням коефіцієнту струморозподілу в місці установки розглянутого захисту в схемі заміщення нульової послідовності.

Коефіцієнт струморозподілу в місці установки розглянутого захисту збільшується при зменшенні відношення опору нульової послідовності системи з боку, де встановлений розглянутий захист, до опору нульової послідовності системи із протилежної сторони.

При виборі розрахункового режиму не слід урахувати малоїмовірної комбінації умов.

10-8. Струм спрацьовування четвертого ступеня повинен бути відбудований від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при зовнішніх замиканнях між фазами (додаток VIII), якщо розглянутий ступінь захисту нульової послідовності має витримку часу, рівну або меншу, ніж захист від замикань між фазами на пошкоджені елементі. Як правило, зазначене відповідає умові відбудовування від струмів небалансу при КЗ між трьома фазами за трансформаторами й на стороні низької напруги автотрансформаторів підстанцій даного й протилежного кінців лінії.

Струм спрацьовування захисту, що обирають за розглянутою умовою, визначається за виразом

$$I_{0с.з} = k_{відб} k_{пер} I_{0нб.у}, \quad (10.7)$$

де $I_{0нб.у}$ - струм небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму в усталеному режимі при розглянутих зовнішніх КЗ між трьома фазами;

$k_{відб}$ - коефіцієнт відбудовування, що враховує похибку реле, помилки розрахунків і необхідний запас, приймається рівним 1,25;

$k_{пер}$ - коефіцієнт, що враховує збільшення струму небалансу в перехідному режимі, приймається рівним:

2 - при витримці часу розглянутого ступеня до 0,1 с;

1,5 - при витримці часу до 0,3 с;

1 - при витримці часу вище 0,5 - 0,6 с.

Струм небалансу $I_{0нб.у}$ у виразі (10.7) відповідно до додатку VIII, п.7 може бути приблизно визначений за виразом

$$I_{0нб.у} = k_{нб} I_{розр}, \quad (10.8)$$

де $I_{розр}$ - максимальне значення фазного струму, що проходить у місці установки розглянутого захисту при зовнішньому КЗ між трьома фазами;
 $k_{нб}$ - коефіцієнт небалансу.

Коефіцієнт небалансу приймається залежно від кратності $I_{розр}$:

- а) при невеликих кратностях, до $(2 - 3)I_{ном}$, $k_{нб} = 0,05$;
- б) при більших кратностях, але не перевищуючих $(0,7 - 0,8)I_{н10}$ ($I_{н10}$ - гранична кратність первинного струму трансформаторів струму при 10%-ний похибці), $k_{нб} = 0,05 - 0,1$;
- в) при кратностях, більших $(0,7 - 0,8)I_{н10}$, розрахунки проводяться за виразом (ДVIII.1) додатка VIII; при цьому з метою спрощення може бути прийнято $I_{0нб1} = 0$.

Якщо при виборі струму спрацьовування за виразом (10.7) з урахуванням виразу (10.8) даний ступінь захисту не задовольняє вимозі чутливості, слід уточнити значення струму небалансу $I_{нб.у}$ відповідно до рекомендацій додатка VIII, п.4 або 5.

Струм спрацьовування розглянутого ступеня захисту перевіряється за умовою відбудовування від сумарного струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму, що протікає в максимальному навантажувальному режимі, за виразом

$$I_{0с.з} = \frac{k_{відб}}{k_n} (I_{0нб} + 3I_{0н.р}), \quad (10.9)$$

де $I_{0нб}$ - первинний струм небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму в розглянутому режимі, визначається за (10.8), у якому $I_{розр}$ - розрахунковий струм навантажувального режиму;

$3I_{0н.р}$ - потроєний струм нульової послідовності, обумовлений несиметрією в системі, що виникає наприклад, при роботі суміжної лінії з одностороннім живленням у неповнофазному режимі;

$k_{відб}$ - те ж, що у виразі (10.7);

k_{π} - коефіцієнт повернення реле.

Якщо в захисті для розглянутого ступеня використовується «дозволяюче» реле напряму потужності (див.п.10-10), що виконується на схемі порівняння абсолютних значень або фаз і відбудоване від напруги небалансу нульової послідовності в реле при хитаннях, асинхронному ході, несинхронному ввімкненні, КЗ між трьома фазами за трансформаторами (автотрансформаторами) підстанцій даного й протилежного кінців лінії в навантажувальному режимі, відбудовування струму спрацьовування розглянутого ступеню за відповідною умовою (див.пп.10-2, 10-3, 10-5 та 10-8) за виразами (10.7) - (10.9) може не проводитися.

Напруга спрацьовування такого реле напряму потужності відбудовується від сумарної напруги небалансу в нормальному навантажувальному режимі за виразом

$$U_{0c.з} = \frac{k_{відб}}{k_{\pi}} (U_{0нб} + 3U_{0н.р}), \quad (10.10)$$

де $U_{0нб}$ - первинна напруга небалансу на реле в розглянутому режимі;

$3U_{0н.р}$ - потроєна напруга нульової послідовності, обумовлена несиметрією в системі, що виникає, наприклад, при роботі суміжної лінії з одностороннім живленням у неповнофазному режимі;

$k_{відб}$ - те ж, що у виразі (10.7);

k_{π} - коефіцієнт повернення реле.

У випадку, коли при виборі струму спрацьовування четвертого ступеня зазначеним образом він не задовольняє вимозі чутливості (не забезпечує далекого резервування), доцільно вибирати його струм спрацьовування, виходячи із забезпечення необхідної чутливості за умови відбудовування від струму небалансу в максимальному навантажувальному режимі [вираз (10.9)]. При цьому струм спрацьовування може бути прийнятий $(0,05 - 0,1)I_{ном}$, але, як правило, не менший 60 А (зменшення останнього до 40 А допускається в окремих

випадках, наприклад, на довгих лініях з малим коефіцієнтом трансформації трансформаторів струму захисту), а витримка часу захисту додатково погоджена із захистами, що діють при ушкодженнях за трансформаторами (автотрансформаторами) підстанції даного й протилежного кінців лінії.

При наявності на лініях захисту від неповнофазного режиму, тобто, як правило, на лініях 330 кВ і вище, розглянутий ступінь повинен бути відбудований також від неповнофазного режиму суміжної лінії, що працює вхолосту, якщо реле струму ПРВВ суміжної лінії відбудоване від зазначеного режиму. При відсутності захистів від неповнофазного режиму (як правило, на лініях 220 кВ) таке відбудовування не має змісту, оскільки пуск ПРВВ при неповнофазному режимі можливий від захистів, що спрацьовують під дією струмів, викликаних навантаженням.

В умовах експлуатації рекомендується також проводити узгодження за чутливістю останніх ступенів суміжних ділянок при замиканні на землю на ділянці, із захистом якої проводиться узгодження. Узгодження можна не робити, якщо при ньому не задовольняється вимога чутливості.

Витримка часу четвертого ступеня захисту визначається по можливості за східчастим принципом. Для забезпечення селективної дії в складних мережах струм спрацьовування четвертого ступеня окремих захистів може додатково узгоджуватися із третіми ступенями захистів попередніх ліній за аналогією з п.10-3,А за виразом (10.4). При цьому витримка часу четвертого ступеня розглянутого захисту узгоджується з витримками часу третіх ступенів захистів попередніх ліній.

10-9. При використанні триступінчастих захистів параметри спрацьовування другого ступеня вибираються відповідно до рекомендацій 10-2, а третього ступеня - з рекомендаціями 10-8.

10-10. Спрямованість ступенів захисту може здійснюватися в загальному випадку за допомогою реле напрямку потужності, що спрацьовує при напрямі потужності КЗ у лінію й замикаючого при цьому ланцюг захисту (реле з дозволяючим сигналом, або «дозволяюче» реле), або за допомогою реле напрямку потужності, що спрацьовує при напрямі потужності КЗ до шин і розмикаючого при цьому ланцюг захисту (реле із блокувальним сигналом, або «блокувальне реле»).

Питання про виконання ступенів захистів спрямованими або неспрямованими, а також про тип застосовуваного реле напрямку потужності слід вирішувати з урахуванням забезпечення вимог чутливості, надійності спрацьовування й селективності захисту.

Для підвищення надійності спрацьовування східчастого захисту доцільно, щоб хоча б один з його захистів, що охоплює з достатнім запасом лінію, що захищається, був виконаний неспрямованим або спрямованим з використанням реле напрямку потужності із блокувальним сигналом. Останнє також доцільно використовувати й для забезпечення чутливості захисту у випадках, коли при використанні реле напрямку потужності з дозволяючим сигналом його чутливість виявляється недостатньою (наприклад, для останнього ступеня при замиканні на землю в зоні резервування).

У першу чергу за умовою селективності слід розглядати можливість виконання окремих ступенів неспрямованими. Узгодження за чутливістю й за часом проводиться для групи захистів, установлених з однієї зі сторін кожної з ліній, для яких при зовнішніх (одночасно для всіх розглянутих ліній) замиканнях на землю потужність КЗ спрямована однаково (так, наприклад, на рис.10.3 повинні бути погоджені між собою захисти 9, 7, 5, 3 і 1, а також захисти 2, 4, 6 і 8).

Відповідно до зазначеного кожен із захистів на кінцях ліній, де при зовнішньому замиканні потужність може бути спрямована до шин, для

запобігання неселективної дії повинен бути виконаний спрямованим, якщо він може спрацювати раніше, ніж захист на протилежному кінці тієї ж лінії, де при розглянутому зовнішньому замиканні потужність спрямована від шин.

Окремі ступені захисту можуть бути виконані неспрямованими в наступних випадках:

а) перший ступінь - якщо вона не діє при замиканнях на землю на шинах підстанції, де встановлений розглянутий захист;

б) другий і третій ступені - якщо вони не діють при замиканні на землю в кінці зон, що захищаються, тих ступенів захистів усіх інших ліній, підключених до шин підстанції, де встановлений розглянутий захист, з якими вони погоджені за часом:

в) останній ступінь - якщо витримка часу її більше витримок часу останніх ступенів захистів усіх інших ліній, підключених до шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист;

г) можливість виконання окремих ступенів неспрямованими може бути виявлена також на підставі порівняння витримок часу й струмів спрацьовування захистів, установлених на протилежних кінцях розглянутої лінії, а саме для першого, другого і третього ступенів:

якщо ступені захистів мають рівні витримки часу, то неспрямованим може виконуватися ступінь захисту, струм спрацьовування якого більше, однак в окремих випадках допускається виконувати захисти спрямованими на обох кінцях розглянутої лінії (щоб уникнути відключення двох вимикачів замість одного);

якщо ступені захистів мають неоднакові витримки часу, причому ступінь захисту з більшою витримкою часу має струм спрацьовування, рівний (або більший) струму спрацьовування відповідного ступеня захисту з меншою витримкою часу, то неспрямованим може виконуватися ступінь захисту з більшою витримкою часу;

останній ступінь виконується неспрямованим, якщо витримка часу його більше або дорівнює витримці часу четвертого ступеня захисту, встановленого на протилежному кінці лінії, що захищається.

Можна відмовитися від установки реле напрямку потужності за рахунок деякого збільшення струму спрацьовування захисту, якщо чутливість захисту залишається при цьому в межах припустимої.

10-11. Для ступеня захисту, спрямованість якого здійснюється з використанням реле напрямку потужності із блокувальним сигналом, повинна перевірятися умова забезпечення правильної дії реле напрямку потужності при замиканні на землю в напрямку, протилежному тому, що захищається (узгодження за чутливістю реле струму й реле напрямку потужності), відповідно до розглянутого в додатку VII. Зазначена умова може бути перевірене за виразами (ДVII.9) - (ДVII.13) для випадку замикання на землю в точці, розрахунковій для перевірки чутливості відповідного ступеню захисту, встановленого на протилежному кінці лінії, що захищається. Як показано в додатку VII, зазначена умова для ліній, не зв'язаних взаємоіндукцією, у більшості випадків не є розрахунковою.

10-12. При зближенні трас двох електрично не з'єднаних ліній захист нульової послідовності кожної з цих ліній повинен бути перевірений за умовою відбудовування від струму, що проходить у місці установки захисту однієї з ліній і обумовленого взаємоіндукцією між лініями, при зовнішньому замиканні на землю (за аналогією із вказівками, наведеними в главі 11).

Якщо відбудовування захисту від зазначеного режиму шляхом збільшення струму спрацьовування неприпустимо знижує її чутливість, запобігання зайвого спрацьовування захисту може бути досягнуте за допомогою блокувального органу напруги або струму зворотної послідовності.

10-13. Для полегшення узгодження характеристик захистів і підвищення їх чутливості слід по можливості стабілізувати режим заземлення нейтралей трансформаторів (кількість і розміщення глухозаземлених нейтралей у різних режимах роботи системи).

Глава одинадцята

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЛІНІЙ 110 - 500 КВ ІЗ ДВОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ БЕЗ ВІДГАЛУЖЕНЬ

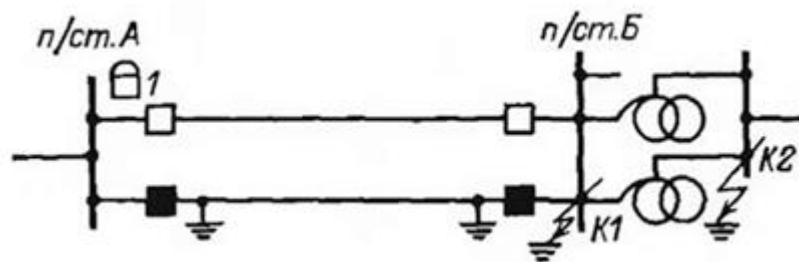
11-1. У даній главі приводяться розрахункові умови, які повинні розглядатися при виборі струмів спрацьовування перших трьох ступенів захисту, що враховують наявність взаємоіндукції між лініями, а також конфігурацію мережі (наявність паралельних ліній). Інші розрахункові умови, а також вибір витримок часу всіх ступенів і струму спрацьовування четвертого ступеня аналогічні розглянутим у главі 10.

Вказівки, що приводяться нижче, дані для випадку двох паралельних ліній, зв'язаних взаємоіндукцією. Загальні вказівки для випадку, коли є більш двох паралельних ліній, а також для випадку, коли лінії, зв'язані взаємоіндукцією, на одному або обох кінцях не мають спільної точки, наведені в п.11-13.

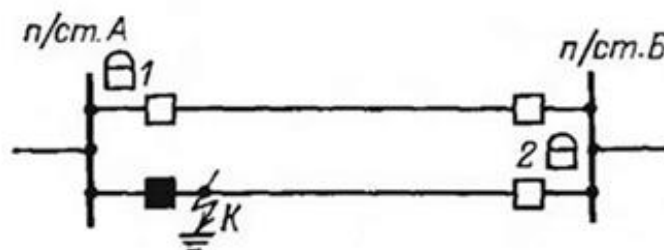
Методика складання схем заміщення нульової послідовності для розрахунків струмів КЗ з урахуванням взаємоіндукції між лініями розглянута в додатку III.

11-2. *Струм спрацьовування першого ступеня захисту* паралельних ліній при виконанні її без витримки часу вибирається за умовою відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в наступних випадках:

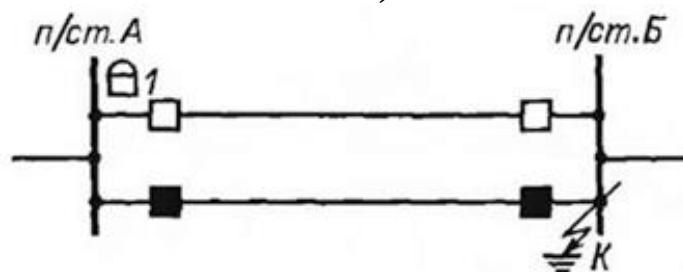
А) при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції, якщо друга паралельна лінія відключена й заземлена на обох кінцях (у точці *KI* рис.11.1,а) і взаємоіндукцією між лініями знехтувати не можна;



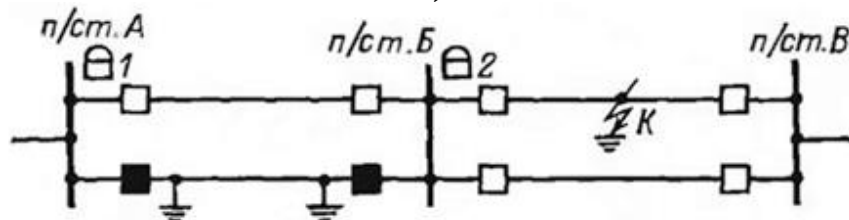
а)



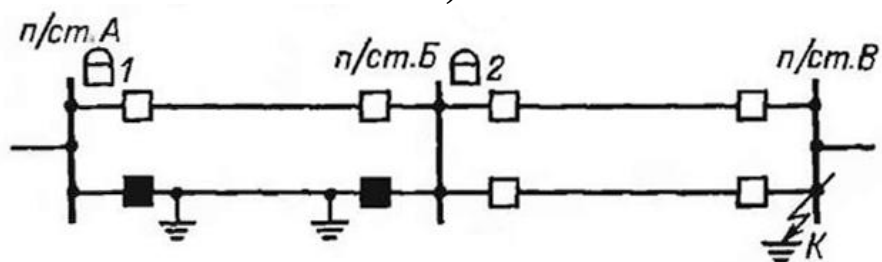
б)



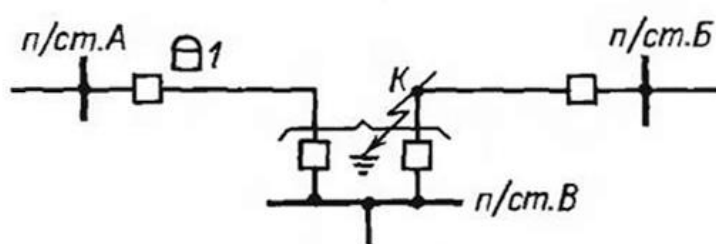
в)



г)



д)



д)

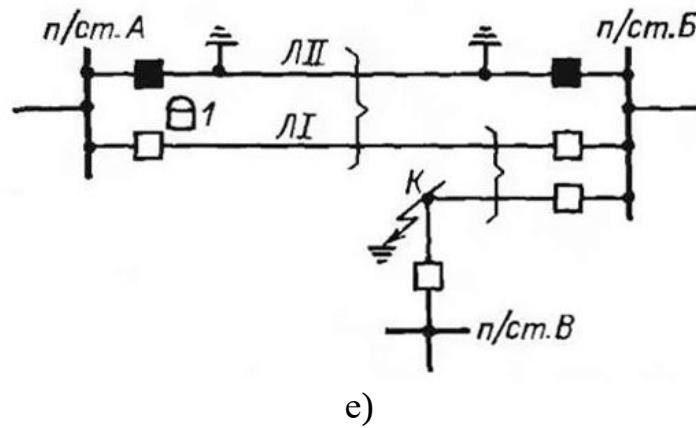
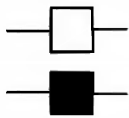


Рис.11.1. Розрахункові режими для вибору струмів спрацьовування захисту паралельних ліній із двостороннім живленням.



- вимикач включений,
- вимикач відключений.

Б) при каскадному відключенні замикання на землю однієї фази на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист (рис.11.1,б);

В) при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції у випадку, коли друга паралельна лінія відключена (рис.11.1,в), якщо взаємоіндукцією між лініями можна знехтувати внаслідок її малого значення.

11-3. Струм спрацьовування першого ступеня захисту, що обирають за умовами пп.11-2,А, В та Б, визначається за виразом (10.1), у якому I_{03} - максимальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту, відповідно:

при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції у випадку, коли друга паралельна лінія відключена й заземлена на обох кінцях;

те ж, але коли друга паралельна лінія відключена;

при каскадному відключенні замикання на землю однієї фази на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист.

У додатку IV для вихідних схем рис.ДІV.1,*a* й рис.ДІV.2,*a* побудовані криві залежності від довжини лінії відношення струму в захисті при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції в режимі, коли друга паралельна лінія відключена й заземлена на обох кінцях, до струму в захисті при каскадному відключенні замикання на землю однієї фази на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист. Криві дані для паралельних ліній 110 - 220 і 500 кВ, зв'язаних взаємодукцією.

Як впливає з зазначених кривих, умова п.11-2,Б у порівнянні з умовою п.11-2,А не є розрахунковою:

для двох паралельних ліній 500 кВ при відстані між ними 100 м - практично у всіх можливих випадках;

для двох паралельних ліній 500 кВ при відстані між ними 50 м, якщо опір прямої послідовності системи з боку підстанції, на якій установлений розглянутий захист, менший або рівний 10 Ом;

для двох паралельних ліній 110 - 220 кВ, а також ліній 500 кВ при відстані між ними 50 м, якщо відношення опору нульової послідовності системи з боку протилежної підстанції до її опору прямої послідовності більший або рівний 1.

11-4. *Струм спрацьовування другого ступеня захисту паралельних ліній вибирається за умовами:*

А) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю за попереднім автотрансформатором на стороні його суміжної напруги (пов'язаною з мережею із глухозаземленою нейтраллю) - у точці К2 рис.11.1,*a*;

Б) узгодження з першим ступенем захисту попередньої лінії (рис.11.1,з) або захисту від замикань на землю попереднього автотрансформатора, установленим на стороні суміжної напруги (проводиться замість умови з п.11-4,А в випадку, якщо це необхідно для підвищення чутливості захисту);

В) узгодження з першим ступенем захисту, установленим на протилежному кінці паралельної лінії, в умовах по п.11-2,Б (рис.11.1,б):

Г) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю на шинах підстанції, що примикає до попередньої ділянки, яка складається із двох паралельних ліній (рис.11.1, г).

Відбудовування по пп.11-4,А та Г і узгодження по п.11-4,Б проводяться в режимі, коли друга паралельна лінія розглянутої ділянки відключена й заземлена на обох кінцях.

З метою підвищення чутливості може виявитися доцільним узгоджувати другий ступінь захисту за струмом спрацьовування й витримкою часу не з першим, як зазначено в п.11-4,Б, а із другим ступенем захисту попередньої лінії, а також використовувати на протилежному кінці розглянутих паралельних ліній струмовий поперечний спрямований захист нульової послідовності (прискорення третього ступеня захисту з контролем напрямку потужності в паралельній лінії) - п.11-9, оскільки при цьому узгодження за п.11-4,В повинне проводитися з реле струму поперечного захисту й, як правило, виявляється нерозрахованим.

11-5. Узгодження за чутливістю захистів суміжних ділянок відповідно до п.11-4,Б для ланцюгу паралельних ліній слід виконувати при роботі обох паралельних ліній на попередній ділянці - рис.11.1,з, оскільки режим одночасного відключення на двох суміжних ділянках мережі по одній з паралельних ліній не враховується через малу його

ймовірність. Розглянуте узгодження доцільно виконувати за виразом (10.4) графічним способом, тому що коефіцієнт струморозподілу для лінії $n/см.А - n/см.Б$ звичайно суттєво міняється при переміщенні точки замикання уздовж лінії $n/см.Б - n/см.В$. При цьому умова з п.11-4,Г не є розрахунковою і може не розглядатися.

У тих випадках, коли зони, що захищаються першими ступенями захистів попередньої ділянки, перекриваються (коефіцієнт чутливості в точці однакової чутливості не менш 1,3), узгодження за чутливістю другого ступеня захисту з першим ступенем захисту попередньої ділянки за п.11-4,Б допускається робити в режимі каскадного відключення замикання на землю на попередній ділянці за виразом (10.5) з урахуванням коефіцієнта повернення захисту. При цьому повинна розглядатися також умова п.11-4,Г.

При використанні на попередній ділянці, що складається із двох паралельних ліній, струмового поперечного спрямованого захисту нульової послідовності (п.11-9) умова узгодження із захистом цієї ділянки (п.11-4,Б) відпадає, а замість цієї умови розглядається умова п.11-4,Г.

Узгодження із захистом попереднього автотрансформатора проводиться за виразом (10.5), при цьому коефіцієнт струморозподілу $k_{стр}$ визначається для випадку замикання на землю на шинах суміжної напруги (у точці $K2$ рис.11.1,а).

При наявності спеціального захисту шин підстанції, що примикає до попередньої ділянки, допускається, якщо це необхідно для підвищення чутливості другого ступеня захисту, відбудовування за п.11-4,Г робити при роботі обох паралельних ліній на даній ділянці.

Струм спрацьовування другого ступеня захисту, що обирають за умовою п.11-4,Г, визначається за виразом (10.3), у якому $3I_{0з}$ - максимальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту

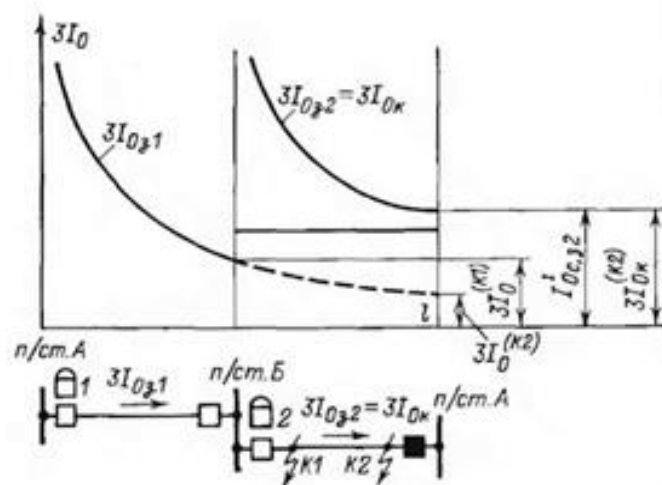
при замиканні на землю на шинах підстанції, що примикає до попередньої ділянки, яка складається із двох паралельних ліній, у випадку, коли друга паралельна лінія розглянутої ділянки відключена й заземлена на обох кінцях;

$k_{\text{відб}}$ - коефіцієнт відбудовування, що враховує похибку реле, помилки розрахунків і необхідний запас, приймається як у виразі (10.3).

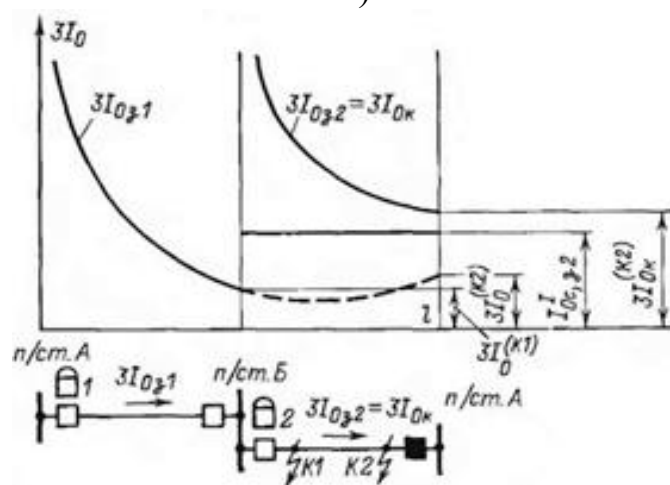
11-6. При виборі струму спрацьовування другого ступеня захисту за умовою п.11-4,В слід урахувати, що при каскадному відключенні замикання на одній з паралельних ліній у випадку наявності між ними взаємоіндукції струм у неушкодженій лінії може як зменшуватися, так і збільшуватися (при значній взаємоіндукції) у міру наближення місця замикання на землю до відключеного кінця лінії. Відповідно до зазначеного вибір струму спрацьовування другого ступеня захисту за умовою п.11-4,В проводиться залежно від характеру зміни кривих струму в розглянутій (неушкодженій) лінії при каскадному відключенні замикань на землю на паралельній лінії (рис.11.2) одним з наступних способів:

А) якщо в режимі каскадного відключення замикання на землю перший ступінь захисту 2 ушкодженої лінії охоплює всю лінію (рис.11.2,а, рис.11.2,б), струм спрацьовування другого ступеня захисту 1 паралельної лінії вибирається за виразом (10.5), у якому $I_{0\text{с.з.поп}}$ - струм спрацьовування першого ступеня захисту 2, установленого на протилежному кінці паралельної лінії;

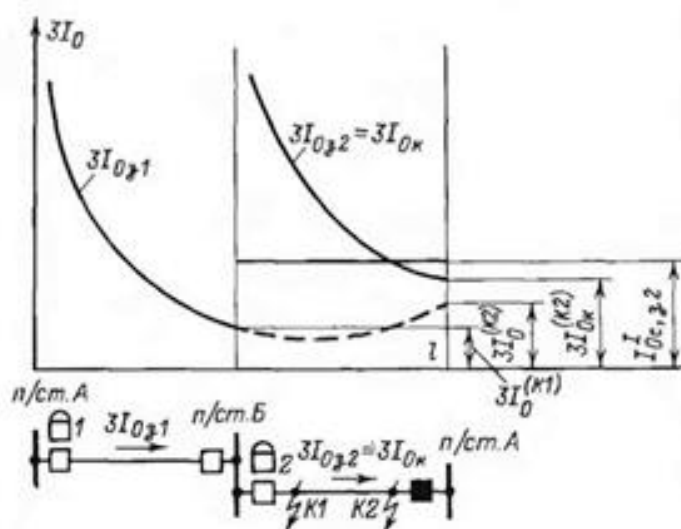
$k_{\text{стр}}$ - коефіцієнт струморозподілу при каскадному відключенні замикання на землю на паралельній лінії поблизу підстанції, на якій установлений розглянутий захист 1.



a)



б)



в)

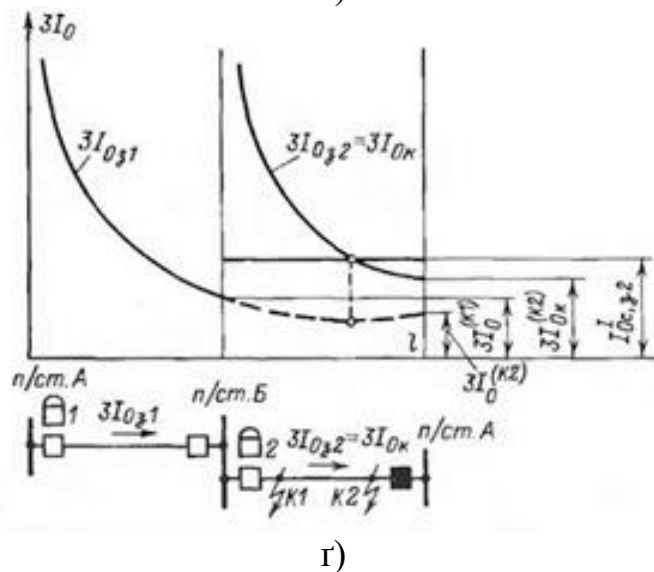
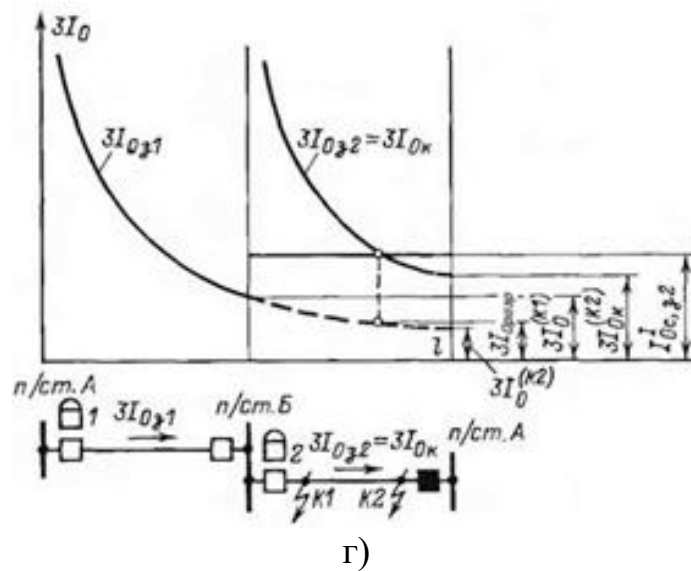


Рис.11.2.Струми нульової послідовності в паралельних лініях при каскадному відключенні замикання на землю на одній з них (за рис.11.1,б).

Примітка. Штриховою лінією показаний струм у неушкодженій паралельній лінії.

Узгодження за виразом (10.5) проводиться для випадку замикання через перехідний опір.

Б) у випадку, коли в режимі каскадного відключення замикання на землю перший ступінь захисту 2 uszkodженої лінії охоплює тільки частину лінії, а струм у неушкодженій паралельній лінії при замиканні на землю на відключеному кінці пошкодженої лінії більший, ніж при замиканні на землю на невідключеному кінці її, тобто коли $3I_0^{(K2)} > 3I_0^{(K1)}$

(рис.11.2,в), струм спрацьовування другого ступеня розглянутого захисту 1 відбудовується від потроєного струму нульової послідовності в лінії, що захищається, при каскадному відключенні замикання на землю на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист 1 (у точці $K2$), за виразом (10.3), у якому

$3I_{0з}$ - максимальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при каскадному відключенні замикання на землю на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист 1;

$k_{відб}$ - приймається як у виразі (10.3).

В) у випадку, коли в режимі каскадного відключення замикання на землю перший ступінь захисту охоплює тільки частину лінії, а струм у неушкодженій паралельній лінії при замиканні на землю на відключеному кінці ушкодженої лінії менший, ніж при замиканні на землю на невідключеному кінці її, тобто коли $3I_0^{(K2)} < 3I_0^{(K1)}$ (рис.11.2,г,і), струм спрацьовування другого ступеня розглянутого захисту 1 визначається за виразом (10.4), у якому струм $3I_{0розр}$ знаходиться графічно (як це показано вертикальним пунктиром, для випадку за рис.11.2,г) або відбудовується за виразом (10.3) від потроєного струму нульової послідовності в лінії, що захищається, при каскадному відключенні замикання на землю на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист 1 (у точці $K2$) за аналогією з випадком з п.11-6,Б, якщо цей струм виявляється більшим струму при замиканні на землю наприкінці зони, що охоплюється першим ступенем захисту, установленим на протилежному кінці паралельної лінії, отриманого графічною побудовою (для випадку за рис.11.2,і). Таким чином, в обох цих випадках (за рис.11.2,г,і) струм спрацьовування другого ступеня розглянутого захисту 1 може бути визначений тільки в результаті

графічної побудови, тобто потрібна побудова кривих струму в розглянутій (неушкодженій) і ушкодженій лініях при каскадному відключенні замикання на землю на паралельній лінії; у трьох інших випадках (по рис.11.2,а - в) побудова таких кривих не потрібна.

11-7. *Струм спрацьовування третього ступеня захисту паралельних ліній вибирається за умовою узгодження:*

А) із другим або третім ступенем попередньої лінії (останнє - якщо при узгодженні із другим ступенем розглянутий третій ступінь захисту не задовольняє вимогам чутливості) або з першим або другим ступенем захисту від замикань на землю попереднього автотрансформатора, встановленого на стороні суміжної напруги (останнє - якщо другий ступінь розглянутого захисту узгоджений з першим ступенем захисту від замикань на землю автотрансформатора);

Б) із другим ступенем захисту, встановленим на протилежному кінці паралельної лінії, в умовах за п.11-2,Б.

Узгодження за п.11-7,А проводиться в режимі, коли друга паралельна лінія розглянутої ділянки відключена й заземлена на обох кінцях. При необхідності підвищення чутливості слід робити зазначене узгодження в режимі роботи обох паралельних ліній на розглянутій ділянці (наприклад, якщо можливо, виконати виведення третього ступеня при відключенні паралельної лінії або не враховувати в зазначеному режимі можливість виведення з роботи захисту шин або ПРВВ на підстанції, що примикає до попередньої ділянки).

11-8. Узгодження третього ступеня захисту із другим ступенем захисту попередньої лінії за п.11-7,А проводиться за аналогією із зазначеним у п.11-5; при цьому узгодження допускається робити в каскаді (з урахуванням коефіцієнта повернення), коли зони, що захищаються другим ступенем захисту, встановленим на близькому кінці, і першим ступенем захисту, встановленим на віддаленому кінці

попередньої ділянки, перекриваються з коефіцієнтом чутливості не менш 1,3. Узгодження третього ступеня захисту із третім ступенем захисту попередньої лінії або захистом попереднього автотрансформатора за п.11-7,А проводиться за виразом (10.5), при цьому $k_{\text{стр}}$ визначається при замиканні на землю на шинах попереднього елемента (у точці K на рис.11.1,д або $K2$ на рис.11.1,а).

Якщо при виборі струму спрацьовування третього ступеня за п.11-7,А не забезпечується необхідна чутливість, а на попередній ділянці, що складається із двох паралельних ліній, використовується струмовий поперечний спрямований захист нульової послідовності (див.п.11-9), слід розглянути можливість підвищення чутливості третього ступеня, виконуючи замість узгодження за п.11-7,А відбудовування за п.11-4,Г.

Струм спрацьовування третього ступеня захисту, який обирають за умовою п.11-7,Б, визначається за виразом (10.5), у якому $I_{0\text{с.з.поп}}$ - струм спрацьовування другого ступеня захисту, встановленого на протилежному кінці паралельної лінії.

11-9. Чутливість другого і третього ступенів захисту може бути підвищена шляхом використання струмового поперечного спрямованого захисту нульової послідовності. При цьому витримка часу другого ступеня захисту узгоджується із часом спрацьовування струмового поперечного спрямованого захисту (з урахуванням каскадного відключення паралельної лінії).

Необхідність у струмовому поперечному спрямованому захисті виникає, зокрема, якщо розрахунковим для вибору струму спрацьовування першого й другого ступенів захисту (захисту 1 на рис.11.2,в) є та сама умова, а саме відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при каскадному відключенні замикання на землю однієї фази на паралельній

лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист (п.11-2,Б; п.11-4,В; п.11-6,Б).

При використанні на ділянці, що захищається, струмового поперечного спрямованого захисту нульової послідовності (пп.11-4,11-5) умови вибору другого ступеня захисту за п.11-4,В та третього ступеня за п.11-7,Б відпадають, якщо не враховувати випадків, коли поперечний захист може бути виведений при роботі обох паралельних ліній.

Струм спрацьовування третього ступеня захисту при прискоренні її з контролем напрямку потужності в паралельній лінії (тобто при використанні її для виконання струмового поперечного спрямованого захисту нульової послідовності) на додаток до зазначеного в п.11-7 повинен бути також відбудований:

А) від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах підстанцій, що примикають до ділянки, що захищається, паралельних ліній, при хитаннях, асинхронному ході;

Б) від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача з пофазним приводом однієї з ліній.

Розрахунки за умовою п.11-9,А проводиться за виразом (10.7) з урахуванням виразу (10.8), у якому $I_{розр}$ - максимальне значення періодичної складової початкового фазного струму, що проходить по кожній з паралельних ліній у місці установки розглянутого захисту при КЗ між трьома фазами на шинах підстанцій, що примикають до ділянки, яка захищається, паралельних ліній, або при хитаннях.

Необхідність обліку умови п.11-9,А викликана можливістю спрацьовування в розглянутих випадках реле напрямку потужності обох захистів від струмів і напруг небалансу. Цей розрахунок може не

проводитися, якщо реле напряду потужності буде відбудовано за напругою спрацювання від напруги небалансу, що можливо при застосуванні дозволяючого реле напряду потужності, виконаного на схемі порівняння абсолютних значень або фаз.

Розрахунки за умовою п.11-9,Б проводяться за виразом (10.2). Умова п.11-9,Б не розглядається, якщо захист відбудований від зазначеного режиму за часом.

Струмовий поперечний спрямований захист нульової послідовності принципово може спрацювати на відключення неушкодженої паралельної лінії при каскадному відключенні замикання на землю між вимикачем і виносним трансформатором струму на іншій паралельній лінії на кінці, де встановлений розглянутий захист. Однак умова відбудовування захисту від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці її установки при зазначеному ушкодженні, не розглядається в припущенні, що вона виводиться з дії контактом реле положення вимикача паралельної лінії при його відключенні.

11-10. Ступінь захисту з найбільшою витримкою часу може виявитися доцільним ввімкнути на суму струмів паралельних ліній, якщо це потрібно за умовами чутливості до ушкоджень наприкінці зони резервування (глава 15, п.15-4); захист виконується з дією на відключення вимикачів обох ліній. При цьому інші ступені захисту (включені на струм однієї лінії) з урахуванням каскадної їхньої дії повинні надійно забезпечувати відключення замикання на землю в будь-якій точці лінії, що захищається.

При включенні ступеня захисту з найбільшою витримкою часу на суму струмів обох ліній:

А) витримка часу цьому ступеня окрім зазначеного в главі 10, п.10-8 повинна бути відбудована від часу каскадного відключення

ушкодження на своїй ділянці ступенями захисту, включеними на струм однієї лінії;

Б) при визначенні струму небалансу $I_{\text{нб.у}}$ за виразом (10.8) у якості $I_{\text{розр}}$ слід приймати сумарний струм ліній.

11-11. При виконанні ступеня захисту з використанням блокувального реле напрямку потужності повинна перевірятися умова забезпечення правильної дії останнього при замиканні на землю в напрямку, протилежному тому, що захищається (глава 10, п.10-11).

Як показано в пп. 11-4 і 11-5 додатку VII, зазначена умова для захисту паралельних ліній, зв'язаних взаємоіндукцією, у ряді режимів виявляється значно більш важкою, ніж для захисту одиночних ліній. Розрахунки повинні проводитися за аналогією з розрахунками, наведеним у главі 10, п.10-11. При замиканні на землю поза розглянутими паралельними лініями в якості розрахункового повинен прийматися режим, при якому друга паралельна лінія відключена й заземлена на обох кінцях (додаток VII, п.4). При замиканні на землю на розглянутих паралельних лініях розрахунковим для перевірки зазначеної умови є каскадне відключення замикання на землю на протилежному кінці паралельної лінії. Як показано в п.5 додатка VI, внаслідок впливу взаємоіндукції напруга нульової послідовності на кінці, найближчому до місця замикання на землю, може виявитися менше, ніж на віддаленому, у зв'язку із чим виконання розглянутої умови може виявитися складним. Якщо при цьому загрубіння захисту за струмом спрацьовування виявляється неможливим, допускається обмежитися виконанням вимоги достатньої чутливості реле напрямку потужності розглянутого захисту при каскадному відключенні замикання на землю на протилежному кінці паралельної лінії (глава 15, п.15-4).

В експлуатації можуть використовуватися різні способи підвищити чутливість реле напряму потужності або блокування захисту неущожденної лінії [23].

При застосуванні струмового поперечного спрямованого захисту нульової послідовності чутливість блокувального реле напряму потужності повинна забезпечуватися при каскадному відключенні замикання на землю на протилежному кінці паралельної лінії. А якщо ні, то захист не буде виконувати свого призначення - забезпечення селективного відключення КЗ на паралельних лініях.

В обох випадках мінімальний коефіцієнт чутливості для розглянутого реле напряму потужності повинен бути за потужністю 2 для індукційного реле й за струмом й напругою 1,5 для реле на схемі порівняння абсолютних значень або фаз.

11-12. У випадку каскадного відключення замикання на землю на одній із двох паралельних ліній, що працюють у блоці із трансформаторами (автотрансформаторами) і зв'язаних взаємоіндукцією, а також якщо така схема може утворюватися в процесі відключення КЗ, може мати місце зайве спрацьовування захисту неущожденної лінії внаслідок протікання нею струму нульової послідовності, викликаного взаємоіндукцією, і неправильної поведінки реле напряму потужності, ввімкненого на струм і напругу нульової послідовності (додаток V).

У тих випадках, коли відбудовування захисту від зазначеного режиму шляхом збільшення струму спрацьовування призводить до неприпустимого загрубіння, для виключення зайвого спрацьовування слід живити ланцюги напруги захистів ліній, що працюють у блоці з автотрансформаторами, від трансформатора напруги, встановленого на шинах середньої напруги автотрансформатора. У цих же випадках у схемі захистів ліній, що працюють у блоці із трансформаторами, слід використовувати блокувальне реле струму або напруги зворотної

послідовності або реле напряду потужності зі струмовою поляризацією (типу РМП-272), одна з обмоток якого включена на струм у нейтралі трансформатора, а друга - на суму струмів нейтралей двох трансформаторів.

11-13. При наявності більш двох паралельних ліній, зв'язаних взаємоіндукцією, а також у випадках, коли лінії, зв'язані взаємоіндукцією, на одному або обох кінцях не мають спільної точки, розрахункова точка й розрахункові умови для вибору струму спрацьовування захисту повинні визначатися виходячи із принципових вказівок, які дані для двох паралельних ліній. Наприклад, у схемі за рис.11.1,д додатково повинне розглядатися відбудовування першого ступеня захисту від замикання на землю в точці K ; у схемі за рис.11.1,е - відбудовування першого ступеня захисту лінії II від замикання на землю в точці K в режимі відключення й заземлення лінії III .

Глава дванадцята

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ ЛІНІЙ 110 - 500 КВ ІЗ ВІДГАЛУЖЕННЯМИ ПРИ НАЯВНОСТІ ЖИВЛЕННЯ ІЗ ДВОХ АБО БІЛЬШ СТОРІН

12-1. Струм спрацьовування першого ступеня захисту, який установлюють на лініях з відгалуженнями, додатково до зазначеного в главі 10, п.10-1 і главі 11, п.11-2 повинен бути відбудований від:

А) кидка намагнічуючого струму трансформаторів, приєднаних до відгалужень від лінії, що захищається, і мають глухозаземлені нейтралі, в умовах каскадного включення лінії, що захищається;

Б) потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача, що подає напругу на лінію, що захищається, і самозапуску двигунів навантаження, що живдяться від трансформаторів, приєднаних до відгалужень від лінії, що захищається, при роботі хоча б одного із цих трансформаторів із глухозаземленою нейтраллю.

Розрахунки за умовою п.12-1,А проводяться на підставі додатка VI.

Відбудування захисту за умовою п.12-1,Б виконується за виразом (10.2), у якому $3I_{0нп}$ - максимальне значення потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача, що подає напругу на лінію, що захищається, і самозапуску двигунів навантаження, що живляться від трансформаторів, приєднаних до відгалужень від лінії, що захищається.

Умови з п.12-1,А і п.12-1,Б розглядаються при розрахунках захистів ліній, обладнаних вимикачами з пофазним приводом, і не враховуються, якщо перший ступінь захисту відбудований за часом від неодночасного

включення фаз вимикача (наприклад, при дії на вихідне проміжне реле через реле часу).

Слід зазначити, що перший ступінь захисту при виборі її струму спрацьовування за розглянутими вище умовами може діяти при замиканнях на землю в трансформаторах, приєднаних до відгалужень від лінії, що захищається, однак зазначене припустимо в припущенні, що на лінії передбачений пристрій АПВ.

12-2. Струми спрацьовування другого і третього ступенів захисту, який встановлюють на лініях з відгалуженнями, вибираються так само, як і на лініях без відгалужень, відповідно за главою 10, пп.10-2, 10-4; главою 11, пп.11-4, 11-5, 11-6, 11-9 і главою 10, п.10-3, 10-4; главою 11, пп.11-7, 11-8, 11-9.

Струм спрацьовування третього ступеня додатково перевіряється за умовою відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при трифазному КЗ за трансформаторами, приєднаними до відгалужень від лінії, що захищається (за аналогією із главою 10, п.10-8).

Слід зазначити, що на лініях з відгалуженнями струмовий поперечний спрямований захист за певних умов може зайво спрацьовувати на відключення неушкодженої паралельної лінії. Зазначене може мати місце у випадках приєднання до однієї з паралельних ліній поблизу шин відгалуження з потужним трансформатором із заземленої нейтраллю й зовнішньому замиканні на землю або замиканні на землю на розглянутій лінії із протилежного кінця, оскільки в цих умовах струм від розглянутого відгалуження може бути спрямований до найближчих шин. Струмовий поперечний спрямований захист при цьому можна застосовувати тільки за умови відбудовування третього ступеня струмового спрямованого захисту другої паралельної

лінії на додаток до зазначеного в главі 11, п.11-7 від замикання на землю на шинах протилежної підстанції.

12-3. Струм спрацьовування ступеню захисту, що має прискорення при включенні вимикача, додатково до зазначеного в главі 10, п.10-5 повинен бути відбудований від умов, розглянутих у п.12-1, А-Б. При відбудовуванні від умов глави 10, п.10-5,А повинно бути враховано, що струм $3I_{\text{неп}}$ у виразі (10.2) повинен визначатися з урахуванням самозапуску двигунів навантаження, що живляться від трансформаторів, приєднаних до відгалужень від лінії, що захищається.

12-4. Струм спрацьовування четвертого ступеня захисту, який встановлюють на лініях з відгалуженнями із двостороннім живленням, додатково до зазначеного в главі 10, п.10-8 повинен бути відбудований також від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при трифазному КЗ за трансформаторами, приєднаними до відгалужень від лінії, що захищається, або розглянутий ступінь повинен бути узгоджений за витримкою часу із захистами, що діють при зазначеному ушкодженні.

12-5. При замиканні на землю на одній із двох паралельних ліній з відгалуженнями при наявності взаємоіндукції між лініями й відключенні ушкодженої лінії з одного або із двох кінців може мати місце зайве спрацьовування захисту неушкодженої лінії внаслідок неправильної дії реле напрямку потужності, включеного на струм і напругу нульової послідовності (додаток V). Для виключення зазначеного зайвого спрацьовування в схемі захисту можна використовувати реле напрямку потужності зі струмовою поляризацією (типу РМП-272), одна з обмоток якого включається на струм у нейтралі трансформатора, а друга обмотка - на суму струмів нейтралей двох трансформаторів, або блокувальне реле струму або напруги зворотної послідовності.

12-6. Якщо трансформатори на відгалуженні мають глухозаземлені нейтралі, вибір струмів спрацьовування першого, другого і третього ступенів захисту за умовами глави 10, пп.10-1, 10-2, 10-3 проводиться в реально можливому режимі відключення найбільшого числа трансформаторів на відгалуженнях, що мають глухозаземлені нейтралі, а за умовами п.12-1,А, Б - у режимі включення всіх трансформаторів із глухозаземленими нейтралями.

Чутливість захисту перевіряється для випадку включення реально можливого найбільшого числа трансформаторів на відгалуженнях, що мають глухозаземлені нейтралі.

12-7. Режим заземлення нейтралей трансформаторів, приєднаних до відгалужень від ліній 110 і 150 кВ, слід приймати за умовою забезпечення якомога більшої чутливості захисту нульової послідовності (наприклад, заземлювати нейтралі найменшого числа трансформаторів), однак при цьому необхідно враховувати також і вимоги захисту трансформаторів від перенапруг. При відсутності живлення й роздільній роботі на сторонах середньої й низької напруг цих трансформаторів їх нейтралі доцільно не заземлювати, якщо це припустимо за умовами захисту від перенапруг.

При наявності живлення або паралельній роботі на сторонах середньої або низької напруги трансформаторів за умовами захисту від перенапруг, як правило, припустимо заземлювати на кожній лінії нейтраль тільки одного трансформатора.

12-8. При виявленні ступенів захистів, які повинні виконуватися спрямованими, слід користуватися рекомендаціями глави 10, п.10-10, за винятком п.10-10,Г.

Глава тринадцята
ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ
ОДИНОЧНИХ ЛІНІЙ У РАДІАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ 110 - 220 КВ ІЗ
ОДНОСТОРОННІМ ЖИВЛЕННЯМ (З ВІДГАЛУЖЕННЯМИ Й БЕЗ
ВІДГАЛУЖЕНЬ)

13-1. *На тупикових лініях* у випадках, коли тривалий режим роботи двома фазами не передбачається, захист може виконуватися одно- або двоступінчастим. Однак, враховуючи наявність типових панелей, захист доцільно виконувати двоступінчастим зі спрямованим другим ступенем, що дасть можливість підвищити чутливість захисту й зменшити час відключення.

13-2. Струм спрацьовування одноступінчастого захисту й першого ступеня двоступінчастого захисту тупикових ліній при виконанні розглянутих ступенів без витримки часу вибирається за умовами відбудовування від:

А) кидка намагнічуючого струму трансформаторів, що мають глухозаземлені нейтралі, що й включаються під напругу при включенні лінії;

Б) потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодноразовому включенні фаз вимикача, що подає напругу на лінію, що захищається, і самозапуску двигунів навантаження трансформаторів, що живляться від лінії, що захищається, при роботі хоча б одного із цих трансформаторів із глухозаземленою нейтраллю;

В) потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю за автотрансформатором приймаючої підстанції на стороні його, пов'язаною з мережею із глухозаземленою нейтраллю;

Г) струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами за трансформаторами підстанцій, які підживлюють;

Г) потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту, при замиканні на землю на шинах підстанції, на якій цей захист установлений.

Умови п.13-2,А і п.13-2,Б розглядаються при розрахунках захистів ліній, обладнаних вимикачами з пофазними приводами; зазначені умови не враховуються, якщо перший ступінь захисту відбудований за часом від неодночасного включення фаз вимикача.

Розрахунки за умовою п.13-2,А повинен проводитися на підставі додатка VI.

Умова п.13-2,Б може з'явитися розрахунковою тільки для ліній 110 кВ у рідких випадках, коли від розглянутої лінії живиться кілька трансформаторів і тільки частина з них працює із глухозаземленою нейтраллю. Відбудовування за умовою п.13-2,Б виконується за виразом (10.2), у якому $3I_{0\text{неп}}$ - максимальне значення потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача, що подає напругу на лінію, що захищається, і самозапуску двигунів навантаження трансформаторів, що живляться від лінії, що захищається, при заземленні нейтралі хоча б одного із трансформаторів. Розрахунки за умовою п.13-2,В проводиться за виразом (10.3); за умовою п.13-2,Г - за виразами (10.7), (10.8) і (ДVIII.1) відповідно до рекомендацій глави 10, п.10-8.

Умова п.13-2,Г розглядається при виконанні захисту неспрямованим, відбудовування по ньому проводиться за виразом (10.1).

Якщо через відбудовування за умовою п.13-2,А або п.13-2,Б одноступінчастий захист не задовольняє умові чутливості при замиканнях

на землю в кінці елемента, який захищають, він може бути виконаний з витримкою часу, яка залежно від типу вимикача приймається 0,1 або 0,2 з (додаток VI).

13-3. Струм спрацьовування другого ступеня двоступінчастого захисту тупикових ліній вибирається за умовою п.13-2,Г, а витримка часу - за умовою відбудовування від різночасності включення фаз вимикача.

Крім того, при наявності на підстанції, яку підживлюють, автотрансформатора другий ступінь за струмом спрацьовування й за витримкою часу узгоджується з першим ступенем захисту від замикань на землю, установленим на стороні суміжної напруги автотрансформатора, яка примикає до мережі із глухозаземленою нейтраллю.

13-4. На нетупикових лініях, якщо тривалий режим роботи двома фазами не передбачається, захист виконується триступінчастим.

13-5. Струм спрацьовування першого ступеня захисту нетупикових ліній (відсічка без витримки часу) при відсутності почергового АПВ вибирається:

А) за умовою відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції;

Б) за умовами п.13-2,А, Б, Г.

Розрахунки за умовою п.13-5,А проводиться за (10.1).

Умови п.13-2,А та Б розглядаються при розрахунках захистів ліній, обладнаних вимикачами з пофазними приводами. Умова п.13-2,Г розглядається при виконанні першого ступеня ненаправленим.

13-6. Струм спрацьовування другого ступеня захисту нетупикових ліній (відсічка з витримкою часу) вибирається:

А) за умовою узгодження з першими (другими) ступенями захистів попередніх ліній;

Б) за умовою п.13-2,В.

Струм спрацьовування другого ступеня перевіряється також за умовою п.13-2,Г.

Розрахунки за умовою п.13-6,А проводиться за виразом (10.5).

З метою підвищення чутливості доцільно замінити умову з п.13-2,В узгодженням з першим ступенем захисту від замикань на землю, установленим на стороні суміжної напруги автотрансформатора (яка примикає до мережі із глухозаземленою нейтраллю).

Витримка часу другого ступеня захисту повинна бути узгоджена з витримками часу перших (або других) ступенів захистів попередніх елементів (ліній, автотрансформаторів), з якими розглянутий другий ступінь узгоджується за струмом спрацьовування.

13-7. Струм спрацьовування третього ступеня захисту нетупикових ліній вибирається за умовою п.13-2,Г, витримка часу узгоджується із часом спрацьовування останніх ступенів захистів попередніх елементів.

13-8. Прискорення захисту при включенні вимикача може бути виконано:

а) без витримки часу;

б) з витримкою часу, відбудованої від різночасності включення фаз вимикача.

При виконанні прискорення без витримки часу струм спрацьовування ступеня, що прискорюється, додатково до перерахованих умов повинен бути відбудований за умовами п.13-2,А та Б.

13-9. При використанні почергового АПВ струм спрацьовування неселективному ступеня вибирається за умовами п.13-2, А, Б, У та Г і за умовою узгодження із ступенем без витримки часу (першим або неселективним ступенем) попередньої лінії, а також перевіряється за умовою п.13-2,Г. При цьому для скорочення зони дії неселективного

ступеня доцільно обмежувати струм спрацьовування її необхідною чутливістю.

13-10. На лініях, для яких передбачається режим *тривалої роботи двома фазами*, захист виконується триступінчастим.

13-11. Струм спрацьовування *першого ступеня* захисту за п.13-10 вибирається:

А) за умовою відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при КЗ між трьома фазами за трансформаторами протилежної підстанції в неповнофазному режимі роботи лінії, що захищається;

Б) за умовами п.13-2,А, Б, Г;

В) за умовою п.13-6,А (тільки для нетупикових ліній). На нетупикових лініях при невикористанні почергового АПВ перший ступінь виконується з витримкою часу, узгодженою з витримкою часу перших ступенів захистів попередніх елементів; в інших випадках - на нетупикових лініях при використанні почергового АПВ і на тупикових лініях - перший ступінь виконується без витримки часу. На лініях, для яких передбачається тривалий неповнофазний режим, умови п.13-2,А і Б повинні враховуватися незалежно від різночасності включення фаз вимикача, тобто незалежно від типу привода.

Розрахунки струму спрацьовування за умовою п.13-11,А проводяться за виразом

$$I_{0с.з}^I \geq k_{відб} 3I_{0з}, \quad (13.1)$$

де $3I_{0з}$ - максимальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при КЗ між трьома фазами за трансформаторами протилежної підстанції в режимі роботи лінії, що захищається, двома фазами;

$k_{\text{відб}}$ - коефіцієнт відбудовування, прийнятий рівним 1,3 при виконанні розглянутого ступеня без витримки часу й 1,2 при виконанні його з витримкою часу.

13-12. Струм спрацьовування *другого ступеня* захисту за п.13-10 вибирається за умовою відбудовування від потроєного струму нульової послідовності в неповнофазному навантажувальному режимі роботи лінії, що захищається, за виразом

$$I_{0с.з}'' \geq \frac{k_{\text{відб}}}{k_n} 3I_{0нсп}, \quad (13.2)$$

де $3I_{0нсп}$ - максимальне значення потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному навантажувальному режимі роботи лінії, що захищається; визначається з урахуванням самозапуску двигунів навантаження;

$k_{\text{відб}}$ - коефіцієнт відбудовування, прийнятий рівним 1,2;

k_n - коефіцієнт повернення реле.

Витримка часу другого ступеня повинна бути узгоджена з витримкою часу відповідного ступеня захисту попередньої лінії (для нетупикової лінії) і захистом від зовнішніх КЗ між фазами трансформатора протилежної підстанції.

13-13. Струм спрацьовування й витримка часу *третього ступеня* захисту за п.13-10 на нетупикових лініях вибираються за п.13-7 (оскільки розглянутий ступінь у неповнофазному режимі з роботи виводиться); на тупикових лініях струм спрацьовування вибирається за умовою п.13-2,Г, а витримка часу відбудовується від різночасності включення фаз вимикача.

13-14. Недоліком захисту за п.13-10 нетупикової лінії при невикористанні почергового АПВ є відсутність ступеня без витримки часу. Використання замість першого ступеня, розглянутого в п.13-11, селективної струмової відсічки, відбудованої від замикань на землю на шинах протилежної підстанції за п.13-5,А в більшості випадків

виявляється неприйнятним внаслідок малого значення охопленої нею зони й відключення КЗ на значній частині лінії другим ступенем захисту з великими витримками часу (п.13-12).

У зв'язку із зазначеним на лініях з можливістю тривалої роботи двома фазами рекомендується застосування почергового АПВ.

Глава чотирнадцята

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТІВ

ОДИНОЧНИХ ЛІНІЙ КІЛЬЦЕВОЇ МЕРЕЖІ 110 - 220 КВ ІЗ ОДНИМ

ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ

Параметри спрацьовування захистів ліній кільцевої мережі з одним джерелом живлення вибираються відповідно до вказівок глави 10 з урахуванням розглянутих нижче особливостей вибору параметрів спрацьовування захистів ліній, що примикають до джерела живлення з боку приймаючих підстанцій.

Захисти ліній з боку приймаючих підстанцій виконуються двоступінчастими. Струм спрацьовування *першого ступеня* (відсічка без витримки часу) вибирається:

- А) за умовою глави 10, п.10-1,А;
- Б) за умовою відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах підстанції, на якій цей захист установлений.

Розрахунки за умовою п.14-3,Б проводиться за виразами (10.7), (10.8) і (ДVIII.1) відповідно до рекомендацій глави 10, п.10-8.

Струм спрацьовування *другого ступеня* вибирається за умовами:

- А) відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами за трансформаторами підстанції, на якій цей захист установлений;
- Б) узгодження зі струмом спрацьовування третіх ступенів захистів ліній, що відходять від шин протилежної (живлячої) підстанції й других ступенів захистів нульової послідовності автотрансформаторів, приєднаних до шин цієї підстанції.

Витримка часу другого ступеня захисту повинна бути узгоджена із часом спрацьовування третіх ступенів захистів розглянутих ліній і других ступенів захистів автотрансформаторів.

Глава п'ятнадцята

ПЕРЕВІРКА ЧУТЛИВОСТІ

15-1. Обраний захист повинен задовольняти вимогам чутливості при металевих замиканнях на землю в розрахунковому режимі. При цьому повинні розглядатися замикання на землю на кожному з кінців лінії, протилежному місцю установки захисту, як у режимі до відключення вимикача на цьому кінці, так і після відключення. Ступінь захисту, що має прискорення при включенні вимикача, повинен задовольняти вимозі чутливості до замикання на землю на кожному кінці лінії, що захищається, у режимі її однобічного включення.

Чутливість захисту повинна перевірятися при замиканні на землю однієї фази. Однак у ряді випадків повинна також перевірятися чутливість захисту й при замиканні на землю двох фаз. Це необхідно, якщо при замиканнях на землю двох фаз захист від багатofазних замикань виявляється нечутливим, наприклад при КЗ у зоні резервування, або можливо значна його затримка, наприклад при переході замикання однієї фази в замикання двох фаз на землю, якщо не передбачена дія другого ступеня дистанційного захисту без блокування при хитаннях (оскільки до часу переходу замикання однієї фази в замикання двох фаз на землю другий ступінь може бути виведений блокуванням); забезпечення чутливості захисту при замиканні двох фаз на землю в останньому випадку може запобігти затримці відключення КЗ.

15-2. Коефіцієнт чутливості реле струму захисту визначається за виразом

$$k_{ч.с} = \frac{3I_{0з\min}}{I_{0с.з}}, \quad (15.1)$$

де $3I_{0з\min}$ - мінімальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при розрахунковому виді замикання на землю в

розрахунковому режимі; у якості розрахункового приймається реально можливий режим, при якому має місце мінімальне значення струму;

$I_{0c.3}$ - первинний струм спрацьовування відповідного ступеня захисту.

15-3. Коефіцієнт чутливості реле напряму потужності індукційного типу визначається за виразом

$$k_{ч.н} = \frac{(3I_{0з} 3U_{0з})_{\min}}{K_I K_U S_{с.р}}, \quad (15.2)$$

де $(3I_{0з} 3U_{0з})_{\min}$ - мінімальне значення потужності нульової послідовності в місці установки захисту при розрахунковому виді замикання на землю в розрахунковому режимі; у якості розрахункового приймається реально можливий режим, при якому має місце мінімальне значення потужності;

K_I, K_U - коефіцієнти трансформації відповідно трансформаторів струму й трансформаторів напруги;

$S_{с.р}$ - потужність спрацьовування реле напряму потужності.

Слід зазначити, що потужність спрацьовування індукційного реле напряму потужності може відрізнятися від значення, наведеного в інформації заводу для струму, рівного номінальному. Тому значення коефіцієнта чутливості, отримане за виразом (15.2), доцільно уточнювати в умовах експлуатації з урахуванням реальних вольт-амперних характеристик реле.

Коефіцієнт чутливості реле напряму потужності, виконаного на схемі порівняння абсолютних значень або на схемі порівняння фаз, повинен визначатися окремо за струмом й за напругою.

Коефіцієнт чутливості за напругою визначається за виразом

$$k_{ч.с}^{p.н} = \frac{3I_{0з\min}}{I_{0с.р.н} K_I}. \quad (15.3)$$

Коефіцієнт чутливості за струмом визначається за виразом

$$k_{ч.н}^{p.n} = \frac{3U_{0зmin}}{U_{0с.р.н} K_U}. \quad (15.4)$$

У виразах (15.3) і (15.4) $3I_{0зmin}$ - те ж, що в (15.1);

$3U_{0зmin}$ - мінімальне значення періодичної складової потроєної початкової напруги нульової послідовності в місці установки захисту при розрахунковому виді замикання на землю в розрахунковому режимі; у якості розрахункового приймається реально можливий режим, при якому має місце мінімальне значення напруги;

$I_{0с.р.п}$, $U_{0с.р.п}$ - струм і напруга спрацьовування реле напряму потужності;

K_I , K_U - те ж, що в (15.2).

Слід зазначити, що при малих значеннях напруги $3U_{0з}$ на чутливість реле напряму потужності помітно впливає напруга небалансу $U_{0нб}$. Тому при малих, порівнянних зі значенням напруги небалансу $U_{0нб}$, розрахункових значеннях напруги $3U_{0з}$ доцільно приймати останнє меншим розрахункового на значення $U_{0нб}$, яке в умовах експлуатації може бути визначене експериментально. При відсутності відповідних даних допускається враховувати $U_{0нб}$ підвищенням мінімальних коефіцієнтів чутливості $k_{ч.п}$ і $k_{ч.н}$ (п.15-4) для випадку ушкодження наприкінці зони резервування до значення 2,0.

15-4. Відповідно до ПУЕ для струмового східчастого захисту нульової послідовності повинні забезпечуватися наступні мінімальні значення коефіцієнта чутливості.

Для реле струму:

А) при замиканні на землю в кінці лінії, що захищається, без врахування резервної дії - близько 1,5, а при наявності надійно діючого резервного ступеня - близько 1,3; при наявності на протилежній підстанції окремого захисту шин допускається забезпечувати коефіцієнт чутливості в режимі каскадного відключення близько 1,5;

Б) при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції - близько 1,5;

В) при замиканні на землю наприкінці зони резервування в режимі каскадного відключення пошкодження для останнього ступеня захисту - не менш 1,2.

Слід урахувати, що при замиканні на землю за п.15-4,А у випадку використання розглянутого захисту в якості основного, а також при замиканні на землю за п.15-4,Б у випадках, коли спеціальний захист шин не передбачається, витримка часу захисту, як правило, не повинна перевищувати 1,5 с.

Для реле напрямку потужності:

А) при ушкодженні наприкінці лінії, що захищається, - близько 2,0 за потужністю й 1,5 за струмом й напругою;

Б) при ушкодженні наприкінці зони резервування - близько 1,4 за потужністю й 1,2 за струмом й напругою.

В умовах експлуатації в тих випадках, коли виконане узгодження за чутливістю останніх ступенів захисту, рекомендується перевіряти чутливість реле напрямку потужності при струмі, рівному струму спрацьовування найбільш чутливого спрямованого ступеня.

У випадку, коли на приймаючій підстанції є короткозамикач, захист повинен бути чутливий до замикання на землю однієї фази на цій підстанції з урахуванням зменшення струму $3I_{0zmin}$ у виразі (15.1) і потужності $(3I_{0z}3U_{0z})_{min}$ у виразі (15.2) через можливе одночасне КЗ між трьома фазами за трансформатором або автотрансформатором (включення короткозамикача при ушкодженні в трансформаторі або автотрансформаторі).

При $x_T / x_{13} \leq 3$ (де x_T - опір прямої послідовності променів схеми заміщення трансформатора або автотрансформатора до місця КЗ між трьома фазами; x_{13} - еквівалентний опір прямої послідовності системи і

лінії, що захищається, до місця замикання на землю однієї фази) значення струму $3I_{0\text{зmin}}$ при одночасному багатofазному КЗ за трансформатором або автотрансформатором уточнюється відповідно до додатка ІХ.

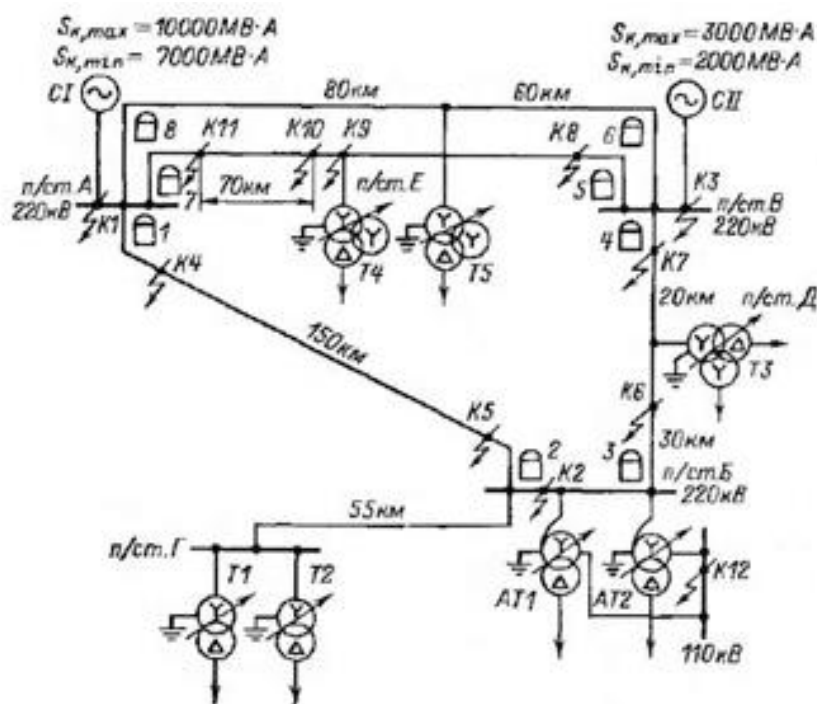
При $x_T / x_{1\text{з}} \geq 3$ зменшення струму $3I_{0\text{зmin}}$ може бути враховано підвищенням мінімального коефіцієнта чутливості (п.15-4) реле струму до 1,8, а реле напряду потужності - до 3 (за потужністю) та до 1,8 (за струмом й напругою).

Глава шістнадцята

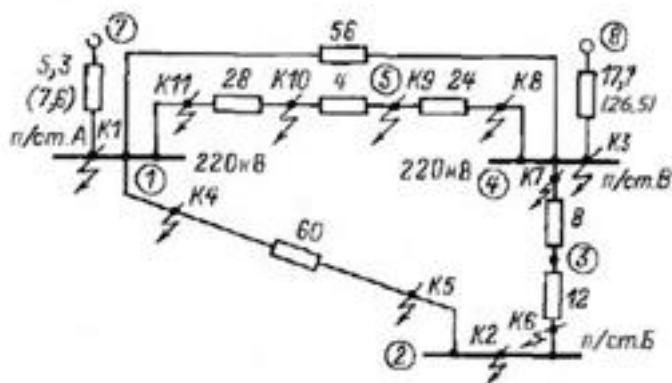
ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

16-1. 1) Нижче наведені розрахунки струмових спрямованих і неспрямованих захистів нульової послідовності зі східчастою характеристикою витримки часу, встановлених у кільцевій мережі 220 кВ.

Вихідна схема мережі наведена на рис.16.1,*а*, схеми заміщення прямої (зворотної) і нульової послідовностей наведені на рис.16.1,*б*,*в*.



а)



б)



δ – схема заміщення нульової послідовності.

2. У дужках дані опори систем, що відповідають мінімальному режиму.

3. Номера вузлів у схемах заміщення обведені кружком.

Таблиця 16.1

Параметри трансформаторів

Позначення елемента за рис.16.1, <i>a</i>	$S_{\text{ном}}, \text{MBA}$	$u_k, \%$		
		ВН-СН	СН-НН	ВН-НН
$T1, T2$	63	-	-	12
$T3$	40	20,4	7,6	12,5
$T4, T5$	40	12,5	7,6	20,4
$AT1, AT2$	200	10,6	19,5	32

Опори прямої послідовності $x_{1T(AT)}$ трансформаторів T (автотрансформаторів AT) розраховані для середнього положення регулятора пристрою РПН і віднесені до номінальної потужності трансформаторів (автотрансформаторів).

Через відсутність заводських даних по опорах нульової послідовності трансформаторів (автотрансформаторів) орієнтовно прийнято, що ці опори дорівнюють опорам прямої послідовності:

$x_{0T(AT)} = x_{1T(AT)}$. Нейтралі всіх трансформаторів і автотрансформаторів прийняті глухозаземленими.

На стороні 220 кВ усіх підстанцій передбачені пристрої резервування при відмові вимикачів (ПРВВ). На лініях установлені повітряні вимикачі з пофазними приводами.

Максимальний струм навантаження для кожної лінії не перевищує 600 А; коефіцієнт трансформації трансформаторів струму $K_I = 1000/5$.

На підставі окремих розрахунків отримані наступні параметри спрацьовування захисту від замикань на землю автотрансформатора *n/ст.Б*, встановленого з боку середньої напруги: струми спрацьовування відповідно першого й другого ступенів $I_{0с.зAT}^I = 820 \text{ А}$; $I_{0с.зAT}^{II} = 300 \text{ А}$, витримки часу відповідно першого й другого ступенів $t_{с.з}^I = 0,8 \text{ с}$; $t_{с.з}^{II} = 1,5 \text{ с}$.

Ступінь витримки часу захистів Δt приймався 0,5 с.

Схема розміщення захистів наведена на рис.16.2.

Позначення розрахункових режимів мережі наведено в табл.16.2.

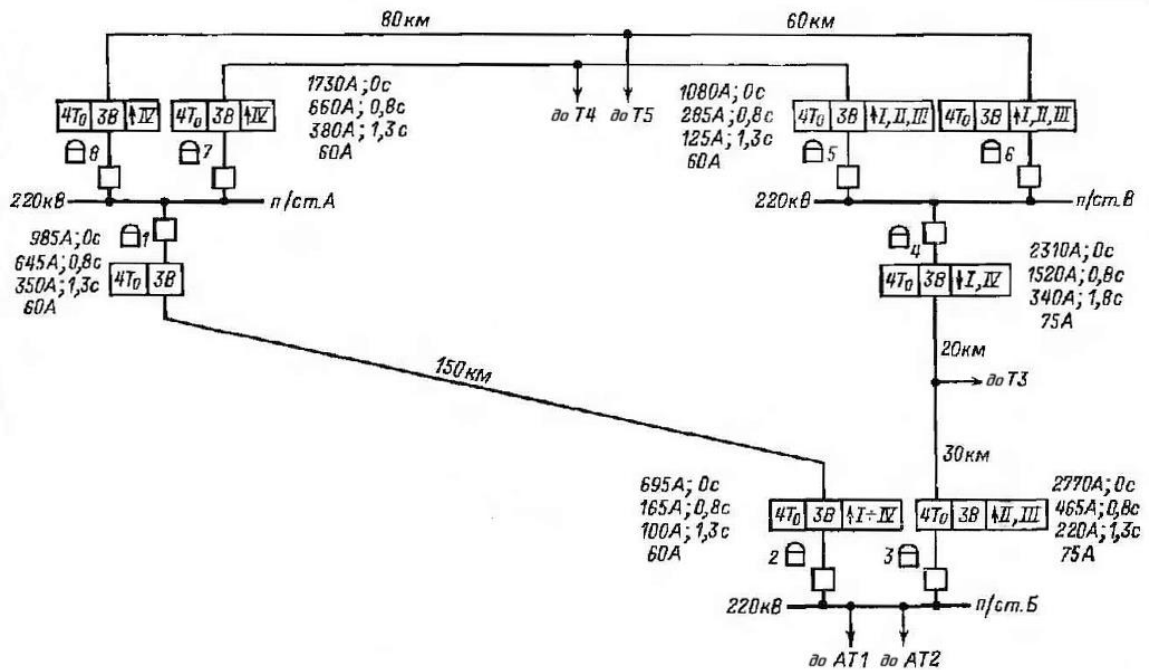
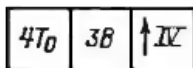


Рис.16.2. Схема розміщення захистів ліній кільцевої мережі за рис.16.1,а.



- чотириступінчастий струмовий захист нульової послідовності зі спрямованим IV ступенем.

Таблиця 16.2

Позначення розрахункових режимів мережі за рис.16.1,а

Режим	Характеристика розрахункових режимів
I	Системи CI й CII в максимальному режимі
II	Системи CI й CII в мінімальному режимі
III	Система CI в максимальному режимі, система CII в мінімальному режимі
IV	Система CI в мінімальному режимі, система CII в максимальному режимі
1	Відключено один автотрансформатор на п/ст.Б і один трансформатор на п/ст.Г
2	Відключена лінія п/ст.А - п/ст.Б
3	Відключена лінія п/ст.Б - п/ст.В
4	Відключена одна з паралельних ліній п/ст.А - п/ст.В
5	Відключені паралельні лінії п/ст.А - п/ст.В
6	Відключений трансформатор ТЗ на відгалуженні від лінії п/ст.Б - п/ст.В
7	Відключений трансформатор на відгалуженні від однієї (неушкодженої) з паралельних ліній п/ст.А - п/ст.В
8	Відключені трансформатори на відгалуженнях від паралельних ліній п/ст.А - п/ст.В
9	Відключено один трансформатор на п/ст.Г

Примітки: 1. Режими каскадного відключення ліній позначаються додаванням індексу «к».

2. Режим заземлення відключеної лінії із двох сторін позначається додаванням індексу «0».

3. Буквами А, Б і В в індексі позначається підстанція, з боку якої лінія відключена.

4. Штрихом позначено замикання на землю двох фаз.

Розрахунки струмів КЗ виконані в обсязі, необхідному для вибору уставок і перевірки чутливості захистів, і проведені для початкового моменту часу. З метою спрощення не враховувалися активні складові опорів, а також зміна опорів трансформаторів (автотрансформаторів) при регулюванні напруги під навантаженням. Результати розрахунків струмів КЗ наведені в табл.16.3.

Таблиця 16.3

Результати розрахунків струмів КЗ мережі по рис.16.1,а

Точка КЗ	K1								
Режим	I'-8	I'-5	III'-8	III'-5	II-1-6	I'-2-4 ₀ -8	IV'-2-4 ₀ -7	III-3 _B	II'-2-6-8
$x_{\Sigma}, \text{Ом}$	4,65	5,02	6,35	7,05	6,53	4,94	6,86	4,82	6,65
$x_{0\Sigma}, \text{Ом}$	4,07	4,16	5,75	5,95	5,7	4,11	5,83	4,05	5,87
$3I_0, \text{А, у вітці}$									
1-2	-534	-534	-534	-534	-465	0	0	-	0
2-3	-	-	-	-	-	-	-	-	196
3-4	-	-	-	-	-	-	-	-	196
4-5	-	0	-	0	-	822	828	230	348
4-6	-	0	-	0	-	0	0	230	348
5-1	-	0	-	0	-	822	828	-	348
6-1	-	0	-	0	-	0	0	-	348

Продовження табл.16.3

Точка КЗ	K2					
Режим	I-1-6	I'-1-3 _B	III-1-6	II-5	I-1-2-6	IV-1-6
$x_{\Sigma}, \text{Ом}$	22	64,75	23,7	27,6	31,5	22,6
$x_{0\Sigma}, \text{Ом}$	30,3	45,3	31,2	21,1	35,3	30,7
$3I_0, \text{А, у вітці:}$						
1-2	756	540	711	510	-	-
2-3	-1780	0	-	-	-1560	-1749
3-4	-1780	0	-	-851	-1560	-1749
4-5	-	-	-	0	-	-
4-6	-	-	-	0	-	-
5-1	-	-	-	0	-	-
6-1	-	-	-	0	-	-

Продовження табл.16.3

Точка КЗ	К3							
Режим	I-6-8	I-5-6	III-6-8	II-1	I-3 _В -4 ₀ -8	III-3 _В -4 ₀ -8	IV-2	II'-3 _В -8
$x_{1\Sigma}$, Ом	10,5	14,6	13,1	13,7	13,7	18,5	11,8	15,2
$x_{0\Sigma}$, Ом	18,5	20,6	24,1	22,2	22,2	30,8	17,05	31,85
$3I_0$, А, у вітці:								
1-2	-	-	-	-	-	-	-	-91,5
2-3	2070	1710	2130	1355	-	-	-	-
3-4	-	-	2130	-	0	0	-	0
4-5	-	-	-	-	-1311	-1329	-	-
4-6	-	-	-	-	0	0	-	-
5-1	-	-	-	-	-1311	-1329	-414	-563
6-1	-	-	-	-	-	-	-414	-563

Продовження табл.16.3

Точка КЗ	К4		К5		К6	
Режим	I-2 _к -4 ₀ -6	II'-2 _к -4-8	IV-2 _к -4 ₀ -8	III-1-2 _к -6	III-3 _к -4 ₀ -6-8	IV'-1-3 _к -6
$x_{1\Sigma}$, Ом	91,5	98,7	66,86	64,83	38,5	31,8
$x_{0\Sigma}$, Ом	245,3	233	215,83	214,12	100,8	79,9
$3I_0$, А, у вітці:						
1-2	-930	-	1140	1161	0	-
2-3	-358	-	-	-	-2847	-
3-4	-358	-140	-	-	-2847	-
4-5	-	-	43,8	9,87	-507	-
4-6	-	0	0	9,87	0	-
5-1	-	-	43,8	-	-507	-87
6-1	-	0	0	-	0	-87

Продовження табл.16.3

Точка КЗ	К7		К8					
Режим	I-1-3 _к -6	II'-3 _к -4-8	I-2-4 _к	III-3 _В	II'-1-2-4 _к -6-7	II-2-6-7	IV-2-4 _к -7	III-1-4 _к -6
$x_{1\Sigma}$, Ом	84,75	86,9	60,95	14,75	62,95	15,2	62,86	60,86
$x_{0\Sigma}$, Ом	115,2	76,4	120,35	30	122,6	24,3	139,2	141,5
$3I_0$, А, у вітці:								
1-2	297	148	0	-	0	0	0	28
2-3	1401	-	-	-	-	1740	-	-
3-4	1401	-	-	0	-	1740	-	-
4-5	-	-	-1644	-840	0	-555	-1503	-
4-6	-	0	753	-840	-	-555	801	-
5-1	-	-	-	-	-1254	-555	-1503	-
6-1	-	0	750	-	-	-555	801	-
7-1	-	-	516	-	-	-	-	-
8-4	-	-	-	5040	-	-	-	-

Продовження табл.16.3

Точка КЗ	К9		К10		К11		
Режим	IV-2	III-3 _В	II'-2-6-7	II'-3 _В -7	III-3 _В -4 _к -7	IV'-2	II-1-3-4 _к -7
$x_{1\Sigma}$, Ом	19,95	20,55	21,7	14,75	69,7	6,5	74,7
$x_{0\Sigma}$, Ом	42,6	45	62	30	124,46	5,85	126,8
$3I_0$, А, у вітці:							
1-2	0	-	0	-56	-	0	-
2-3	-	-	489	-	-	-	-
3-4	-	-	489	-	0	-	0
4-5	-	2010	1850	-	-	-	1185
4-6	-	-	-	-	-	-	-
5-1	-1815	-	-	-2000	1506	450	-
6-1	-	-	-	-	-834	450	-
7-1	-	-	-	-	-	21000	-
8-4	-	-	-	-	-	-	-

Закінчення табл.16.3

Точка КЗ	K11				K12
Режим	II'-3 _B -7	IV'-2-4 _к -7	III-3 _B -4 _к -7	IV'-1-4 _к	I-6-9
$x_{1\Sigma}, \text{Ом}$	6,65	69,5	74,5	68,3	37,3
$x_{0\Sigma}, \text{Ом}$	42,6	45	62	137,6	62,7
$3I_0, \text{А, у вітці:}$					
1-2	-534	-	-	-	536
2-3	-	-	-	83,4	-
3-4	0	-	0	-	-1266
4-5	315	0	1345	-	-
4-6	315	682	-849	-	-
5-1	315	0	1345	58	-
6-1	315	682	-849	-	-
7-1	-	-	-	-	-
8-4	-	-	-	-	-

Розрахунки струмів КЗ з урахуванням зміни опорів трансформаторів (автотрансформаторів) при регулюванні напруги під навантаженням виконані у п.16-3.

2) Вибір струмів спрацьовування й витримок часу, а також перевірка чутливості реле струму захистів наведені в табл.16.4.

**Вибір параметрів і перевірка чутливості захистів мережі по
рис.16.1,а**

Назва лінії	Місце установки захисту	№ захисту	Ступінь захисту	Тип захисту	Вибір параметрів		
					Умова вибору струму спрацьовування		
<i>n/см.А – n/см.Б</i>	<i>n/см.А</i>	1	I	Струмовий	Відбудовування від $3I_0$ при замиканні на землю на шинах <i>n/см.Б</i>		
					Відбудовування від кидка $I_{\text{нам}}$ автотрансформатора <i>n/см.Б</i>		
			II	Струмовий	Відбудовування від $3I_0$ при замиканні на землю за автотрансформатором <i>n/см.Б</i> на стороні 110 кВ		
					Узгодження з I ступенем захисту 3		
			III	Струмовий	Узгодження з II ступенем захисту 3		
					Узгодження з I ступенем захисту від замикань на землю на стороні 110 кВ автотрансформатора <i>n/см.Б</i>		
					Відбудовування від кидка $I_{\text{нам}}$ автотрансформатора <i>n/см.Б</i> і трансформаторів <i>n/см.Г</i>		
			IV	Струмовий	Відбудовування від $I_{\text{нб}}$ у нульовому проводі ТТ при КЗ між трьома фазами на стороні НН автотрансформатора <i>n/см.Б</i>		
			<i>n/см.Б</i>	2	I	Струмовий спрямований	Відбудовування від $3I_0$ при замиканні на землю на шинах <i>n/см.А</i>
					II	Струмовий спрямований	Узгодження з I ступенем захисту 7 (8)
	III	Струмовий спрямований			Узгодження з II ступенем захисту 7 (8)		

№ захисту	Вибір параметрів спрацьовування захисту				
	Розрах. режим	Розрахунковий струм спрацьовування, А	Прийнятий $I_{0с.з}$	Умова вибору витримки часу, с	Витримка часу, с
1	I-1	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з} = 1,3 \cdot 756 = 984$	985	-	Без витримки часу
	I-3Б	$I_{0с.з}^I = \frac{C_{\delta}^{(k)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{Г.екв}^{(1)})} = \frac{0,55 \cdot 230000}{\sqrt{3}(4,75 + 100)} = 665$			
	I-6-9	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} 3I_{0з} = 1,2 \cdot 536 = 642$	645	Узгодження з I ступенем захисту 3 з урахуванням часу спрацьовування ПРВВ	0,8
	I-1-3к-6	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} k_{смп} I_{0с.з3}^I = 1,1 \cdot 0,212 \cdot 2770 = 645$			
	I-1-3к-6	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{смп} I_{0с.з3}^{II} = 1,1 \cdot 0,212 \cdot 465 = 108$	350	Узгодження з I ступенем захисту від замикань на землю на стороні 110 кВ автотрансформатора	1,3
	I-6-9	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{смп} I_{0с.зAT}^I = 1,1 \cdot 0,438 \cdot 720 = 348$			
	I-3Б	$I_{0с.з}^{III} = \frac{C_{\delta}^{(k)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{Г.екв}^{(1)})} = \frac{0,55 \cdot 230000}{\sqrt{3}(4,75 + 100)} = 665$			
	I-3	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} = 1,25 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 890 = 56$	60	Узгодження з останніми ступенями захистів попередніх елементів	-
2	I-5	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з} = 1,3 \cdot 534 = 694$	695	-	Без витримки часу
	II'-3Б-8	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} 3I_{0розр1} = 1,1 \cdot 150 = 165$	165	Узгодження з I ступенем захисту 7 (8) з урахуванням часу спрацьовування ПРВВ	0,8
	II'-3Б-8	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} 3I_{0розр2} = 1,1 \cdot 90 = 99$	100	Узгодження з II ступенем захисту 7 (8)	1,3

Продовження табл.16.4

№ захисту	Перевірка чутливості реле		
	Умова перевірки чутливості	Розрах. режим	$k_{ч.с} = \frac{3I_{03\min}}{I_{0с.з}}$
1	-	-	-
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії <i>n/см.А</i> - <i>n/см.Б</i> поблизу шин <i>n/см.Б</i>	II-2 _к -1-6	$\frac{795}{645} = 1,2$
	Замикання на землю на шинах <i>n/см.Б</i>	II-5	$\frac{510}{350} = 1,46$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії <i>n/см.Б</i> - <i>n/см.В</i> поблизу шин <i>n/см.В</i>	II-32 (II-42)	$\frac{148}{60} = 2,47$
	Замикання на землю на шинах <i>n/см.Б</i>	II-5	$\frac{510}{60} = 8,5$
2	-	-	-
	Замикання на землю на шинах <i>n/см.А</i>	II-1-6	$\frac{465}{165} = 2,82$
	Замикання на землю на шинах <i>n/см.А</i>	II-1-6	$\frac{465}{100} = 4,65$

Продовження табл.16.4

Назва лінії	Місце установки захисту	№ захисту	Ступінь захисту	Тип захисту	Вибір параметрів
					Умова вибору струму спрацьовування
$n/см.А - n/см.Б$	$n/см.Б$	2	IV	Струмовий спрямований	Відбудовування від $I_{нб}$ у нульовому проводі ТТ при КЗ між трьома фазами за автотрансформатором $n/см.Б$
$n/см.Б - n/см.В$	$n/см.Б$	3	I	Струмовий	Відбудовування від $3I_0$ при замиканні на землю на шинах $n/см.В$
			II	Струмовий спрямований	Узгодження з I ступенем захисту 5 (6)
					Відбудовування від кидка $I_{нам}$ трансформатора на відгалуженні
			III	Струмовий спрямований	Узгодження з II ступенем захисту 5 (6)
	$n/см.В$	4	IV	Струмовий	Відбудовування від $I_{нб}$ у нульовому проводі ТТ при КЗ між трьома фазами за автотрансформатором $n/см.Б$
					Відбудовування від $I_{нб}$ у нульовому проводі ТТ при КЗ між трьома фазами на стороні НН автотрансформатора на відгалуженні
			I	Струмовий спрямований	Відбудовування від $3I_0$ при замиканні на землю на шинах $n/см.Б$
					Відбудовування від кидка $I_{нам}$ автотрансформатора $n/см.Б$
	$n/см.В$	4	II	Струмовий	Відбудовування від $3I_0$ при замиканні на землю за автотрансформатором $n/см.Б$ на стороні 110 кВ
					Узгодження з I ступенем захисту 2

№ захисту	Вибір параметрів спрацьовування захисту				
	Розрах. режим	Розрахунковий струм спрацьовування, А	Прийнятий $I_{0с.з}$	Умова вибору витримки часу, с	Витримка часу, с
2	I-3	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} =$ $= 1,25 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 800 = 56$	60	Узгодження з IV ступенем захисту 7 (8)	-
3	III-6-8	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з} =$ $= 1,3 \cdot 2130 = 2770$	2770	-	Без витримки часу
	II'-2-6-8	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} 3I_{0розр1} =$ $= 1,1 \cdot 420 = 462$	465	Узгодження з I ступенем захисту 5 (6) з урахуванням часу спрацьовування ПРВВ	0,8
	I-3 _к	$I_{0с.з}^{II} = \frac{C_b^{(к)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)})} =$ $= \frac{0,74 \cdot 230000}{\sqrt{3}(4,75 + 384)} = 252$			
	II'-2-6-8	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} 3I_{розр2} =$ $= 1,1 \cdot 200 = 220$	220	Узгодження з II ступенем захисту 5 (6)	
	I-2	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} =$ $= 1,25 \cdot 1,0 \cdot 0,05 \cdot 1140 = 71$	75	Узгодження з IV ступенем захисту 5 (6)	-
	I-3 _В	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} =$ $= 1,25 \cdot 1,0 \cdot 0,05 \cdot 550 = 35$			
4	I-1-6	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з} =$ $= 1,3 \cdot 1780 = 2310$	2310	-	Без витримки часу
	I-2	$I_{0с.з}^I = \frac{C_b^{(к)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)})} =$ $= \frac{0,785 \cdot 230000}{\sqrt{3}(11,6 + 52,8)} = 1500$			
	I-6-9	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} 3I_{0з} =$ $= 1,2 \cdot 1266 = 1520$	1520	Узгодження з I ступенем захисту 2 з урахуванням часу спрацьовування ПРВВ	0,8
	I-1-2 _к -6	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} k_{стр} 3I_{с.з2}^I =$ $= 1,1 \cdot 0,386 \cdot 695 = 295$			

№ захисту	Перевірка чутливості реле		
	Умова перевірки чутливості	Розрах. режим	$k_{ч.с} = \frac{3I_{03\min}}{I_{0с.з}}$
2	Каскадне відключення замикання на землю на лінії $n/см.А$ - $n/см.В$ поблизу шин $n/см.В$	IV-1-4 _к -6	Ступінь не спрацьовує, тому що потужність КЗ спрямована до шин
	Замикання на землю на шинах $n/см.А$	II-1-6	$\frac{465}{60} = 7,75$
3	-	-	-
	Замикання на землю на шинах $n/см.В$	II-1	$\frac{1355}{465} = 2,92$
	Замикання на землю на шинах $n/см.В$	II-1	$\frac{1355}{220} = 6,1$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії $n/см.А$ - $n/см.В$ поблизу шин $n/см.А$	IV'-1-4 _{до}	$\frac{83}{75} = 1,1$
	Замикання на землю на шинах $n/см.В$	II-1	$\frac{1355}{75} = 18$
4	-	-	-
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії $n/см.Б$ - $n/см.В$ поблизу шин $n/см.Б$	II-3 _к	$\frac{1682}{1520} = 1,11$

Продовження табл.16.4

Назва лінії	Місце установки захисту	№ захисту	Ступінь захисту	Тип захисту	Вибір параметрів
					Умова вибору струму спрацьовування
$n/см.Б - n/см.В$	$n/см.В$	4	III	Струмовий	Узгодження з II ступенем захисту 2
					Узгодження з II ступенем захисту від замикань на землю на стороні 110 кВ автотрансформатора $n/см.Б$
					Відбудування від кидка $I_{нам}$ автотрансформатора $n/см.Б$ і трансформаторів $n/см.Г$ і $Д$
					Відбудування від кидка $I_{нам}$ трансформатора на відгалуженні
			IV	Струмовий спрямований	Відбудування від $I_{нб}$ у нульовому проводі ТТ при КЗ між трьома фазами за автотрансформатором $n/см.Б$
					Відбудування від $I_{нб}$ у нульовому проводі ТТ при КЗ між трьома фазами на стороні НН трансформатора на відгалуженні
$n/см.Б - n/см.А$	$n/см.В$	5 (6)	I	Струмовий спрямований	Відбудування від $3I_0$ при замиканні на землю на шинах $n/см.А$
					Відбудування від $3I_0$ при каскадному відключенні замикання на землю на паралельній лінії поблизу шин $n/см.В$
					Відбудування від кидка $I_{нам}$ трансформатора на відгалуженні
			II	Струмовий спрямований	Узгодження з I ступенем захисту 1
					Узгодження з I ступенем захисту 7 (8)
					Відбудування від кидка $I_{нам}$ трансформатора на відгалуженні

№ захисту	Вибір параметрів спрацювання захисту				
	Розрах. режим	Розрахунковий струм спрацювання, А	Прийнятий $I_{0с.з}$	Умова вибору витримки часу	Витримка часу, с
4	I-1-2 _к -6	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.з2}^{II} = 1,1 \cdot 1 \cdot 0,386 \cdot 165 = 70$	340	Узгодження з II ступенем захисту від замикань на землю на стороні 110 кВ АТ п/см.Б	1,8
	I-6-9	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.зAT}^{II} = 1,1 \cdot 1 \cdot 1,03 \cdot 300 = 340$			
	I-2	$I_{0с.з}^{III} = \frac{C_{\delta}^{(к)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)})} = \frac{0,725 \cdot 230000}{\sqrt{3}(11,6 + 52,8)} = 1500$			
	I-3 _Б	$I_{0с.з}^{III} = \frac{C_{\delta}^{(к)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)})} = \frac{0,83 \cdot 230000}{\sqrt{3}(11,6 + 332)} = 322$			
	I-2	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} = 1,25 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 1140 = 71$	75	Узгодження з II ступенем захисту від замикань на землю на стороні 110 кВ АТ п/см.Б і III ступенем захисту 2	1,8
	I-3 _Б	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} = 1,25 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 721 = 45$			
5 (6)	IV-2-4 ₀ -8	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з} = 1,3 \cdot 828 = 1076$	1080	-	Без витримки часу
	IV-2-4 _к -7	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з} = 1,3 \cdot 801 = 1041$			
	I-4 _А	$I_{0с.з}^{II} = \frac{C_{\delta}^{(к)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)})} = \frac{0,77 \cdot 230000}{\sqrt{3}(12,1 + 348)} = 284$			
	II'-2-6-8	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.з1}^I = 1,1 \cdot 0,0384 \cdot 985 = 41,5$	285	Узгодження з I ступенем захисту 1 з урахуванням спрацювання ПРВВ	0,8
	I-2	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} 3I_{0з} = 1,2 \cdot 801 = 962$			
	I-3 _В	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} = 1,25 \cdot 1,0 \cdot 0,05 \cdot 550 = 35$			

№ захисту	Перевірка чутливості реле		
	Умова перевірки чутливості	Розрах. режим	$k_{ч.с} = \frac{3I_{03\min}}{I_{0с.з}}$
4	Замикання на землю на шинах <i>n/см.Б</i>	II-5	$\frac{851}{340} = 2,5$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії <i>n/см.А - n/см.Б</i> поблизу шин <i>n/см.А</i>	II'-2 _к -4-8	$\frac{140}{75} = 1,87$
	Замикання на землю на шинах <i>n/см.Б</i>	II-5	$\frac{851}{75} = 11,3$
5 (6)	-	-	-
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії <i>n/см.А - n/см.Б</i> поблизу шин <i>n/см.А</i>	II-1-3-4 _к -7	$\frac{1185}{285} = 4,16$

Продовження табл. 16.4

Назва лінії	Місце установки захисту	№ захисту	Ступінь захисту	Тип захисту	Вибір параметрів
					Умова вибору струму спрацьовування
$n/см.В - n/см.А$	$n/см.В$	5 (6)	III	Струмовий спрямований	Узгодження з I ступенем захисту 1
					Узгодження з II ступенем захисту 8 (7)
					Відбудовування від кидка $I_{нб}$ у нульовому проводі $ТТ$ при КЗ між трьома фазами на шинах $n/см.В$
			IV	Струмовий	Відбудовування від $I_{нб}$ у нульовому проводі $ТТ$ при КЗ між на стороні T на відгалуженні
$n/см.В - n/см.А$	$n/см.А$	7 (8)	I	Струмовий	Відбудовування від $3I_0$ при замиканні на землю на шинах $n/см.В$
					Відбудовування від $3I_0$ при каскадному відключенні замикання на землю на паралельній лінії поблизу шин $n/см.А$
					Відбудовування від $I_{нам}$ трансформатора на відгалуженні
			II	Струмовий спрямований	Узгодження з I ступенем захисту 4
					Узгодження з I ступенем захисту 5 (6)
			III	Струмовий	Узгодження з II ступенем захисту 4
					Узгодження з II ступенем захисту 5 (6)
					Відбудовування від $I_{нам}$ T на відгалуженні
					Відбудовування від $I_{нб}$ у нульовому проводі $ТТ$ при КЗ між трьома фазами на шинах $n/см.В$
			IV	Струмовий спрямований	Відбудовування від $I_{нб}$ у нульовому проводі $ТТ$ при КЗ між трьома фазами на стороні НН трансформатора на відгалуженні

№ захисту	Вибір параметрів спрацювання захисту				
	Розрах. режим	Розрахунковий струм спрацювання, А	Прийнятий $I_{0с.з}$	Умова вибору витримки часу	Витримка часу, с
5 (6)	IV-2 _к -4 ₀ -8	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.з1}^{II} = 1,1 \cdot 0,0384 \cdot 645 = 27$	125	Узгодження з II ступенем захисту 1	0,8
	IV-2-4 _к -7	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.з7(8)}^{II} = 1,1 \cdot 0,533 \cdot 660 = 387$			
	III-3	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} = 1,25 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 2000 = 125$			
	I-4 _A	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} = 1,25 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 434 = 27,1$	60	Узгодження з IV ступенем захисту 1	1,3
7 (8)	III-3 _B -4 ₀ -8	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з} = 1,3 \cdot 1329 = 1730$	1730	-	Без витримки часу
	III-3 _B -4 _к -7	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з} = 1,3 \cdot 834 = 1085$			
	I-4 _B	$I_{0с.з}^{II} = \frac{C_{б}^{(к)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)})} = \frac{0,73 \cdot 230000}{\sqrt{3}(4,75 + 348)} = 269$			
	III-3 _B -4 ₀ -8	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.з4}^I = 1,1 \cdot 0,226 \cdot 2310 = 575$	660	Узгодження з I ступенем захисту 4 з урахуванням спрацювання ПРВВ	0,8
	III-3 _B -4 _к -7	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.з5(6)}^I = 1,1 \cdot 0,554 \cdot 1080 = 660$			
	III-3 _B -4 ₀ -8	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.з4}^{II} = 1,1 \cdot 0,226 \cdot 1520 = 378$	380	Узгодження з II ступенем захисту 4	1,3
	III-3 _B -4 _к -7	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{стр} I_{0с.з5(6)}^{II} = 1,1 \cdot 0,554 \cdot 889 = 587$			
	I-4 _B	$I_{0с.з}^{III} = \frac{C_{б}^{(к)} U_{ном}}{\sqrt{3}(x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)})} = \frac{0,73 \cdot 230000}{\sqrt{3}(4,75 + 348)} = 269$			
	III-3	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} = 1,25 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 2000 = 125$	60	Узгодження з IV ступенем захисту 4	-
	I-4 _B	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} k_{пер} k_{нб} I_{розр} = 1,25 \cdot 1 \cdot 0,05 \cdot 433 = 27$			

№ захисту	Перевірка чутливості реле		
	Умова перевірки чутливості	Розрах. режим	$k_{ч.с} = \frac{3I_{03\min}}{I_{0с.з}}$
5 (6)	Замикання на землю на шинах <i>n/см.А</i>	III-3 _В	$\frac{230}{125} = 1,84$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії <i>n/см.А - n/см.Б</i> поблизу шин <i>n/см.Б</i>	III-1-2 _к -6	$\frac{10}{60} = 0,16$
	Замикання на землю на шинах <i>n/см.А</i>	III-3 _В	$\frac{230}{60} = 3,84$
7 (8)	-	-	-
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії <i>n/см.А - n/см.В</i> поблизу шин <i>n/см.В</i>	II-1-2-4 _к -6-7	$\frac{1254}{660} = 1,9$
	Замикання на землю на шинах <i>n/см.В</i>	IV-2	$\frac{414}{380} = 1,09$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії <i>n/см.Б - n/см.В</i> поблизу шин <i>n/см.Б</i>	IV'-1-3 _к -6	$\frac{87}{60} = 1,45$
	Замикання на землю на шинах <i>n/см.В</i>	IV-2	$\frac{414}{60} = 6,9$

Примітка: позначення розрахункових режимів дано в табл.16.2.

На всіх лініях установлені чотириступінчасті захисти. Другі ступені захистів 2, 3 і 5 (6) і треті ступені захистів 1, 4 і 7 (8) прискорюються при включенні вимикача.

На рис.16.3 і рис.16.4 наведені криві зміни потроєних струмів нульової послідовності, що проходять по паралельним лініям при замиканнях на землю однієї фази в розрахунковому режимі, а також струми спрацьовування перших і других ступенів захистів 7 (8) і 5 (6). необхідні для вибору струмів спрацьовування других і третіх ступенів захистів 2 і 3.

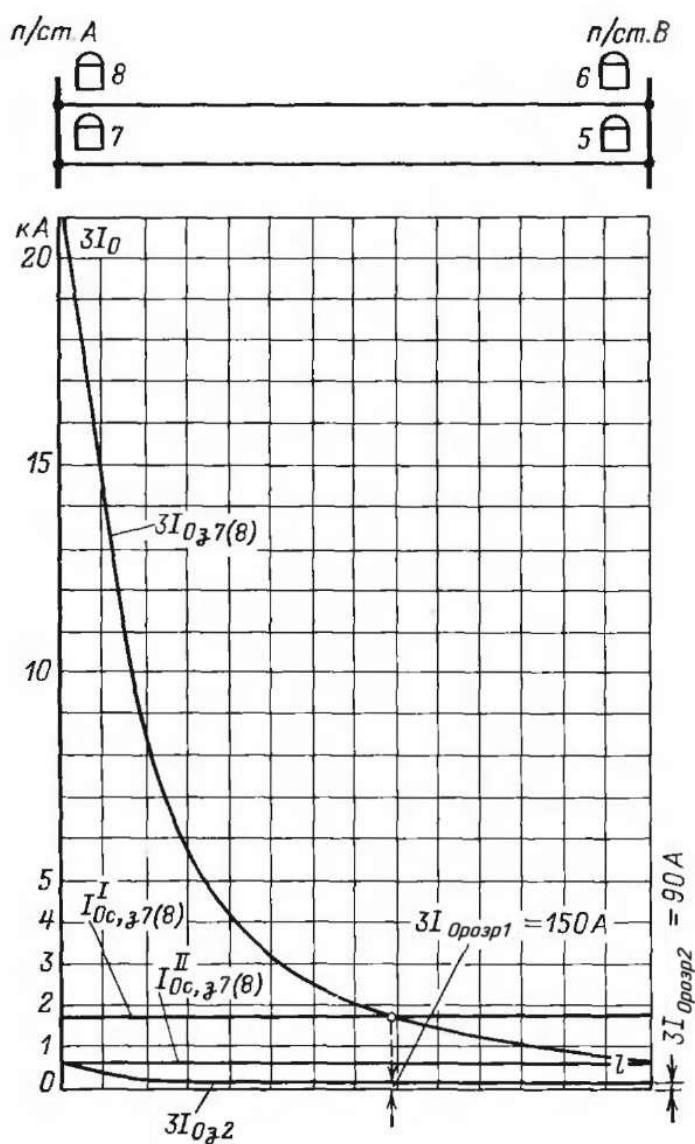


Рис.16.3. Розрахунки струмів спрацьовування II й III ступенів захисту 2 у мережі за рис.16.1,а.

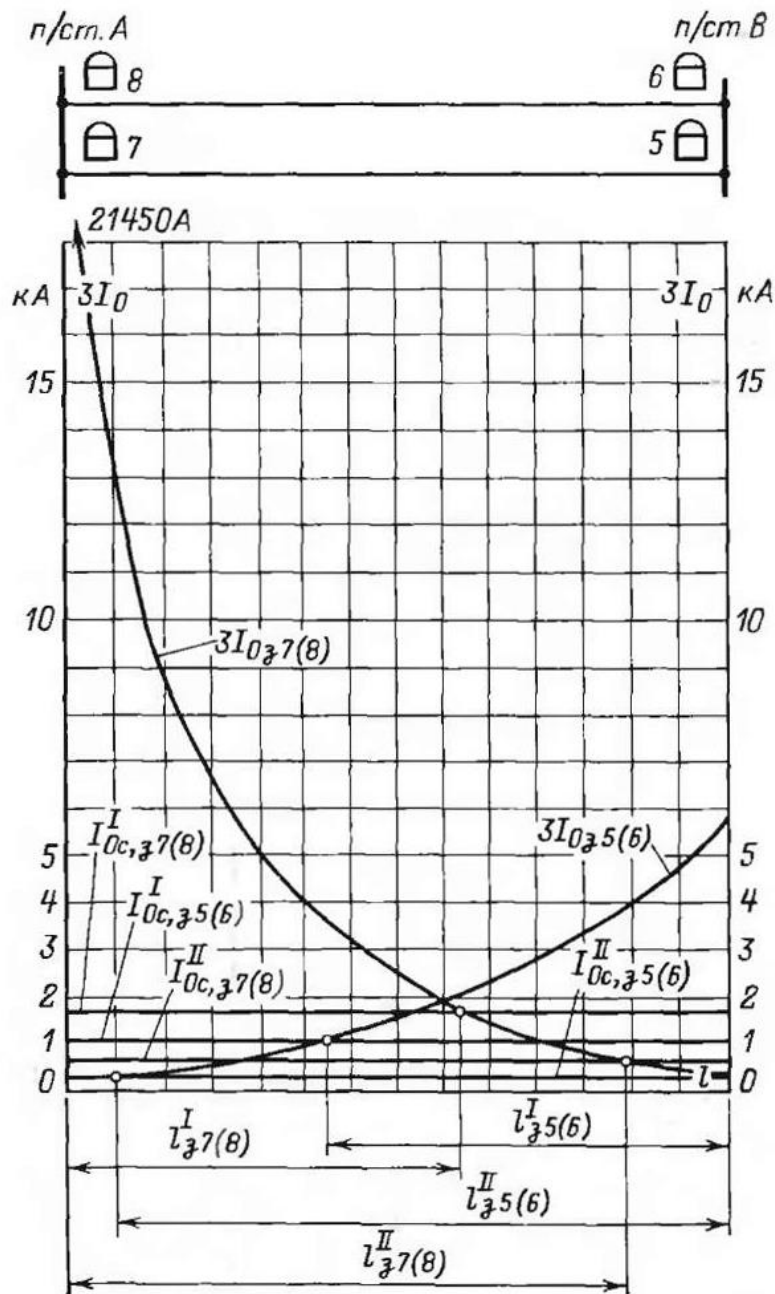


Рис.16.4. Розрахунки струмів спрацьовування II й III ступенів захисту З у мережі за рис.16.1,а.

3) При виборі *струмів спрацьовування перших ступенів* захистів розглядалися умови відбудовування від:

А) потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції, - для всіх захистів;

Б) потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при каскадному відключенні замикання на землю

однієї фази, на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист, - для захистів паралельних ліній 5 (6) і 7 (8);

В) кидка намагнічуючого струму трансформаторів і автотрансформаторів у режимі одностороннього живлення *n/ст.Б* - для захистів 1 і 4 і кидка намагнічуючого струму трансформатора на відгалуженні - для захистів 5 (6) і 7 (8).

Умова відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодноразовому включенні фаз вимикача, приймалася нерозрахованою у зв'язку з наявністю трьох з'єднань між живлячими системами й тому не розглядалася.

Розрахунки струмів спрацьовування перших ступенів захистів за умовами п.А і п.Б проводилися за виразом (10.1).

Розрахунки струмів спрацьовування перших ступенів захистів 1, 4, 5 (6) і 7 (8) за умовою п.В проводилися відповідно до вказівок додатку VI за виразом (ДVI.10).

При цьому приймалося, що магнітопроводи автотрансформаторів і трансформаторів виготовлені з холоднокатаної сталі, питомий активний опір ліній $r_{\text{ном}} = 0,08 \text{ Ом/км}$, розрахунковий час спрацьовування реле струму $t = 0,06 \text{ с}$.

Для перших ступенів всіх захистів розрахунковою виявилася умова відбудовування від замикання на землю на шинах протилежної підстанції.

4) При виборі *струмів спрацьовування других ступенів* захистів розглядалися наступні умови:

А) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю за автотрансформатором *n/ст.Б* на стороні 110 кВ - для захистів 1 і 4;

Б) узгодження з першим ступенем захисту попередньої лінії - для всіх захистів; при цьому враховувалося, що для захистів 1 і 4 умова узгодження із захистом лінії $n/см.Б - n/см.Г$ не є розрахунковою;

В) узгодження з першим ступенем захисту, установленим на протилежному кінці паралельної лінії, - для захистів 5 (6) і 7 (8).

Г) відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів на відгалуженнях - для захистів 3 і 5 (6), що мають прискорення при включенні вимикача.

Розрахунки струмів спрацьовування захистів 1 і 4 за умовою п.Б проводилися за виразом (10.3). Розглянута умова виявилася розрахунковою для другого ступеня захисту 4.

Розрахунки струмів спрацьовування других ступенів захистів за умовою п.Б для захистів 1, 4, 5 (6) і 7 (8) проводилися за виразом (10.5), при цьому значення $k_{стр}$ у даних і далі у всіх аналогічних випадках розраховувалися за значеннями струмів КЗ, наведеними у табл.16.3. Для других ступенів захистів 2 і 3 розрахунки проводилися за виразом (10.4), при цьому струм $3I_{розр}$ визначався графічно, як показано на рис.16.3 і рис.16.4.

Умова узгодження з першим ступенем захисту попередньої лінії виявилася розрахунковою для других ступенів захистів 1, 2 і 3.

Розрахунки струму спрацьовування другого ступеня захисту 7 (8) за умовою п.В проводилися за виразом (10.5), а другого ступеня захисту 5 (6) - за виразом (10.1), у якому $3I_{0з}$ - максимальне значення періодичної складової потроєного початкового струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при каскадному відключенні замикання на землю поблизу шин $n/см.В$ на паралельній лінії.

Умова п.В виявилася розрахунковою для досліджуваних других ступенів.

Однак подальші розрахунки показали, що обрані в такий спосіб другі ступені захистів паралельних ліній, як і обрані за умовою узгодження з ними треті ступені, недостатньо чутливі до замикань на шинах протилежної підстанції.

Для підвищення чутливості захистів і зменшення часу відключення ушкодження (рис.16.5) на паралельних лініях $n/ст.А$ - $n/ст.В$ вирішено використовувати струмовий поперечний спрямований захист, що забезпечує відключення в каскаді КЗ на землю в будь якій точці лінії без витримки часу.

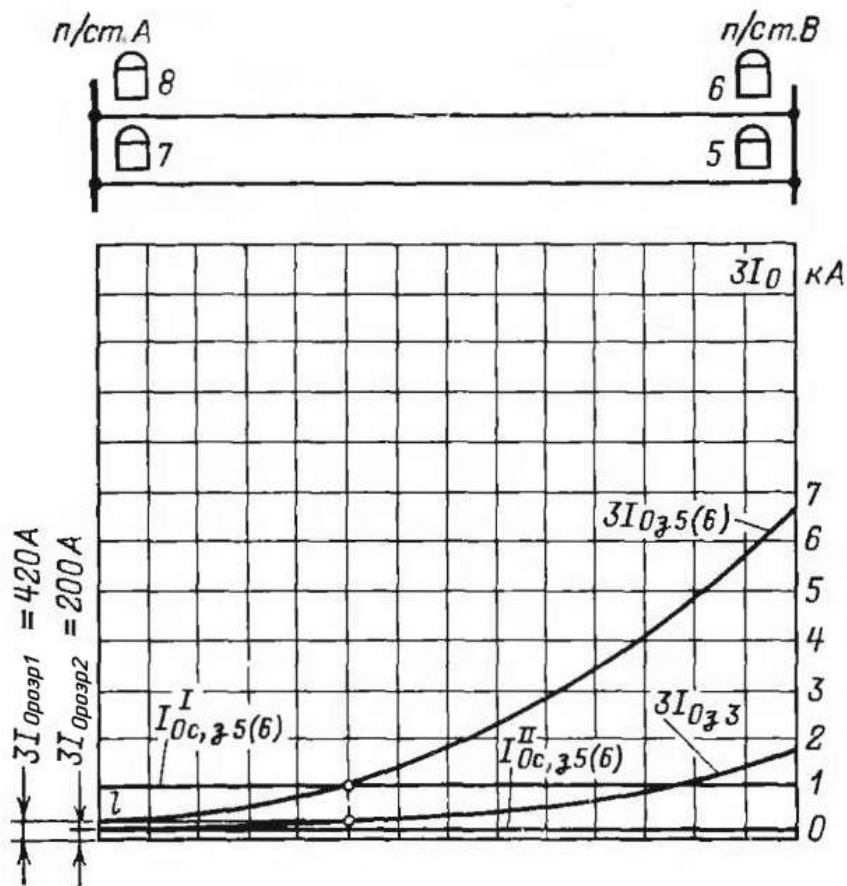


Рис.16.5. Захищені зони перших і других ступенів захистів 5 (6) і 7 (8) у мережі за рис.16.1,.а.

У зв'язку із зазначеним умов узгодження струмів спрацьовування других ступенів розглянутих захистів зі струмом спрацьовування першого ступеня захисту, установленого на протилежному кінці паралельної лінії, відпала.

Відбудовування других ступенів захистів 3 і 5 (6) за умовою п.Г проводилося за виразом (ДVI.10).

Остаточню струм спрацьовування другого ступеня захисту 5 (6) був обраний за умовою відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформатора на відгалуженні, а струм спрацьовування другого ступеня захисту 7 (8) - за умовою узгодження з першим ступенем захисту 5 (6), оскільки при цьому забезпечуються необхідний коефіцієнт чутливості й селективність дії захисту при виводі з роботи струмового поперечного спрямованого захисту.

5) При виборі *струмів спрацьовування третіх ступенів* захистів розглядалися наступні умови:

А) узгодження із другим ступенем захисту попередньої лінії - для всіх захистів;

Б) узгодження з першим ступенем захисту автотрансформатора *п/ст.Б*, установленим на стороні 110 кВ, - для захисту 1; узгодження із другим ступенем зазначеного захисту автотрансформатора - для захисту 4;

В) відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів (автотрансформаторів) - для захистів 1, 4 і 7 (8), що мають прискорення при включенні вимикача;

Г) відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах підстанцій, що примикають до ділянки паралельних ліній, яка захищається, - для захистів 5 (6) і 7 (8), треті ступені яких виконуються з контролем напряду потужності в паралельній лінії (використовується струмовий поперечний спрямований захист).

Розрахунки струмів спрацьовування третіх ступенів захистів за умовами п.А і п.Б для захистів 1, 4, 5 (6) і 7 (8) проводилися за виразом (10.5), а для захистів 2 і 3 - за виразом (10.4) графічно, як показано на

рис.16.3 і рис.16.4. Умова п.А виявилася розрахунковою для третіх ступенів захистів 2, 3 і 7 (8). Узгодження захистів 5, 6, 7 і 8 із другим ступенем захисту, установленим на протилежному кінці паралельної лінії, не приймалося за розрахункове у зв'язку з використанням на цих лініях струмового поперечного спрямованого захисту.

Розрахунки струму спрацьовування третіх ступенів захистів 1, 4 і 7 (8) за умовою п.В проводилися за виразом (ДVI.10) Дана умова виявилася розрахунковою для третіх ступенів захистів 1 і 4. Однак, щоб уникнути закругіння, час дії третіх ступенів цих захистів по ланцюгу прискорення приймається рівним 0,15 с (більше максимального часу різночасності включення фаз вимикачів), що дає можливість не враховувати розглянуту умову й вибрати струм спрацьовування третього ступеня захисту 1 за умовою узгодження з першим ступенем захисту автотрансформатора *п/ст.Б*, установленим на стороні 110 кВ, а третього ступеня захисту 4 - за умовою узгодження із другим ступенем зазначеного захисту.

Розрахунки струму спрацьовування третіх ступенів захистів 5 (6) і 7 (8) проводилися за виразом (10.7) з урахуванням вираження (10.8) Дана умова виявилася розрахунковою для третього ступеня захисту 5 (6); відбудовування її за умовою п.В не проводилося, щоб уникнути зайвого закругіння з припущення, що поперечний струмовий спрямований захист виконується з витримкою часу.

6) При виборі *струмів спрацьовування четвертих ступенів* захистів розглядалися умови відбудовування їх від струмів небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами за трансформаторами підстанцій, що примикають до кінців ліній, - для захистів 1 - 4 і за трансформаторами відгалужень - для захистів 3, 4, 5 (6) і 7 (8). Відповідно до рекомендацій глави 10 п.10-8 струм спрацьовування четвертих ступенів захистів 1, 2, 5 (6) і 7 (8) прийнятий рівним 60 А за

умовою відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму в максимальному навантажувальному режимі.

7) *Витримки часу захистів* визначені в такий спосіб:

А) перші ступені всіх захистів виконані без витримки часу;

Б) витримки часу других ступенів усіх захистів погоджені із часом спрацьовування перших ступенів захистів попередніх ліній з урахуванням часу спрацьовування пристрою резервування при відмові вимикачів (ПРВВ), встановленого на шинах протилежної підстанції;

В) витримки часу третіх ступенів захистів 2, 3, 5 (6) і 7 (8) погоджені з витримками часу других ступенів захистів попередніх ліній; витримки часу других ступенів захистів 1 і 4 погоджені з витримкою часу відповідно першого й другого ступенів захисту від замикань на землю, встановленого на стороні 110 кВ автотрансформатора *п/ст.Б*;

Г) витримка часу четвертого ступеня захисту 4 узгоджена з витримкою часу третього ступеня захисту 2 попередньої лінії; витримки часу четвертих ступенів захистів 1, 2, 3, 5 (6) і 7 (8) повинні бути обрані за умовою узгодження з останніми ступенями захистів попередніх елементів (у табл.16.4 не приводяться).

8) *Реле напрямку потужності* передбачені у всіх захистах.

Питання про необхідність виконання окремих ступенів спрямованими вирішувалося відповідно до рекомендацій глави 10, п.10-10, при цьому четверті ступені захистів 2, 4 і 7 (8) прийняті спрямованими умовно з припущення, що їх витримки часу менші, ніж витримки часу четвертих ступенів захистів - відповідно 1, 3 і 5 (6).

9) Для оцінки *чутливості реле струму* захистів у табл.16.4 наведені розрахункові умови, розрахункові режими й значення коефіцієнтів чутливості. Як видно з табл.16.4, вимогам чутливості не задовольняють тільки четверті ступені захистів 3 і 5 (6) при замиканнях на землю

наприкінці зони резервування. Розглянуті КЗ повинні ліквідуватися в каскаді - після відключення елементів систем відповідно *СII* й *CI*.

Захист 2 при замиканні на землю наприкінці зони резервування не спрацьовує (струм $3I_0$ у місці її установки досить малий і потужність КЗ спрямована до шин), розглянуте замикання на землю повинне ліквідуватися в каскаді - після відключення неушкодженої паралельної лінії *n/см.А* - *n/см.В* і елементів системи *CI*.

Для оцінки чутливості реле напряму потужності захистів у табл.16.5 наведені розрахункові умови, розрахункові режими й значення коефіцієнтів чутливості.

Таблиця 16.5

Перевірка чутливості реле напряму потужності, що спрацьовує при напрямі потужності КЗ у лінію захистів мережі, за рис.16.1,а

№ захисту	Умова перевірки чутливості	Розрахунковий режим		Струм і напруга на реле в місці установки захисту		$k_{ч.л} = \frac{(3I_{0з} 3U_{0з})_{\min}}{K_I K_U S_{с.р}}$
		для $3I_0$	для $3U_0$	$3I_{0з\min}$, А	$3U_{0з\min}$, В	
2	Замикання на землю на шинах <i>n/см.А</i>	II-1-6	III-5	465	12250	$\frac{465 \cdot 12250}{1000 / 5 \cdot 1270 \cdot 1,5} = 15,0$
4	Каскадне відключення замикання поблизу шин <i>n/см.А</i>	II'-2 _к -4-8	1-2 _к	140	4450	$\frac{140 \cdot 4450}{1000 / 5 \cdot 1270 \cdot 1,5} = 1,63$
7 (8)	Каскадне відключення замикання поблизу шин <i>n/см.В</i>	IV'-1-3 _к -6	1-3 _к	87	952	$\frac{87 \cdot 952}{1000 / 5 \cdot 1270 \cdot 1,5} = 0,22$

Примітки: 1. Позначення режимів дано в табл.16.2.

2. Коефіцієнти трансформації $K_I = 1000 / 5$, $K_U = 220000 / (\sqrt{3} \cdot 100) = 1270$.

3. У всіх захистах використовується реле напряму потужності комплексу КЗ-10 панелі ЕПЗ-1636-67, потужність спрацьовування якого $S_{с.р} = 1,5$ ВА.

Перевірка чутливості реле напряду потужності захисту 2 проводилася для випадку замикання на землю на шинах протилежної підстанції (передбачалося, що при каскадному відключенні КЗ у зоні резервування чутливість цього реле забезпечується); для інших захистів зазначена перевірка чутливості проводилася для випадку замикання на землю наприкінці зони резервування. Як видно з табл.16.5, реле напряду потужності захисту 7 (8) не задовольняє вимогам чутливості, тому в зазначеному захисті для четвертого ступеня використовується блокувальне реле напряду потужності (що розмикає ланцюг захисту при напрямі потужності КЗ до шин). При такому виконанні четвертого ступеня захисту слід перевірити умову забезпечення правильної дії реле напряду потужності при замиканні на землю в напрямі, протилежному тому, який захищається (узгодження за чутливістю реле струму й реле напряду потужності) відповідно до вказівок додатку VII.

Відповідно до вказівок додатку VII, п.5 перевірка проводиться при каскадному відключенні замикання на землю на протилежному кінці паралельної лінії.

Визначається значення первинної напруги на реле:

$$3U_{0з} = \frac{3I_{0,7-1}}{3I_{0,6-1}} I_{0с.з} Z_{0сІ} = 0,69 \cdot 60 \cdot 4,2 = 174 \text{ В},$$

де відношення $3I_{0,7-1}/3I_{0,6-1}$ визначається на підставі схеми заміщення за рис.16.1,в у режимі І-2-4_к.

Вторинна напруга на реле

$$U_{0р} = \frac{3U_{0з}}{K_U} = \frac{174}{1270} = 0,137 \text{ В}.$$

У захисті використовується реле напряду потужності типу РБМ-178/1, окремо встановлене на панелі ЕПЗ-1636-67, потужність спрацьовування якого $S_{0с.р} = 1 \text{ ВА}$.

Напруга спрацьовування цього реле при вторинному струмі

$$I_{0c.p} = \frac{60 \cdot 5}{1000} = 0,3 \text{ A}$$

рівна

$$U_{0c.p} = \frac{S_{0c.p}}{I_{0c.p}} = \frac{1}{0,3} = 3,3 \text{ В.}$$

Отже, у досліджуваному випадку при використанні блокувального реле напряму потужності можлива дія захисту неушкодженої лінії на даному кінці. Зазначене при відмові захисту 8 (7) не є неселективною дією, оскільки інакше повинен відключатися вимикач неушкодженої лінії із протилежного кінця.

Перевіряється умова правильної дії блокувального реле напряму потужності захисту 7 (8) при зовнішньому КЗ у напрямі, протилежному тому, який захищається, у режимі, коли паралельна лінія відключена й заземлена по обидва боки, за виразом (Д.VII.9):

$$3U_{0з} \geq \frac{k_{відб} S_{0c.p} K_U 3I_{0з}}{I_{0c.p}^2 K_I} = \frac{1,1 \cdot 1 \cdot 1270 \cdot 822}{0,3^2 \cdot 1000 / 5} = 64000 \text{ В.}$$

Значення $3U_{0з}$ і $3I_{0з}$ визначаються на підставі схеми заміщення рис.16.1,в у режимі І'-2-40-8 при замиканні на землю в точці KI :

$$3U_{0з} = (3I_{0,8-4} z_{0cII} + 3I_{0,5-1} z_{0лA-B}) = 615 \cdot 26,5 + 822 \cdot 132 = 124800 \text{ В;}$$

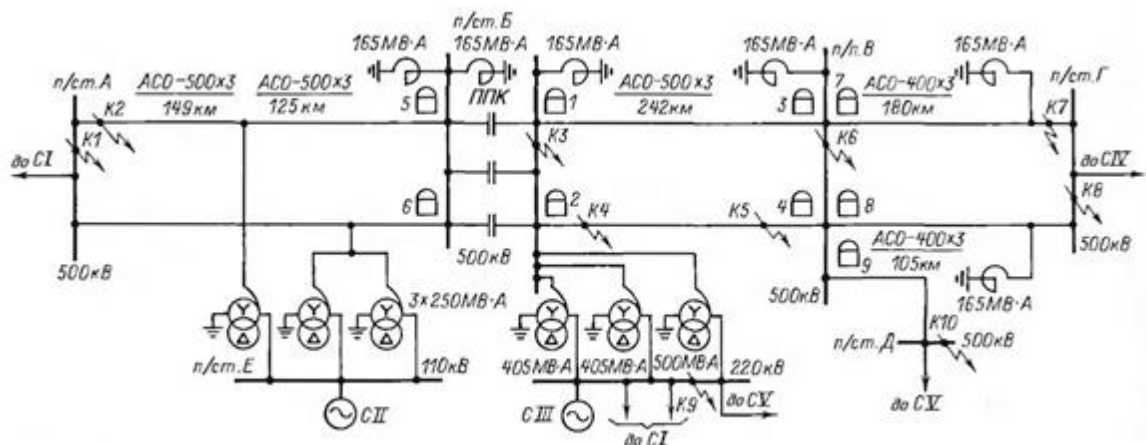
$$3I_{0з} = 3I_{0,5-1} = 822 \text{ А;}$$

$$3U_{0з} = 124800 > 64000 \text{ В.}$$

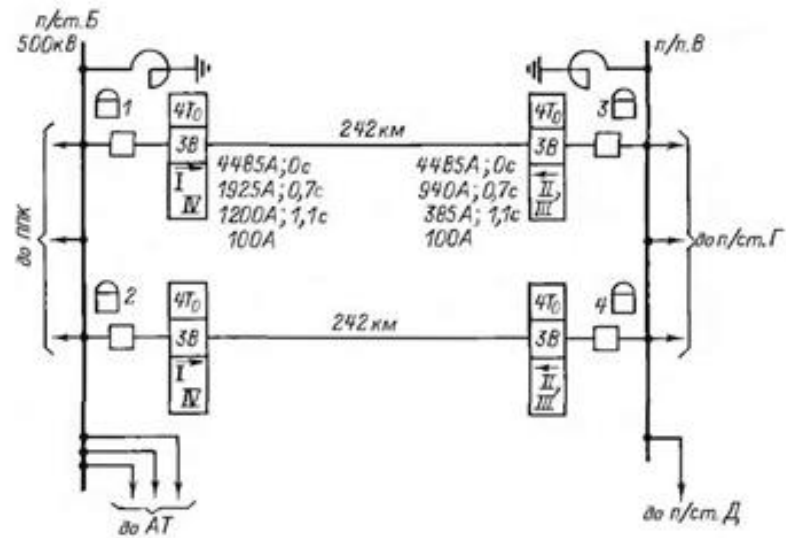
Таким чином, спрямованість захисту 7 (8) забезпечується.

16-2. 1) Нижче наведені розрахунки струмових спрямованих і неспрямованих захистів нульової послідовності зі східчастою характеристикою витримки часу, установлених на паралельних лініях 500 кВ.

Вихідна схема мережі й схема розміщення захистів дані на рис.16.6.

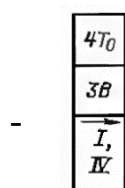


а)



б)

Рис.16.6. Вихідна схема мережі й схема розміщення захистів для п.16-2:
а – вихідна схема; б – схема розміщення захистів;



чотириступінчастий струмовий захист
нульової послідовності зі спрямованими I і IV ступенями.

Схеми заміщення прямої (зворотної) та нульової послідовностей -
на рис.16.7 і рис.16.8.

Таблиця 16.6

Параметри спрацьовування захистів ліній, суміжних з паралельними лініями ділянки *п/ст.Б* - *п/ст.В* мережі за рис.16.6,а

№ захисту	Струм спрацьовування, А, для ступенів			Витримка часу, с, для ступенів		
	I	II	III	I	II	III
5 (6)	5250	1210	760	0	0,7	1,1
7 (8)	3560	970	400	0	0,7	1,1
9	3360	1600	520	0,1	0,7	1,1

На паралельних лініях *п/ст.Б* - *п/ст.В*, а також на суміжних з ними лініях використовуються пристрої ОАПВ.

Позначення розрахункових режимів мережі наведено в табл.16.7.

Таблиця 16.7

Позначення розрахункових режимів мережі за рис.16.6,а

Режим	Характеристика розрахункових режимів
I	Максимальний режим: включені всі генеруючі потужності, автотрансформатори, лінії. Ємнісний опір ППК на <i>п/ст.Б</i> $x_c = -37$ Ом
II	Мінімальний режим: на станціях систем <i>CI</i> , <i>CIV</i> і <i>CV</i> відключена частина генеруючої потужності. Ємнісний опір ППК на <i>п/ст.Б</i> $x_c = -37$ Ом
1	Відключено один міст ППК на <i>п/ст.Б</i> , $x_c = -55$ Ом
2	ППК на <i>п/ст.Б</i> зашунтований, $x_c = 0$
3	Відключена одна лінія <i>п/ст.А</i> - <i>п/ст.Б</i> (із двома трансформаторами на відгалуженні)
4	Відключено одна лінія <i>п/ст.Б</i> - <i>п/ст.В</i>
5	Відключено одна лінія <i>п/ст.В</i> - <i>п/ст.Г</i>
6	Відключено одна лінія <i>п/ст.В</i> - <i>п/ст.Д</i>
7	Відключений автотрансформатор потужністю 3*167 МВА на <i>п/ст.Б</i>
8	Відключено два автотрансформатори на <i>п/ст.Е</i> , що живляться від однієї з ліній ділянки <i>п/ст.А</i> - <i>п/ст.Б</i>

Примітки: 1. Режими каскадного відключення ліній позначаються додаванням індексу «к».

2. Режим заземлення відключеної лінії із двох сторін позначається додаванням індексу «0».

Розрахунки струмів КЗ виконані на ЕОМ в обсязі, необхідному для вибору уставок і перевірки чутливості захистів, і проведені для початкового моменту часу. Розрахунки виконані з урахуванням значень ЕРС і опорів живлячих систем, що відповідають попередньому

навантажувальному режиму, і ємнісної провідності ліній; з метою спрощення активні складові опорів не враховувалися. Результати розрахунків струмів КЗ, використовувані в даному прикладі, наведені в табл.16.8, потроєні струми нульової послідовності, що проходять по лініях у неповнофазних режимах роботи, - у табл.16.9.

Таблиця 16.8

Результати розрахунків струмів КЗ мережі за рис.16.6,а

Точка КЗ	K1	K2	K3	K4	K5	
Режим	I-1-4 ₀ -7	II-3 _к	II-5 ₀	II-1-4 _к -6	II-4 _к -7	I-4 _к -7
$x_{1\Sigma}$, Ом	14,9	95,5	23,9	104	91	87
$x_{0\Sigma}$, Ом	28,5	271	30,4	288	263	253
$3I_0$, А, у вітці:						
2-1	361	-	-	-	-	-
6-5	-	-	-	1824	-	-
6-4	142	119	850	-	-	626
3-5	-	-	-	-	2200	2433
3-4	-	-	-	831	-	-
6-7	-	-	-	-	-	-
6-8	-	-	-	-	-	-

Закінчення табл.16.8

Точка КЗ	K6	K7	K8	K9	K10
Режим	II-3 ₀ -7	II-5 _к	I-1-4 ₀ -6	I-1-6	II-1-4 ₀
$x_{1\Sigma}$, Ом	23,6	83,2	14,1	15,8	31,3
$x_{0\Sigma}$, Ом	48,4	180,5	11,4	20,5	37,6
$3I_0$, А, у вітці:					
2-1	-	-	-	-	-
6-5	-	-	-	-	-
6-4	-	-	-	540	-
3-5	-	-	-	-	-
3-4	1570	255	399	-	591
6-7	-	-	873	-	-
6-8	-	-	-	-	1779

Примітка:1. Струми приведено до напруги 500 кВ і спрямовані від вузла, позначеного першою цифрою, до вузла, позначеного другою цифрою.

2. Позначення режимів дано в табл.16.7.

3. При КЗ у точці K9 у режимі I-2-4 струм $I_{4-3}^{(3)} = 1480$ А, а струм $I_{6-4}^{(3)} = 1430$ А.

**Результати розрахунків неповнофазних режимів ліній мережі за
рис.16.6,а**

Неповнофазний режим на одній з ліній ділянки	Розрахунковий режим	Захист	3I ₀ , А, у режимі	
			однофазному	двофазному
n/ст.А - n/ст.Б	I-1-30	5 (6)	-	3210
		3 (4)	-	347
n/ст.Б - n/н.В	I-1-40-6	1 (2), 3 (4)	3450	1900
n/н.В - n/ст.Г	I-1-50-6	7 (8)	3240	1950
		1 (2)	-	920

Примітки: 1. Струми приведено до напруги 500 кВ.

2. Розрахунковий зсув фаз між еквівалентними ЕРС приймався рівним:

180° - для однофазного режиму (виникаючого при неодноточасному включенні фаз вимикача) і 120° - для двофазного режиму (виникаючого в циклі ОАПВ на попередній лінії або лінії, що захищається).

3. Позначення режимів дано в табл.16.7.

2) Вибір струмів спрацьовування й витримок часу захистів паралельних ліній n/ст.Б - n/н.В, а також перевірка чутливості реле струму захистів наведені в табл.16.10 (тільки умови, що є розрахунковими).

**Вибір параметрів і перевірка чутливості захистів мережі за
рис.16.6,а**

Назва лінії	Місце установки захисту	№ захисту	Ступінь захисту	Тип захисту	Вибір параметрів спрацьовування захисту
					Умови вибору струму спрацьовування
<i>n/см.Б - n/n.В</i>	<i>n/см.Б</i>	1 (2)	I	Струмовий спрямований	Відбудування від $3I_0$ у короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача
			II	Струмовий	Узгодження з I ступенем захисту 7(8)
			III	Струмовий	Відбудування від $3I_0$ у неповнофазному режимі, що виникає в безструмову паузу ОАПВ на лінії <i>n/n.В - n/см.Г</i>
			IV	Струмовий спрямований	Відбудування від $3I_{нб}$ в нульовому проводі ТТ у навантажувальному режимі
	<i>n/n.В</i>	3 (4)	I	Струмовий	Відбудування від $3I_0$ у короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача
			II	Струмовий спрямований	Узгодження з I ступенем захисту 5(6)
			III	Струмовий спрямований	Узгодження з II ступенем захисту 5(6)
			IV	Струмовий	Відбудування від $3I_{нб}$ в нульовому проводі ТТ у навантажувальному режимі

№ захисту	Вибір параметрів спрацьовування захисту				
	Розрах. режим	Розрахунковий струм спрацьовування, А	Прийнятий $I_{0с.з}$	Умова вибору витримки часу, з	Витримка часу, с
1 (2)	I-4-4 ₀ -6	$I'_{0с.з} = k_{відб} 3I_{0неп} = 1,3 \cdot 3450 = 4485$	4485	-	Без витримки часу
	I-1-4 ₀ -6	$I''_{0с.з} = k_{відб} 3I_{0розр} = 1,1 \cdot 1750 = 1925$	1925	Узгодження з I ступенем захисту 7 (8) з урахуванням спрацьовування ПРВВ	0,7
	I-1-5 ₀ -6	$I'''_{0с.з} = k_{відб} 3I_{0неп} = 1,3 \cdot 920 = 1190$	1200	Узгодження з II ступенем захисту 7 (8) і 4 (3) і II ступенем захисту від замикань на землю на стороні СН АТ <i>n/см.Б</i>	1,1
	-	-	100	Узгодження з останніми ступенями захистів попередніх ліній	-
3 (4)	I-1-4 ₀ -6	$I'_{0с.з} = k_{відб} 3I_{0неп} = 1,3 \cdot 3450 = 4485$	4485	-	Без витримки часу
	I-2-4 ₀ -7	$I''_{0с.з} = k_{відб} 3I_{0розр1} = 1,1 \cdot 850 = 935$	940	Узгодження з I ступенем захисту 5 (6) з урахуванням спрацьовування ПРВВ	0,7
	I-1-4 ₀ -7	$I'''_{0с.з} = k_{відб} 3I_{0розр2} = 1,1 \cdot 350 = 385$	385	Узгодження з II ступенем захисту 5 (6) і 2 (1)	1,1
	-	-	100	Узгодження з останніми ступенями захистів попередніх елементів	-

№ захисту	Перевірка чутливості реле		
	Умова перевірки чутливості	Розрах. режим	$k_{ч.с} = \frac{3I_{03\min}}{I_{0с.з}}$
1 (2)	-	-	-
	Каскадне відключення замикання на землю однієї фази на ділянці $n/см.Б - n/n.В$ поблизу шин $n/n.В$	II-4 _к -7	$\frac{2200}{1925} = 1,14$
	Замикання на землю однієї фази на шинах $n/n.В$	II-3 ₀ -7	$\frac{1570}{1200} = 1,31$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії $n/n.В - n/см.Г$ поблизу шин $n/см.Г$	II-5 _к	$\frac{255}{100} = 2,55$
3 (4)	-	-	-
	Каскадне відключення замикання на землю однієї фази на лінії $n/см.Б - n/n.В$ поблизу шин $n/см.Б$	II-1-4 _к -6	$\frac{1824}{940} = 1,94$
	Замикання на землю однієї фази на шинах $n/см.Б$	II-5 ₀	$\frac{850}{385} = 2,2$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії $n/см.Б - n/см.А$ поблизу шин $n/см.А$	II-3 _к	$\frac{119}{100} = 1,19$

На рис.16.9 і 16.10 наведені криві зміни потроєних струмів нульової послідовності, що проходять через розглянуті захисти при замиканнях на землю в розрахунковому режимі, відповідні криві повних струмів через ППК, а також струми спрацьовування перших і других ступенів захистів 7 (8) і 5 (6), необхідні для вибору струмів спрацьовування других і третіх ступенів захистів 1 (2) і 3 (4).

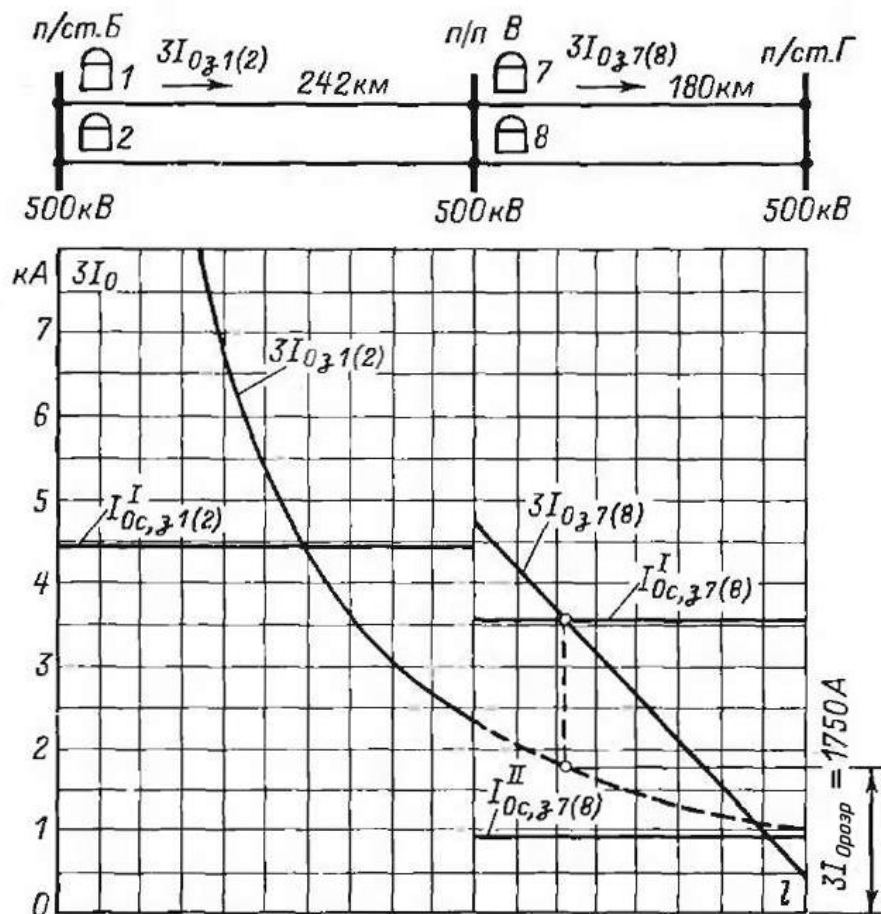


Рис.16.9 Криві струмів $3I_{0z}$, що проходять через захисти 1 (2) і 7 (8) мережі за рис.16.6,а при замиканнях на землю однієї фази, і струми спрацьовування захистів 1 (2) і 7 (8).

$3I_{0z1(2)}$ і $3I_{0z7(8)}$ - потроєні струми нульової послідовності, що проходять відповідно через захисти 1 (2) і 7 (8) при замиканнях на землю однієї фази в режимі I-1-4₀-6;

$I_{0c,z1(2)}^I$ і $I_{0c,z7(8)}^I$ - струми спрацьовування перших ступенів захистів відповідно 1 (2) і 7 (8);

$I_{0c,z7(8)}^{II}$ - струм спрацьовування другого ступеня захисту 7 (8);

$3I_{0розр}$ - розрахунковий струм для визначення струму спрацьовування другого ступеня захисту 1 (2).

Примітка. Позначення режимів дано в табл.16.7.

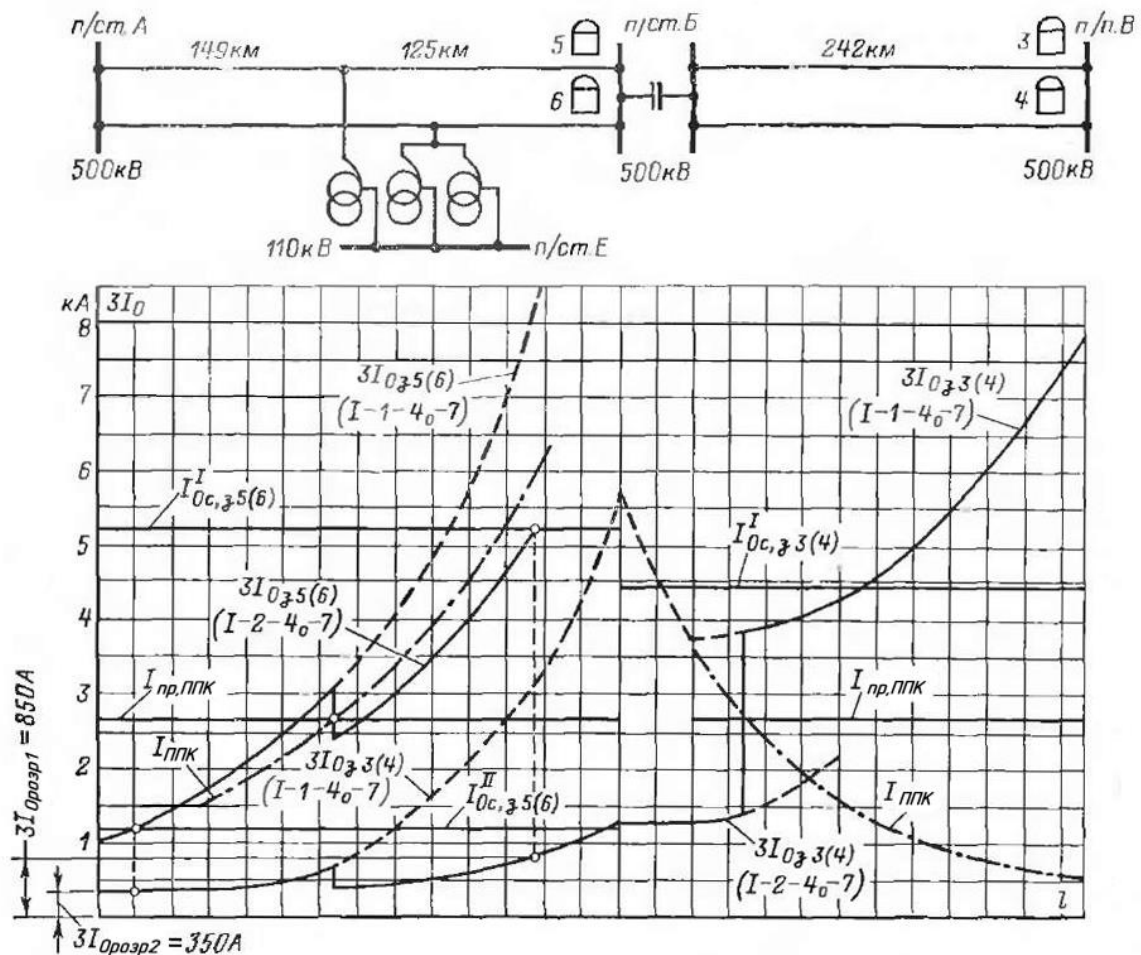


Рис.16.10. Криві струмів $3I_{0з}$, що проходять через захисти 3 (4) і 5 (6) і ППК мережі за рис.16.6,а при замиканнях на землю однієї фази, і струми спрацьовування захистів 3 (4) і 5 (6).

Примітка. Позначення режимів дано в табл.16.7.

3) Струм спрацьовування перших ступенів захистів 1 (2) і 3 (4) вибирався за умовами відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту:

А) у короткочасному неповнофазному режимі, що виникає при неодноразовому включенні фаз вимикача,- за виразом (10.2);

Б) при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції у випадку, коли друга паралельна лінія відключена й заземлена на обох кінцях, - за виразом (10.1);

В) при каскадному відключенні замикання на землю однієї фази на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій встановлений розглянутий захист,- за виразом (10.1).

Для перших ступенів захистів 1 (2) і 3 (4) розрахунковим виявилося відбудовування від короткочасного неповнофазного режиму, що виникає при неодночасному включенні фаз вимикача.

4) *Струм спрацьовування других ступенів* захистів вибирався за умовами:

А) відбудовування від потроєного струму нульовий послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю за автотрансформатором *п/ст.Б* на стороні 220 кВ, за виразом (3) - — для захисту 3 (4);

Б) узгодження з першим ступенем захисту попередньої лінії - за виразом (10.4), у якому значення струму $3I_{0\text{розр}}$ визначалися графічно, як показано на рис.16.9 і рис.16.10;

В) узгодження з першим ступенем захисту, установленим на протилежному кінці паралельної лінії, - за виразом (10.5);

Г) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає в безструмову паузу ОАПВ на попередній лінії та на лінії, що захищається, - за виразом (10.2).

Струм спрацьовування другого ступеня захисту 1 (2) спочатку визначався за його розрахунковою умовою узгодження зі струмом спрацьовування першого ступеня захисту, установленого на протилежному кінці паралельної лінії, при каскадному відключенні останньої. Однак, як показали подальші розрахунки, обраний в такий спосіб другий ступінь захисту 1 (2) недостатньо чутливий ($k_{\text{ч.с}} < 1$) до замикання на землю однієї фази в кінці лінії, яка захищається, в режимі каскадного її відключення.

З метою підвищення чутливості на паралельних лініях *п/ст.Б* - *п/п.В* вирішено використовувати струмовий поперечний спрямований захист. У зв'язку із цим умова п.В відпала й струм спрацьовування других

ступенів захистів 1 (2) і 3 (4) був обраний за умовою узгодження зі струмом спрацьовування першого ступеня захисту попередньої ділянки.

Щоб уникнути зайвого загроbinня другий ступінь захисту 3 (4), не відбудований від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає в безструмову паузу циклу ОАПВ на лінії, що захищається, повинен виводитися з роботи в зазначеному режимі.

5) *Струм спрацьовування третіх ступенів* захистів вибирався за умовами:

А) узгодження із другим ступенем захисту попередньої лінії - за виразом (10.4), у якому значення струму $3I_{0розр}$ визначалися графічно (рис.16.9 і рис.16.10);

Б) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає в безструмову паузу ОАПВ на попередній лінії та лінії, що захищається, - за виразом (10.2);

В) відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах низької напруги $n/ст.Б$ - за виразом (10.7) з урахуванням виразу (10.8).

Струм спрацьовування третього ступеня захисту 1 (2) був обраний за умовою відбудовування від неповнофазного режиму, що виникає в безструмову паузу ОАПВ на ділянці $n/n.В$ - $n/ст.Г$, а третього ступеня захисту 3 (4) - за умовою узгодження із другим ступенем захисту 5 (6).

Треті ступені захистів 1 (2) і 3 (4), не відбудовані за струмом спрацьовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту в неповнофазному режимі, що виникає в безструмову паузу циклу ОАПВ на ділянці, що захищається, і за часом від цієї безструмової паузи, повинні виводитися з роботи в зазначеному режимі.

б) *Струми спрацьовування четвертих ступенів захистів* вибиралися за умовами відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах низької напруги *п/ст.Б* і в навантажувальному режимі.

Розрахунковою виявилася остання умова.

7) *Витримки часу захистів* визначені в такий спосіб:

А) перші ступені захистів виконані без витримки часу;

Б) витримки часу других ступенів узгоджені із часом спрацьовування перших ступенів захистів попередніх ліній з урахуванням часу спрацьовування ПРВВ, встановленого на шинах протилежної підстанції;

В) витримки часу третіх ступенів захистів узгоджені з витримками часу других ступенів захистів попередніх ділянок;

Г) витримки часу четвертих ступенів захистів повинні бути обрані за умовою узгодження з останніми ступенями захистів попередніх елементів (у табл.16.10 не приводяться).

8) *Реле напрямку потужності* передбачені в обох розглянутих захистах. Питання про необхідність виконання окремих ступенів спрямованими вирішувалося відповідно до рекомендацій глави 10, п.10-10. Четвертий ступінь захисту 1 (2) умовно прийнятий спрямованим з припущення, що його витримка часу менша витримки часу четвертого ступеня захисту 3 (4).

9) Для *оцінки чутливості реле струму* захистів у табл.16.10 наведені розрахункові умови, розрахункові режими й значення коефіцієнтів чутливості. Перевірка чутливості четвертих ступенів проводилася для випадків:

- каскадного відключення замикання на землю однієї фази поблизу шин підстанції, яка примикає з кінцем попереднього ділянки;

- каскадного відключення замикання на землю однієї фази на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій установлений розглянутий захист.

Умови, які виявилися розрахунковими і, відповідні значення коефіцієнтів чутливості наведені в табл.16.10.

Як видно з табл.16.10, захисти мають достатню чутливість.

Оцінка чутливості реле напряму потужності захисту 1 (2) проводилася для випадку каскадного відключення замикання на землю однієї фази на ділянці $n/n.B - n/ст.Г$ поблизу шин $n/ст.Г$. Струм і напруга в місці установки захисту 1 (2) $3I_{0z\min} = 255 \text{ A}$, $3U_{0z\min} = 21800 \text{ В}$.

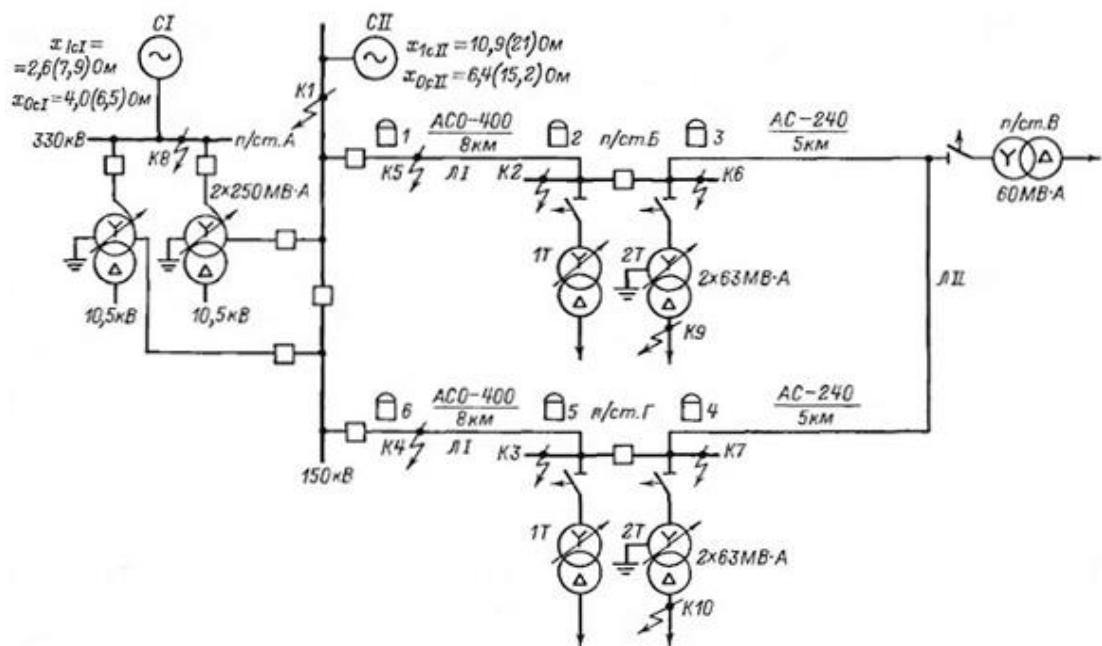
У захисті застосовано реле напряму потужності типу РБМ-278/2, потужність спрацьовування якого $S_{c.p} = 0,2 \text{ ВА}$. Коефіцієнти трансформації використовуваних у захисті трансформаторів струму й трансформаторів напруги $K_I = 2000 / 1$; $K_U = \frac{500000}{\sqrt{3} \cdot 100} = 2890$.

Значення коефіцієнта чутливості реле потужності визначається за виразом (15.2)

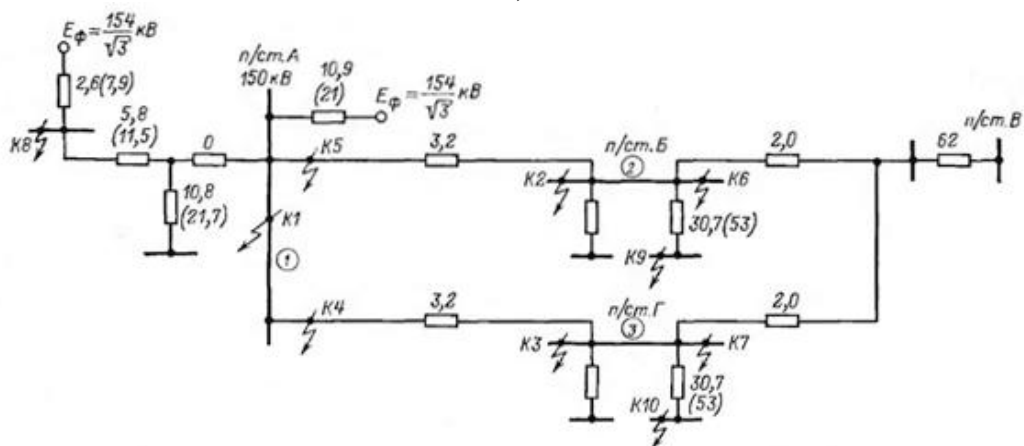
$$k_{ч.п} = \frac{255 \cdot 21800}{2000 \cdot 2890 \cdot 0,2} = 4,8, \text{ тобто реле має високу чутливість.}$$

16-3. 1) Нижче наведені розрахунки струмового спрямованого захисту нульової послідовності від замикань на землю ліній кільцевої мережі 150 кВ із одним джерелом живлення.

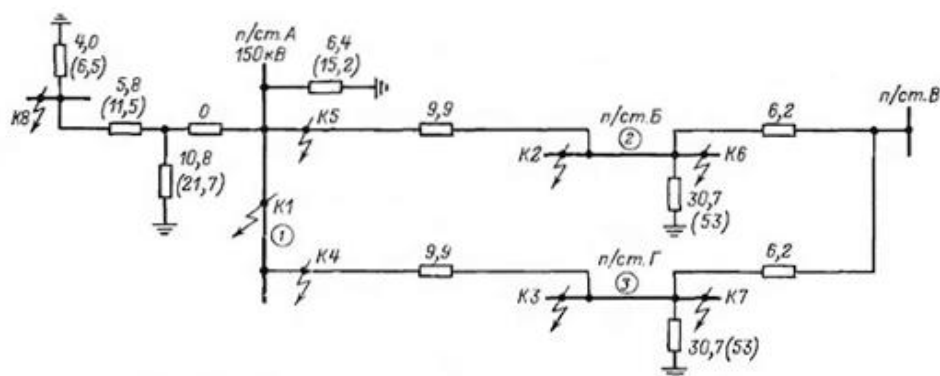
Вихідна схема мережі й схема заміщення прямої (зворотної) і нульової послідовностей наведені на рис.16.11.



а)



б)



в)

Рис.16.11. Розрахункові схеми для п.16-3:

а – вихідна схема; б – схема заміщення прямої (зворотної) послідовності; в – схема заміщення нульової послідовності.

Примітки: 1. Опори в омах приведено до напруги 154 кВ.

2. У дужках дані опори, що відповідають мінімальному режиму системи й максимальній регульованій напрузі трансформаторів і автотрансформаторів.

Захисти встановлені на *н/ст.А*, *Б* і *Г* (рис.16.18). На *н/ст.А* встановлені повітряні вимикачі, на *н/ст.Б* і *Г* масляні вимикачі з пофазними приводами. На стороні 150 кВ живлячої *н/ст.А* передбачене ПРВВ.

Прийнятий режим заземлення нейтралей показаний на рис.16.18; при цьому на *н/ст.Б* і *Г* нейтраль одного із трансформаторів прийнята постійно глухозаземленою.

Питомі індуктивні опори ліній приймалися: $x_{\text{ліній}} = 0,4$ Ом/км; $x_{0\text{ліній}} = 1,24$ Ом/км. Параметри трансформаторів на *н/ст.Б* і *Г* і автотрансформаторів живлячої підстанції наведені в табл.16.11.

Таблиця 16.11

Параметри трансформаторів і автотрансформаторів

Номинальна потужність, МВА	$U_{\text{ном}}$, кВ			u_k , %
	ВН	СН	НН	ВН-НН
63	158 - 8*1,5%	-	6,3	10
	158			10,5
250	158 + 8*1,5%	165	10,5	10,66
	330 ± 2*2,5%			35

Примітки: 1. Значення u_k віднесені до номінальних значень напруг відгалужень і номінальної потужності трансформатора (автотрансформатора).

2. Для автотрансформатора потужністю 250 МВА $u_{\text{кВН-СН}} = 11,3$ %; $u_{\text{кСН-НН}} = 22$ %.

Опори x_{1T} трансформаторів із пристроєм РПН розраховані для двох крайніх положень регулятора.

Через відсутність уточнених заводських даних орієнтовно прийнято, що опір нульової послідовності трансформаторів (автотрансформаторів) дорівнює опору прямої послідовності: $x_{0T} \approx x_{1T}$.

Схема розміщення захистів наведена на рис.16.12, позначення розрахункових режимів мережі – у табл.16.12.

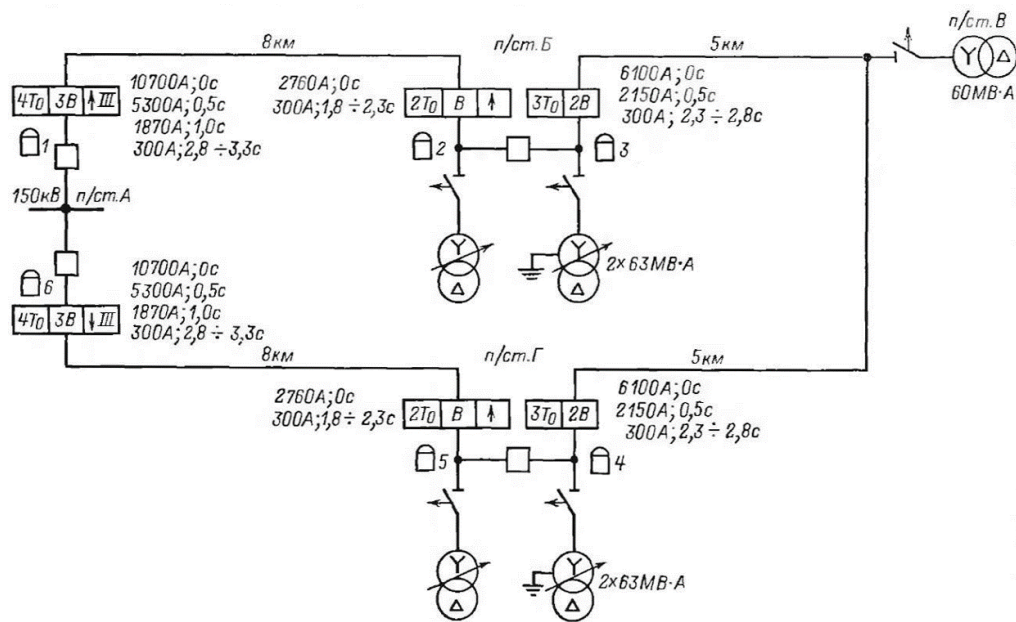
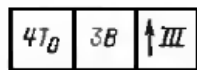


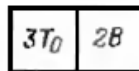
Рис.16.12. Схема розміщення захистів ліній кільцевої мережі за рис.16.11,а.



нульової

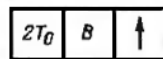
-

спрямований захист



- чотириступінчастий струмовий захист нульової послідовності зі спрямованим ступенем III;

- триступінчастий струмовий захист послідовності;



двоступінчастий струмовий нульової послідовності.

Таблиця 16.12

Позначення розрахункових режимів мережі за рис.16.11,а

Режим	Характеристика розрахункового режиму
I	Максимальний режим роботи систем CI й CII; на n/см.А включені обидва автотрансформатора
II	Мінімальний режим роботи систем CI й CII; на n/см.А включено один автотрансформатор
1	Відключений вимикач 150 кВ на n/см.Г; заземлена нейтраль трансформатора 1Т n/см.Г
2	Відключений вимикач 150 кВ на n/см.Б; заземлена нейтраль трансформатора 1Т n/см.Б
3	Відключений вимикач 150 кВ на n/см.Г; заземлена нейтраль трансформатора 2Т n/см.Г
4	Відключений вимикач 150 кВ на n/см.Б; заземлена нейтраль трансформатора 2Т n/см.Б
5	Відключений вимикач лінії n/см.А – n/см.Г на n/см.А
6	Відключений вимикач лінії n/см.А – n/см.Б на n/см.А

Примітка. Положення регулятора РПН, що відповідають максимальному й мінімальному опорам трансформатора, позначені індексами «1» і «2».

Струми КЗ розраховані в іменованих одиницях для початкового моменту часу в обсязі, необхідному для розрахунків захистів; результати розрахунків зведені в табл.16.13.

Таблиця 16.13

Результати розрахунків струмів КЗ мережі по рис.16.11,а

Точка КЗ	K1			K2			K3		
Режим	I-3 ₂	I-4 ₂	I ₁	I-6 ₂	I-6 ₁	II-2 ₂	I-5 ₂	I-5 ₁	II-1 ₂
$x_{1\Sigma}$, Ом	4,8	4,8	4,8	12	12	13,4	12	12	13,4
$x_{0\Sigma}$, Ом	2,6	2,6	2,66	12,6	15,9	10,2	12,6	15,9	10,2
3I ₀ , А, у вітці:									
1-2	(-2120)	-	-925	-	-	4840	3040	3780	-
2-3	-	-	-	-4300	-4700	-	4300	4700	-
3-1	-	(2120)	925	-3040	-3780	-	-	-	-4840

Продовження табл.16.13

Точка КЗ	K4		K5		K6		
Режим	II-5 ₂	II-5 ₁	II-6 ₂	II-6 ₁	I-1 ₁	II ₂	II-4 ₂ , II-6 ₂
$x_{1\Sigma}$, Ом	20,6	20,6	20,6	20,6	12	13,4	17,4
$x_{0\Sigma}$, Ом	23	26,7	23	26,7	15,9	10,2	13,1
3I ₀ , А, у вітці:							
1-2	-	-	-4160	-3940	-	4840	-
2-3	2380	2680	-2380	-2680	-4700	-	-3200
3-1	4160	3940	-	-	-	-	-2100

Закінчення табл.16.13

Точка КЗ	K7			K8		K9	K10
Режим	I-2 ₁	II ₂	II-3 ₂ , II-5 ₂	I-3 ₂	I-4 ₂	I-1 ₂	I-1 ₂
$x_{1\Sigma}$, Ом	8	12,4	17,4	2,4	2,4	38,7	42,7
$x_{0\Sigma}$, Ом	10,2	8,1	13,1	2,9	2,9	-	-
3I ₀ , А, у вітці:							
1-2	-	930	2100	-1310	-	-	-
2-3	-	2170	3200	-	-	-	-
3-1	-8200	-3750	-	-	1310	-	-

Примітка:1. Струми приведено до напруги 154 кВ і спрямовані від вузла, позначеного першою цифрою, до вузла, позначеного другою цифрою.

2. Позначення режимів дано в табл.16.12.

3. При КЗ у точці $K9$ у режимі I-12 струм $I_{1-2}^{(3)} = 2300$ А , при КЗ у точці $K10$ у режимі I-1₂ струм $I_{1-2}^{(3)} = 2080$ А .

Розрахунки захисту наведені у табл.16.14. У дужках у таблиці дані значення величин, що відносяться до захистів 4, 5 і 6.

Таблиця 16.14

**Вибір параметрів і перевірка чутливості захистів мережі за
рис.16.11,а**

Назва лінії	Місце установки захисту	№ захисту	Ступінь захисту	Тип захисту	Вибір параметрів
					Умова вибору струму спрацьовування
	$n/см.А$	1 (6)	I	Струмовий	Відбудовування від замикання на землю на шинах 150 кВ $n/см.Г$
			II	Струмовий	Узгодження з I ступенем захисту 3 (4)
			III	Струмовий спрямований	Узгодження з II ступенем захисту 3 (4)
					Відбудовування від кидка $I_{нам}$ при включенні трансформаторів із заземленими нейтралями
	$n/см.Б(Г)$	2 (5)	IV	Струмовий спрямований	Відбудовування від $I_{нб}$ при КЗ між трьома фазами за трансформатором $n/см.Б(Г)$
			I	Струмовий спрямований	Відбудовування від замикання на землю на шинах 150 кВ $n/см.А$
			II	Струмовий спрямований	Відбудовування від $I_{нб}$ при КЗ між трьома фазами за трансформатором $n/см.Б(Г)$
					Узгодження з III ступенем захисту 6 (1)
$n/см.Б - n/см.Г$	$n/см.Б(Г)$	3 (4)	I	Струмовий	Відбудовування від замикання на землю на шинах 150 кВ $n/см.Г(Б)$
			II	Струмовий	Узгодження з I ступенем захисту 5 (2)
			III	Струмовий	Відбудовування від $I_{нб}$ при КЗ між трьома фазами за трансформатором $n/см.Г$ і $Б$

№ захисту	Вибір параметрів спрацювання захисту				
	Розрах. режим	Розрахунковий струм спрацювання, А	Прийнятий $I_{0с.з}$	Умова вибору витримки часу, с	Витримка часу, с
1 (6)	I-1 ₁ (I-2 ₁)	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з}^{(1)} = 1,3 \cdot 8200 = 10700$	10700	-	Без витримки часу
	I-1 ₁ (I-2 ₁)	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} k_{сгр} I_{0с.з3(4)}^I = 1,1 \cdot 0,79 \cdot 6100 = 5300$	5300	Узгодження з I ступенем захисту 3 (4)	0,5
	I-1 ₁ (I-2 ₁)	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} k_{сгр} I_{0с.з3(4)}^{II} = 1,1 \cdot 0,79 \cdot 2150 = 1870$	1870	Узгодження з II ступенем захисту 3 (4)	1,0
	I-3 (I-4)	$I_{0с.з}^{III} = \frac{C_{\delta}^{(1)} U_{ном}}{\sqrt{3} x_{розр}^{(1)}} = 1720$ (див.табл.16.15)			
	I-1 ₂	$I_{0с.з}^{IV} = k_{відб} I_{нб} = 1,25 \cdot 0,1 \cdot 2300 = 288$	300	Узгодження з III ступенем захисту 3 (4)	2,8 - 3,3
2 (5)	I-3 ₂ (I-4 ₂)	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з}^{(1,1)} = 1,3 \cdot 2120 = 2760$	2760	-	Без витримки часу
	I-1 ₂ (I-2 ₂)	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} I_{нб} = 1,25 \cdot 0,1 \cdot 2300 = 288$	300	Узгодження з III ступенем захисту 6 (1) і II ступенем захисту авто-трансформатора	1,8 – 2,3
	II-3 ₂ (II-4 ₂)	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} k_{сгр} I_{0с.з6(1)}^{III} = 1,1 \cdot 0,1 \cdot 1870 = 206$			
3 (4)	I-5 ₁ (I-6 ₁)	$I_{0с.з}^I = k_{відб} 3I_{0з}^{(1)} = 1,3 \cdot 4700 = 6100$	6100	-	Без витримки часу
	I-5 ₁ (I-6 ₁)	$I_{0с.з}^{II} = k_{відб} k_{сгр} I_{0с.з5(2)}^I = 1,1 \cdot 0,7 \cdot 2760 = 2125$	2150	Узгодження з I ступенем захисту 5 (2)	0,5
	I-1 ₂ і I-2 ₂	$I_{0с.з}^{III} = k_{відб} I_{нб} = 1,25 \cdot 0,1 \cdot 2080 = 260$	300	Узгодження з II ступенем захисту 5 (2)	2,3 – 2,8

№ захисту	Перевірка чутливості реле		
	Умова перевірки чутливості	Розрах. режим	$k_{ч.с} = \frac{3I_{03min}}{I_{0с.з}}$
1 (6)	-	-	-
	Каскадне відключення замикання на землю однієї фази на ділянці $n/см.А - n/см.Б(Г)$ поблизу шин $n/см.Б(Г)$	II-2 ₂ (II-1 ₂)	$\frac{4840}{5300} = 0,91$
	Замикання на землю на шинах $n/см.Б(Г)$	II ₂	$\frac{3750}{1870} = 2,01$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії $n/см.Б - n/см.Г$ поблизу шин $n/см.Г(Б)$	II-3 ₂ (II-4 ₂)	$\frac{2100}{300} = 7$
2 (5)	Каскадне відключення замикання на землю поблизу шин $n/см.А$	II-6 ₁ (II-5 ₁)	$\frac{3940}{2760} = 1,43$
	Замикання на землю на шинах $n/см.А$	I ₁	$\frac{925}{300} = 3,08$
3 (4)	-	-	-
	Замикання на землю на шинах $n/см.Г(Б)$	II ₂	$\frac{2170}{2150} = 1,01$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії $n/см.Б - n/см.Г$ поблизу шин $n/см.Г(Б)$	II-3 ₂ (II-4 ₂)	$\frac{3200}{2150} = 1,49$
	Замикання на землю на шинах $n/см.Г(Б)$	II ₂	$\frac{2170}{300} = 7,25$
	Каскадне відключення замикання на землю на лінії $n/см.Г(Б) - n/см.А$ поблизу шин $n/см.А$	II-5 ₂ (II-6 ₂)	$\frac{2380}{300} = 7,9$

3) Струм спрацьовування перших ступенів захистів вибирався за умовою відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції в режимі одностороннього живлення.

Умова відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів, що мають глухозаземлені нейтралі і включаються під напругу при включенні лінії, не є розрахунковою для перших ступенів. Перші ступені виконані без витримки часу.

4) Струми спрацьовування других ступенів захистів 1, 3, 4 і 6 вибиралися за умовою узгодження з першими ступенями захистів

попередніх ліній. Витримки часу других ступенів цих захистів погоджені з витримками часу перших ступенів захистів попередніх ліній.

Струм спрацьовування других ступенів захистів 2 і 5 вибирався за умовами:

А) відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах низької напруги підстанцій, де ці захисти встановлені;

Б) узгодження зі струмом спрацьовування третіх ступенів захистів ліній, що відходять від шин протилежної підстанції й других ступенів захистів нульової послідовності на стороні 330 кВ автотрансформаторів цієї підстанції. Умова узгодження із захистом автотрансформатора не знайшло відображення в розрахунках, наведених у табл.16.14. через відсутність відповідних даних.

Витримка часу другого ступеня захистів 2 і 5 узгоджена з часом дії третіх ступенів захистів ліній і других ступенів захистів автотрансформаторів.

5) *Струми спрацьовування третіх ступенів* захистів 1, 3, 4 і 6 вимикачів, що мали прискорення при включенні, вибиралися за умовами:

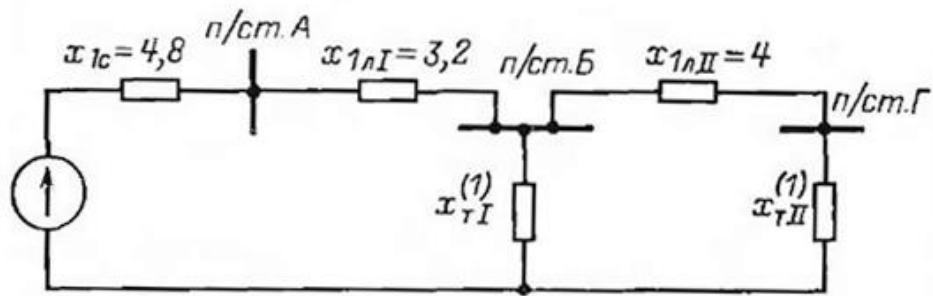
А) відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів, що мають глухозаземлені нейтралі і включаються під напругу при включенні лінії;

Б) узгодження із другими ступенями захистів попередніх ділянок;

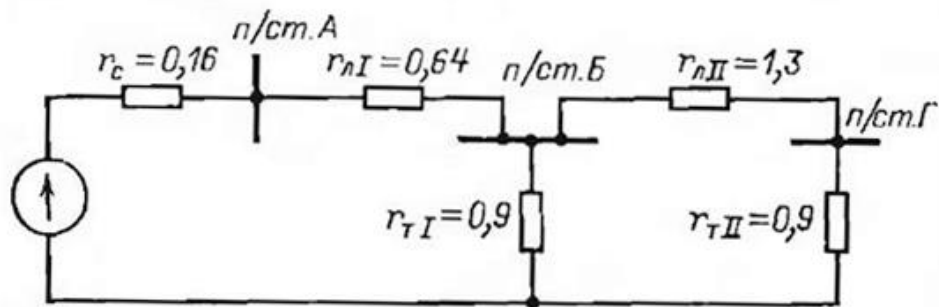
В) відбудовування від струму небалансу при КЗ між трьома фазами за трансформаторами *п/ст.Б* або *Г* (для захисту 4 і 3).

Розрахунки за умовою п.А проводилися на підставі додатку VI. При цьому приймалося, що для виконання третього ступеня використане реле струму типу РТ-40. Схеми заміщення мережі для визначення

еквівалентного опору в розрахунках кидка намагнічуючого струму трансформаторів наведені на рис.16.13.



а)



б)

Рис.16.13. Схеми заміщення мережі для розрахунків кидка намагнічуючого струму трансформаторів при однофазному включенні.

а - для визначення індуктивного опору мережі;

б - для визначення активного опору мережі.

Примітка. Опори в омах приведені до напруги 154 кВ.

Результати розрахунків зведені в табл.16.15.

Таблиця 16.15

Вибір параметрів спрацьовування захистів мережі за рис.16.11,а за умовою відбудовування від намагнічуючого струму

Назва лінії	Місце установки захисту	№ захисту	Тип захисту	Прискорювана ступінь, захисту	Розрах. режим	Розрахункова величина
<i>n/см.А – n/см.Б(Г)</i>	<i>n/см.А</i>	<i>1 (6)</i>	Струмовий спрямований	III	I-3 (I-4)	$x_{*II}^{(1)} = x_{*III}^{(1)}$
						$x_{II}^{(1)} = x_{III}^{(1)}$
						$x_{T.екв}^{(1)}$
						$x_{розр}^{(1)}$
						$r_{розр}$
						τ
						t
						$\frac{t}{\tau}$
						$C_{\phi}^{(1)}$
						$I_{0с.з}^{III}$
<i>n/см.Б – n/см.Г</i>	<i>n/см.Б(Г)</i>	<i>3 (4)</i>	Струмовий	III	I-3 (I-4)	$x_T^{(1)}$
						$x_{розр}^{(1)}$
						$r_{розр}$
						τ
						t
						$\frac{t}{\tau}$
						$C_{\phi}^{(1)}$
						$I_{0с.з}^{III}$

Розрахункова величина	Спосіб визначення	Розрахунковий вираз	Значення
$x_{*T}^{(1)} = x_{*TII}^{(1)}$	На підставі табл.ДVI.2	$x_{*T}^{(1)} = \frac{0,127 + \frac{u_{KBH}}{100}}{1,35}$	$\frac{0,127 + \frac{10,5}{100}}{1,35} = 0,172$
$x_{TI}^{(1)} = x_{TII}^{(1)}$	-	$x_T^{(1)} = x_{*T}^{(1)} \frac{U_{ном}^2}{S_{ном.T}}$	$0,172 \frac{158^2}{63} = 68 \text{ Ом}$
$x_{T.екв}^{(1)}$	З пояснення до (ДVI.10)	$x_{T.екв}^{(1)} = \left[(x_{T.II}^{(1)} + x_{1.II}) \parallel x_{T.I}^{(1)} \right] + x_{1.II}$	$\frac{(68+4)68}{68+4+68} + 3,2 = 38,2 \text{ Ом}$
$x_{розр}^{(1)}$	З пояснення до (ДVI.7)	$x_{розр} = x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)}$	$4,8 + 38,2 = 43 \text{ Ом}$
$r_{розр}$	-	$r_{розр} = r_c + r_{лI} + \frac{(r_{TII} + r_{лII})r_{TI}}{r_{TII} + r_{лII} + r_{TI}}$	$0,16 + 0,64 + \frac{(0,9+1,3)0,9}{0,9+1,3+0,9} = 1,44 \text{ Ом}$
τ	(ДVI.12)	$\tau = \frac{x_{розр}}{\omega r_{розр}}$	$\frac{43}{314 \cdot 1,44} = 0,095 \text{ с}$
t	$t_{власн}$ РТ-40	-	0,06 с
$\frac{t}{\tau}$	-	-	$\frac{0,06}{0,095} = 0,63$
$C_{\delta}^{(1)}$	За кривою рис.ДVI.1,а	-	0,83
$I_{0с.3}^{III}$	(ДVI.10)	$I_{0с.3}^{III} = \frac{C_{\delta}^{(1)} U_{ном}}{\sqrt{3} x_{розр}}$	$\frac{0,83 \cdot 154000}{\sqrt{3} \cdot 43} = 1720 \text{ А}$
$x_T^{(1)}$	На підставі табл.ДVI.2	-	68 Ом
$x_{розр}^{(1)}$	З пояснення до (ДVI.7)	$x_{розр} = (x_{1c} + x_{1лI}) + x_{1лII} + x_{T.II}^{(1)}$	$(4,8 + 3,2) + 4 + 68 = 80 \text{ Ом}$
$r_{розр}$	-	$r_{розр} = (r_c + r_{лI}) + r_{лII} + r_{TII}$	$(0,16 + 0,64) + 1,3 + 0,9 = 3 \text{ Ом}$
τ	(ДVI.12)	$\tau = \frac{x_{розр}}{\omega r_{розр}}$	$\frac{80}{314 \cdot 3} = 0,085 \text{ с}$
t	$t_{вст}$ РВ	-	0,1 с
$\frac{t}{\tau}$	-	-	$\frac{0,1}{0,085} = 1,18$
$C_{\delta}^{(1)}$	За кривою рис.ДVI.1,а	-	0,72
$I_{0с.3}^{III}$	(ДVI.10)	$I_{0с.3}^{III} = \frac{C_{\delta}^{(1)} U_{ном}}{\sqrt{3} x_{розр}}$	$\frac{0,72 \cdot 154000}{\sqrt{3} \cdot 80} = 800 \text{ А}$

Спочатку приймалося, що прискорення захистів 1 і 6 виконується без витримки часу, а захистів 3 і 4 - з витримкою $t = 0,15$ с. При цьому відповідно до вказівок додатку VI п.2 потрібне урахування умови п.А. Для захистів 1 і 6 відбудовування від кидка намагнічуючого струму не піддається розрахунку. Для захистів же 3 і 4 таке відбудовування виявилось визначальним при виборі струму спрацьовування. Тому прискорення третіх ступенів цих захистів було прийнято з витримкою часу 0,2 с, відбудованою від різночасності включення фаз вимикача, щоб не відбудовувати розглянуті ступені від кидка намагнічуючого струму.

Розрахунковими для визначення струмів спрацьовування третіх ступенів захистів 1 і 6 є умова п.Б, а захистів 3 і 4 - умова п.В.

Витримка часу третіх ступенів узгоджена з витримками часу других ступенів захистів попередніх елементів.

6) *Струм спрацьовування четвертого ступеня* захистів 1 і 6 обраний за умовою відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами за трансформаторами *п/ст.Б* або *Г*, витримка часу за умовою узгодження з витримкою часу третіх ступенів захистів 3 і 4.

7) Окремі ступені захистів прийняті *неспрямованими*, (див.рис.16.12) виходячи з рекомендацій глави 10, п.10-10.

8) Як видно з табл.16.14 і рис.16.12, захисти 1 і 6 передбачено виконувати чотиріступінчастими, 3 і 4 - триступінчастими, 2 і 5 - двоступінчастими.

9) Для оцінки *чутливості реле струму* захисту в табл.16.14 наведені розрахункові умови, розрахункові режими й значення коефіцієнтів чутливості. Як видно з табл.16.14, недостатню чутливість мають другі ступені захистів 1, 3, 4 і 6.

Для оцінки чутливості реле напряму потужності захистів у табл.16.16 наведені розрахункові умови, розрахункові режими й значення коефіцієнтів чутливості.

Таблиця 16.16

Перевірка чутливості реле напряму потужності захистів 1(6) і 2(5) мережі по рис.16.11,а

Захист	Умова перевірки чутливості	Розрахунковий режим	Струм і напруга на реле в місці установки захисту	
			$3I_{0\text{зmin}}, \text{ A}$	$3U_{0\text{зmin}}, \text{ В}$
1 (6)	Замикання на землю на шинах <i>н/см.Г(Б)</i>	II-3 ₂ (II-4 ₂)	2100	-
		I-5 ₂ (I-6 ₂)	-	$3040 \cdot 3,5 = 10500$
2 (5)	Замикання на землю на лінії <i>н/см.А – н/см.Б(Г)</i> поблизу <i>н/см.А</i>	II-6 ₁ (II-5 ₁)	3940	-
		I-6 ₂ (I-5 ₂)	-	$1780 \cdot 30,7 = 54500$

Закінчення табл.16.16

Захист	Тип реле напряму потужності	Потужність спрацьовування реле напряму потужності $S_{\text{с.р.}}$, ВА	Струм і напруга на реле в місці установки захисту
1 (6)	Виконання Б комплекту КЗ-10 панелі ЕПЗ-1636	4,5	$\frac{2100 \cdot 10500}{\frac{1200}{5} \cdot \frac{154000}{\sqrt{3} \cdot 100} \cdot 4,5} = 23$
2 (5)	РБМ-177	3	$\frac{3940 \cdot 54500}{\frac{600}{5} \cdot \frac{154000}{\sqrt{3} \cdot 100} \cdot 3} \gg 2$

Примітки: 1. Позначення режимів дано в табл.16.12.

2. Коефіцієнти трансформації на *н/см.А* $K_I = 1200/5$; на *н/см.Б* і *Г* $K_I = 600/5$;

$$K_U = \frac{154000}{\sqrt{3} \cdot 100}.$$

Перевірка чутливості розглянутих реле проводилася для випадків замикання на землю однієї фази наприкінці зони резервування. Як видно з табл.16.16, реле напряму потужності захистів мають високу чутливість.

16-4. Нижче наведені розрахунки струмового спрямованого захисту нульової послідовності від замикань на землю тупикової дволанцюгової лінії 150 кВ із відгалуженнями.

Вихідна схема й схеми заміщення прямої (зворотної) і нульової послідовностей мережі, що захищається, наведені на рис.16.14.

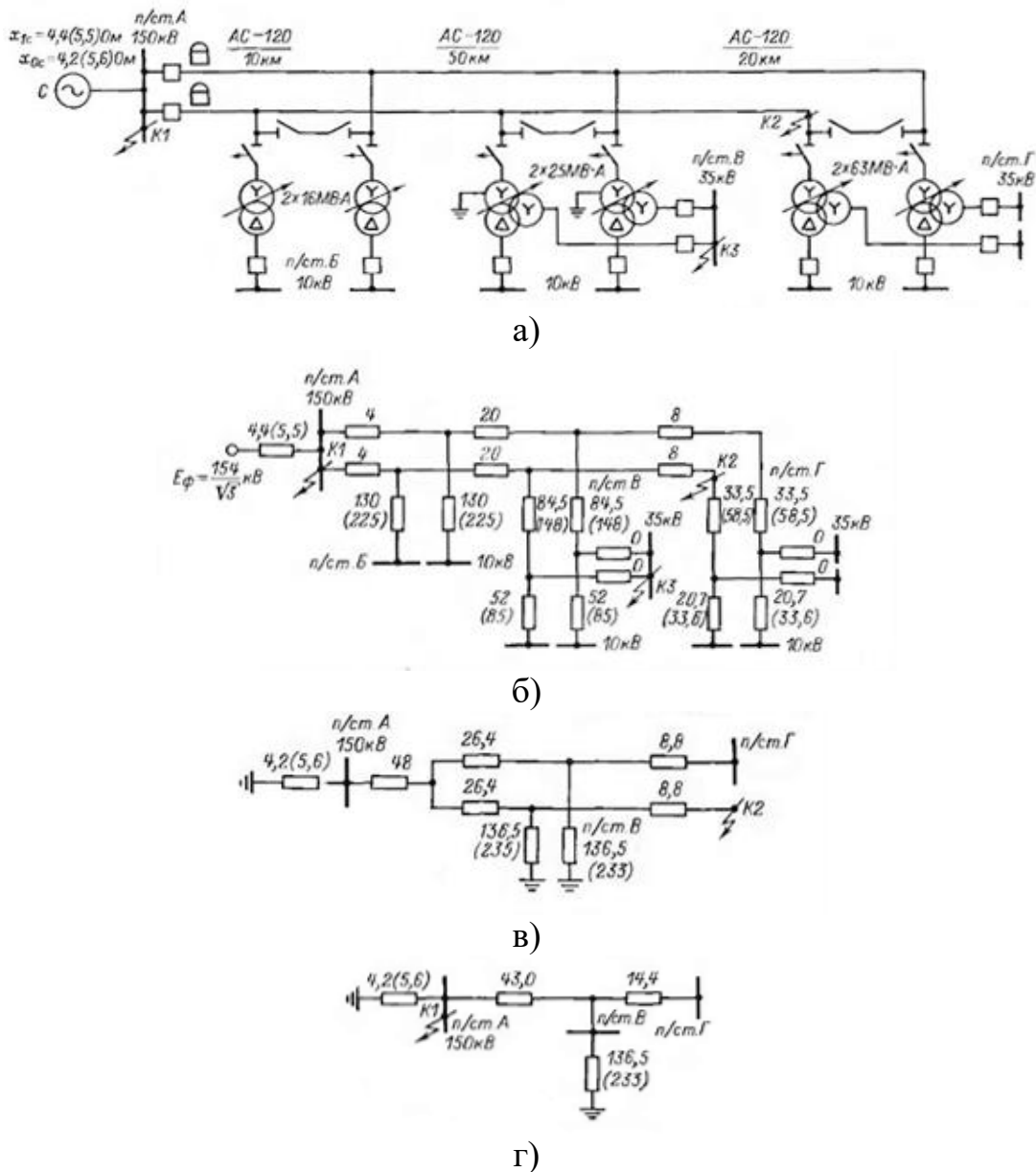


Рис.16.14. Розрахункові схеми для п.16-4:

а – вихідна схема; *б* – схема заміщення прямої (зворотної) послідовності; *в* – схема заміщення нульової послідовності при роботі лінії двома ланцюгами; *г* – схема заміщення нульової послідовності при роботі лінії одним ланцюгом (другий ланцюг відключений і заземлений).

Примітки: 1. Опори в омах наведено до напруги 154 кВ.

2. У дужках дані опори систем, які відповідають мінімальному режиму, і

максимальні опори трансформаторів, які відповідають максимальній регульованій напрузі.

Питомі індуктивні опори лінії приймалися: $x_{\text{ліній}} = 0,4 \text{ Ом/км}$,
 $x_{0\text{ліній}} = 1,24 \text{ Ом/км}$, $x_{0\text{ліній}} = 2x_{\text{ліній}}$.

Параметри трансформаторів наведені в табл.16.17.

Таблиця 16.17

Параметри трансформаторів

Номінальна потужність, МВА	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$			$u_k, \%$		
	ВН	СН	НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН
16	158-8×1,5%	-	11	-	10,78	-
	158				11	
	158+8×1,5%				11,49	
25; 63	158-8×1,5%	38,5±2+2,5%	11	10,2	17,7	6
	158			10,5	18	6
	158+8×1,5%			11	18,6	6

Опори трансформаторів із пристроєм регулювання напруги під навантаженням РПП розраховані для двох крайніх положень регулятора.

Через відсутність уточнених заводських даних орієнтовно прийнято, що опір нульової послідовності трансформаторів дорівнює опору прямої послідовності $x_{0T} \approx x_{1T}$.

На стороні 35 кВ *н/ст.В* прийнята паралельна робота трансформаторів. При роботі обох ланцюгів лінії на *н/ст.В* нейтралі двох трансформаторів глухозаземлені; при відключенні одного ланцюга нейтраль одного із трансформаторів розземлюється. На *н/ст.Б* і *Г* нейтралі трансформаторів прийняті ізольованими.

На лінії встановлені повітряні вимикачі з пофазними приводами.

З боку *н/ст.В* для захисту від замикань на землю досліджуваної лінії встановлений комплект поперечного диференціального струмового спрямованого захисту. Розрахунки цього комплексу в даному прикладі не приводяться.

2) Струми й напруги в місці установки захисту при КЗ розраховані в іменованих одиницях і для початкового моменту часу в обсязі, необхідному для розрахунків захисту:

А) при замиканні на землю на шинах $n/см.А$ (точка $K1$) у мінімальному режимі роботи системи при роботі одного ланцюга лінії, відключеного й заземленого іншого ланцюга й мінімальному опорі трансформатора із глухозаземленою нейтраллю на $n/см.В$

$$3I_{0\max}^{(1)} = 490 \text{ A}, \quad 3I_{0\max}^{(1,1)} = 495 \text{ A};$$

Б) при замиканні на землю однієї фази в кінці лінії, що захищається, (точка $K2$) при мінімальному опорі трансформаторів на $n/см.В$ й нормальному режимі роботи лінії:

у мінімальному режимі роботи системи

$$3I_{0\min}^{(1)} = 1390 \text{ A}, \quad 3U_0 = 5870 \text{ В};$$

у максимальному режимі роботи системи

$$3I_{0\max}^{(1)} = 1430 \text{ A}, \quad 3U_0 = 4550 \text{ В};$$

В) при КЗ між трьома фазами на шинах середньої напруги $n/см.В$ (точка $K3$) у максимальному режимі системи при роботі одного ланцюга лінії й двох трансформаторів на $n/см.В$ $I_{\max}^{(3)} = 1260 \text{ A}$

3) Розрахунки захисту наведені у табл.16.18.

**Вибір параметрів спрацювання й перевірка чутливості захисту
лінії по рис.16.14,а**

Назва лінії	Місце установки захисту	Ступінь захисту	Тип захисту	Вибір параметрів спрацювання захисту	
				Умова вибору струму спрацювання	Розрахунковий струм спрацювання
<i>n/см.А – n/см.Г (з відга- луженнями)</i>	<i>n/см.А</i>	I	Струмовий	Відбудування від кидка $I_{\text{нам}}$ при включенні трансформатора 25 МВА на <i>n/см.В</i>	$I_{0с.з}^I = \frac{C_{\text{б}}^{(1)} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} x_{\text{розр}}^{(1)}} = 272$ (див. табл.16.19)
				Відбудування від $I_{\text{нб}}$ у нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах середньої напруги <i>n/см.В</i>	$I_{0с.з}^I = k_{\text{відб}} I_{\text{нб}} = 1,25 \cdot 0,1 \cdot 1260 = 156$
				Відбудування від струму $3I_{0з}$, що проходить у місці установки захисту при замиканні на землю на шинах <i>n/см.А</i>	$I_{0с.з}^I = k_{\text{відб}} 3I_{0з \text{ max}} = 1,3 \cdot 495 = 644$
		II	Струмовий спрямований	Відбудування від $I_{\text{нб}}$ у нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах середньої напруги <i>n/см.В</i>	$I_{0с.з}^{II} = 156$

Ступінь захисту	Вибір параметрів спрацьовування захисту			Перевірка чутливості		
	Прийнятий $I_{0c.3}, A$	Умова вибору витримки часу	Витримка часу, с	Умова перевірки чутливості	$k_{ч.с} = \frac{3I_{0з min}}{I_{0c.3}}$	$k_{ч.н} = \frac{3I_{0з min} 3U_{0з min}}{K_I K_U S_{cp}}$
I	645	Без витримки часу	-	Замикання на землю однієї фази поблизу $n/ст.Г$	$\frac{1390}{645} = 2,16$	
				Замикання на землю однієї фази поблизу $n/ст.Г$ з одночасним замиканням між трьома фазами за T $n/ст.Г$	$\frac{1390 \cdot 0,7}{645} = 1,51$	
II	170	Відбудова від різночасності вимикання фаз вимикача	0,1-0,2	Замикання на землю однієї фази поблизу $n/ст.Г$	$\frac{1390}{170} = 8,2$	$\frac{1390 \cdot 5870}{600 \cdot 154000} \cdot 3 = 25,5$
					-	$\frac{1430 \cdot 4550}{600 \cdot 154000} \cdot 3 = 20,3$

Струм спрацьовування захисту вибирався за трьома умовами:

А) відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформатора $n/ст.В$, що має глухозаземлену нейтраль і включається під напругу при включенні лінії;

Б) відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на стороні середньої або низької напруги трансформаторів підстанцій, які підживлюють, (розрахунковим виявилось КЗ на шинах середньої напруги $n/ст.В$);

В) відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту, при замиканні на землю на шинах $n/см.А$.

Розрахунки за умовою п.А проводилися, виходячи із вказівок додатку VI. Результати розрахунків зведені в табл.16.19.

Таблиця 16.19

Вибір параметрів спрацьовування захистів мережі за рис.16.14,а за умовою відбудовування від кидка намагнічуючого струму

Назва лінії	Місце встановлення захисту	Тип захисту	Розрахункова величина	Спосіб визначення
$n/см.А - n/см.(Г)$ (з відгалуженнями)	$n/см.А$	Струмовий	$x_{*T}^{(1)}$	На підставі табл.ДVI.2
			$x_T^{(1)}$	-
			$x_{розр}^{(1)}$	З пояснення до (ДVI.7)
			$r_{розр}$	-
			t	$t_{власн}$ РТ-40
			τ	(ДVI.12)
			$\frac{t}{\tau}$	-
			$C_{\delta}^{(1)}$	За кривою рис.ДVI.1,а
			$I_{0с.з}^I$	(ДVI.10)

Закінчення табл.16.19

Розрахункова величина	Розрахунковий вираз	Значення
$x_{*T}^{(1)}$	$x_{*T}^{(1)} = \frac{0,127 + \frac{u_{кВН}}{100}}{1,35}$	$\frac{0,127 + \frac{18}{100}}{1,35} = 0,227$
$x_T^{(1)}$	$x_T^{(1)} = x_{*T}^{(1)} \frac{U_{ном}^2}{S_{ном.T}}$	$0,227 \frac{158^2}{25} = 227 \text{ Ом}$
$x_{розр}^{(1)}$	$x_{розр}^{(1)} = x_{1c} + x_{1л} + x_T^{(1)}$	$4,4 + 24 + 227 = 255,4 \text{ Ом}$
$r_{розр}$	$r_{розр} = r_c + r_l + r_T$	$0,14 + 6,8 + 2,9 = 9,8 \text{ Ом}$
t	-	0,06 с
τ	$\tau = \frac{x_{розр}^{(1)}}{\omega r_{розр}}$	$\frac{255,4}{314 \cdot 9,8} = 0,083 \text{ с}$
$\frac{t}{\tau}$	-	$\frac{0,06}{0,083} = 0,72$
$C_{\bar{o}}^{(1)}$	-	0,78
$I_{0с.з}^I$	$I_{0с.з}^{II} = \frac{C_{\bar{o}}^{(1)} U_{ном}}{\sqrt{3} x_{розр}^{(1)}}$	$\frac{0,78 \cdot 154000}{\sqrt{3} \cdot 255,4} = 272 \text{ А}$

Приймалося, що захист виконується без витримки часу. При цьому відповідно до п.2 додатку VI потрібне врахування зазначеної умови.

Умова з п.В розглянута з метою виявлення можливості виконання захисту неспрямованим.

Як видно з табл.16.18, захист може бути виконаний одноступінчастим спрямованим без витримки часу зі струмом спрацьовування 272 А; виконання захисту спрямованим необхідно для підвищення чутливості.

Однак, беручи до уваги, що захисти нульової послідовності тупикових ліній, передбачені на типових панелях, мають два ступені, доцільно з метою підвищення надійності й забезпечення резервування частини елементів схеми захисту використовувати обидві ступені, тобто виконати захист двоступінчастим. При цьому ступінь без витримки часу

виконується неспрямованим, а струм спрацьовування її приймається 645 А за умовою п.В.

Другий ступінь виконується спрямованим, з витримкою часу, що визначена за умовою відбудовування від різночасності включення фаз вимикача, і струмом спрацьовування, обраним за умовою відбудовування від струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами на шинах 35 кВ *n/ст.В*.

Розрахунки чутливості захисту наведені у табл.16.18 у режимах замикання на землю однієї фази й замикання на землю однієї фази при одночасному КЗ між трьома фазами за трансформатором *n/ст.Г* (відповідно до додатку IX).

Додаток І

СТРУМИ Й НАПРУГИ ПРИ ДВОХ ОДНОЧАСНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ НА ПІДСТАНЦІЯХ З КОРОТКОЗАМИКАЧАМИ

На понижуючих підстанціях з короткозамикачами на стороні вищої напруги при коротких замиканнях у зоні дії релейних захистів трансформаторів ці захисти спрацьовують на ввімкнення короткозамикача. У результаті цього на таких підстанціях можуть бути два одночасні КЗ у різних точках або однофазно-двофазне КЗ в одній точці.

Для аналізу дії різних типів релейного захисту, установленого з боку живлячого кінця лінії, до якої підключена підстанція без вимикачів на стороні вищої напруги, необхідно знати струми й напруги на початку лінії при зазначених видах коротких замикань на таких підстанціях.

Нижче в загальному виді приводяться розрахункові вирази для визначення струмів у вітках і напруг у різних точках схеми при двох одночасних КЗ і однофазно-двофазних КЗ на підстанціях з короткозамикачами. Розглядаються мережі на стороні вищої напруги трансформаторів підстанцій як з малим, так і з великим струмом замикання на землю. При виводі розрахункових виразів навантаження на підстанціях не враховувалися, а опір зворотної послідовності системи приймався рівним опору прямої послідовності. Розрахункові вирази наведені для струмів і напруг прямої, зворотної й нульової послідовності. Повні струми у фазах, а також повні фазні й міжфазні напруги визначаються підсумовуванням величин усіх послідовностей за відомими виразами методу симетричних складових [1].

Мережа з малим струмом замикання на землю на стороні вищої напруги трансформатора. На рис.ДІ.1 наведена вихідна схема, на якій для одного з можливих випадків показано два одночасні КЗ у точках M і N , тобто на сторонах вищої й нижчої напруги підстанцій.

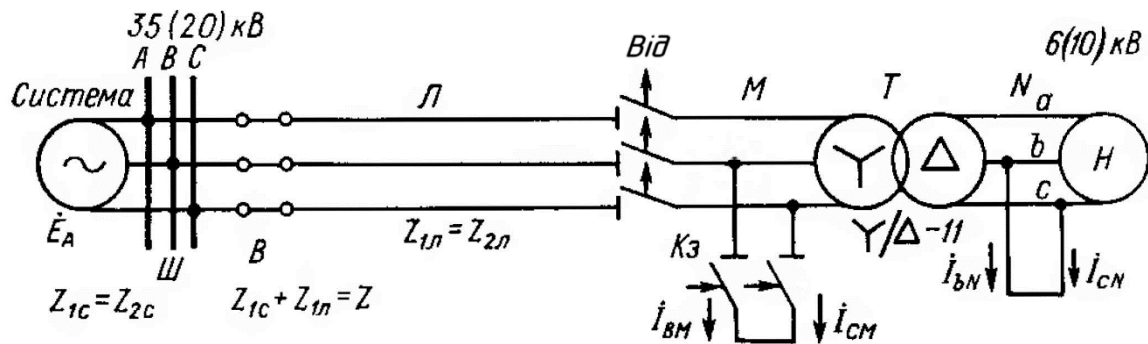
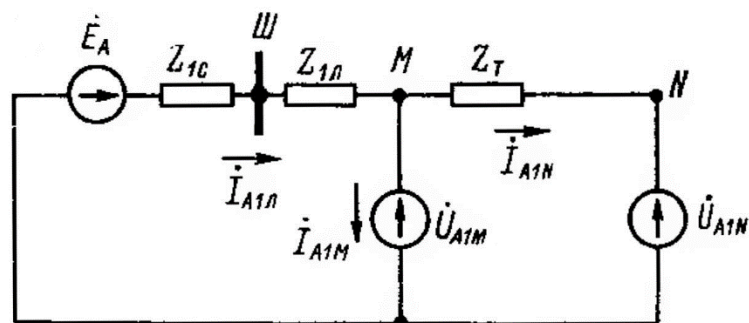
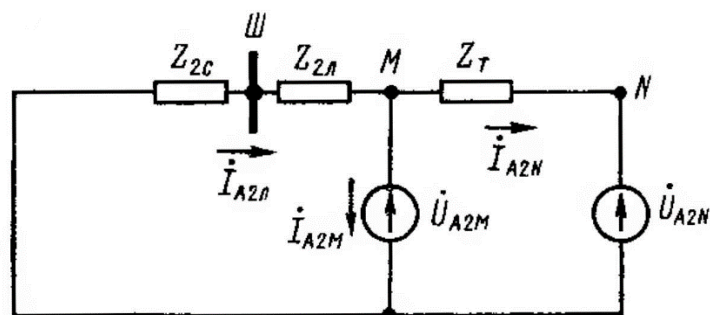


Рис.ДІ.1. Вихідна схема живлення однотрансформаторної підстанції без вимикача на стороні вищої напруги.
Мережа 35 (20) кВ з малим струмом замикання на землю; Bid - трифазний віддільник, $Kз$ - двофазний короткозамикач.

На рис.ДІ.2 для двох одночасних КЗ (рис.ДІ.1) наведені схеми заміщення: на рис.ДІ.2, а - прямої, на рис.ДІ.2, б - зворотної послідовності; на схемах показані струми й напруги фази А, прийнятої за основну (розрахункову).



а)



б)

Рис.ДІ.2. Схеми заміщення при двох одночасних коротких замиканнях (рис.ДІ.1, рис.ДІ.3 - ДІ.4): а - прямої послідовності, б - зворотної.

Струми й напруги на стороні трикутника трансформатора $\dot{I}_{a1N}$, $\dot{I}_{a2N}$, $\dot{U}_{a1N}$ і $\dot{U}_{a2N}$ приведені до сторони зірки трансформатора й позначені $\dot{I}_{A1N}$, $\dot{I}_{A2N}$, $\dot{U}_{A1N}$ і $\dot{U}_{A2N}$.

Співвідношення між струмами й напругами на сторонах трикутника й зірки трансформатора із групою з'єднання обмоток ∇/Δ - 11 наступні [1]:

$$\dot{I}_{a1N} = n_T \dot{I}_{A1N} e^{j30} = n_T \dot{I}_{A1N} (0,867 + j0,5), \quad (\text{ДІ.1})$$

$$\dot{U}_{a1N} = \frac{1}{n_T} \dot{U}_{A1N} e^{j30} = \frac{1}{n_T} \dot{U}_{A1N} (0,867 + j0,5), \quad (\text{ДІ.2})$$

$$\dot{I}_{a2N} = n_T \dot{I}_{A2N} e^{-j30} = n_T \dot{I}_{A2N} (0,867 - j0,5), \quad (\text{ДІ.3})$$

$$\dot{U}_{a2N} = \frac{1}{n_T} \dot{U}_{A2N} e^{-j30} = \frac{1}{n_T} \dot{U}_{A2N} (0,867 - j0,5), \quad (\text{ДІ.4})$$

де $n_T = \frac{\sqrt{3}\omega_3}{\omega_T} = \frac{U_{\text{ном.ВН}}}{U_{\text{ном.НН}}}$ - коефіцієнт трансформації трансформатора;

ω_3 , ω_T - число витків обмоток трансформатора, з'єднаних у зірку й трикутник відповідно.

З рис.ДІ.2 випливає, що необхідно визначити 12 невідомих симетричних складових струмів і напруг: $\dot{I}_{A1M}$, $\dot{I}_{A1N}$, $\dot{I}_{A1\ell}$, $\dot{I}_{A2M}$, $\dot{I}_{A2N}$, $\dot{I}_{A2\ell}$, $\dot{U}_{A1M}$, $\dot{U}_{A1N}$, $\dot{U}_{A1\ell}$, $\dot{U}_{A2M}$, $\dot{U}_{A2N}$, $\dot{U}_{A2\ell}$ - за відомими опорами окремих елементів і електрорушійній силі системи $\dot{E}_A$. Для визначення цих 12 невідомих немає потреби в розв'язку 12 рівнянь; можна спочатку визначити струми й напруги для обох місць коротких замикань, у точках M і N , тобто скласти й розв'язати вісім рівнянь із вісьма невідомими.

Інші 4 невідомих, тобто струми в лінії й напруги на шинах, визначаються зі схем заміщення (рис.ДІ.2)

$$\dot{I}_{A1\ell} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N}, \quad (\text{ДІ.5})$$

$$\dot{I}_{A2\ell} = \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N}, \quad (\text{ДІ.6})$$

$$\dot{U}_{A1u} = \dot{U}_{A1M} + \dot{I}_{A1l} Z_{1l}, \quad (\text{ДІ.7})$$

$$\dot{U}_{A2u} = \dot{U}_{A2M} + \dot{I}_{A2l} Z_{2l}. \quad (\text{ДІ.8})$$

Струми й напруги в точках M і N визначаються за чотирма рівняннями, отриманими з фізичних граничних умов у цих точках для заданих видів короткого замикання, і за чотирма рівняннями зв'язку між струмами й напругами однойменної послідовності, отриманими обходом контурів у схемах на рис.ДІ.2.

Складемо ці рівняння для випадку двох одночасних КЗ: між фазами B і C у точці M (на стороні зірки) і між фазами b і c у точці N (на стороні трикутника) трансформатора.

Граничні умови в точках M і N для розглянутого виду КЗ наступні:

$$\dot{I}_{AM} = 0, \quad (\text{ДІ.9})$$

$$\dot{I}_{BM} = -\dot{I}_{CM}, \quad (\text{ДІ.10})$$

$$\dot{U}_{BM} - \dot{U}_{CM} = 0, \quad (\text{ДІ.11})$$

$$\dot{I}_{aN} = 0, \quad (\text{ДІ.12})$$

$$\dot{I}_{bN} = -\dot{I}_{cN}, \quad (\text{ДІ.13})$$

$$\dot{U}_{bN} - \dot{U}_{cN} = 0. \quad (\text{ДІ.14})$$

Виразивши члени рівнянь (ДІ.9) - (ДІ.14) через симетричні складові фази A і привівши величини в точці N до сторони зірки трансформатора (табл.5.1), одержуємо:

$$\dot{I}_{A1M} = -\dot{I}_{A2M}, \quad (\text{ДІ.15})$$

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{U}_{A2M}, \quad (\text{ДІ.16})$$

$$\dot{I}_{A1N} = a\dot{I}_{A2N}, \quad (\text{ДІ.17})$$

$$\dot{U}_{A1N} = -a\dot{U}_{A2N}, \quad (\text{ДІ.18})$$

де $a = e^{j120} = -0,5 + j0,867$ - оператор фази.

Прийнявши $Z_c + Z_l = Z$ (рис.ДІ.1 і рис.ДІ.2), обходом контурів схем прямої і зворотної послідовності одержуємо наступні 4 рівняння зв'язку між струмами й напругами однойменної послідовності:

$$\dot{E}_A (\dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N}) Z + \dot{U}_{A1M}, \quad (\text{ДІ.19})$$

$$\dot{U}_{A1N} = \dot{U}_{A1M} - \dot{I}_{A1N} Z_T, \quad (\text{ДІ.20})$$

$$\dot{U}_{A2N} = -(\dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N}) Z, \quad (\text{ДІ.21})$$

$$\dot{U}_{A2M} = \dot{U}_{A2N} + \dot{I}_{A2N} Z_T. \quad (\text{ДІ.22})$$

Розв'язком восьми рівнянь (ДІ.15) - (ДІ.22) визначаємо струми й напруги в точках M і N . Струми в лінії й напруги на шинах визначаються за формулами (ДІ.5) - (ДІ.8).

1. Одночасне замикання між фазами B і C на стороні зірки (точка M на рис.ДІ.1) і фазами b і c на стороні трикутника (точка N на рис.ДІ.1) трансформатора.

Симетричні складові струмів і напруг визначаються в наступній чіткій послідовності:

$$\dot{I}_{A1M} = \frac{\dot{E}_A (2Z_T - aZ)}{Z(4Z_T + Z)}, \quad (\text{ДІ.23})$$

де $a = e^{j120} = -0,5 + j0,867$;

$$\dot{I}_{A1N} = \frac{\dot{E}_A (1 + a)}{4Z_T + Z}, \quad (\text{ДІ.24})$$

$$\dot{I}_{A2M} = -\dot{I}_{A1M}, \quad (\text{ДІ.25})$$

$$\dot{I}_{A2N} = a^2 \dot{I}_{A1N}, \quad (\text{ДІ.26})$$

$$\dot{I}_{A1l} = \dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A1N}, \quad (\text{ДІ.27})$$

$$\dot{I}_{A2l} = \dot{I}_{A2M} + \dot{I}_{A2N}, \quad (\text{ДІ.28})$$

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{U}_{A2M} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1l} Z, \quad (\text{ДІ.29})$$

$$\dot{U}_{A1N} = \dot{U}_{A1M} - \dot{I}_{A1N} Z_T, \quad (\text{ДІ.30})$$

$$\dot{U}_{A2N} = -a^2 \dot{U}_{A1N}, \quad (\text{ДІ.31})$$

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1L} Z_{1c}, \quad (\text{ДІ.32})$$

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2L} Z_{2c}. \quad (\text{ДІ.33})$$

2. Одночасне замикання між фазами B і C на стороні зірки й фазами a і c на стороні трикутника трансформатора (рис.ДІ.1).

Для даного випадку вірні формули (ДІ.23) - (ДІ.33), якщо в (ДІ.23), (ДІ.24), (ДІ.26) і (ДІ.31) поміняти оператори a й a^2 місцями.

3. Одночасне замикання між фазами B і C на стороні зірки й фазами a і c на стороні трикутника трансформатора (рис.ДІ.1).

Для даного випадку вірні формули (ДІ.23) - (ДІ.33), якщо в (ДІ.23), (ДІ.24), (ДІ.26) і (ДІ.31) оператори a й a^2 замінити одиницею.

4. Одночасне замикання між фазами B і C на стороні зірки й між трьома фазами на стороні трикутника трансформатора (рис.ДІ.1).

Симетричні складові струмів і напруг у точках M і N визначаються виразами:

$$\dot{I}_{A1M} = -\dot{I}_{A2M} = \frac{\dot{E}_A}{2Z}, \quad (\text{ДІ.34})$$

$$\dot{I}_{A1N} = \dot{I}_{A2N} = \frac{\dot{E}_A}{2(Z + Z_T)}, \quad (\text{ДІ.35})$$

$$\dot{U}_{A1N} = \dot{U}_{A2N} = 0, \quad (\text{ДІ.36})$$

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{U}_{A2M} = \dot{I}_{A1N} Z_T. \quad (\text{ДІ.37})$$

Струми в лінії й напруги на шинах визначаються за формулами (ДІ.27), (ДІ.28) (ДІ.32) і (ДІ.33).

Мережа з великим струмом замикання на землю на стороні вищої напруги трансформатора. На рис.ДІ.3 і рис.ДІ.4 наведені вихідні схеми, на яких показано два одночасні короткі замикання, у точках M і N , при цьому в точці M має місце замикання однієї фази на землю в мережі з великим струмом замикання на землю.

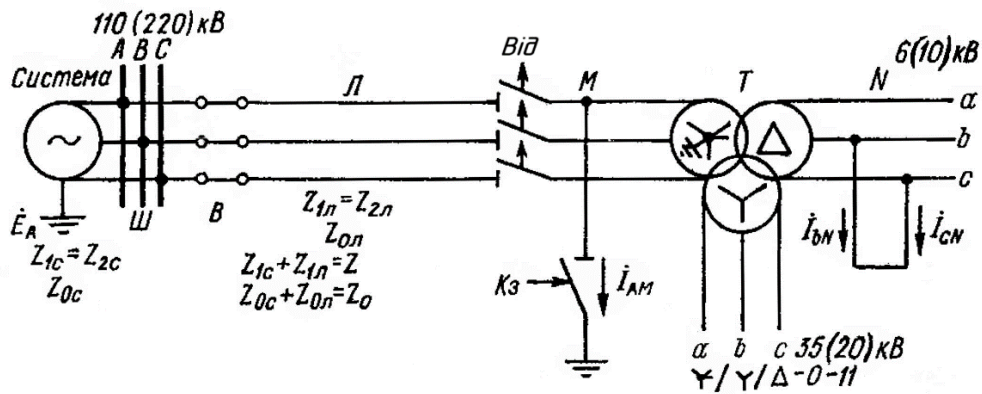


Рис.ДІ.3. Вихідна схема живлення однострансформаторної підстанції без вимикача на стороні вищої напруги.

На схемі показане міжфазне КЗ на стороні 6 (10) кВ, мережа 110 (220) кВ із великим струмом замикання на землю; $Від$ - трифазний віддільник, $Кз$ - однофазний короткозамикач.

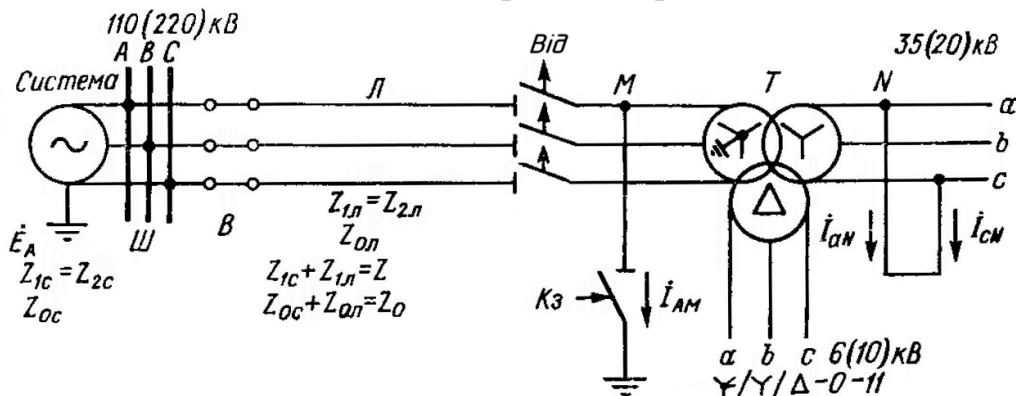


Рис.ДІ.4. Вихідна схема живлення однострансформаторної підстанції без вимикача на стороні вищої напруги.

На схемі показане міжфазне КЗ на стороні 35 (20) кВ, мережа 110 (220) кВ із великим струмом замикання.

Для цих вихідних схем на рис.ДІ.2 наведені схеми заміщення: на рис.ДІ.2,а - прямої, на рис.ДІ.2,б - зворотної послідовності. а на рис.ДІ.5 - схема заміщення нульової послідовності.

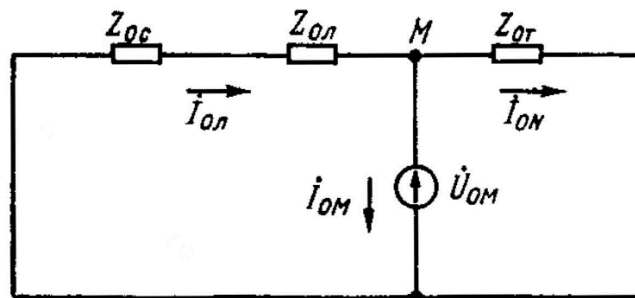


Рис.ДІ.5. Схема заміщення нульової послідовності при ввімкненні однофазного короткозамикача в точці M (рис.ДІ.3 і рис.ДІ.4)

Слід зазначити, що на схемах рис.ДІ.2 і рис.ДІ.5 приведений до сторони ВН еквівалентний опір триобмоткового трансформатора між відповідними двома напругами в його схемі заміщення (у вигляді трипроменевої зірки) позначений Z_T . При замиканні однієї фази на землю на стороні заземленої нейтралі й одночасно з ним замиканні між двома або трьома фазами на стороні трикутника

$$Z_T = Z_{1T} = Z_{0T} = Z_{TB} + Z_{TH}, \quad (\text{ДІ.38})$$

при замиканні однієї фази на землю на стороні заземленої зірки й одночасному з ним замиканні між двома або трьома фазами на стороні середньої напруги (незаземленої зірки)

$$Z_T = Z_{1T} = Z_{2T} = Z_{TB} + Z_{TC}, \quad (\text{ДІ.39})$$

$$Z_{0T} = Z_{TB} + Z_{TH}, \quad (\text{ДІ.40})$$

де Z_{TB} , Z_{TC} , Z_{TH} - приведені до сторони ВН опори променів зірки вищої, середньої й нижчої напруги триобмоткового трансформатора;

Z_{1T} , Z_{2T} , Z_{0T} - еквівалентні опори відповідно прямої, зворотної й нульової послідовності триобмоткового трансформатора.

Зі схем рис.ДІ.2 і рис.ДІ.5 випливає, що необхідно визначити 17 невідомих симетричних складових струмів і напруг, показаних на цих схемах. Для цього немає потреби вирішувати 17 рівнянь: можна спочатку визначити симетричні складові струмів і напруг для обох місць КЗ у точках M і N , тобто скласти й розв'язати 11 рівнянь із 11 невідомими. Інші 6 невідомих, тобто струми в лінії й напруги на шинах, визначаються формулами (ДІ.5) - (ДІ.8) і виразами:

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0M} + \dot{I}_{0N}, \quad (\text{ДІ.41})$$

$$\dot{U}_{0u} = \dot{U}_{0M} + \dot{I}_{0L} Z_{0L}. \quad (\text{ДІ.42})$$

Зазначені 11 рівнянь одержують у такий спосіб: 5 рівнянь складають, виходячи з фізичних граничних умов у точках M і N для заданих видів КЗ; 6 рівнянь зв'язку між струмами й напругами однойменної послідовності отримують обходом контурів у схемах на

рис.ДІ.2 і рис.ДІ.5. Складемо ці рівняння для одного з можливих випадків двох одночасних КЗ, а саме: замикання фази A на землю на стороні мережі із заземленою нейтраллю (точка M) і замикання між фазами b і c на стороні трикутника триобмоткового трансформатора (точка N на рис.ДІ.3).

Граничні умови в точці M

$$\dot{U}_{AM} = 0, \quad (\text{ДІ.43})$$

$$\dot{I}_{BM} = 0, \quad \dot{I}_{CM} = 0. \quad (\text{ДІ.44})$$

Виразивши повні струми й напругу в рівняннях (ДІ.43) і (ДІ.44) через симетричні складові фази A одержуємо наступні три рівняння:

$$\dot{U}_{A1M} + \dot{U}_{A2M} = \dot{U}_{0M} = 0. \quad (\text{ДІ.45})$$

$$\dot{I}_{A1M} = \dot{I}_{A2M}, \quad (\text{ДІ.46})$$

$$\dot{I}_{A1M} = \dot{I}_{0M}. \quad (\text{ДІ.47})$$

Для точки N вірні рівності (ДІ.17) і (ДІ.18), у яких, як було зазначено вище, струми й напруги приведені до сторони зірки трансформатора.

Обходом контурів у схемах заміщення прямої і зворотної послідовності (рис.ДІ.2) одержуємо чотири рівняння (ДІ.19) - (ДІ.22). Інші два рівняння отримуємо обходом контурів у схемі заміщення нульової послідовності (рис.ДІ.5):

$$\dot{U}_{0M} + \dot{I}_{0M}Z_0 + \dot{I}_{0N}Z_0 = 0, \quad (\text{ДІ.48})$$

$$\dot{U}_{0M} - \dot{I}_{0N}Z_{0T} = 0, \quad (\text{ДІ.49})$$

де $Z_0 = Z_{0c} + Z_{0л}$.

Розв'язком 11 зазначених вище рівнянь (ДІ.17) - (ДІ.22) і (ДІ.45) - (ДІ.49) визначаємо струми й напруги в точках M і N . Струми в лінії й напруги на шинах, як це було зазначено вище, визначаються за формулами (ДІ.5) - (ДІ.8), (ДІ.41) і (ДІ.42).

Наведеним вище методом були отримані розрахункові вирази для 17 невідомих симетричних складових струмів і напруг при двох одночасних КЗ у різних точках (рис.ДІ.3 і рис.ДІ.4) для схем із триобмотковими трансформаторами. Нижче дані ці розрахункові вирази.

5. Замикання фази *A* на землю на стороні мережі із заземленою нейтраллю й одночасне з ним замикання між фазами *b* і *c* на стороні трикутника триобмоткового трансформатора (рис.ДІ.3).

Симетричні складові струмів і напруг визначаються в наступній чіткій послідовності:

$$\dot{I}_{A1M} = \frac{\dot{E}_A (Z_0 + Z_T) [Z(a^2 - a) + 2a^2 Z_T]}{(Z_0 + Z_T) [Z^2(2a^2 - a - 1) + 4a^2 Z Z_T] + 2a^2 Z_0 Z_T (Z + Z_T)}, \quad (\text{ДІ.50})$$

$$\dot{I}_{A1N} = \frac{1}{Z(1 + a^2)} \left[\dot{E}_A - \dot{I}_{A1M} \left(2Z + \frac{Z_0 Z_T}{Z_0 + Z_T} \right) \right], \quad (\text{ДІ.51})$$

$$\dot{I}_{A2M} = \dot{I}_{0M} = \dot{I}_{A1M}, \quad (\text{ДІ.52})$$

$$\dot{I}_{A2N} = a^2 \dot{I}_{A1N}; \quad (\text{ДІ.53})$$

$\dot{I}_{A1L}$ визначається за (ДІ.5), $\dot{I}_{A2L}$ - за (ДІ.6), $\dot{U}_{A1M}$ - за (ДІ.19), $\dot{U}_{A1N}$ - за (ДІ.20), $\dot{U}_{A1u}$ - за (ДІ.7), $\dot{U}_{A2u}$ - за (ДІ.8),

$$\dot{U}_{A2M} = -\dot{I}_{A2L} Z, \quad (\text{ДІ.54})$$

$$\dot{U}_{0M} = -\dot{U}_{A1M} - \dot{U}_{A2M}, \quad (\text{ДІ.55})$$

$$\dot{I}_{0N} = \dot{U}_{0M} / Z_{0T}, \quad (\text{ДІ.56})$$

$$\dot{I}_{0L} = \dot{I}_{0M} + \dot{I}_{0N}, \quad (\text{ДІ.57})$$

$$\dot{U}_{A2N} = -a^2 \dot{U}_{A1N}, \quad (\text{ДІ.58})$$

$$\dot{U}_{0u} = -\dot{I}_{0L} Z_{0c}. \quad (\text{ДІ.59})$$

6. Замикання фази *A* на землю на стороні мережі із заземленою нейтраллю й одночасне з ним замикання між фазами *a* і *b* на стороні трикутника триобмоткового трансформатора (рис.ДІ.3).

Для даного випадку вірні вирази, наведені в п.5, якщо в (ДІ.50), (ДІ.51), (ДІ.53) і (ДІ.58) поміняти оператори a і a^2 місцями.

7. Замикання фази A на землю на стороні мережі із заземленою нейтраллю й одночасне з ним замикання між фазами a і c на стороні трикутника триобмоткового трансформатора (рис.ДІ.3).

Для даного випадку вірні вирази, наведені в п.5, якщо в (ДІ.50), (ДІ.51), (ДІ.53) і (ДІ.58) оператори a і a^2 замінити одиницею.

8. Замикання фази A на землю на стороні мережі із заземленою нейтраллю й одночасне з ним замикання між трьома фазами на стороні трикутника (рис.ДІ.3) або на стороні незаземленої зірки (сторона середньої напруги триобмоткового трансформатора - рис.ДІ.4).

Струми в точках M і N визначаються виразами:

$$\dot{I}_{A1M} = \dot{I}_{A2M} = \dot{I}_{0M} = \frac{\dot{E}_A}{2Z + \frac{Z_0 Z_{0T}(Z + Z_T)}{Z_T(Z_0 + Z_{0T})}}, \quad (\text{ДІ.60})$$

$$\dot{I}_{A1N} = \dot{I}_{A1M} \left[\frac{Z_0 Z_{0T}}{Z_T(Z_0 + Z_{0T})} + \frac{Z}{Z + Z_T} \right], \quad (\text{ДІ.61})$$

$$\dot{I}_{A2N} = -\dot{I}_{A1M} \frac{Z}{Z + Z_T}, \quad (\text{ДІ.62})$$

де $Z = Z_{0T} = Z_{TB} + Z_{TH}$ - опори при трифазному КЗ на стороні трикутника,

$Z_T = Z_{TB} + Z_{TC}$, $Z_{0T} = Z_{TB} + Z_{TH}$ - опори при трифазному КЗ на стороні незаземленої зірки (середньої напруги);

$\dot{I}_{A1L}$ визначається за (ДІ.5), $\dot{I}_{A2L}$ - за (ДІ.6), інші значення струмів і напруг визначаються розв'язком рівнянь із одним невідомим (ДІ.19), (ДІ.20), (ДІ.7), (ДІ.8), (ДІ.54) - (ДІ.59) у зазначеній послідовності.

9. Замикання фази A на землю на стороні мережі із заземленою нейтраллю й одночасне з ним замикання між фазами a і c на стороні незаземленої зірки (середньої напруги) триобмоткового трансформатора (рис.ДІ.4).

Струми в точках M і N визначаються виразами:

$$\dot{I}_{A1M} = \dot{I}_{A2M} = \dot{I}_{0M} = \frac{\dot{E}_A (Z_0 + Z_T) (2Z_T + aZ + Z)}{2Z_0 Z_{0T} (Z + Z_T) + Z (Z_0 + Z_{0T}) (4Z_T + Z)}, \quad (\text{ДІ.63})$$

$$\dot{I}_{A1N} = \frac{\dot{E}_A + \dot{I}_{A1M} Z \left(\frac{1}{a} - 1 \right)}{2(Z + Z_T)}, \quad (\text{ДІ.64})$$

де $Z_T = Z_{TB} + Z_{TC}$, $Z_{0T} = Z_{TB} + Z_{TH}$,

$$\dot{I}_{A2N} = -a\dot{I}_{A1N}. \quad (\text{ДІ.65})$$

Інші невідомі симетричні складові струмів і напруг, показані на рис.ДІ.2 і рис.ДІ.5, визначаються розв'язком рівнянь із одним невідомим (ДІ.5), (ДІ.6), (ДІ.19), (ДІ.20), (ДІ.7), (ДІ.8), (ДІ.54) - (ДІ.57), (ДІ.59) і рівняння

$$\dot{U}_{A2N} = a\dot{U}_{A1N}. \quad (\text{ДІ.66})$$

10. Замикання фази A на землю на стороні мережі із заземленою нейтраллю й одночасне з ним замикання між фазами a і b на стороні незаземленої зірки (середньої напруги) триобмоткового трансформатора (рис.ДІ.4).

Для даного випадку вірні рівняння, наведені в п.9, якщо в (ДІ.63) - (ДІ.66) замінити оператор a на a^2 .

11. Замикання фази A на землю на стороні мережі із заземленою нейтраллю й одночасне з ним замикання між фазами b і c на стороні незаземленої зірки (середньої напруги) триобмоткового трансформатора (рис.ДІ.4).

Для даного випадку вірні рівняння, наведені в п. 9, якщо в (ДІ.63) - (ДІ.66) замінити оператор a одиницею.

12. Однофазно-двофазне коротке замикання в одній точці на стороні мережі із заземленою нейтраллю.

Вихідна схема наведена на рис.ДІ.6.

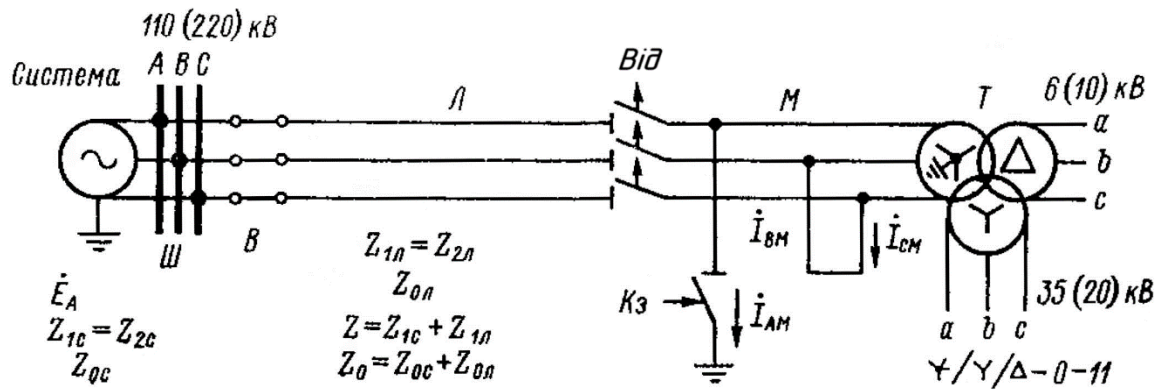
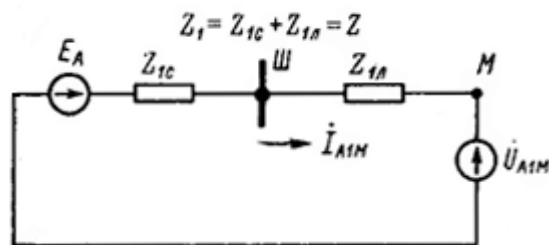


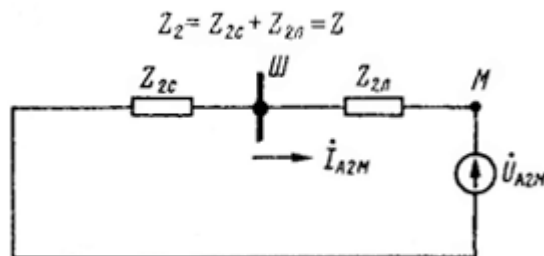
Рис.ДІ.6. Вихідна схема живлення однотрансформаторної підстанції без вимикача на стороні вищої напруги.
На схемі показане двофазне КЗ у точці М.

Розглядається випадок замикання між фазами B і C у точці M і ввімкненням короткозамикачем фази A на землю в цій же точці.

Для даного виду КЗ наведені схеми заміщення: на рис.ДІ.7,а - прямої, на рис.ДІ.7,б - зворотної послідовності, а схема заміщення нульової послідовності - на рис.ДІ.5.



а)



б)

Рис.ДІ.7. Схеми заміщення при однофазно-двофазному КЗ в одній точці при ввімкненні короткозамикача (рис.ДІ.6): а - прямої послідовності, б - зворотної.

Граничні умови в місці однофазно-двофазного КЗ в одній точці M наступні:

$$\dot{U}_{AM} = 0, \quad (\text{ДІ.67})$$

$$\dot{U}_{BM} - \dot{U}_{CM} = 0, \quad (\text{ДІ.68})$$

$$\dot{I}_{BM} + \dot{I}_{CM} = 0. \quad (\text{ДІ.69})$$

Виразивши повні напруги й струми в рівняннях (ДІ.67) - (ДІ.69) через симетричні складові фази A , після перетворень одержуємо:

$$\dot{U}_{A1M} + \dot{U}_{A2M} + \dot{U}_{0M} = 0, \quad (\text{ДІ.70})$$

$$\dot{U}_{A1M} = \dot{U}_{A2M}, \quad (\text{ДІ.71})$$

$$\dot{I}_{A1M} + \dot{I}_{A2M} = 2\dot{I}_{0M}. \quad (\text{ДІ.72})$$

Зі схем заміщення, наведених на рис.ДІ.7 і рис.ДІ.5, випливає, що необхідно визначити 8 невідомих симетричних складових струмів і напруг: $\dot{U}_{A1M}$, $\dot{U}_{A2M}$, $\dot{U}_{0M}$, $\dot{I}_{A1M}$, $\dot{I}_{A2M}$, $\dot{I}_{0M}$, $\dot{I}_{0L}$, $\dot{I}_{0N}$. Для визначення цих невідомих необхідно скласти 8 рівнянь. Три рівняння (ДІ.70) - (ДІ.72) отримані із граничних умов. Інші 5 рівнянь отримаємо обходом контурів у схемах заміщення прямої, зворотної й нульової послідовності (рис.ДІ.7 і рис.ДІ.5):

$$\dot{E}_A = \dot{U}_{A1M} + \dot{I}_{A1M}Z, \quad (\text{ДІ.73})$$

$$\dot{U}_{A2M} + \dot{I}_{A2M}Z = 0, \quad (\text{ДІ.74})$$

$$\dot{U}_{0M} + \dot{I}_{0L}Z_0 = 0, \quad (\text{ДІ.75})$$

$$\dot{U}_{0M} - \dot{I}_{0N}Z_{0T} = 0, \quad (\text{ДІ.76})$$

$$\dot{I}_{0M} = \dot{I}_{0L} - \dot{I}_{0N}. \quad (\text{ДІ.77})$$

У результаті розв'язку рівнянь (ДІ.70) - (ДІ.77) отриманий наступний розрахунковий вираз для струму прямої послідовності в точці M :

$$\dot{I}_{A1M} = \frac{\dot{E}_A [4Z(Z_{0T} + Z_0) + Z_0Z_{0T}]}{4Z^2(Z_0 + Z_{0T}) + 2ZZ_0Z_{0T}}. \quad (\text{ДІ.78})$$

Інші 7 невідомих визначаються розв'язком рівнянь із однією невідомою у наступній чіткій послідовності:

$\dot{U}_{A1M}$ - за (ДІ.73), $\dot{U}_{A2M}$ - за (ДІ.71), $\dot{U}_{0M}$ - за (ДІ.70),

$\dot{I}_{A2M}$ - за (ДІ.74), $\dot{I}_{0M}$ - за (ДІ.72), $\dot{I}_{0л}$ - за (ДІ.75), $\dot{I}_{0N}$ - за (ДІ.76).

Оскільки у виведенні струми навантаження не враховувалися, то струми прямої і зворотної послідовності в лінії L рівні:

$$\dot{I}_{A1л} = \dot{I}_{A1M} \quad \text{та} \quad \dot{I}_{A2л} = \dot{I}_{A2M}. \quad (\text{ДІ.79})$$

Це впливає також зі схем заміщення (рис.ДІ.7).

Напруги на шинах визначаються виразами (рис.ДІ.7 і рис.ДІ.5):

$$\dot{U}_{A1ш} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1M} Z_{1c}, \quad (\text{ДІ.80})$$

$$\dot{U}_{A2ш} = -\dot{I}_{A2M} Z_{2c}, \quad (\text{ДІ.81})$$

$$\dot{U}_{0ш} = -\dot{I}_{0л} Z_{0c}. \quad (\text{ДІ.82})$$

Необхідно відзначити, що в [13] і [14] наведені розрахунки зазначених видів складних ушкоджень, засновані на принципі накладання.

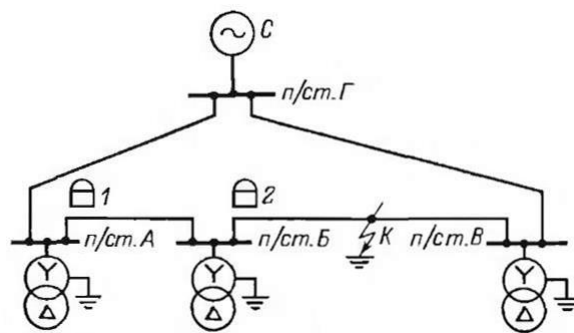
13. Нейтраль трансформатора T на підстанції не заземлена (рис.ДІ.3 – рис.ДІ.6).

Для мережі з великим струмом замикання на землю на стороні вищої напруги трансформатора, у якого нейтраль на цій стороні не заземлена, вірні формули, що описують усі випадки двох одночасних КЗ, наведені в п. 5 - 12, якщо в них прийняти $Z_{0T} = \infty$ й $\dot{I}_{0N} = 0$.

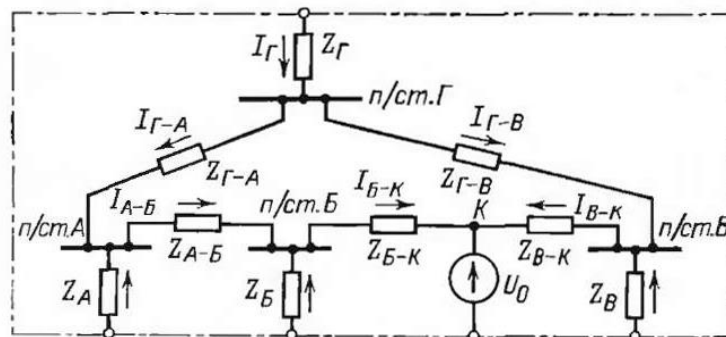
Додаток II

УЗГОДЖЕННЯ СТРУМОВИХ ЗАХИСТІВ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ В КІЛЬЦЕВІЙ МЕРЕЖІ

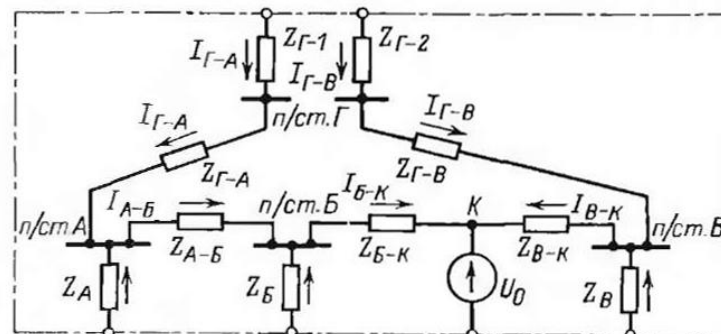
1. У кільцевій мережі з одиночних ліній, яка не має діагональних з'єднань (рис.ДП.1,а), визначення струму спрацьовування другого ступеня захисту лінії проводиться за умовою узгодження її за чутливістю з першим ступенем захисту попередньої ділянки при замиканні на землю на останньому й каскадному його відключенні.



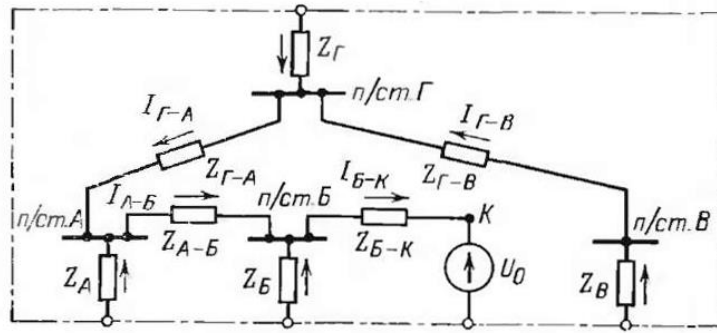
а)



б)



в)



г)

Рис.ДП.1. Струморозподіл для замикання на землю в кільцевій мережі:
а – вихідна схема; *б* – струморозподіл в схемі заміщення нульової послідовності до розмикання кільця; *в* – струморозподіл в перетвореній схемі заміщення за рис.б; *г* – струморозподіл в схемі заміщення нульової послідовності після розмикання кільця.

Так, наприклад, у мережі за рис.ДП.1,*а* струм спрацьовування другого ступеня захисту 1 визначається за умовою узгодження з першим ступенем захисту 2 у режимі, коли лінія *н/см.Б - н/см.В* відключена з боку *н/см.В*.

2. При замиканні на землю в точці *К* в режимі, коли кільце замкнене, у схемі заміщення нульової послідовності (рис.ДП.1,*б*) точка струморозподілу знаходиться на одній з підстанцій кільця, струм від цієї підстанції протікає до місця ушкодження по обом підключеним до неї лініям кільця.

У схемі за рис.ДП.1,*б* точка струморозподілу прийнята на *н/см.Г*. Ця схема може бути перетворена в схему за рис.ДП.1,*в* на підставі співвідношень

$$\dot{I}_{Г-А} Z_{Г-1} = \dot{I}_{Г-Б} Z_{Г-2} = \dot{I}_Г Z_Г;$$

$$\dot{I}_{Г-А} + \dot{I}_{Г-Б} = \dot{I}_Г;$$

$$Z_Г = \frac{Z_{Г-1} Z_{Г-2}}{Z_{Г-1} + Z_{Г-2}},$$

де $Z_Г$ - еквівалентний опір системи, приведений до шин *н/см.Г*.

Згідно зі схемою, наведеною на рис.ДП.1,*в*, коефіцієнт струморозподілу $k_{стр}$ для лінії *н/см.А - н/см.Б* при замкненому кільці

$$k_{cmp(z)} = \frac{Z_B}{Z_B + Z_{A-B} + Z_A \parallel (Z_{\Gamma-A} + Z_{\Gamma-1})}. \quad (\text{ДП.1})$$

3. Для випадку каскадного відключення лінії $n/см.Б - n/см.В$ з боку $n/см.В$, тобто для випадку розімкнутого кільця, схема заміщення нульової послідовності наведена на рис.ДП.1,з. У цій схемі коефіцієнт струморозподілу для лінії $n/см.А - n/см.Б$

$$k_{cmp(p)} = \frac{Z_B}{Z_B + Z_{A-B} + Z_A \parallel [Z_{\Gamma-A} + Z_{\Gamma} \parallel (Z_{\Gamma-B} + Z_B)]}. \quad (\text{ДП.2})$$

4. З розгляду рис.ДП.1,в,з і порівняння виразів (ДП.1) і (ДП.2) випливає, що при пошкодженні на лінії $n/см.Б - n/см.В$ коефіцієнт струморозподілу для лінії $n/см.А - n/см.Б$:

а) при розімкнутому кільці не залежить від місця ушкодження на лінії $n/см.Б - n/см.В$;

б) має найбільше значення у випадку розімкнутого кільця (останній член знаменника в (ДП.2) менший, ніж в (ДП.1), і, отже, $k_{cmp(p)} > k_{cmp(z)}$, тобто розрахунковим для узгодження є випадок каскадного відключення ушкодження).

Додаток III

СКЛАДАННЯ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ІЗ ВЗАЄМОІНДУКЦІЄЮ МІЖ НИМИ

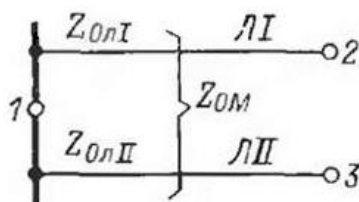
1. У даному додатку розглядається методика, а також дані приклади схем заміщення нульової послідовності двох і трьох паралельних ліній із взаємоіндукцією між ними [24].

2. Метод складання схем заміщення нульової послідовності двох паралельних ліній із взаємоіндукцією між ними (у тому числі й лінії з відгалуженнями) при замиканні на землю на одній з них заснований на наступних положеннях:

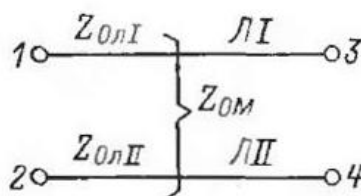
паралельні лінії можуть бути розбиті або на триполюсники (рис.ДІІІ.1,*а*), або на чотириполюсники (рис.ДІІІ.1,*б*),

триполюсники мають схему заміщення у вигляді трипроменевої зірки (рис.ДІІІ.1,*в*).

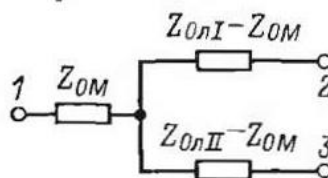
чотириполюсники мають схему заміщення у вигляді двох променів і опору Z_{0M} , додатково включеного в ту вітку схеми заміщення, у якій протікає струм, який дорівнює сумі струмів обох ліній (рис.ДІІІ.1,*г*).



а)



б)



в)

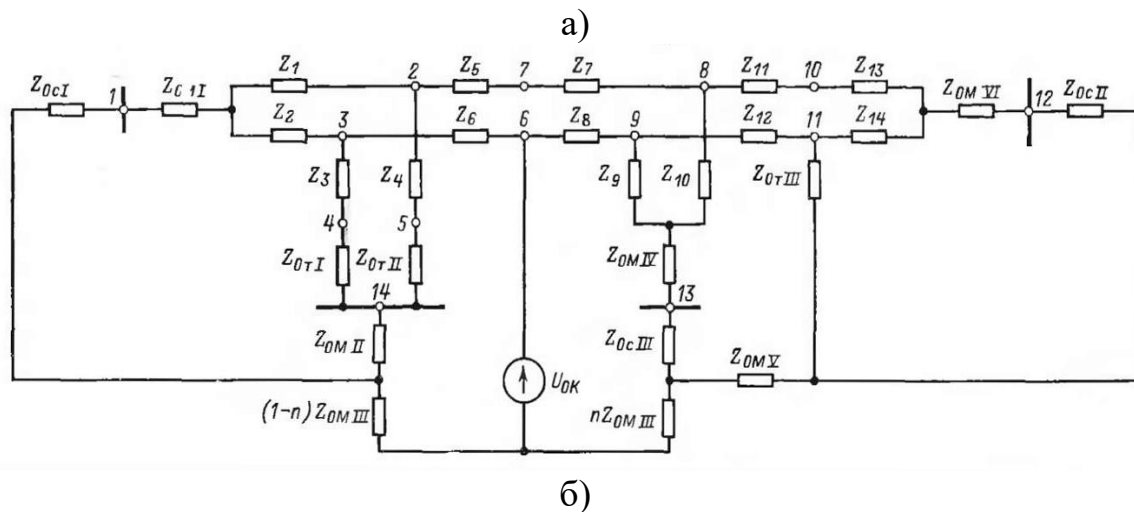


Рис.ДІІ.2. Дві паралельні лінії з відгалуженнями із взаємоіндукцією між ними при КЗ на одній з них:

a – вихідна схема; *б* – схема заміщення нульової послідовності;

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= Z_{0лI} - Z_{0MI}; & Z_2 &= Z_{0лII} - Z_{0MI}; & Z_3 &= Z_{0лIII} - Z_{0MII}; \\
 Z_4 &= Z_{0лIV} - Z_{0MI}; & Z_5 &= (1-n)(Z_{0лV} - Z_{0MIII}); & Z_6 &= (1-n)(Z_{0лVI} - Z_{0MIII}); \\
 Z_7 &= n(Z_{0лV} - Z_{0MIII}); & Z_8 &= n(Z_{0лVI} - Z_{0MIII}); & Z_9 &= Z_{0лVII} - Z_{0MIV}; \\
 Z_{10} &= Z_{0лVIII} - Z_{0MIV}; & Z_{11} &= Z_{0лIX} - Z_{0MV}; & Z_{12} &= Z_{0лX} - Z_{0MV}; \\
 Z_{13} &= Z_{0лXI} - Z_{0MVI}; & Z_{14} &= Z_{0лXII} - Z_{0MVI}.
 \end{aligned}$$

Примітка. У кружку поставлений номер багатополісника відповідно до табл.ДІІ.1.

Паралельні лінії розбиваються на багатополісники (табл.ДІІ.1).

Таблиця ДІІ.1

Багатополісники для двох паралельних ліній з відгалуженнями із взаємоіндукцією між ними

Номер багатополісника	Виводи багатополісника	Тип багатополісника
1	1, 2, 3	Триполісник
2	2, 3, 4, 5	Чотириполісник
3	2, 3, 6, 7	-
4	6, 7, 8, 9	-
5	8, 9, 10, 11	-
6	10, 11, 12	Триполісник
7	8, 9, 13	-

Триполісники 1, 6 і 7 заміщуються схемами, аналогічними схемі на рис.ДІІ.1,в. Чотириполісники 2 - 5 заміщуються схемами, аналогічними схемі на рис.ДІІ.1,г; при цьому опори взаємоіндукції цих ділянок включаються в вітки схеми заміщення, де протікають струми, рівні сумі

струмів паралельних ліній розглянутої ділянки. У схемі заміщення на рис.ДІІ.2,б опори взаємоіндукції включені у наступні вітки:

опір Z_{0MII} чотириполюсника 2 підключено до точки 14 схеми;

опір $(1 - n)Z_{0MIII}$ чотириполюсника 3 включений на суму струмів, що протікають в опорі системи Z_{0cI} й опорі Z_{0MII} ;

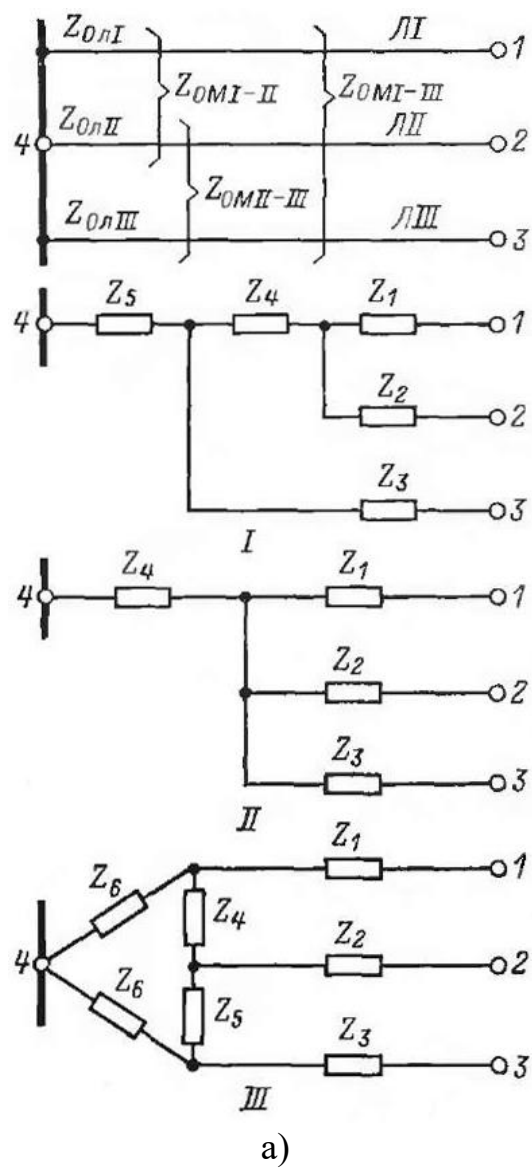
опір Z_{0MV} чотириполюсника 5 включений на суму струмів, що протікають в опорі системи Z_{0cii} і опорі Z_{0TIII} ;

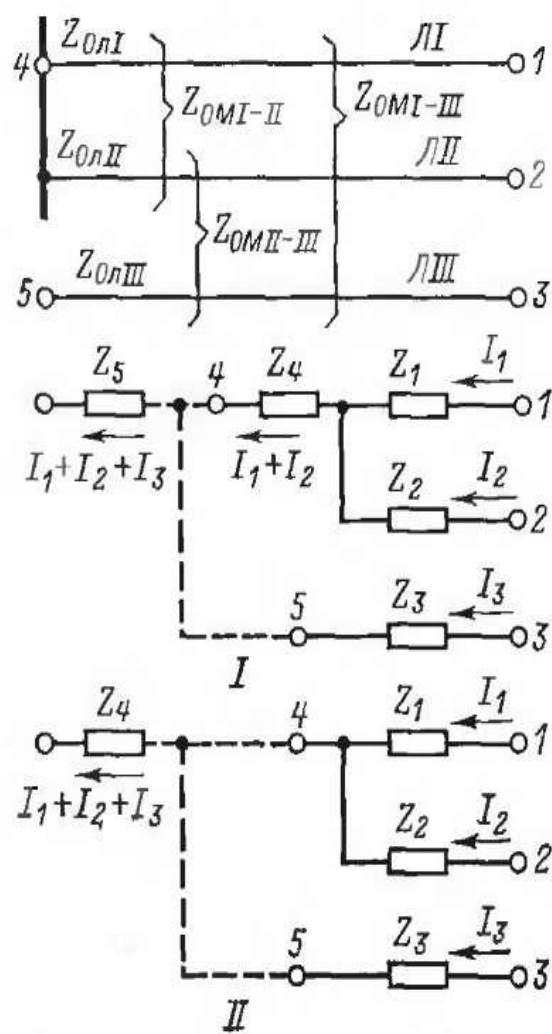
опір nZ_{0MIII} чотириполюсника 4 включений на суму струмів, що протікають в опорі систем Z_{0cii} і Z_{0cIII} і опорі Z_{0TIII} .

Відповідно до зазначеного в п.2 напруга нульової послідовності на шинах системи I (точка 1) визначається як падіння напруги на опорі Z_{0cI} . Аналогічно визначаються напруги нульової послідовності на шинах систем II (точка 12) п III (точка 13) відносно нульової точки системи.

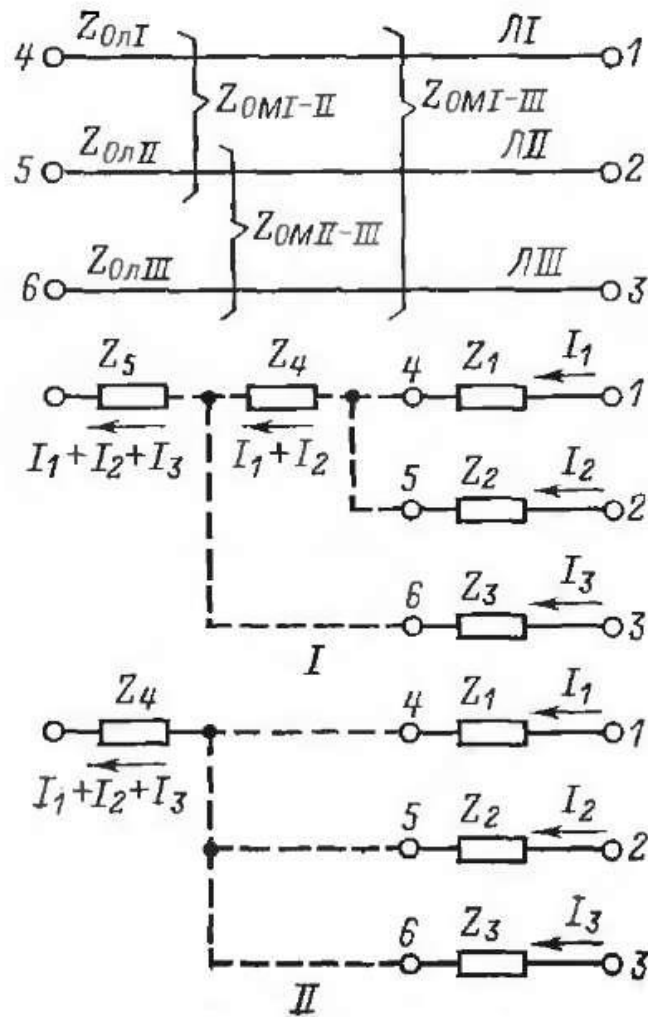
4. Метод складання схем заміщення нульової послідовності трьох паралельних ліній із взаємоіндукцією між ними заснований на наступних положеннях:

паралельні лінії можуть бути розділені на чотириполюсники, п'ятиполюсники й шестиполюсники (рис.ДІІ.3);





6)



в)

Рис.ДІІІ.3. Багатополюсники для трьох паралельних ліній із взаємоіндукцією між ними: а, б, в – схеми заміщення відповідно чотирьох-, п'яти- і шестиполусника;

у варіанті I $Z_1 = Z_{0лI} - Z_{0MI-II}$; $Z_2 = Z_{0лII} - Z_{0MI-II}$;

$Z_3 = Z_{0лIII} - Z_{0MI-III}$; $Z_4 = Z_{0MI-II} - Z_{0MI-III}$; $Z_5 = Z_{0MI-III}$;

у варіанті II $Z_1 = Z_{0лI} - Z_{0M}$; $Z_2 = Z_{0лII} - Z_{0M}$; $Z_3 = Z_{0лIII} - Z_{0M}$; $Z_4 = Z_{0M}$;

у варіанті III

$Z_1 = Z_{0лI} - Z_{0MI-II} - Z_{0MII-III} + Z_{0MI-III}$; $Z_2 = Z_{0лII} - Z_{0MI-II} Z_{0MII-III} / Z_{0MI-III}$;

$Z_3 = Z_{0лIII} - Z_{0MI-II} - Z_{0MII-III} + Z_{0MI-III}$; $Z_4 = (Z_{0MII-III} + Z_{0MI-II})(Z_{0MII-III} - Z_{0MI-III}) / Z_{0MI-III}$;

$Z_5 = (Z_{0MII-III} + Z_{0MI-II})(Z_{0MI-II} - Z_{0MI-III})$; $Z_6 = Z_{0MII-III} + Z_{0MI-II}$.

Примітка. Варіант I використовується при $Z_{0MI-III} = Z_{0MII-III}$;

варіант II при $Z_{0MI-II} = Z_{0MI-III} = Z_{0MII-III} = Z_{0M}$.

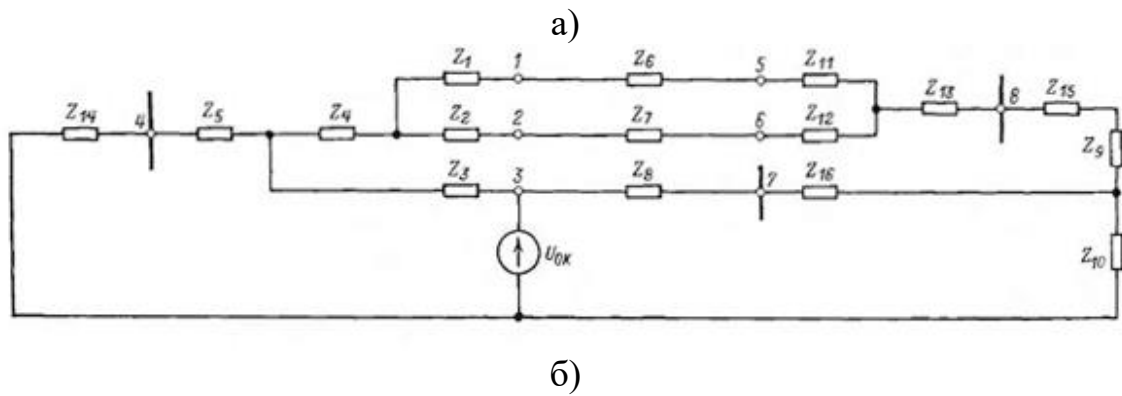


Рис.ДІІІ.4. Три паралельні лінії із взаємоіндукцією між ними при КЗ на одній з них: *а* – вихідна схема; *б* – схема заміщення при

$$\begin{aligned}
 &Z_{0MI-III} = Z_{0MII-III}; \quad Z_{0MIV-VI} = Z_{0MV-VI}; \\
 &Z_1 = Z_{0лI} - Z_{0MI-II}; \quad Z_2 = Z_{0лII} - Z_{0MI-II}; \quad Z_3 = Z_{0лIII} - Z_{0MI-III}; \\
 &Z_4 = Z_{0MI-II} - Z_{0MI-III}; \quad Z_5 = Z_{0MI-III}; \quad Z_6 = Z_{0лIV} - Z_{0MIV-V}; \\
 &Z_7 = Z_{0лV} - Z_{0MIV-V}; \quad Z_8 = Z_{0лVI} - Z_{0MIV-VI}; \quad Z_9 = Z_{0MIV-V} - Z_{0MIV-VI}; \\
 &Z_{10} = Z_{0MIV-VI}; \quad Z_{11} = Z_{0лVII} - Z_{0MVII-VIII}; \quad Z_{12} = Z_{0лVIII} - Z_{0MVII-VIII}; \\
 &Z_{13} = Z_{0MVII-VIII}; \quad Z_{14} = Z_{0сI}; \quad Z_{15} = Z_{0сII}; \quad Z_{16} = Z_{0сIII}.
 \end{aligned}$$

Таблиця ДІІІ.2

Багатополюсники для трьох паралельних ліній із взаємоіндукцією між ними

Номер багатополюсника	Виводи багатополюсника	Тип багатополюсника
1	1, 2, 3, 4	Чотириполюсник
2	1, 2, 3, 5, 6, 7	Шестиполюсник
3	5, 6, 8	Триполюсник

З урахуванням того, що $Z_{0MI-III} = Z_{0MII-III}$, для чотириполюсника приймається схема заміщення за рис.ДІІІ.3,а, варіант I. Оскільки $Z_{0MIV-VI} = Z_{0MV-VI}$ для шестиполюсника приймається схема заміщення за рис.ДІІІ.3,в, варіант I. Для триполюсника приймається схема заміщення за рис.ДІІІ.1,в.

Схема заміщення трьох паралельних ліній із взаємоіндукцією за рис.ДІІІ.4,а при замиканні на землю на одній з них наведена на рис.ДІІІ.4,б. У відповідності зі схемою на рис.ДІІІ.3,в (варіант I) у схемі заміщення на рис.ДІІІ.4,б опір Z_9 включений на суму струмів в опорах Z_6 і Z_7 шестиполюсника, а Z_{10} - на суму струмів в опорах Z_6 , Z_7 і Z_8 .

6. Схема паралельних ліній за рис.ДІІ.5,а розбивається на багатополосники (табл.ДІІ.3), для яких відповідно до співвідношень опорів взаємоіндукції між окремими лініями прийняті схеми заміщення, зазначені в таблиці.

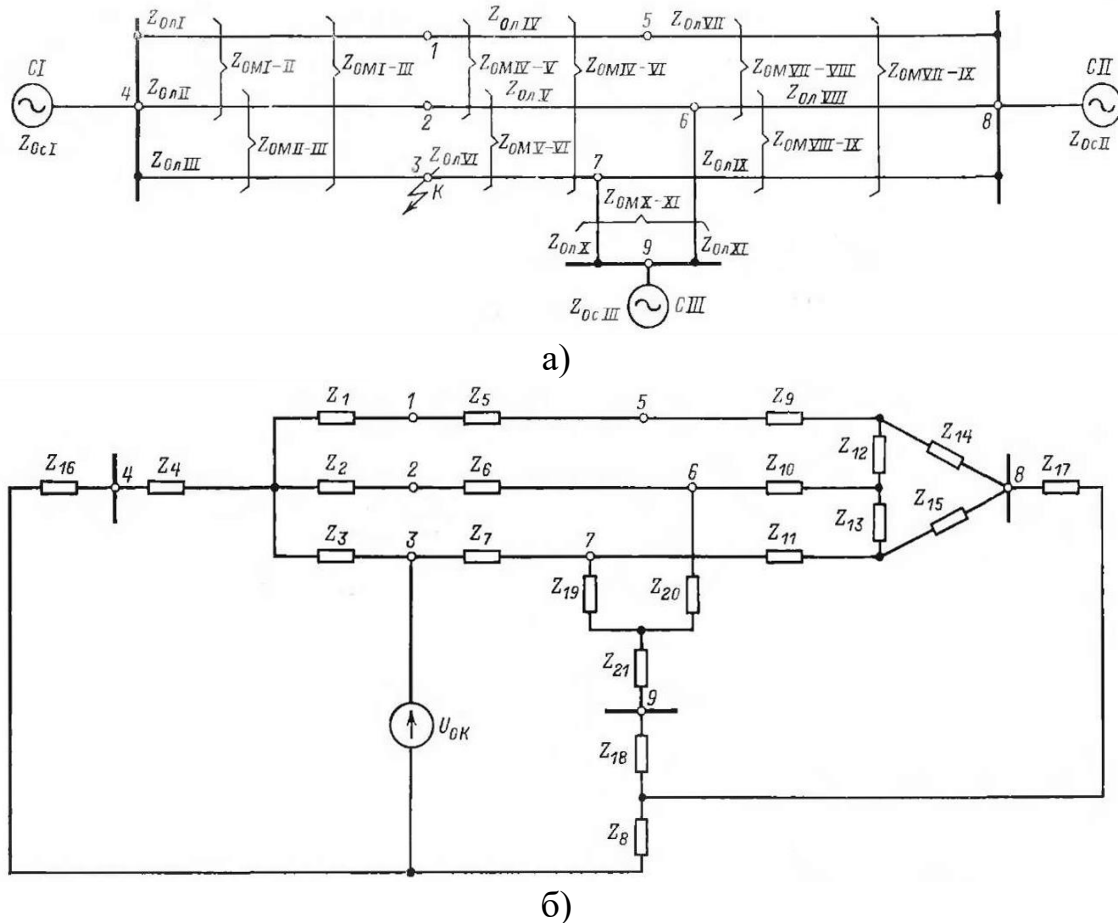


Рис.ДІІ.5. Три паралельні лінії з відгалуженням із взаємоіндукцією між ними при КЗ на одній з них: а – вихідна схема; б – схема заміщення при

$$\begin{aligned}
 & Z_{0MI-II} = Z_{0MI-III} = Z_{0MII-III}; \quad Z_{0MIV-V} = Z_{0MIV-VI} = Z_{0MV-VI}; \\
 & Z_1 = Z_{0лI} - Z_{0MI-II}; \quad Z_2 = Z_{0лII} - Z_{0MI-II}; \quad Z_3 = Z_{0лIII} - Z_{0MI-II}; \\
 & Z_4 = Z_{0MI-II}; \quad Z_5 = Z_{0лIV} - Z_{0MIV-V}; \quad Z_6 = Z_{0лV} - Z_{0MIV-V}; \\
 & Z_7 = Z_{0лVI} - Z_{0MIV-V}; \quad Z_8 = Z_{0MIV-V}; \quad Z_9 = Z_{0лVII} - Z_{0MVII-VIII} - Z_{0MVIII-IX} + Z_{0MVII-IX}; \\
 & Z_{10} = Z_{0лVIII} - Z_{0MVII-VIII} - Z_{0MVIII-IX} / Z_{0MVII-IX}; \quad Z_{11} = Z_{0лIX} - Z_{0MVII-VIII} - Z_{0MVIII-IX} + Z_{0MVII-IX}; \\
 & Z_{12} = (Z_{0MVIII-IX} + Z_{0MVII-VIII})(Z_{0MVIII-IX} - Z_{0MVII-IX}) / Z_{0MVII-IX}; \\
 & Z_{13} = (Z_{0MVIII-IX} + Z_{0MVII-VIII})(Z_{0MVII-VIII} - Z_{0MVII-IX}) / Z_{0MVII-IX}; \\
 & Z_{14} = Z_{15} = Z_{0MVIII-IX} + Z_{0MVII-VIII}; \quad Z_{16} = Z_{0сI}; \quad Z_{17} = Z_{0сII}; \quad Z_{18} = Z_{0сIII}; \\
 & Z_{19} = Z_{0лX} - Z_{0MX-XI}; \quad Z_{20} = Z_{0лXI} - Z_{0MX-XI}; \quad Z_{21} = Z_{0MX-XI}.
 \end{aligned}$$

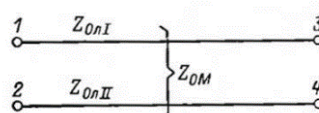
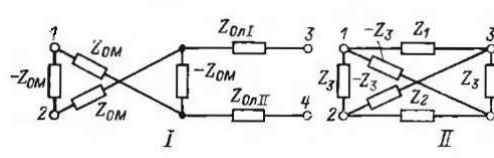
Багатополюсники для трьох паралельних ліній з відгалуженнями із взаємоіндукцією між ними

Номер багато-полюсника	Виводи багато-полюсника	Тип багато-полюсника	Співвідношення опорів взаємоіндукції	Прийнята схема заміщення
1	1, 2, 3, 4	4-полюсник	$Z_{0MI-II} = Z_{0MI-III} = Z_{0MII-III}$	Рис.ДІІІ.3,а (варіант ІІ)
2	1, 2, 3, 5, 6, 7	6-полюсник	$Z_{0MIV-V} = Z_{0MIV-VI} = Z_{0MIV-VI}$	Рис.ДІІІ.3,в (варіант ІІ)
3	5, 6, 7, 8	4-полюсник	$Z_{0MVI-VII} \neq Z_{0MVI-IX} \neq Z_{0MVI-IX}$	Рис.ДІІІ.3,а (варіант ІІІ)
4	6, 7, 9	3-полюсник	-	Рис.ДІІІ.1,в

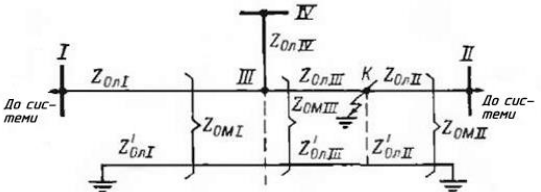
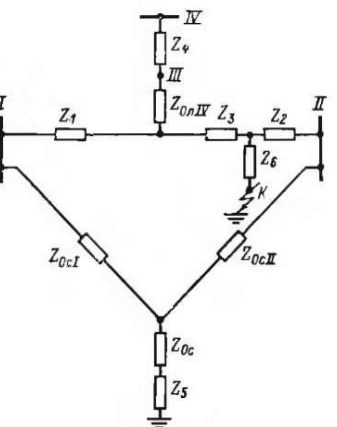
Схема заміщення трьох паралельних ліній із взаємоіндукцією за рис.ДІІІ.5,а при КЗ на одній з них наведена на рис.ДІІІ.5,б. Відповідно до рис.ДІІІ.3,в (варіант ІІ) у схемі заміщення опір Z_8 включений в вітку, де протікає сума струмів в опорах Z_5 , Z_6 і Z_7 .

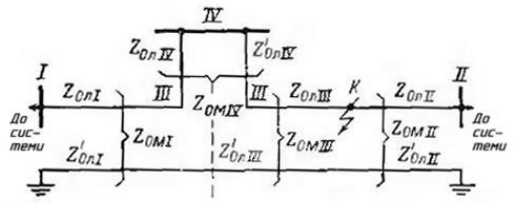
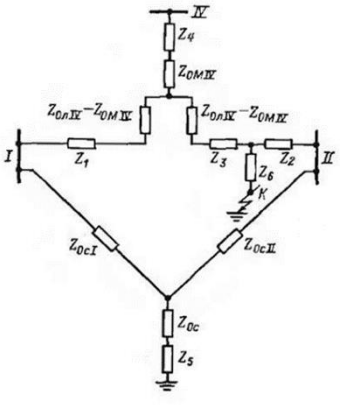
7. У табл.ДІІІ.4 наведені приклади схем заміщення двох і трьох паралельних ліній із взаємоіндукцією для випадків, які найчастіше зустрічаються. Схеми заміщення складені з використанням вищевикладеної методики, за винятком схем за пп.12 і 13, які складені на підставі розгляду падінь напруги на окремих ділянках схеми.

Приклади схем заміщення нульової послідовності паралельних ліній із взаємоіндукцією

Вихідна схема	Схема заміщення	Примітки
		Схема заміщення дана для випадків замикання поза зоною зближення $Z_1 = \frac{Z_{0nI} Z_{0nII} - Z_{0M}^2}{Z_{0nII}};$ $Z_2 = \frac{Z_{0nI} Z_{0nII} - Z_{0M}^2}{Z_{0nI}};$ $Z_3 = \frac{Z_{0nI} Z_{0nII} - Z_{0M}^2}{Z_{0M}};$

		$Z_1 = (1-n)(Z_{0nIV} - Z_{0MII});$ $Z_2 = n(Z_{0nIV} - Z_{0MII})$
		-
		A – зона зближення паралельних ліній
		$Z_1 = (1-m)Z_{0M};$ $Z_2 = (1-m)(Z_{0nI} - Z_{0M});$ $Z_3 = (1-m)(Z_{0nII} - Z_{0M});$
		$Z_4 = m(Z_{0nI} - Z_{0M});$ $Z_5 = (m-n)(Z_{0nII} - Z_{0M});$
		$Z_6 = n(Z_{0nII} - Z_{0M});$ $Z_7 = nZ_{0M};$ $Z_8 = (m-n)Z_{0M};$ $Z_1 = Z_{0nIII} - Z_{0MII};$ $Z_2 = (1-n)(Z_{0nIV} - Z_{0MII});$ $Z_4 = n(Z_{0nIV} - Z_{0MII});$ $Z_5 = Z_{0nV} - Z_{0MIII};$ $Z_6 = Z_{0nVI} - Z_{0MIII};$ $Z_7 = Z_{0nVII} - Z_{0MIV};$ $Z_8 = Z_{0nVIII} - Z_{0MIV}$

Вихідна схема	Схема заміщення	Примітки
		При $Z_{0rI} = Z'_{0rI}, Z_{0rII} = Z'_{0rII},$ $Z_{0rIII} = Z'_{0rIII}$ $Z_{0r\Sigma} = Z_{0rI} + Z_{0rII} + Z_{0rIII};$ $Z_{0M\Sigma} = Z_{0MI} + Z_{0MII} + Z_{0MIII};$ $Z_1 = Z_{0rI} - \frac{Z_{0M\Sigma} Z_{0MI}}{Z_{0r\Sigma}};$ $Z_2 = Z_{0rII} - \frac{Z_{0M\Sigma} Z_{0MII}}{Z_{0r\Sigma}};$ $Z_3 = Z_{0rIII} - \frac{Z_{0M\Sigma} Z_{0MIII}}{Z_{0r\Sigma}};$ $Z_4 = \frac{Z_{0MI} Z_{0MIII}}{Z_{0r\Sigma}};$ $Z_5 = \frac{Z_{0MI} Z_{0MII}}{Z_{0r\Sigma}};$ $Z_6 = \frac{Z_{0MII} Z_{0MIII}}{Z_{0r\Sigma}}.$ Система представлена на схемі заміщення еквівалентною зіркою Z_{0cI}, Z_{0cII} й Z_{0c}.

Вихідна схема	Схема заміщення	Примітки
		При $Z_{0.лI} = Z'_{0.лI}, Z_{0.лII} = Z'_{0.лII},$ $Z_{0.лIII} = Z'_{0.лIII}, Z_{0.лIV} = Z'_{0.лIV}$ $Z_{0.л\Sigma} = Z_{0.лI} + Z_{0.лII} + Z_{0.лIII};$ $Z_{0M\Sigma} = Z_{0MI} + Z_{0MII} + Z_{0MIII};$ $Z_1 = Z_{0.лI} - \frac{Z_{0M\Sigma} Z_{0MI}}{Z_{0.л\Sigma}};$ $Z_2 = Z_{0.лII} - \frac{Z_{0M\Sigma} Z_{0MII}}{Z_{0.л\Sigma}};$ $Z_3 = Z_{0.лIII} - \frac{Z_{0M\Sigma} Z_{0MIII}}{Z_{0.л\Sigma}};$ $Z_4 = \frac{Z_{0MI} Z_{0MIII}}{Z_{0.л\Sigma}};$ $Z_5 = \frac{Z_{0MI} Z_{0MII}}{Z_{0.л\Sigma}};$ $Z_6 = \frac{Z_{0MII} Z_{0MIII}}{Z_{0.л\Sigma}}.$ Система представлена на схемі заміщення еквівалентною зіркою Z_{0cI}, Z_{0cII} й Z_{0c}.

Додаток IV

ВИБІР РОЗРАХУНКОВОЇ УМОВИ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ СТРУМУ СПРАЦЬОВУВАННЯ ПЕРШОГО СТУПЕНЯ ЗАХИСТУ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЛІНІЙ 110 - 500 КВ

1. У додатку даються рекомендації з вибору розрахункової умови при визначенні струму спрацьовування першого ступеня струмового спрямованого захисту нульової послідовності від замикань на землю паралельних ліній 110 – 500 кВ, зв'язаних взаємоіндукцією. Як зазначено в главі 11, струм спрацьовування цього ступеня захисту повинен вибиратися за умовою відбудовування від потроєного струму нульової послідовності, що проходить у місці установки захисту, зокрема, при:

А) замиканні на землю на шинах протилежної підстанції в режимі, коли друга паралельна лінія відключена й заземлена на обох кінцях (глава 11, п.11-2,А);

Б) каскадному відключенні замикання на землю однієї фази на кінці паралельної лінії поблизу шин підстанції, на якій цей захист установлений (глава 11, п.11-2,Б).

У додатку побудовані криві залежності від довжини лінії відношення струму в захисті при замиканні на землю на шинах протилежної підстанції в режимі, коли друга паралельна лінія відключена й заземлена на обох кінцях, до струму в захисті при каскадному відключенні замикання на землю однієї фази на паралельній лінії поблизу шин підстанції, на якій цей захист установлений.

2. Нижче приводиться виведення розрахункових виразів для побудови зазначених кривих.

Потроєний струм нульової послідовності в захисті при замиканні на землю однієї фази на шинах протилежної підстанції (у точці *K* мережі за рис.ДІV.1,*a*) і при каскадному відключенні замикання на землю однієї фази на паралельній лінії (у точці *K* мережі за рис.ДІV.2,*a*)

$$3I_{03.w}^{(1)} = \frac{3E_{\phi}}{2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma}} k_{cmp}. \quad (\text{ДІV.1})$$

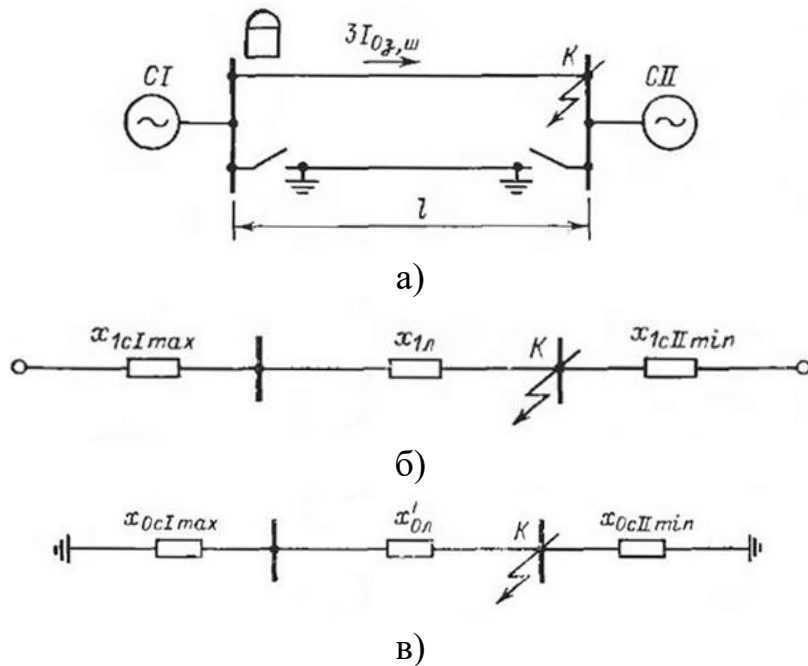


Рис.ДІV.1. Замикання на землю на шинах протилежної підстанції:
а – вихідна схема; б – схема заміщення прямої (зворотної)
послідовності; в – схема заміщення нульової послідовності.

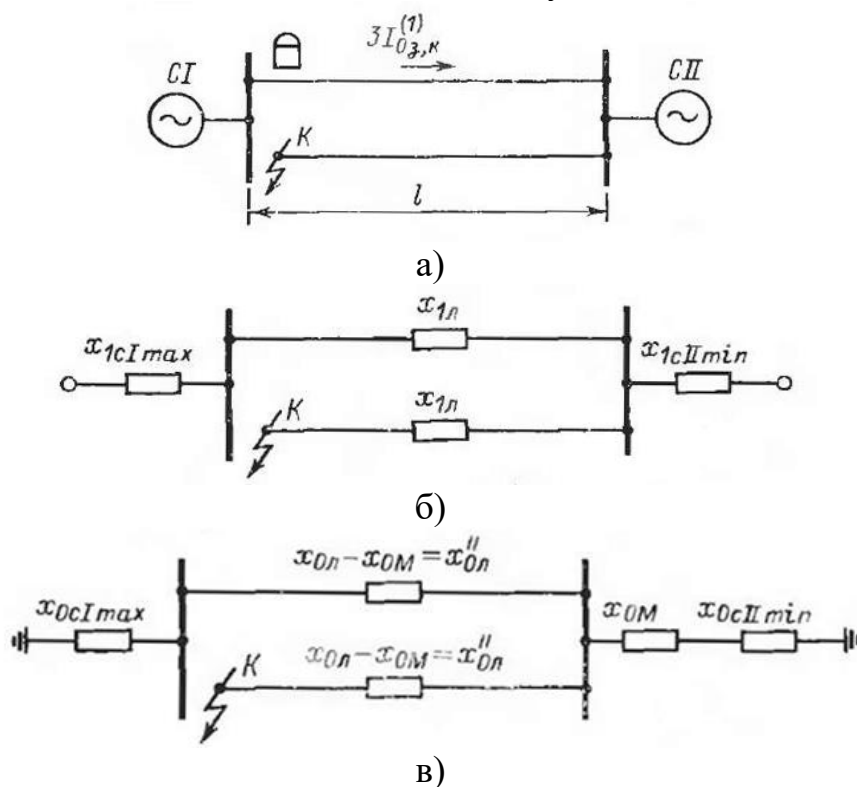


Рис.ДІV.2. Каскадне відключення замикання на землю на ближньому кінці паралельної лінії: а – вихідна схема; б – схема заміщення прямої (зворотної) послідовності; в – схема заміщення нульової послідовності.

Потроєний струм нульової послідовності в захисті при замиканні на землю двох фаз на шинах протилежної підстанції (у точці K мережі на рис. ДІV.1,а)

$$3I_{03.ш}^{(1,1)} = \frac{3E_{\phi}}{x_{1\Sigma} + 2x_{0\Sigma}} k_{cmp}. \quad (\text{ДІV.2})$$

У виразах (ДІV.1) і (ДІV.2)

E_{ϕ} - фазна ЕРС системи;

$x_{1\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$ - результуючі опори схем заміщення відповідно прямої (зворотної) і нульової послідовностей;

$k_{стр}$ - коефіцієнт струморозподілу в схемі заміщення нульової послідовності.

Зі схем заміщення прямої і нульової послідовностей за рис. ДІV.1,б і в випливає, що при замиканні на землю однієї або двох фаз у точці K за рис. ДІV.1 у розрахунковому режимі

$$x_{1\Sigma} = \frac{(x_{1cI \max} + x_{1л}) x_{1cII \min}}{x_{1cI \max} + x_{1л} + x_{1cII \min}}; \quad (\text{ДІV.3})$$

$$x_{0\Sigma} = \frac{(x_{0cI \max} + x'_{0л}) x_{0cII \min}}{x_{0cI \max} + x'_{0л} + x_{0cII \min}}; \quad (\text{ДІV.4})$$

$$k_{cmp} = \frac{x_{0cII \min}}{x_{0cI \max} + x'_{0л} + x_{0cII \min}}. \quad (\text{ДІV.5})$$

У виразах (ДІV.3) - (ДІV.5):

$x_{1cI \max}$ і $x_{0cI \max}$ - опори системи CI відповідно прямої і нульової послідовностей у максимальному режимі;

$x_{1cII \min}$ і $x_{0cII \min}$ - опори системи CII відповідно прямої і нульової послідовностей у мінімальному режимі;

$x_{1л}$ - опір прямої послідовності лінії, яка захищається;

$x'_{0л}$ - опір нульової послідовності лінії, що захищається, при відключеній й заземленій на обох кінцях паралельної лінії.

Підставивши вирази (ДІВ.3) - (ДІВ.5) в (ДІВ.1) і (ДІВ.2), одержимо вирази для струму в захисті при замиканні на землю відповідно одної і двох фаз на шинах протилежної підстанції в режимі, коли друга паралельна лінія відключена й заземлена на обох кінцях:

$$3I_{03.u}^{(1)} = \frac{3E_{\phi}}{2 \frac{(x_{1cl \max} + x_{1l})x_{1cl \min}}{x_{1cl \max} + x_{1l} + x_{1cl \min}} + \frac{(x_{0cl \max} + x'_{0l})x_{0cl \min}}{x_{0cl \max} + x'_{0l} + x_{0cl \min}}} \times \times \frac{x_{0cl \min}}{x_{0cl \max} + x'_{0l} + x_{0cl \min}}; \quad (\text{ДІВ.6})$$

$$3I_{03.u}^{(1,1)} = \frac{3E_{\phi}}{\frac{(x_{1cl \max} + x_{1l})x_{1cl \min}}{x_{1cl \max} + x_{1l} + x_{1cl \min}} + 2 \frac{(x_{0cl \max} + x'_{0l})x_{0cl \min}}{x_{0cl \max} + x'_{0l} + x_{0cl \min}}} \times \times \frac{x_{0cl \min}}{x_{0cl \max} + x'_{0l} + x_{0cl \min}}. \quad (\text{ДІВ.7})$$

Зі схем заміщення прямої і нульової послідовностей за рис.ДІВ.2,б і в можна визначити, що при каскадному відключенні замикання на землю однієї фази в точці K мережі за рис. ДІВ.2,а в розрахунковому режимі

$$x_{1\Sigma} = \frac{(x_{1cl \max} + x_{1l})x_{1cl \min}}{x_{1cl \max} + x_{1l} + x_{1cl \min}} + x_{1l}; \quad (\text{ДІВ.8})$$

$$x_{0\Sigma} = \frac{(x_{0cl \max} + x_{0l} - x_{0M})(x_{0M} + x_{0cl \min})}{x_{0cl \max} + x_{0l} + x_{0cl \min}} + (x_{0l} - x_{0M}); \quad (\text{ДІВ.9})$$

$$k_{cmp} = \frac{x_{0M} + x_{0cl \min}}{x_{0cl \max} + x_{0l} + x_{0cl \min}}. \quad (\text{ДІВ.10})$$

У виразах (ДІВ.8) – (ДІВ.10)

$x_{1cl \max}$, $x_{0cl \max}$, $x_{1cl \min}$ і $x_{0cl \min}$ – те ж, що й в (ДІВ.3) – (ДІВ.5);

x_{0l} – опір нульової послідовності ліній, що захищається;

x_{0M} – опір взаємодукції між лініями.

Підставивши вирази (ДІВ.8) – (ДІВ.10) в (ДІВ.1), одержимо вираз (ДІВ.11) для струму в захисті при каскадному відключенні замикання на

землю однієї фази на кінці паралельної лінії поблизу шин підстанції, на якій цей захист установлений:

$$3I_{0\text{з.к}}^{(1)} = \frac{3E_{\phi}}{2 \frac{(x_{1cl \max} + x_{1l})x_{1cl \min}}{x_{1cl \max} + x_{1l} + x_{1cl \min}} + 2x_{1l} + \frac{(x_{0cl \max} + x_{0l} - x_{0M})(x_{0M} + x_{0cl \min})}{x_{0cl \max} + x_{0l} + x_{0cl \min}} + x_{0l} - x_{0M}} \times \times \frac{x_{0M} + x_{0cl \min}}{x_{0cl \max} + x_{0l} + x_{0cl \min}}. \quad (\text{ДІВ.11})$$

Опори лінії x_{1l} і x'_{0l} визначаються за виразами

$$x_{1l} = x_{1\text{ном}} l, \quad (\text{ДІВ.12})$$

де $x_{1\text{пит}}$ - питомий опір прямої послідовності ліній;

l – довжина лінії, що захищається, км;

$$x'_{0l} = x_{0l} - \frac{x_{0M}^2}{x_{0l}}. \quad (\text{ДІВ.13})$$

Прийнявши далі з метою спрощення середні параметри

$$\frac{x_{1cl \min}}{x_{1cl \max}} = \frac{x_{0cl \min}}{x_{0cl \max}} = \frac{x_{1cl \min}}{x_{1cl \max}} = \frac{x_{0cl \min}}{x_{0cl \max}} = 2;$$

для ліній 110 - 220 кВ

$$x_{1l} = 0,4 \text{ Ом/км}, \quad x_{0l} = 3,5x_{1l}, \quad x_{0M} = 2x_{1l};$$

для ліній 500 кВ при відстані між лініями 50 м

$$x_{1l} = 0,3 \text{ Ом/км}, \quad x_{0l} = 3,5x_{1l}, \quad x_{0M} = 1,88x_{1l};$$

$$x_{0M} = 1,45x_{1l} \text{ при відстані між лініями 100 м і ввівши позначення}$$

$$g = \frac{x_{1cl \max}}{x_{1cl \max}}, \quad m = \frac{x_{0cl \max}}{x_{1cl \max}}, \quad n = \frac{x_{0cl \max}}{x_{1cl \max}}, \quad (\text{ДІВ.14})$$

з виразів (ДІВ.6), (ДІВ.7) і (ДІВ.11) з урахуванням (ДІВ.13) і (ДІВ.14) після перетворення одержимо вирази (ДІВ.15) - (ДІВ.18) для відношення струмів у захисті:

для ліній 110 - 220 кВ

$$\frac{I_{03,ш}^{(1)}}{I_{03,к}^{(1)}} = \frac{\frac{(x_{1cl\max} + 0,4l)2gx_{1cl\max}}{x_{1cl\max} + 0,4l + 2gx_{1cl\max}} + 0,7l + \frac{(mx_{1cl\max} + 0,6l)(0,4l + gnx_{1cl\max})}{mx_{1cl\max} + 1,4l + 2gnx_{1cl\max}}}{2 \frac{(x_{1cl\max} + 0,4l)(mx_{1cl\max} + 0,944l + 2gnx_{1cl\max})}{n(x_{1cl\max} + 0,4l + 2gx_{1cl\max})} + mx_{1cl\max} + 0,944l} \times \frac{(mx_{1cl\max} + 1,4l + 2gnx_{1cl\max})}{0,4l + gnx_{1cl\max}}; \quad (\text{ДІВ.15})$$

$$\frac{I_{03,ш}^{(1,1)}}{I_{03,к}^{(1,1)}} = \frac{\frac{(x_{1cl\max} + 0,4l)2gx_{1cl\max}}{x_{1cl\max} + 0,4l + 2gx_{1cl\max}} + 0,7l + \frac{(mx_{1cl\max} + 0,6l)(0,4l + gnx_{1cl\max})}{mx_{1cl\max} + 1,4l + 2gnx_{1cl\max}}}{\frac{(x_{1cl\max} + 0,4l)(mx_{1cl\max} + 0,944l + 2gnx_{1cl\max})}{n(x_{1cl\max} + 0,4l + 2gx_{1cl\max})} + 2(mx_{1cl\max} + 0,944l)} \times \frac{(mx_{1cl\max} + 1,4l + 2gnx_{1cl\max})}{0,4l + gnx_{1cl\max}}; \quad (\text{ДІВ.16})$$

для ліній 500 кВ при відстані між ними 50 м

$$\frac{I_{03,ш}^{(1)}}{I_{03,к}^{(1)}} = \frac{\frac{(x_{1cl\max} + 0,3l)2gx_{1cl\max}}{x_{1cl\max} + 0,3l + 2gx_{1cl\max}} + 0,583l + \frac{(mx_{1cl\max} + 0,486l)(0,282l + gnx_{1cl\max})}{mx_{1cl\max} + 1,05l + 2gnx_{1cl\max}}}{2 \frac{(x_{1cl\max} + 0,3l)(mx_{1cl\max} + 0,746l + 2gnx_{1cl\max})}{n(x_{1cl\max} + 0,3l + 2gx_{1cl\max})} + mx_{1cl\max} + 0,746l} \times \frac{(mx_{1cl\max} + 1,05l + 2gnx_{1cl\max})}{0,282l + gnx_{1cl\max}}; \quad (\text{ДІВ.17})$$

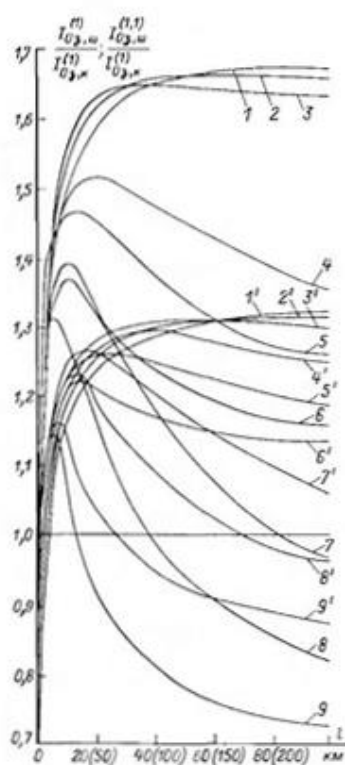
для ліній 500 кВ при відстані між ними 100 м

$$\frac{I_{03,ш}^{(1)}}{I_{03,к}^{(1)}} = \frac{\frac{(x_{1cl\max} + 0,3l)2gx_{1cl\max}}{x_{1cl\max} + 0,3l + 2gx_{1cl\max}} + 0,608l + \frac{(mx_{1cl\max} + 0,615l)(0,218l + gnx_{1cl\max})}{mx_{1cl\max} + 1,05l + 2gnx_{1cl\max}}}{2 \frac{(x_{1cl\max} + 0,3l)(mx_{1cl\max} + 0,87l + 2gnx_{1cl\max})}{n(x_{1cl\max} + 0,3l + 2gx_{1cl\max})} + mx_{1cl\max} + 0,87l} \times \frac{(mx_{1cl\max} + 1,05l + 2gnx_{1cl\max})}{0,282l + gnx_{1cl\max}}. \quad (\text{ДІВ.18})$$

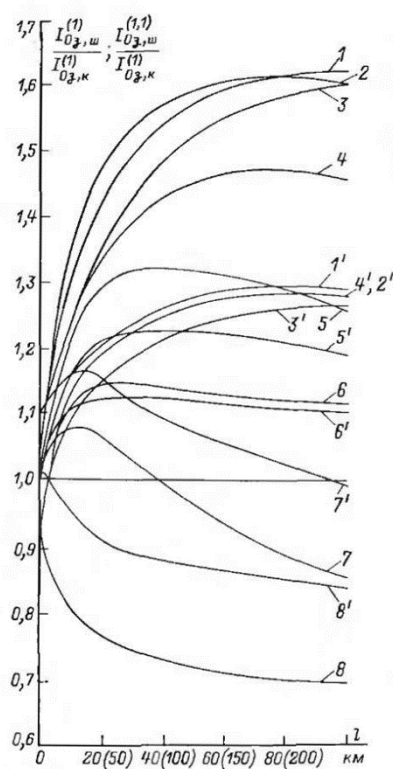
Вирази для відношень $I_{03,ш}^{(1,1)} / I_{03,ш}^{(1)}$ для ліній 500 кВ отримані аналогічно (не приводяться).

3. За отриманими виразами для різних значень параметрів $x_{1cl\max}$, g , m і n побудовані криві (за допомогою ЕОМ за спеціально розробленою програмою М.В.Михайлової) $I_{03,ш}^{(1)} / I_{03,к}^{(1)} = f(l)$ і $I_{03,ш}^{(1,1)} / I_{03,к}^{(1)} = f(l)$, які

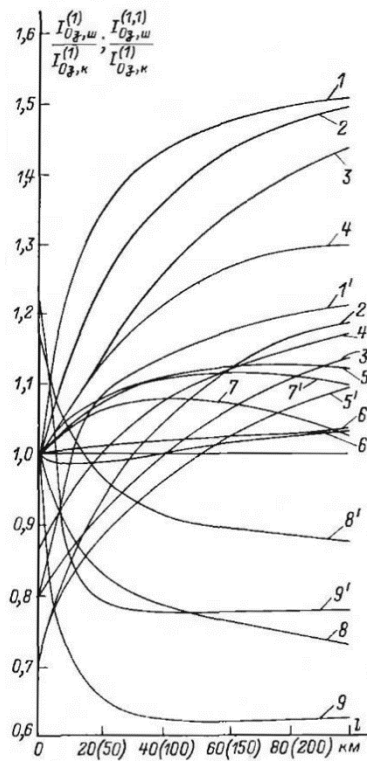
наведені на рис.ДІV.3 для ліній 110 - 220 кВ і на рис.ДІV.4 і рис.ДІV.3 для ліній 500 кВ.



а)



б)



в)

Рис. ДІV.3. Залежність відношень $I_{03,ш}^{(1)} / I_{03,к}^{(1)}$ і $I_{03,ш}^{(1,1)} / I_{03,к}^{(1)}$ від довжини l дволанцюгової лінії 110(220 кВ) за рис.ДІV.1,а й рис.ДІV.2,а:

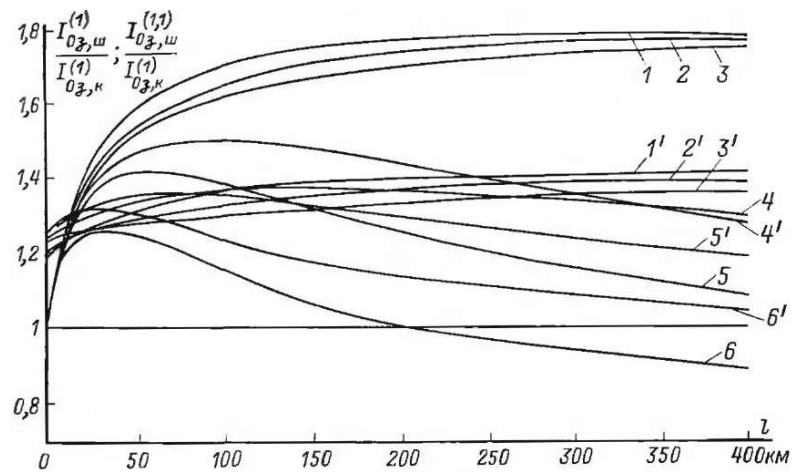
а - $m = 2$; $x_{1cl \max} = 1,32$ (3,3) Ом; 1, 1' - $g = 10$, $n = 2$; 2, 2' - $g = 5$, $n = 2$;
3, 3' - $g = 2$, $n = 2$; 4, 4' - $g = 10$, $n = 1$; 5, 5' - $g = 5$, $n = 1$; 6, 6' - $g = 2$, $n = 1$;
7, 7' - $g = 10$, $n = 0,5$; 8, 8' - $g = 5$, $n = 0,5$; 9, 9' - $g = 2$, $n = 0,5$;

б - $m = 1$; $x_{1cl \max} = 10$ (25) Ом; 1, 1' - $g = 1$, $n = 2$; 2, 2' - $g = 0,2$, $n = 2$;
3, 3' - $g = 4$, $n = 2$; 4, 4' - $g = 4$, $n = 1$; 5, 5' - $g = 1$, $n = 1$; 6, 6' - $g = 0,2$, $n = 1$;
7, 7' - $g = 1$, $n = 0,5$; 8, 8' - $g = 0,2$, $n = 0,5$;

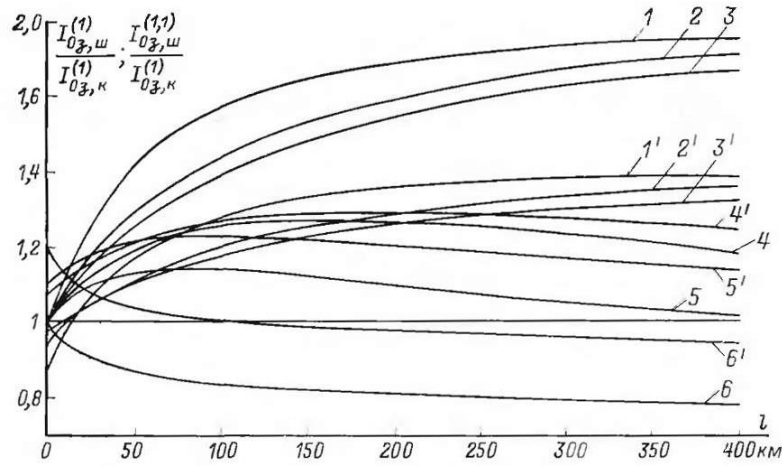
в - $m = 2$; $x_{1cl \max} = 40$ (100) Ом; 1, 1' - $g = 0,04$, $n = 2$; 2, 2' - $g = 0,2$, $n = 2$;
3, 3' - $g = 1$, $n = 2$; 4, 4' - $g = 1$, $n = 1$; 5, 5' - $g = 1$, $n = 2$; 6, 6' - $g = 1$, $n = 2$;
7, 7' - $g = 1$, $n = 0,5$; 8, 8' - $g = 0,2$, $n = 0,5$; 9, 9' - $g = 0,04$, $n = 0,5$;

Примітка. 1. У дужках зазначені довжини ліній і опори $x_{1cl \max}$ для 220 кВ.

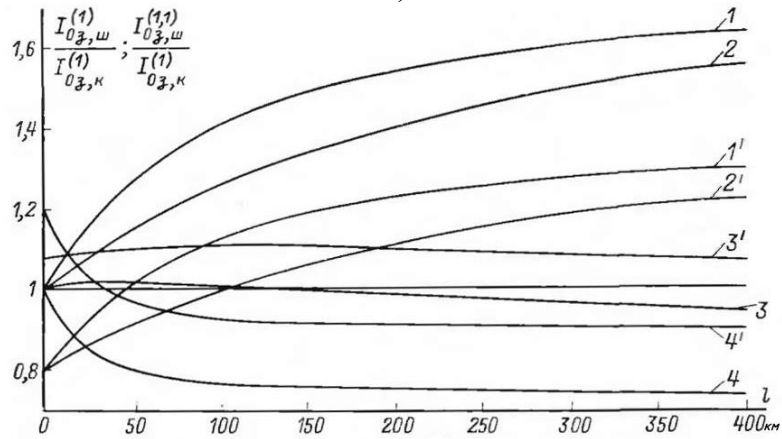
2. Штрихами позначені криві $I_{03,ш}^{(1,1)} / I_{03,к}^{(1)} = f(l)$.



а)



б)



в)

Рис. ДІV.4. Залежність відношень $I_{03,ш}^{(1)} / I_{03,к}^{(1)}$ і $I_{03,ш}^{(1,1)} / I_{03,к}^{(1,1)}$ від довжини l паралельних ліній 500 кВ при відстані між лініями 50 м:

- а - $m = 0,5$; $x_{1cl \max} = 10$ Ом; 1, 1' - $g = 2$, $n = 2$; 2, 2' - $g = 5$, $n = 2$;
 3, 3' - $g = 10$, $n = 2$; 4, 4' - $g = 10$, $n = 0,5$; 5, 5' - $g = 5$, $n = 0,5$; 6, 6' - $g = 2$, $n = 0,5$;
 б - $m = 1$; $x_{1cl \max} = 50$ Ом; 1, 1' - $g = 0,2$, $n = 2$; 2, 2' - $g = 1$, $n = 2$;
 3, 3' - $g = 2$, $n = 2$; 4, 4' - $g = 2$, $n = 0,5$; 5, 5' - $g = 1$, $n = 0,5$; 6, 6' - $g = 0,2$, $n = 0,5$;
 в - $m = 2$; $x_{1cl \max} = 120$ Ом; 1, 1' - $g = 0,1$, $n = 2$; 2, 2' - $g = 0,5$, $n = 2$;
 3, 3' - $g = 0,5$, $n = 0,5$; 4, 4' - $g = 0,1$, $n = 0,5$.

Примітка. Див. примітку 2 до рис. ДІV.3.

Отримані криві можуть використовуватися в конкретних випадках для орієнтовної оцінки, коли потрібно визначити, яка з умов відбудовування є розрахунковою при виборі струму спрацьовування перших ступенів захистів паралельних ліній. Слід урахувати, що на рис. ДІV.3 для ліній 110 і 220 кВ значення опорів $x_{1cl\max}$, а також масштаби по осі абсцис різні. Криві $I_{0з.ш}^{(1,1)} / I_{0з.к}^{(1)} = f(l)$ приводяться для визначення розрахункового виду ушкодження на шинах (замикання на землю однієї або двох фаз).

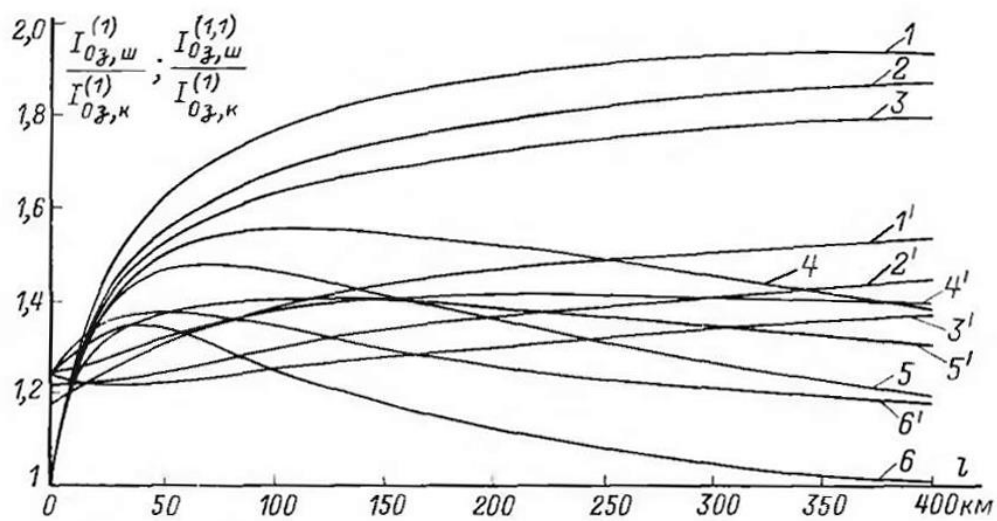
З розгляду кривих на рис. ДІV.3 - рис. ДІV.5 випливає, що при виборі струму спрацьовування першого ступеня захисту паралельних ліній умова п.1,Б у порівнянні з умовою п.1,А не є розрахунковою:

а) для двох паралельних ліній 500 кВ при відстані між ними 100 м - практично у всіх можливих випадках;

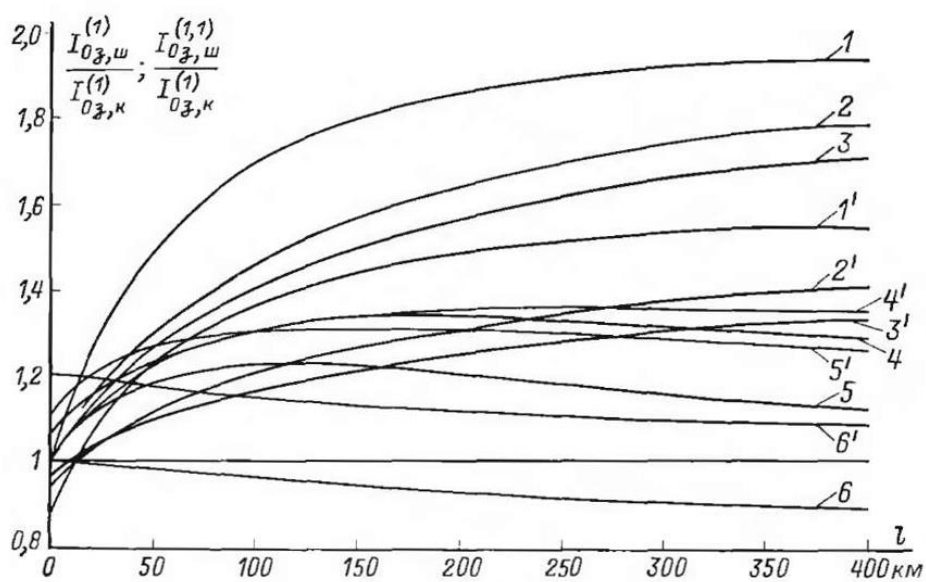
б) для двох паралельних ліній 500 кВ при відстані між ними 50 м - у випадках, коли опір системи з боку підстанції, на якому встановлений розглянутий захист, $x_{1cl\max} \leq 10$ Ом;

в) для двох паралельних ліній 110 - 220 кВ, а також ліній 500 кВ при відстані між ними 50 м у всіх випадках, коли відношення

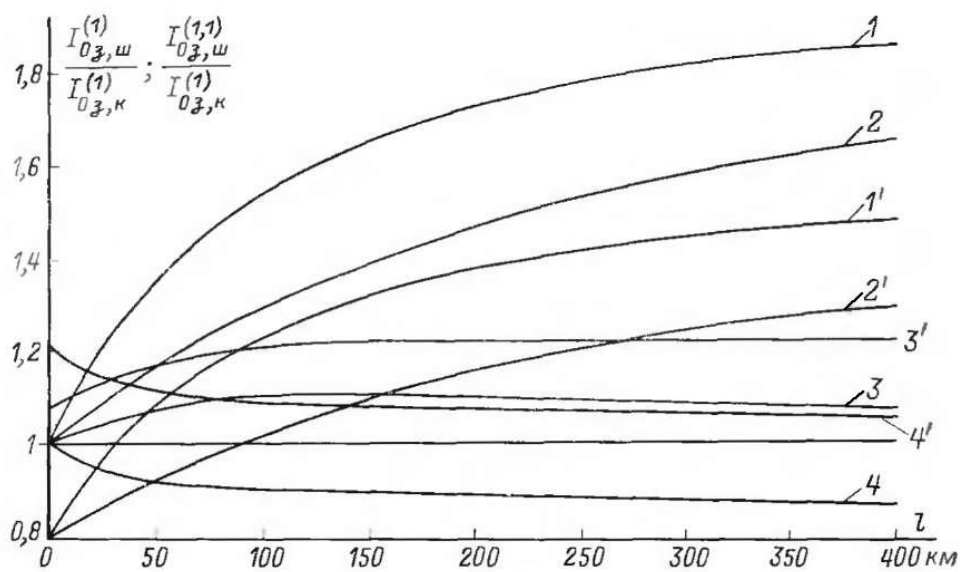
$$n = \frac{x_{0cl\max}}{x_{1cl\max}} \geq 1.$$



a)



б)



в)

Рис. ДІV.5. Залежність відношень $I_{0з.ш}^{(1)} / I_{0з.к}^{(1)}$ і $I_{0з.ш}^{(1,1)} / I_{0з.к}^{(1)}$ від довжини l паралельних ліній 500 кВ при відстані між лініями 100 м:

a - $m = 0,5$; $x_{1cl \max} = 10$ Ом; 1, $1' - g = 2$, $n = 2$; 2, $2' - g = 5$, $n = 2$;
3, $3' - g = 10$, $n = 2$; 4, $4' - g = 10$, $n = 0,5$; 5, $5' - g = 5$, $n = 0,5$; 6, $6' - g = 2$, $n = 0,5$;
б - $m = 1$; $x_{1cl \max} = 50$ Ом; 1, $1' - g = 0,2$, $n = 2$; 2, $2' - g = 1$, $n = 2$;
3, $3' - g = 2$, $n = 2$; 4, $4' - g = 2$, $n = 0,5$; 5, $5' - g = 1$, $n = 0,5$; 6, $6' - g = 0,2$, $n = 0,5$;
в - $m = 2$; $x_{1cl \max} = 120$ Ом; 1, $1' - g = 0,1$, $n = 2$; 2, $2' - g = 0,5$, $n = 2$;
3, $3' - g = 0,5$, $n = 0,5$; 4, $4' - g = 0,1$, $n = 0,5$.

Примітка. Див. примітку 2 до рис. ДІV.3.

Слід зазначити, що, як показали додаткові дослідження, які тут не приводяться, параметр $m = \frac{x_{0cl \max}}{x_{1cl \max}}$ на вибір розрахункової умови впливає незначно, тому в конкретних випадках при використанні кривих його можна не брати до уваги.

Додаток V

ПОВЕДІНКА ЗАХИСТУ НА ЛІНІЯХ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У БЛОКУ ІЗ ТРАНСФОРМАТОРАМИ (АВТОТРАНСФОРМАТОРАМИ), І НА ПАРАЛЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ З ВІДГАЛУЖЕННЯМИ

1. Нижче розглядається поведінка струмового спрямованого захисту нульової послідовності від замикань на землю на лініях, що працюють у блоці із трансформаторами (автотрансформаторами) (рис.ДV.1 і рис.ДV.2), і на паралельних лініях з відгалуженнями (рис.ДV.3) з урахуванням впливу взаємоіндукції.

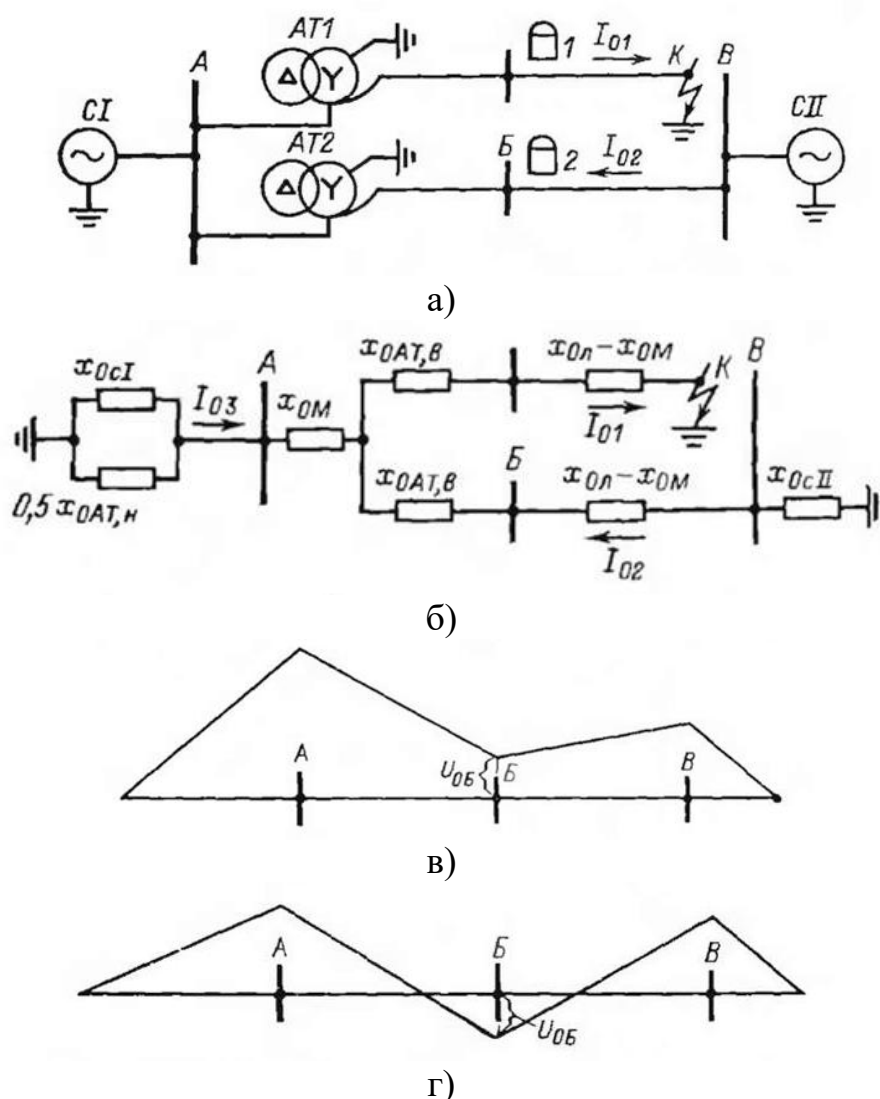


Рис.ДV.1. Каскадне відключення замикання на землю на одній з паралельних ліній, що працюють у блоці з автотрансформаторами:
 а – вихідна схема; б – схема заміщення нульової послідовності;
 в й г – розподіл напруги нульової послідовності уздовж неушкодженої

лінії відповідно при $U_{0B} > 0$ й $U_{0B} < 0$.

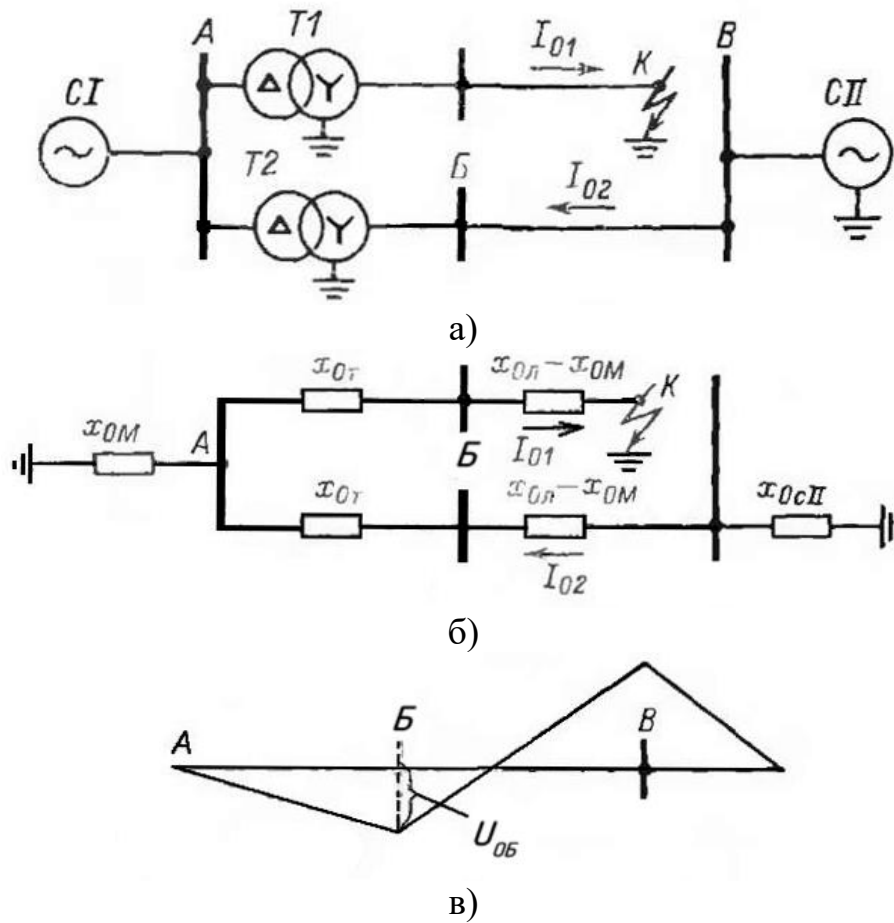
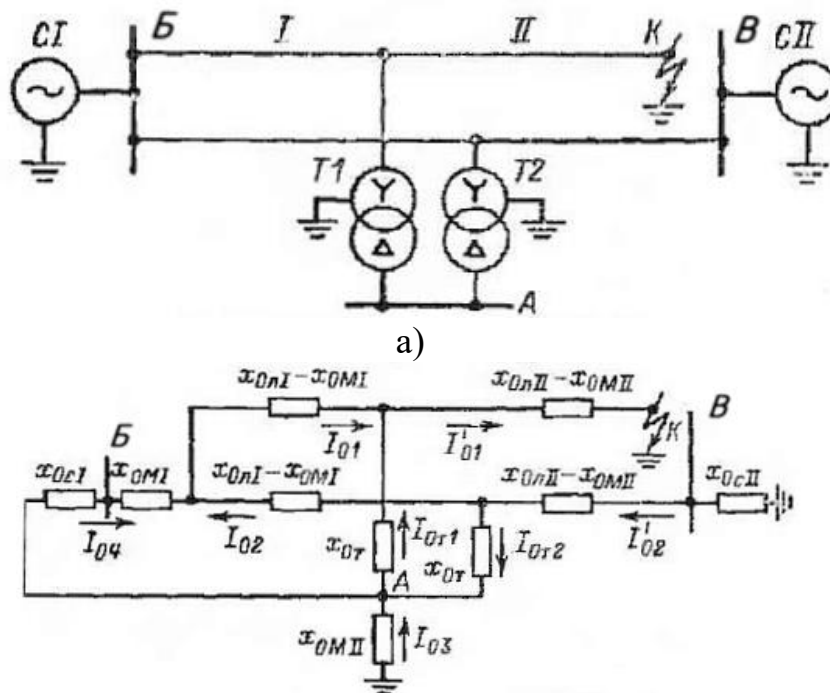


Рис.ДV.2. Каскадне відключення замикання на землю на одній з паралельних ліній, що працюють у блоці із трансформаторами:
 а – вихідна схема; б – схема заміщення нульової послідовності;
 в – розподіл напруги нульової послідовності уздовж неушкодженої лінії.



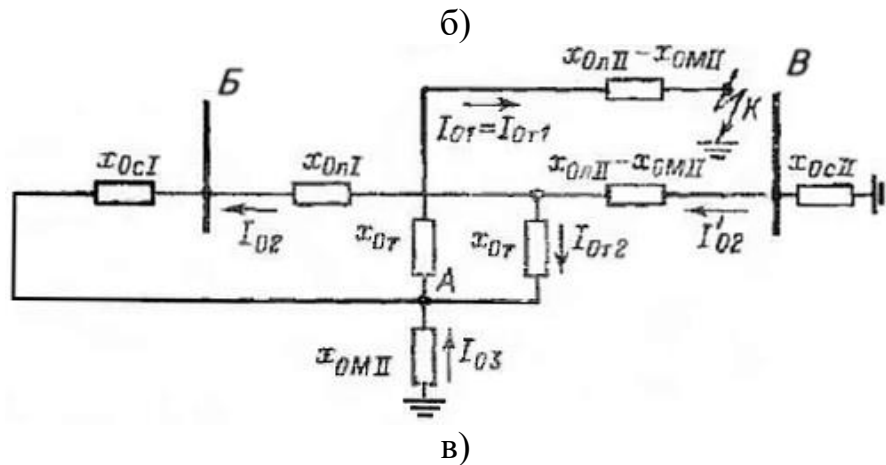


Рис.ДV.3. Замикання на землю на одній з паралельних ліній з відгалуженнями: а – вихідна схема; б і в – схеми заміщення нульової послідовності для випадку відключення пошкодженої лінії відповідно з одного і двох кінців.

Реле напрямку потужності захисту включене на струм і напругу нульової послідовності. Передбачається, що у всіх розглянутих схемах трансформатор напруги встановлюється на стороні вищої напруги трансформатора (автотрансформатора) – на шинах *Б*.

При каскадному відключенні замикання на землю на одній із зазначених ліній можливо зайве спрацювання захисту на іншій, неушкодженій лінії внаслідок неправильної дії реле напрямку потужності.

Для всіх систем розглядається найгірший випадок, відповідний найбільшому впливу взаємоіндукції: замикання на землю на кінці однієї з ліній, протилежному місцю установки розглянутого захисту неушкодженої лінії.

2. Розглядається поведінка захисту лінії в схемі «два блоки автотрансформатор - лінія». Вихідна схема й схема заміщення нульової послідовності наведені на рис.ДV.1,а й б. З використанням параметрів схеми заміщення на рис.ДV.1,б напруга нульової послідовності на шинах *Б* підстанції

$$U_{0B} = I_{03} \frac{x_{0cI} \cdot 0,5x_{0AT.н}}{x_{0cI} + 0,5x_{0AT.н}} - I_{02}x_{0AT.б}, \quad (ДV.1)$$

де I_{02} - струм нульової послідовності, що проходить по неушкодженій лінії;

I_{03} - сумарний струм нульової послідовності від системи CI і заземлених нейтралей автотрансформаторів $AT1$ н $AT2$;

x_{0cl} - опір нульової послідовності системи CI ;

$x_{0AT.y}$ й $x_{0AT.н}$ - опори променів схеми заміщення нульової послідовності автотрансформатора зі сторін вищої й низької напруг (опір променя схеми з боку середньої напруги $x_{0AT.c}$ приймається рівним нулю).

Як впливає з виразу (ДV.1), залежно від співвідношень вхідних у нього величин напруга $U_{0Б}$ може бути як позитивною, так і негативною (рис.ДV.1,в,г). В останньому випадку знак потужності нульової послідовності в місці установки розглянутого захисту 1 неушкодженої лінії буде таким же, як при КЗ у зоні, що захищається, що призведе до зайвого спрацьовування захисту внаслідок неправильної дії реле напруги потужності.

Напруга $U_{0Б}$ буде негативною, якщо дотримується нерівність

$$I_{03} \frac{x_{0cl} \cdot 0,5x_{0AT.н}}{x_{0cl} + 0,5x_{0AT.н}} < I_{02}x_{0AT.в}. \quad (ДV.2)$$

Зі схеми заміщення з рис.ДV.1,б можна одержати:

$$I_{02} = I_{01} \frac{\frac{x_{0cl} \cdot 0,5x_{0AT.н}}{x_{0cl} + 0,5x_{0AT.н}} + x_{0M}}{\frac{x_{0cl} \cdot 0,5x_{0AT.н}}{x_{0cl} + 0,5x_{0AT.н}} + x_{0AT.в} + x_{0л} + x_{0cII}}; \quad (ДV.3)$$

$$I_{03} = I_{01} \frac{x_{0AT.в} + x_{0л} + x_{0cII} - x_{0M}}{\frac{x_{0cl} \cdot 0,5x_{0AT.н}}{x_{0cl} + 0,5x_{0AT.н}} + x_{0AT.в} + x_{0л} + x_{0cII}}. \quad (ДV.4)$$

У виразах (ДV.3) і (ДV.3) I_{01} - струм нульової послідовності, що проходить по ушкодженій лінії;

$x_{0л}$ - опір нульової послідовності лінії;

x_{0M} - опір взаємоіндукції між лініями;

x_{0cII} - опір нульової послідовності системи $СII$.

Підставивши вирази (ДV.3) і (ДV.4) у нерівність (ДV.2) і здійснивши деякі перетворення, можна одержати умову, при якій напруга нульової послідовності на шинах B буде негативною:

$$\frac{x_{0cII}}{x_{1l}} < \frac{x_{0M}}{x_{1l}} \left(2 \frac{x_{0AT.g}}{x_{0AT.n}} + \frac{x_{0AT.g}}{x_{0cl}} + 1 \right) - \frac{x_{0l}}{x_{1l}}. \quad (ДV.5)$$

Для ліній 220 кВ у якості середніх можна прийняти наступні співвідношення: $x_{0l} = 3,5x_{1l}$ і $x_{0M} = 2x_{1l}$. Тоді вираз (ДV.5) може бути записаний у вигляді

$$\frac{x_{0cII}}{x_{1l}} < 2 \left(2 \frac{x_{0AT.g}}{x_{0AT.n}} + \frac{x_{0AT.g}}{x_{0cl}} \right) - 1,5. \quad (ДV.6)$$

Для автотрансформаторів АТДЦТН-125000/220/110 і АТДЦТН-200000/220/110 можна прийняти $0,5x_{0AT.n} = x_{0AT.g}$, що дає деякий запас у розрахунках. Тоді нерівність (ДV.6) набуває вигляду:

$$\frac{x_{0cII}}{x_{1l}} < \frac{2x_{0AT.g}}{x_{0cl}} + 0,5. \quad (ДV.7)$$

Для автотрансформатора АТДЦТН-63000/220/110 можна прийняти $x_{0AT.n} = x_{0AT.g}$, що також дає запас у розрахунках. Тоді нерівність (ДV.6) набуває вигляду:

$$\frac{x_{0cII}}{x_{1l}} < \frac{2x_{0AT.g}}{x_{0cl}} + 2,5. \quad (ДV.8)$$

За виразами (ДV.7) і (ДV.8) для автотрансформаторів потужністю 200, 125 і 63 МВА побудовані залежності відношення x_{0cII} / x_{1l} від опору x_{0cl} (рис.ДV.4), при яких відбудеться зайве спрацьовування захисту неушкодженої лінії внаслідок неправильної дії реле напрямку потужності.

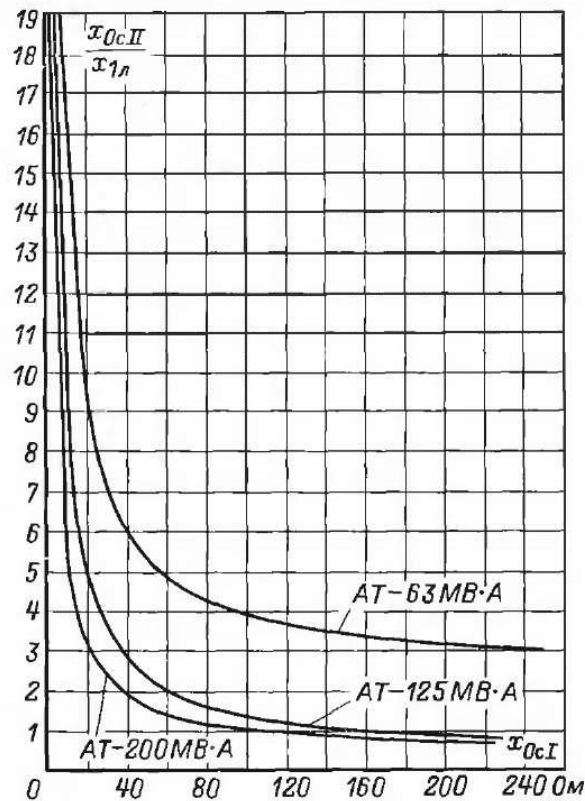


Рис.ДV.4. Залежності відносини $\frac{x_{0cII}}{x_{1л}}$ від опору x_{0cI} , при яких відбудеться зайве спрацювання захистів однієї з ліній, що працюють у блоці з автотрансформаторами.

Зазначеними кривими можна користуватися для оцінки поведінки розглянутого захисту в конкретних випадках. Як видно з наведених кривих, неправильна дія реле напряму потужності захисту 2 у схемі з рис.ДV.1,*a* досить імовірна. Для його виключення необхідно підживлювати ланцюги напруги захисту від трансформатора напруги, встановленого на шинах середньої напруги автотрансформатора (у точці *A*), або узгоджувати за чутливістю відповідні ступені захистів 1 і 2 (наприклад, другий ступінь захисту 2 з першим ступенем захисту 1 і т.д.).

3. Розглядається поведінка захисту в схемі «два блоки трансформатор - лінія». Вихідна схема й схема заміщення нульової послідовності наведені на рис.ДV.2, *a* та *б*. Можна показати, що в

розглянутому випадку завжди будуть мати місце умови, при яких напруга нульової послідовності на шинах B буде негативною.

Виходячи зі схеми з рис. ДV.2,а напруга

$$U_{0B} = I_{02} (x_{0L} + x_{0cII}) - I_{01} x_{0M}, \quad (\text{ДV.9})$$

де I_{01} , I_{02} , x_{0L} , x_{0M} і x_{0cII} - те ж, що у виразах (ДV.1) і (ДV.4).

Зі схеми заміщення по рис. ДV.2,б можна одержати

$$I_{02} = I_{01} \frac{x_{0M}}{x_{0T} + x_{0L} + x_{0cII}}, \quad (\text{ДV.10})$$

де x_{0T} - опір нульової послідовності трансформатора.

З виразу (ДV.9) з урахуванням (ДV.10) можна одержати:

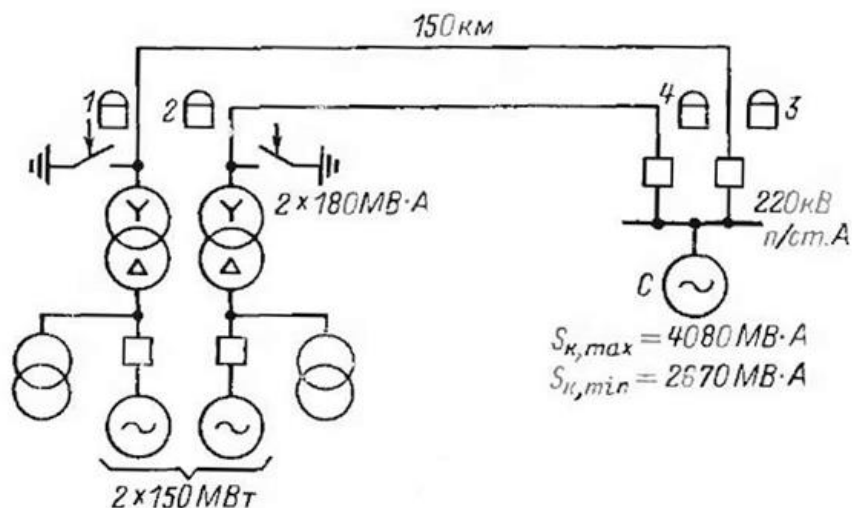
$$U_{0B} = I_{01} \left(\frac{x_{0L} + x_{0cII}}{x_{0T} + x_{0L} + x_{0cII}} - 1 \right) x_{0M} \cdot k \quad (\text{ДV.11})$$

Як видно з виразу (ДV.11), у схемі з рис. ДV.2,а напруга U_{0B} негативна при будь-яких співвідношеннях вхідних у нього параметрів, що призводить до неправильної дії реле напрямку потужності, включеного на напругу на шинах B (рис.ДV.2,в). Це пояснюється тим, що джерело несиметрії (ЕРС взаємоіндукції) перебуває на неушкодженій лінії. Струм нульової послідовності в неушкодженій лінії, викликаний ЕРС взаємоіндукції, може виявитися достатнім для дії досліджуваного захисту; при цьому відбудеться зайве спрацьовування захистів, установлених на обох кінцях неушкодженої лінії.

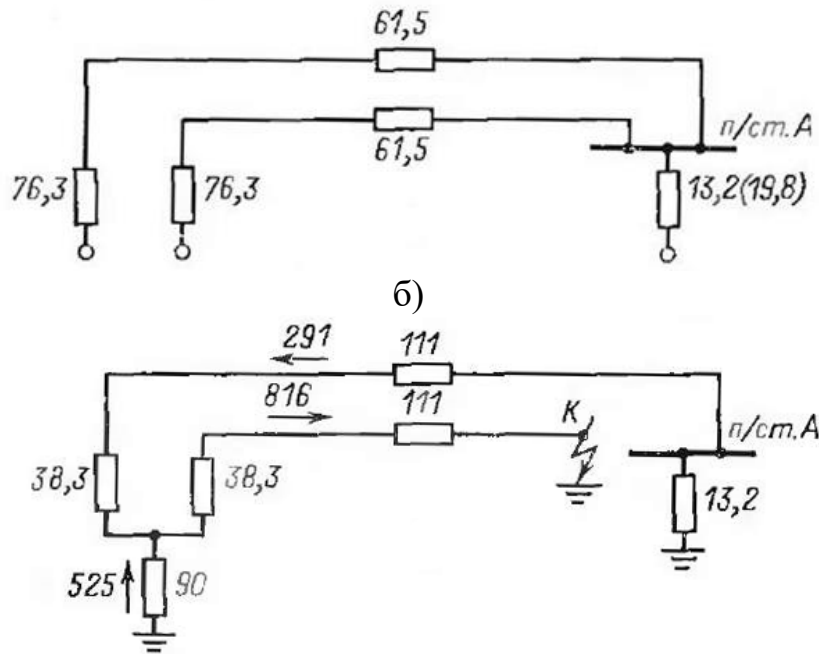
Для виключення зазначеного зайвого спрацьовування захистів повинні передбачатися спеціальні заходи (відбудовування за струмом, використання блокувального реле струму або напруги зворотної послідовності, а також застосування замість звичайного реле напрямку потужності реле зі струмовою поляризацією, наприклад, типу РМП-272, одна з обмоток якого включається на струм у нейтралі трансформатора, а друга обмотка - на суму струмів нейтралей двох трансформаторів).

4. Аналогічно викладеному в пп.2 і 3 при замиканні на землю на одній із двох ліній з відгалуженнями й відключенні ушкодженої лінії з одного або із двох кінців також може мати місце зайве спрацьовування захисту неушкодженої лінії внаслідок неправильної дії реле напрямку потужності. Вихідна схема й схеми заміщення нульової послідовності для розглянутих випадків наведені на рис.ДV.3. Як видно із зазначених схем заміщення, випадок відключення ушкодженої лінії з одного кінця (рис.ДV.3,б) аналогічний розглянутому в п.2 випадку каскадного відключення замикання в схемі «два блоки автотрансформатор - лінія», а випадок відключення ушкодженої лінії із двох кінців (рис. ДV.3,в) аналогічний розглянутому в п.3 випадку каскадного відключення замикання в схемі «два блоки трансформатор - лінія». Для виключення зайвого спрацьовування захисту неушкодженої лінії повинні передбачатися ті ж заходи, що й для схеми «два блоки трансформатор - лінія» (п.3).

5. Для ілюстрації впливу взаємоіндукції розглядається приклад розрахунків захисту від замикань на землю двох паралельних ліній 220 кВ, що працюють у блоці із трансформаторами (рис. ДV.5).



а)



в)

Рис. ДВ.5. Вплив взаємоіндукції між лініями, що працюють у блоці з генераторами й трансформаторами (приклад розрахунків):

а – вихідна схема; *б* – схема заміщення прямої (зворотної) послідовності; *в* – схема заміщення нульової послідовності й розподіл струмів $3I_0$ при каскадному відключенні замикання на землю поблизу шин *п/ст.А*.

Примітки. 1. Опори в омах і струми в амперах приведено до напруги 230 кВ.
2. У дужках даний опір системи, відповідний мінімальному режиму.

Прийняті наступні параметри ліній:

питомий опір прямої послідовності $x_{1л.нум} = 0,41 \text{ Ом/км}$;

питомий опір нульової послідовності $x_{0л.нум} = 1,34 \text{ Ом/км}$;

питомий опір взаємоіндукції між лініями $x_{0М.нум} = 0,6 \text{ Ом/км}$.

Опір генераторів, віднесений до їхньої потужності, прийнятий рівним $x_d'' = 0,12$, напруга КЗ трансформаторів $u_{к.В-Н} = 13 \%$.

Опір нульової послідовності трансформаторів прийнятий рівним їхньому опору прямої послідовності.

Захист ліній з боку *п/ст.А*, який виконують одноступінчастим, повинен би бути відбудований від потроєного струму нульової послідовності в режимі каскадного відключення замикання на землю на

паралельній лінії (поблизу шин *n/ст.А*). Як видно з рис. ДV.5,в, у зазначеному режимі потроєний струм нульової послідовності в неушкодженій лінії рівний 291 А, що значно перевищує струм спрацьовування розглянутого захисту 3, обраний за умовою відбудовування від:

А) кидка намагнічуючого струму трансформатора блоку при включенні його з боку *n/ст.А*;

Б) струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при КЗ між трьома фазами за трансформатором власних потреб блоку.

Орган напряду потужності захисту 3 у розглянутому режимі спрацьовує, оскільки джерело несиметрії (ЕРС взаємоіндукції), що обумовлює наявність струму нульової послідовності в неушкодженій лінії, перебуває на цій же лінії (п.3).

При виборі струму спрацьовування захисту 3 за умовою відбудовування від потроєного струму нульової послідовності в режимі каскадного відключення паралельної лінії з боку *n/ст.А* розглянутий захист нечутливий до замикань на землю поблизу шин станції, тому відбудовування від зазначеного режиму за струмом неприйнятне.

Для виключення зайвого спрацьовування захисту в зазначених умовах слід використовувати блокувальне реле струму зворотної послідовності.

Додаток VI

РОЗРАХУНКИ СТРУМУ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСТУ ЗА УМОВОЮ ВІДБУДУВАННЯ ВІД КИДКА, ЩО НАМАГНІЧУЄ СТРУМУ ТРАНСФОРМАТОРІВ (АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ)

1. Характер протікання струму в нульовому проводі трансформаторів струму захисту при включенні під напругу ненавантаженого силового трансформатора із глухозаземленою нейтраллю залежить від порядку включення фаз вимикача. Розрізняють наступні види включення (для лінії, що працює в повнофазному режимі):

А) трифазне включення (одночасне включення всіх трьох фаз);

Б) однофазне включення (включення однієї фази, потім з деяким запізнюванням включення двох інших фаз); при цьому до включення двох інших фаз у нейтралі трансформатора та у нульовому проводі трансформаторів струму проходить аперіодичний (однополярний) струм;

В) двофазне включення (одночасне включення двох фаз, потім з деяким запізнюванням включення третьої фази); при цьому до включення третьої фази в нульовому проводі трансформаторів струму проходить періодичний несинусоїдальний струм;

Г) різночасне включення двох фаз (друга фаза вмикається не пізніше ніж через один період після першої, а потім з деяким запізнюванням вмикається третя фаза); при цьому до включення третьої фази залежно від моменту включення другої фази в нульовому проводі трансформаторів токи може з'явитися кидок струму, що як містить, так і не містить аперіодичну, що складає;

Д) різночасне включення трьох фаз (першою включається одна фаза, а потім дві інші фази - одночасно або різночасно, не пізніше ніж через один період після включення першої фази).

Як показали дослідження Південного відділення інституту «Енергосетьпроект» і Новочеркаського політехнічного інституту, кидок

намагнічуючого струму, у нульовому проводі захисту лінії, що працює в повнофазному режимі, з'являється тільки при неповнофазному включенні (внаслідок різночасності включення фаз вимикача) трансформатора із глухозаземленою нейтраллю або автотрансформатора. У мережі 110 - 220 кВ після включення третьої фази струм у нейтралі швидко загасає і його практично можна не враховувати. У мережі 330 - 500 кВ після включення третьої фази в нейтралі якийсь час протікає загасаючий аперіодичний струм; відбудовування від цього струму може бути виконано за допомогою спеціального реле (наприклад, з швидконасихуванням трансформатором струму).

При одночасному включенні всіх трьох фаз вимикача струм у нульовому проводі досить малий і може не враховуватися.

На підставі згаданих досліджень встановлено також, що розрахунковими для вибору струму спрацьовування струмового захисту нульової послідовності лінії, що працює в повнофазному режимі, є наступні види включення:

А) при використанні реле струму типу РТ-40 - однофазне (при включенні трифазного тристержневого трансформатора) і різночасне двох фаз (при включенні групи однофазних трансформаторів);

Б) при використанні реле струму з швидконасихуваними трансформаторами струму серії РНТ-560 - двофазне.

При розрахунках струму спрацьовування струмового захисту нульової послідовності за розглянутою умовою для лінії, що працює двома фазами, у загальному випадку повинне розглядатися як однофазне, так і двофазне включення (див.нижче).

2. Як впливає з викладеного в п.1, розрахунки струму спрацьовування розглянутого захисту за умовою відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів (автотрансформаторів), що мають глухозаземлені нейтралі і включаються під напругу при

включенні лінії, що працює в повнофазному режимі, проводиться тільки в тих випадках, коли час спрацьовування розглянутого ступеня захисту $t_{с.з}$ менший часу різночасності включення фаз вимикача $t_{в.різн}$. Значення $t_{в.різн}$ залежить від типу вимикача й типу його привода.

Для масляних вимикачів із трифазним приводом час різночасності $t_{в.різн}$ практично не перевищує власного часу спрацьовування захисту з електромеханічними реле, що не має спеціальної затримки ($t_{в.різн} < t_{с.з}$). У цьому випадку розглянута умова при виборі параметрів спрацьовування захисту не враховується.

Для повітряних вимикачів з пофазним приводом відповідно до норм [25] значення $t_{в.різн}$ повинне не перевищувати 0,04 - 0,05 с. Однак у зв'язку з можливими відхиленнями значення різночасності в міжремонтному періоді це значення для повітряних вимикачів слід вважати не менш 0,1 с.

Для масляних вимикачів з пофазним електромагнітним приводом значення різночасності $t_{в.різн}$ може бути прийняте рівним приблизно 0,2 с. Необхідно підкреслити, що дійсні значення різночасності можуть відрізнятися від зазначених вище, у зв'язку із чим вони повинні уточнюватися в умовах експлуатації.

При оцінці розрахункового часу спрацьовування захисту (п.7) час спрацьовування вихідного проміжного реле, що не має спеціальної затримки, не повинен враховуватися.

При використанні в захисті реле струму типу РТ-40 або реле струму серії РНТ-560, що діють безпосередньо на вихідне проміжне реле, розрахунковий час спрацьовування захистів $t_{с.з}$ із запасом може бути прийнято 0,06 с, тобто приблизно рівним часу спрацьовування реле при невеликій кратності струму в його обмотці.

При розрахунках струму спрацьовування струмового захисту нульової послідовності за розглянутою умовою для лінії, що працює двома фазами, однофазне включення повинне розглядатися (при

використанні реле типу РТ-40) залежно від можливої різночасності включення двох фаз, тобто так само, як для повнофазного режиму роботи. Режим роботи двома фазами повинен розглядатися (як при використанні реле типу РТ-40, так і РНТ-560) як режим двофазного включення. При цьому розрахунковий час $t_{с.з.}$, який визначає загасання кидка намагнічуючого струму, дорівнює повному часу спрацьовування розглянутого ступеня захисту.

3. Основні вихідні положення методики розрахунків параметрів спрацьовування захисту за розглянутою умовою зводяться до наступного.

При включенні під напругу лінії із приєднаними в ній ненавантаженими силовими трансформаторами у фазах лінії й нейтралях трансформаторів можуть протікати кидки намагнічуючих струмів, форма й значення яких залежать від різних факторів. Врахування усіх факторів при розрахунках кидків намагнічуючих струмів може бути виконано шляхом точного розв'язку повної системи диференціальних рівнянь, що описує процес включення ліній і трансформаторів під напругу. В окремому випадку включення однієї фази лінії із приєднанням до неї одним силовим трансформатором із заземленою нейтраллю диференціальне рівняння має вигляд:

$$\frac{d\psi}{dt} + ri = U_{\max} \sin(\omega t + \alpha), \quad (\text{ДVI.1})$$

де ψ - сумарне потокозчеплення системи, лінії і обмотки трансформатора, яка включається під напругу;

r - еквівалентний активний опір контуру включення;

$U_{\max}$ - амплітуда синусоїдальної напруги;

α - початковий кут напруги при включенні;

$\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ - кутова частота.

Інтегрування цього рівняння дає формулу для сумарного потокозчеплення:

$$\psi = \frac{U_{\max}}{\omega} \cos \alpha - \frac{U_{\max}}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) - \psi_r - r \int_0^t i dt, \quad (\text{DVI.2})$$

де $\frac{U_{\max}}{\omega} = \psi_{\max}$ - амплітудне значення синусоїдальної складової потокозчеплення;

ψ - потокозчеплення, відповідне залишковій індукції B_r у стрижні магнітопроводу фази, що включається.

Якщо знехтувати активним опором контуру включення на холостий хід, то можна записати вираз для максимуму струму при включенні однієї фази, який виходить при $\omega t + \alpha = \pi$:

$$i_{\max}^{(1)} = \frac{U_{\max} (1 + A)}{x_{1c} + x_{1l} + x_T^{(1)}}, \quad (\text{DVI.3})$$

де $A = \cos \alpha - \frac{\psi_s - \psi_r}{\psi_{\max}}$ - відносний зсув осі синусоїди потокозчеплення

стосовно точки перегину характеристики намагнічування;

x_{1l} , x_{1c} - індуктивні опори відповідно лінії й системи з метою спрощення приймаються рівними опорам прямої послідовності (а не опору контуру включення, наприклад «провід - земля»), що дає деякий запас у розрахунках;

$x_T^{(1)}$ - індуктивний опір трансформатора при включенні під напругу однієї фази.

При включенні однієї фази трансформатора протягом першого періоду його магнітопровід насичується.

Значення магнітної проникності в магнітопроводі трансформатора наближається до значення магнітної проникності повітря. У досліджуваних умовах опір трансформатора для однофазного включення $x_T^{(1)}$ визначається як індуктивність циліндричної обмотки за виразом

$$x_T^{(1)} = \frac{\mu_0 \omega w^2 S}{l} k_a, \quad (\text{DVI.4})$$

де μ_0 - магнітна проникність повітря;

ω - те ж, що в (ДVI.1);

w - число витків обмотки, що включається;

S - площа перерізу за середнім діаметром обмотки;

l - висота обмотки;

k_a - коефіцієнт, що враховує вплив зовнішнього магнітного поля.

Вираз (ДVI.4), складений для обмоток, висота яких значно перевищує діаметр, придатний для визначення $\chi_T^{(1)}$, оскільки аналіз конструктивних даних трансформаторів показав, що висота обмотки перевищує її товщину в 10 - 25 раз.

Необхідно відзначити, що в режимі включення ненавантаженого силового трансформатора під напругу на відміну від прийнятого допущення в дійсності не відбувається повного насичення ярем магнітопроводу, тому при розрахунках параметрів спрацьовування захистів за розглянутою умовою з використанням виразу (ДVI.4) створюється значний запас (порядку 30%).

Значення A приймається при розрахунках найбільшим з можливих: $A_{\max x} = 0,39$ для холоднокатаної сталі (марок 3413, 3411); $A_{\max z} = 0,06$ для гарячекатаної сталі марки 1512.

У дійсності зазначені значення A , як правило, менше наведених, що в більшості випадків забезпечує додатковий запас.

Якщо захисти працюють із затримкою, то необхідно враховувати загасання кидка намагнічуючого струму

$$i_{\max(t)} = i_{\max(t=0)} k_{\text{заг}(t)}, \quad (\text{ДVI.5})$$

де $k_{\text{заг}(t)}$ - коефіцієнт загасання кидка струму, який залежить від часу спрацьовування захисту й еквівалентній постійній часу контуру включення на холостий хід τ .

Діюче значення кидка намагнічуючого струму до моменту спрацьовування захисту t

$$I_{\text{нам}} = i_{\max(t)} k_{\partial(t)} = i_{\max(t=0)} k_{\text{заг}(t)} k_{\partial(t)}, \quad (\text{ДВІ.6})$$

де $k_{\partial(t)}$ - коефіцієнт діючого значення.

На підставі виразів (ДВІ.3) і (ДВІ.6) можна одержати вираз для кидка намагнічуючого струму при різних видах включення:

$$I_{\text{нам}}^{(\kappa)} = \frac{U_{\text{ном}} C_{\delta}^{(\kappa)}}{\sqrt{3} x_{\text{розр}}}, \quad (\text{ДВІ.7})$$

де $U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга мережі;

$$x_{\text{розр}} = x_{1c} + x_{1l} + x_T^{(\kappa)};$$

(κ) - індекс, що позначає вид включення;

$C_{\delta}^{(\kappa)}$ - коефіцієнт кидка, що враховує залежність діючого значення струму від зміни при загасанні $i_{\max(t)}$ і $k_{\partial(t)}$, а також залежність від марки сталі й виду включення.

Коефіцієнт кидка визначається виразами:

при однофазному включенні

$$C_{\delta}^{(1)} = \sqrt{2} (1 + A_{\max}) k_{\partial(t)}^{(1)} k_{\text{заг}(t)}; \quad (\text{ДВІ.8а})$$

при двофазному включенні

$$C_{\delta}^{(2)} = \sqrt{2} (1 + A_{\max}) k_{\partial(t)}^{(2)} k_{\text{заг}(t)}; \quad (\text{ДВІ.8б})$$

при різночасному включенні двох фаз

$$C_{\delta}^{(1,1)} = \sqrt{2} (1 + A_{\max}) k_{\partial(t)}^{(1,1)} k_{\text{заг}(t)}. \quad (\text{ДВІ.8в})$$

Як показали дослідження, коефіцієнти кидка $C_{\delta}^{(\kappa)}$ однозначно залежать від значення відношення $t_{c.з}/t$.

Враховуючи згадані вище запаси, прийняті при визначенні значення $I_{\text{нам}}^{(\kappa)}$, струм спрацьовування захисту за розглянутою умовою може бути прийнятий рівним:

$$I_{0c.з} = I_{\text{нам}}^{(\kappa)}. \quad (\text{ДВІ.9})$$

Нижче приводяться основні вказівки за розрахунками струму спрацьовування захисту.

4. Струм спрацьовування розглянутого ступеня струмового спрямованого захисту нульової послідовності за умовою відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів (автотрансформаторів), що мають заземлені нейтралі і включаються під напругу при включенні лінії, відповідно до виразів (ДВІ.7) і (ДВІ.9) визначається за виразом

$$I_{0c.з} = \frac{U_{ном} C_{\delta}^{(\kappa)}}{\sqrt{3} x_{розр}} = \frac{U_{ном} C_{\delta}^{(\kappa)}}{\sqrt{3} (x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)})}, \quad (ДВІ.10)$$

де $C_{\delta}^{(\kappa)}$ - коефіцієнт кидка для даного виду включення, визначається відповідно до п.6;

$x_{1з}$ - те ж, що в (ДВІ.3);

$x_{T.екв}^{(1)}$ - еквівалентний опір трансформаторів і ліній для однофазного включення, визначається відповідно до п.5.

Для захистів із часом дії, більшим 0,1 с, принципово було потрібно би у виразі (ДВІ.10) враховувати коефіцієнт повернення реле k_p , однак він не вводиться у зв'язку з наявними розрахунковими запасами (див.вище).

5. При наявності на лінії одного трансформатора із заземленою нейтраллю опір

$$x_{T.екв}^{(1)} = x_{1л} + x_T^{(1)}, \quad (ДВІ.11)$$

де $x_{1л}$ і $x_T^{(1)}$ - те ж, що в (ДВІ.3).

При наявності на лінії декількох трансформаторів значення $x_{T.екв}^{(1)}$ визначається на підставі схеми заміщення, у якій ділянки лінії враховуються опором прямої послідовності, а трансформатори - опором $x_T^{(1)}$. У схемі заміщення враховуються тільки трансформатори із заземленими нейтралями.

Значення $x_{*T}^{(1)}$ у відносних одиницях може бути визначене за табл.ДВІ.1, складеною на підставі розрахунків за виразом (ДВІ.4) для ряду типів трансформаторів і автотрансформаторів. Якщо для

трансформатора (автотрансформатора) значення $x_{*T}^{(1)}$ в табл. ДVI.1 не зазначене, воно може бути обчислене за наближеними розрахунковими виразами, наведеними у табл. ДVI.2, які отримані в результаті обробки даних табл. ДVI.1.

Опори трансформаторів і автотрансформаторів при однофазному

 $x_T^{(1)}$ й трифазному $x_T^{(3)}$ включенні під напругу

Тип	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$			$u_k, \%$		
	ВН	СН	НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН
ТМ-6300/110	110±2*2,5%	-	11	-	10,5	-
ТМ-6300/110	121±2*2,5%	-	6,3	-	10,5	-
ТМТ-6300/110	110±2*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	17	10,5	6
ТМТ-6300/110	110±2*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17	10,5	6
ТМТ-6300/110	121±2*2,5%	38,5±2*2,5%	6,3	17	10,5	6
ТМТ-6300/110	121±2*2,5%	38,5±2*2,5%	6,3	10,5	17	6
ТДТН-10000/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	17	10,5	6
ТДТН-10000/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17	10,5	6
ТДТН-10000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	10,5	17	6
ТДТН-10000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17	10,5	6
ТДНГ-10000/110	110±4*2,5%	-	11	-	10,5	-
ТДНГ-10000/110	115±4*2,5%	-	6,6	-	10,5	-
ТДНГ-15000/110	110±4*2,5%	-	11	-	10,5	-
ТДНГ-15000/110	115±4*2,5%	-	6,6	-	10,5	-
ТДТНГ-15000/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	10,5	17	6
ТДТНГ-15000/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	10,5	17	6
ТДТНГ-15000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	10,5	17	6
ТДТНГ-15000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17	10,5	6
ТД-16000/110	121±2*2,5%	-	10,5	-	10,5	-
ТДНГ-20000/110	112±4*2,5%	-	6,6	-	10,8	-
ТДНГ-20000/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	17	10,5	6
ТДНГ-20000/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17	10,5	6
ТДНГ-20000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	10,5	17	6
ТДНГ-20000/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	17	10,5	6
ТДНГ-20000/110	115±8*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	10,5	17	6
ТДНГ-20000/110	115±8*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17	10,5	6
ТДНГ-31500/110	115±4*2,5%	-	11	-	11,6	-
ТДТНГ-31500/110	115±4*2,5%	6,3	6,3	10,5	10,5	20
ТДТНГ-31500/110	112±4*2,5%	10,5	10,5	10,5	10,5	20
ТДТНГ-31500/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	10,5	17	6
ТДТНГ-31500/110	110±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17	10,5	6
ТДТНГ-31500/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17	10,5	6
ТДТНГ-40500/110	112±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	17	10,5	6
ТДТНГ-40500/110	112±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	10,5	17	6
ТДНГ-60000/110	112±4*2,5%	-	11	-	10,5	-
ТДТНГ-60000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,3	10,5	17,5	6
ТДТНГ-60000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	10,5	17,5	10,5	6
ТДТНГ-60000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	11	17,5	10,5	6
ТДТНГ-75000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	10,5	20	12	8
ТДЦГ-90000/110	121±2*2,5%	-	6,3	-	10,5	-
ТДЦГ-90000/110	121±2*2,5%	-	10,5	-	10,5	-
ТДЦ-125000/110	121±2*2,5%	-	10,5	-	10,5	-

Тип	Опори обмоток					Марка сталі
	$x_{*T}^{(1)}$ при однофазному включенні з боку		$x_{*T}^{(3)}$ при трифазному включенні з боку			
	ВН	СН	ВН	СН	НН	
ТМ-6300/110	0,166	-	0,225		0,087	3413
ТМ-6300/110	0,167	-	0,224	-	0,088	3413
ТМТ-6300/110	0,204	0,0845	0,269	0,0854	0,132	3413
ТМТ-6300/110	0,194	0,0843	0,255	0,0851	0,132	3413
ТМТ-6300/110	0,205	0,0845	0,270	0,0854	0,131	3413
ТМТ-6300/110	0,201	0,126	0,263	0,173	0,077	3413
ТДТН-10000/110	0,199	0,0915	0,258	0,0933	0,13	3413
ТДТН-10000/110	0,199	0,0912	0,258	0,0936	0,138	3413
ТДТН-10000/110	0,198	0,139	0,256	0,186	0,091	3413
ТДТН-10000/110	0,198	0,0912	0,257	0,0936	0,138	3413
ТДНГ-10000/110	0,176	-	0,236	-	0,100	3413
ТДНГ-10000/110	0,176	-	0,240	-	0,099	3413
ТДНГ-15000/110	0,177	-	0,240	-	0,099	3413
ТДНГ-15000/110	0,175	-	0,236	-	0,099	3413
ТДТНГ-15000/110	0,217	0,141	0,288	0,195	0,090	3413
ТДТНГ-15000/110	0,216	0,141	0,289	0,196	0,090	3413
ТДТНГ-15000/110	0,214	0,141	0,283	0,192	0,090	3413
ТДТНГ-15000/110	0,214	0,0778	0,302	0,079	0,142	3413
ТД-16000/110	0,182	-	0,244	-	0,094	3413
ТДНГ-20000/110	0,190	-	0,240	-	0,105	1513
ТДНГ-20000/110	0,218	0,0936	0,394	0,095	0,144	3413
ТДНГ-20000/110	0,212	0,0908	0,288	0,091	0,139	3413
ТДНГ-20000/110	0,219	0,141	0,292	0,148	0,092	3413
ТДНГ-20000/110	0,218	0,0938	0,294	0,088	0,144	3413
ТДНГ-20000/110	0,236	0,159	0,317	0,222	0,101	3413
ТДНГ-20000/110	0,237	0,099	0,317	0,100	0,161	3413
ТДНГ-31500/110	0,200	-	0,267	-	0,125	3413
ТДТНГ-31500/110	0,207	-	0,264	-	0,127	1512
ТДТНГ-31500/110	0,211	-	0,268	-	0,127	1513
ТДТНГ-31500/110	0,229	0,154	0,286	0,217	0,105	3
ТДТНГ-31500/110	0,228	0,103	0,304	0,104	0,155	3
ТДТНГ-31500/110	0,231	0,104	0,309	0,104	0,154	3
ТДТНГ-40500/110	0,246	0,116	0,334	0,117	0,171	3413
ТДТНГ-40500/110	0,246	0,171	0,332	0,238	0,12	3413
ТДНГ-60000/110	0,211	-	0,292	-	0,127	3413
ТДТНГ-60000/110	0,258	0,159	0,346	0,222	0,105	3413
ТДТНГ-60000/110	0,241	0,110	0,328	0,110	0,166	3413
ТДТНГ-60000/110	0,207	0,109	0,385	0,111	0,166	3413
ТДТНГ-75000/110	0,280	0,122	0,434	0,121	0,186	3413
ТДЦГ-90000/110	0,237	-	0,319	-	0,146	3413
ТДЦГ-90000/110	0,224	-	0,316	-	0,150	3413
ТДЦ-125000/110	0,249	-	0,351	-	0,157	3413

Тип	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$			$u_{\text{к}}, \%$		
	ВН	СН	НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН
ТДЦГ-90000/220	242±2*2,5%	-	6,3	-	12,2	-
ТДЦГ-125000/220	242±2*2,5%	-	10,5	-	12	-
АТДЦТГ-120000/220	220±2*2,5%	121	6,6	10,33	36	23
АТДЦТГ-180000/220	230±2*2,5%	121	11	10,9	36	22,05
АТДЦТГ-180000/220	230±2*2,5%	121	38,5±2*2,5%	11	35,5	21,9
АТДЦТГ-240000/220	230±2*2,5%	121	38,5±2*2,5%	10,64	34,82	22
АТДЦТГ-240000/220	230±2*2,5%	121	11	10,2	35,5	22,8
ТДЦТГА-180000/220	242±2*2,5%	121	6,3	12,4	11,65	17,7
ТДЦТГА-180000/220	242±2*2,5%	121	10,5	12,4	11,55	17,7
АТДЦТНГ-125000/220	230	115±6*2%	38,5	8,75	51,5	41,8
АТДЦТНГ-125000/220	230	115±6*2%	10,5	8,73	51,4	41,8
АТДЦТГ-120000/330	330±2*2,5%	121	11	9,7	23,5	12
АТДЦТГ-120000/330	330±2*2,5%	121	38,5	9,7	23,5	12
АТДЦТГ-240000/330	330	242	38,5	7,5	74	63,5
АТДЦТГ-240000/330	347	242	11	9,4	74	63,5
АТДЦТН-200000/330	330	115±6*2%	36,75	10,25	34,2	22,3
АТДЦТН-200000/330	330	115±6*2%	10,5	10,27	34,2	22,3
ТДТНГ-31500/110	112±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	17	10,5	6
ТДЦТГА-180000/220	242±2*2,5%	122	18	12,4	11,51	17,7
АТДЦТГ-240000/330	330±2*2,5%	165	11	11,5	39	24,2
АТДЦТГ-240000/330	330	242	11	7,5	74	63,5
АТДЦТГ-240000/330	347	242	38,5	9,4	74	63,5
ТДТНГ-75000/110	115±4*2,5%	38,5±2*2,5%	6,3	20	12	8
ТДЦ-200000/110	121±2*2,5%	-	18	-	10,5	-
ТДЦ-250000/110	121	-	15,75	-	10,5	-
ТДГ-15000/150	154±2*2,5%	-	6,6	-	11,5	-
ТДТГ-15000/150	150±3*2,5%	38,5±2*2,5%	6,6	12,5	17,5	5
ТДТНГ-25000/150	154±4*2%	38,5±2*2,5%	27,5	18	11,5	5,8
ТДТНГ-25000/150	154±4*2%	38,5±2*2,5%	6,6	18	11,5	5,8
ТРДН-32000/150	150±4*2%	6,3	6,3	10,5	10,5	20
ТДТГ-60000/150	150±2*2,5%	38,5±2*2,5%	11	12,5	12,5	6
ТДГ-60000/150	150±2*2,5%	-	6,6	-	12	-
ТДГ-65000/150	165±2*2,5%	-	13,8	-	12	-
ТДЦ-400000/110	121	-	20	-	10,5	-
ТДЦ-400000/150	165	-	20	-	11	-
ТДЦ-200000/220	242±2*2,5%	-	18	-	11	-
ТДЦ-200000/220	242±2*2,5%	-	15,75	-	11	-
ТДЦ-200000/220	242±2*2,5%	-	13,8	-	11	-
ТДЦ-400000/220	242	-	20	-	10,8	-
ТДЦГ-200000/330	347	-	18	-	11,3	-
ТДЦГ-200000/330	347	-	15,75	-	11,65	-
ТДЦГ-400000/330	347	-	20	-	13	-
ТДЦ-400000/330	347	-	20	-	13	-

Закінчення табл. ДVI.1

Тип	Опори обмоток					Марка сталі
	$x_{*T}^{(1)}$ при однофазному включенні з боку		$x_{*T}^{(3)}$ при трифазному включенні з боку			
	ВН	СН	ВН	СН	НН	
ТДЦГ-90000/220	0,212	-	0,286	-	0,123	3413
ТДЦГ-125000/220	0,175	-	0,826	-	0,437	3413
АТДЦТГ-120000/220	0,559	0,476	0,744	0,649	0,287	3413
АТДЦТГ-180000/220	0,548	0,472	0,692	0,597	0,321	3413
АТДЦТГ-180000/220	0,597	0,517	0,767	0,677	0,359	3413
АТДЦТГ-240000/220	0,544	0,485	0,689	0,626	0,351	3413
АТДЦТГ-240000/220	0,505	0,443	0,671	0,597	0,423	3413
ТДЦТГА-180000/220	0,335	0,267	0,347	0,268	0,420	3413
ТДЦТГА-180000/220	0,335	0,267	0,347	0,268	0,420	3413
АТДЦТНГ-125000/220	0,490	0,373	0,637	0,502	0,283	3413
АТДЦТНГ-125000/220	0,490	0,372	0,644	0,502	0,304	3413
АТДЦТГ-120000/330	0,317	0,250	0,442	0,377	0,153	3413
АТДЦТГ-120000/330	0,320	0,254	0,416	0,336	0,175	3413
АТДЦТГ-240000/330	0,961	0,942	1,217	1,211	0,636	3413
АТДЦТГ-240000/330	0,978	0,869	1,294	1,175	0,488	3413
АТДЦТН-200000/330	0,471	0,380	0,595	0,489	0,230	3413
АТДЦТН-200000/330	0,471	0,380	0,583	0,470	0,245	3413
ТДТНГ-31500/110	0,250	0,104	0,338	0,105	0,153	1512
ТДЦТГА-180000/220	0,335	0,265	0,347	0,267	0,420	3413
АТДЦТГ-240000/330	0,529	0,448	0,674	0,580	0,300	3413
АТДЦТГ-240000/330	0,965	0,943	1,212	1,202	0,546	3413
АТДЦТГ-240000/330	0,945	0,92	1,198	1,185	0,530	3413
ТДТНГ-75000/110	0,299	0,127	0,409	0,126	0,195	3413
ТДЦ-200000/110	0,275	-	0,382	-	0,183	3413
ТДЦ-250000/110	0,273	-	0,377	-	0,186	3413
ТДГ-15000/150	0,184	-	0,252	-	0,0897	3413
ТДТГ-15000/150	0,194	0,107	0,257	0,148	0,067	3413
ТДТНГ-25000/150	0,213	0,0822	0,285	0,0825	0,10	3413
ТДТНГ-25000/150	0,213	0,0822	0,290	0,0825	0,128	3413
ТРДН-32000/150	0,188	-	0,258	-	0,105	3414
ТДТГ-60000/150	0,236	0,105	0,307	0,108	0,157	3413
ТДГ-60000/150	0,191	-	0,262	-	0,106	3413
ТДГ-65000/150	0,21	-	0,288	-	0,116	ХВП
ТДЦ-400000/110	0,40	-	0,412	-	0,482	3413
ТДЦ-400000/150	0,396	-	0,408	-	0,482	3413
ТДЦ-200000/220	0,518	-	0,549	-	0,403	3413
ТДЦ-200000/220	0,523	-	0,554	-	0,404	3413
ТДЦ-200000/220	0,523	-	0,554	-	0,40	3413
ТДЦ-400000/220	0,565	-	0,598	-	0,446	3413
ТДЦГ-200000/330	0,312	-	0,33	-	0,375	3413
ТДЦГ-200000/330	0,340	-	0,366	-	0,398	3413
ТДЦГ-400000/330	0,361	-	0,379	-	0,434	3413
ТДЦ-400000/330	0,352	-	0,372	-	0,419	3413

**Розрахункові вирази для визначення опору трансформаторів і
автотрансформаторів $x_{*g}^{(1)}$ при однофазному включенні з боку вищої
напруги**

Досліджуваний елемент	$x_{*g}^{(1)}$
Трансформатор 220 кВ потужністю, МВА: 6,3 – 63	$\frac{12,7 + u_{\kappa}}{1,35}$
75 – 125	$\frac{21,4 + u_{\kappa}}{1,35}$
Трансформатори 110 – 330 кВ усіх потужностей*: з обмотками середньої напруги, розташованими під обмотками вищої й нижчої напруги ($u_{\kappa BH-CH} > u_{\kappa BH-HH}$)	$3,7 + u_{\kappa}$
з обмотками середньої напруги, розташованими між обмотками вищої й нижчої напруги ($u_{\kappa BH-CH} < u_{\kappa BH-HH}$)	$\frac{13,9 + u_{\kappa}}{1,38}$
Автотрансформатор 220 кВ потужністю 32 – 63 МВА	$\frac{12,7 + u_{\kappa}}{1,3}$
Автотрансформатор 220 – 330 кВ потужністю, МВА: 75; 120 - 180	$\frac{25,7 + u_{\kappa}}{1,31}$
200 – 240	$\frac{35 + u_{\kappa}}{1,28}$

*Включені з боку середньої напруги.

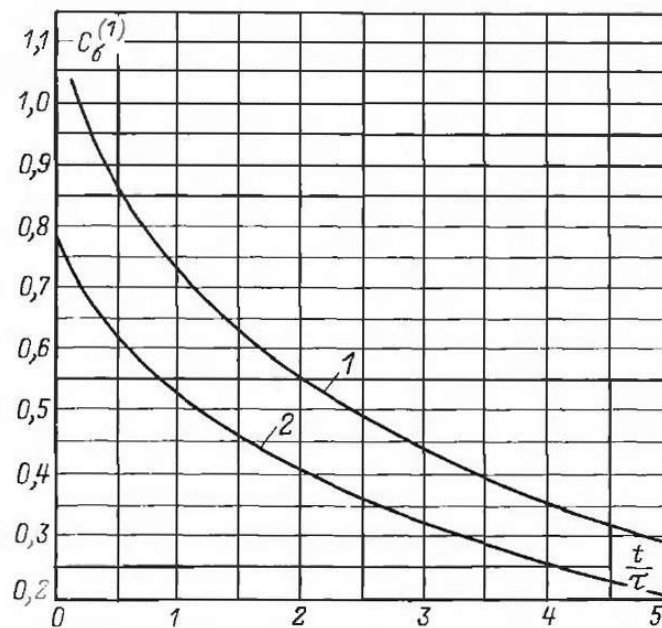
Примітка. u_{κ} – у відсотках для середнього положення регулятора РПН; для триобмоткових трансформаторів і автотрансформаторів відповідає найбільшому з напруг КЗ між обмоткою, з боку якої проводиться включення, і однією із двох інших обмоток; для автотрансформаторів повинно бути приведено до прохідної потужності автотрансформатора.

Значення опорів $x_{*T}^{(1)}$ і $x_{*T}^{(3)}$ в табл.ДVI.1 і табл.ДVI.2 відповідають середньому положенню регулятора напруги РПН і дані у відносних одиницях, приведених до напруги середнього відгалуження. При інших положеннях РПН значення $x_{*T}^{(1)}$ й $x_{*T}^{(3)}$ можуть помітно відрізнятися від підрахованих для середнього положення РПН. Враховуючи значні запаси, обумовлені прийнятими допущеннями (п.3), рекомендується щоб уникнути зайвого загрубіння захисту приймати значення $x_{*T}^{(1)}$, розраховані для середнього положення РПН (надалі до уточнення розрахункового

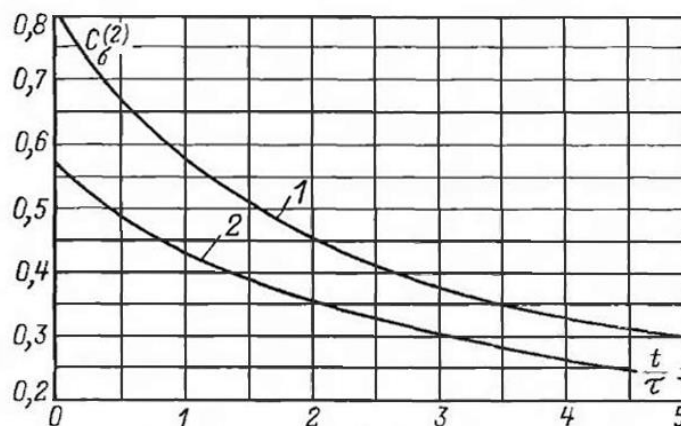
методу визначення $x_{*T}^{(1)}$ з урахуванням регулювання напруги трансформатора).

З урахуванням наближеності наведеного розрахунку $x_T^{(1)}$ доцільно його експериментальне уточнення в експлуатаційних умовах [26]. Таке уточнення в більшості випадків призводить до збільшення значення опору $x_T^{(1)}$.

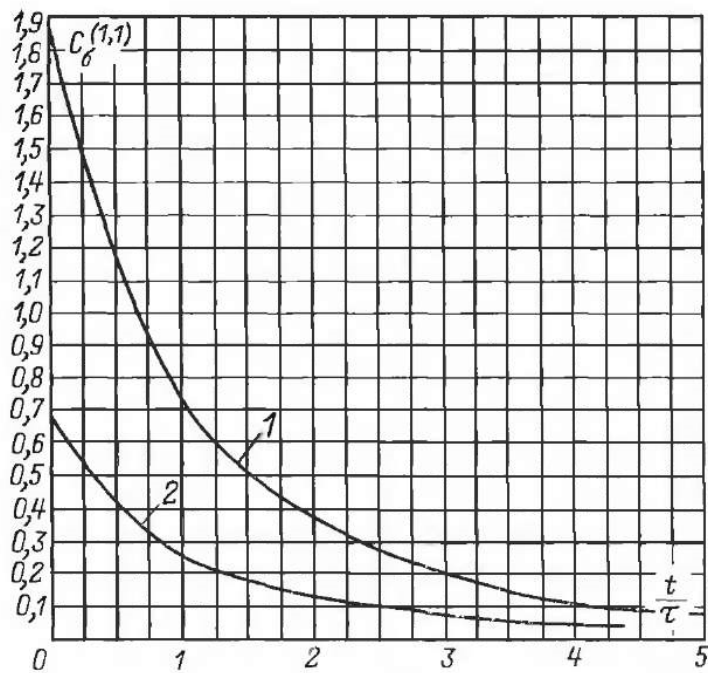
6. Значення $C_{\sigma}^{(\kappa)}$ у виразі (ДVI.7) визначаються за кривими, наведеними на рис.ДVI.1 для розрахункових видів включення й для трансформаторів, магнітопроводи яких виготовлені з холоднокатаної й гарячекатаної сталей.



а)



б)



в)

Рис. ДVI.1. Залежність $C_{\delta}^{(\kappa)}$ від відношення t/τ :

a – для однофазного включення трифазних тристержневих трансформаторів (у схемі використовуються реле струму типу РТ-40);

$б$ – для двофазного включення $C_{\delta}^{(2)}$; $в$ – для різночасного включення

двох фаз $C_{\delta}^{(1,1)}$ групи однофазних трансформаторів (у схемі використовується реле струму типу РТ-40).

Примітки. Криві 1 дані для холоднокатаної сталі; криві 2 – для гарячекатаної сталі.

При живленні від розглянутої лінії трансформаторів з магнітопроводами, виготовленими як з гарячекатаної, так і з холоднокатаної сталей, коефіцієнти $C_{\delta}^{(\kappa)}$ слід визначати із запасом з припущення, що магнітопроводи всіх трансформаторів виготовлені з холоднокатаної сталі, тобто за кривими 1. При необхідності зниження за умовами чутливості струму спрацьовування захисту, обраного за розглянутою умовою, можна приблизно визначити коефіцієнти $C_{\delta}^{(\kappa)}$, користуючись двома окремими умовними схемами заміщення, враховуючи в одній з них тільки трансформатори з холоднокатаної сталі, а в іншій – тільки з гарячекатаної. При цьому струм спрацьовування

захисту визначається як сума отриманих при розрахунках струмів спрацьовування для випадків вищевказаних умовних схем.

7. Значення відношення t/τ , необхідне для визначення розрахункового значення $C_o^{(k)}$ за кривими рис.ДVI.1. може бути отримане виходячи з наступного.

Значення часу t , що входить у зазначене відношення, повинне прийматися рівним розрахунковому часу спрацьовування захисту відповідно до рекомендацій, наведених у п.2.

Значення еквівалентної постійної часу контуру включення τ підраховуються з урахуванням дійсних значень активних і індуктивних опорів елементів мережі за виразом

$$\tau = \frac{x_{1c} + x_{T.екв}^{(1)}}{\omega(r_{1c} + r_{T.екв})} = \frac{x_{розр}}{\omega r_{розр}}, \quad (\text{ДVI.12})$$

де x_{1c} і $x_{T.екв}^{(1)}$ - те ж, що в (ДVI.3) і (ДVI.10) відповідно;

$r_{T.екв}$ - еквівалентний активний опір лінії й трансформаторів, що розраховується за схемою заміщення, аналогічно $x_{T.екв}^{(1)}$;

$r_{екв}$ - активний опір системи, може бути оцінений з використанням узагальнених даних табл.ДVI.3; (ω - те ж, що й в (ДVI.1)).

Значення активних опорів елементів мережі r_0 , необхідних для визначення $r_{T.екв}$, приймаються рівними активним опорам цих елементів, зазначених у каталогах. При відсутності відповідних даних вони можуть бути приблизно визначені з використанням табл.ДVI.3 за виразом

$$r_e = \frac{x_e}{m_{відн}}, \quad (\text{ДVI.13})$$

де x_e - індуктивний опір відповідного елемента мережі, використовуваний в схемі заміщення для розрахунків $x_{T.екв}^{(1)}$;

$m_{відн}$ - відношення індуктивного опору відповідного елемента мережі до активного, оцінюється за даними табл.ДVI.3.

**Значення $m_{відн} = \frac{x}{r}$ окремих елементів електричної системи й
результуючих опорів до певних її точок**

Елемент електричної системи або її частина	$m_{відн}$
Турбогенератори потужністю, МВт: 12 – 60	50 – 85
110 - 500	100 – 135
Гідрогенератори:	
без демпферних обмоток	60 -90
з демпферними обмотками	40 – 50
Трансформатори потужністю, МВА: 5 – 30	7 – 17
60 - 500	20 - 50
Реактори 6 – 10 кВ із номінальним струмом, А: до 1000	15 - 70
1500 і вище	40 – 80
Повітряні лінії	2 – 8
Трижильні кабелі з мідними й алюмінієвими жилами перерізом 3*95 - 3*185 мм ²	0,2 – 0,6
<i>Частина електричної системи</i>	
До збірних шин 6 – 10 кВ станцій з генераторами потужністю 30 – 60 МВт	40 – 80
До точки за лінійним реактором з номінальним струмом до 1000 А, приєднаним до шин 6 – 10 кВ станцій з генераторами потужністю 30 – 60 МВт	20 – 60
До збірних шин підвищеної напруги станцій із трансформаторами потужністю (в одиниці), МВА: від 30 до 100	20 – 50
не менш 100	30 - 60
До збірних шин зниженої напруги підстанцій із трансформаторами опором не менш 90 % результуючого опору до шин; потужність трансформаторів, МВА: від 30 до 100	15 – 30
не менш 100	20 – 40
До точок системи, віддалених від генераторів (збірні шини зниженої напруги підстанцій із трансформаторами 20 МВА й нижче, збірні шини підстанцій у розподільних мережах і ін.)	15 і нижче

8. Точний розрахунок постійної часу контуру включення, розглянутий у п.7, досить трудомісткий і може бути складним при відсутності даних по активних опорах елементів мережі. Тому для орієнтовних розрахунків може бути рекомендовано приймати із запасом:

для мереж 220 кВ $\tau = 250$ мс;

для мереж 110 кВ $\tau = 125$ мс.

Прийнявши для реле струму типу РТ-40 або серії РНТ-560 час спрацьовування $t_{с.з} = 60$ мс, можна отримати:

для мереж 220 кВ $\frac{t}{\tau} = 0,24$;

для мереж 110 кВ $\frac{t}{\tau} = 0,48$.

Для цих значень $\frac{t}{\tau}$ за кривими рис.ДVI.1 визначені значення $C_{\delta}^{(\kappa)}$,

які наведені в табл.ДVI.4.

Таблиця ДVI.4

Значення коефіцієнта $C_{\delta}^{(\kappa)}$

Тип реле струму	Напруга мережі $U_{ном}$, кВ	Відношення $\frac{t}{\tau}$	Холоднокатана (гарячекатана сталь)		
			$C_{\delta}^{(1)}$	$C_{\delta}^{(2)*}$	$C_{\delta}^{(1,1)}$
РТ-40	110	0,48	0,84(0,6)	0,67(0,48)	1,16(0,42)
	220	0,24	0,92(0,66)	0,73(0,52)	1,46(0,52)

* Для реле серії РНТ-560.

Примітки. 1. Значення $C_{\delta}^{(\kappa)}$ дані для часу спрацьовування захисту $t_{с.з} = 60$ мс і постійної часу мережі 220 кВ $\tau = 250$ мс; 110 кВ $\tau = 125$ мс.

2. У дужках дані значення $C_{\delta}^{(\kappa)}$ для гарячекатаної сталі.

Ці значення можуть бути використані для орієнтовного розрахунку струму спрацьовування ступеню захисту, що діє на відключення без спеціальної затримки.

9. Наведена вище методика розрахунків дана без урахування насичення магнітопроводів трансформаторів струму при кидку намагнічуючого струму. Якщо при виборі струму спрацьовування за викладеною вище методикою захист не задовольняє вимогам чутливості, необхідно здійснити уточнення струму спрацьовування з урахуванням насичення трансформаторів струму [27].

10. *Приклад розрахунків.* Нижче приводиться розрахунки струму спрацьовування струмового захисту нульової послідовності тупикової

лінії 220 кВ із відгалуженнями за умовою відбудовування від кидка намагнічуючого струму трансформаторів (рис.ДVI.2).

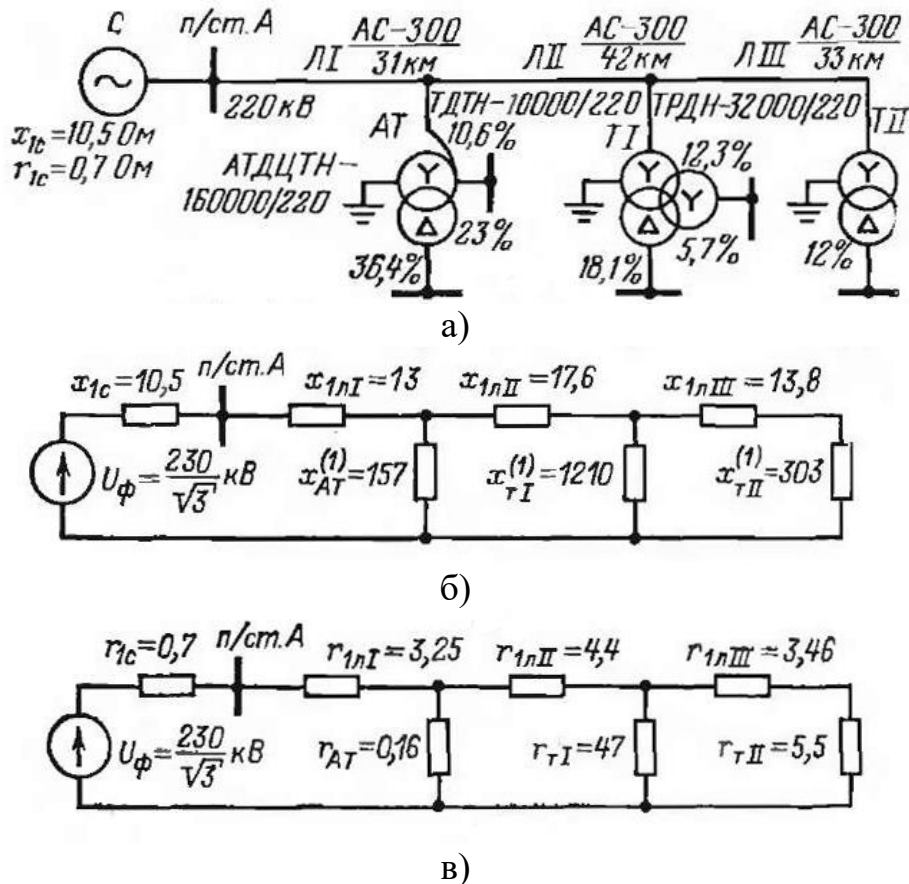


Рис.ДVI.2. Приклад розрахунків: а – вихідна схема; б – схема заміщення для визначення індуктивного опору мережі $x_{\text{розн}}$ при однофазному включенні; в – схема заміщення для визначення активного опору мережі $r_{\text{розн}}$ - при однофазному включенні.

Примітки. 1. Опори в омах приведено до напруги 230 кВ.

2. Активні опори трансформаторів і автотрансформаторів запозичені з [28].

Захист установлений з боку підстанції А, обладнаної повітряними вимикачами з пофазним приводом. Передбачається дія захисту на відключення без спеціальної затримки.

Параметри елементів схеми наведені в табл.ДVI.5. Магнітопроводи автотрансформатора й трансформаторів виконані з холоднокатаної сталі.

Розрахунковий час спрацьовування захисти може бути прийнятий рівним часу спрацьовування реле $t_{\text{с.з}} = 0,06$ с, що менше часу різночасності включення фаз вимикача $t_{\text{в.різн}} \approx 0,1$ с, тому розрахунки за розглянутою умові повинні проводитися (п.2).

Розрахунки проводяться за виразом (ДVI.10).

Таблиця ДVI.5

**Вихідні дані для прикладу розрахунків захисти мережі за
рис.ДVI.2,а**

Позначення на схемі рис.ДVI.2,а	Тип автотрансформатора (трансформатора)	$u_k, \%$		
		ВН-НН	СН-НН	ВН-СН
АТ	АТДЦТН-160000/220	36,4	23	10,6
ТІ	ТДТН-10000/220	18,1	5,7	12,3
ТІІ	ТРДН-320000/220	12	-	-

Закінчення табл.ДVI.5

Позначення на схемі рис.ДVI.2,а	Позначення на рисунку	Довжина лінії, км	Марка проводу	$x_{1л}, \text{Ом}$	$r_{1л}, \text{Ом}$
АТ	ЛІ	31	АС-300	13	3,25
ТІ	ЛІІ	42	АС-300	17,6	4,4
ТІІ	ЛІІІ	33	АС-300	13,8	3,46

Примітка. Параметри системи: $x_{13} = 10,5 \text{ Ом}$; $r_{13} = 0,7 \text{ Ом}$.

Визначається значення $x_{\text{розр}}$ за схемою рис.ДVI.2,б:

$$x_{\text{розр}} = x_{1c} + x_{1л} + \left((x_{ТІІ}^{(1)} + x_{1лІІІ}) \parallel x_{ТІ}^{(1)} + x_{1лІ} \right) \parallel x_{АТ}^{(1)} =$$

$$= 10,5 + 13 + \left((303 + 13,8) \parallel 1210 + 17,6 \right) \parallel 157 = 122,7 \text{ Ом},$$

де значення $x_{ТІІ}^{(1)}$, $x_{ТІ}^{(1)}$ і $x_{АТ}^{(1)}$ отримані на підставі табл.ДVI.2:

$$x_{ТІІ}^{(1)} = \frac{12,7 + 12230^2}{100 \cdot 1,35} \cdot \frac{230^2}{32} = 303 \text{ Ом};$$

$$x_{ТІ}^{(1)} = \frac{12,7 + 18,1}{100 \cdot 1,35} \cdot \frac{230^2}{10} = 1210 \text{ Ом};$$

$$x_{АТ}^{(1)} = \frac{25,7 + 36,4}{100 \cdot 1,31} \cdot \frac{230^2}{160} = 157 \text{ Ом}.$$

Значення $r_{\text{розр}}$ визначається за схемою рис.ДVI.2,в:

$$r_{\text{розр}} = r_{1c} + r_{1л} + \left((r_{ТІІ} + r_{1лІІІ}) \parallel r_{ТІ} + r_{1лІ} \right) \parallel r_{АТ} =$$

$$= 0,7 + 3,25 + \left((5,5 + 3,46) \parallel 47 + 4,4 \right) \parallel 0,16 = 4,108 \text{ Ом}.$$

Визначається постійна часу контуру включення за виразом (ДVI.12):

$$\tau = \frac{x_{розр}}{\omega r_{розр}} = \frac{122,7}{314 \cdot 4,108} = 0,095 \text{ с.}$$

Визначається відношення

$$\frac{t}{\tau} = \frac{0,06}{0,095} = 0,631,$$

де t приймалося рівним розрахунковому часу спрацьовування захисту

$$t_{с.з} = 0,06 \text{ с.}$$

За кривими рис.ДVI.1 для значення $\frac{t}{\tau} = 0,631$ визначаються:

для реле струму типу РТ-40 $C_{\delta}^{(1)} = 0,83$;

для реле струму серії РНТ-560 $C_{\delta}^{(2)} = 0,63$.

Визначається струм спрацьовування захисту за виразом (ДVI.10) для реле струму типу РТ-40:

$$I_{с.з} = \frac{C_{\delta}^{(1)} U_{ном}}{\sqrt{3} x_{розр}} = \frac{0,83 \cdot 230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 122,7} = 900 \text{ А};$$

для реле струму серії РНТ-560

$$I_{с.з} = \frac{C_{\delta}^{(2)} U_{ном}}{\sqrt{3} x_{розр}} = \frac{0,63 \cdot 230 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 122,7} = 685 \text{ А.}$$

Додаток VII

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ЗАХИСТУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ БЛОКУВАЛЬНОГО РЕЛЕ НАПРЯМУ ПОТУЖНОСТІ, ЩО СПРАЦЬОВУЄ ПРИ НАПРЯМІ ПОТУЖНОСТІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ДО ШИН

1. Відповідно до викладеного в главі 10, 10-10 з метою підвищення надійності спрацьовування східчастого струмового спрямованого захисту нульової послідовності від замикань на землю, хоча б один з його ступенів, який охоплює з достатнім запасом лінію, що захищається, доцільно виконувати неспрямованим або спрямованим із застосуванням реле напрямку потужності із блокувальним сигналом. Останнє також можна використовувати для підвищення чутливості захисту, якщо чутливість реле напрямку потужності з дозволяючим сигналом виявляється недостатньою (наприклад, при замиканні в зоні резервування). Для забезпечення спрямованості ступені захисту із блокувальним реле напрямку потужності повинні проводитися узгодження параметрів спрацьовування цього реле й реле струму відповідного ступеня при замиканні на землю в напрямі, протилежному тому, який захищається.

Принципова пояснювальна схема такого ступеня захисту наведена на рис.ДVII.1.

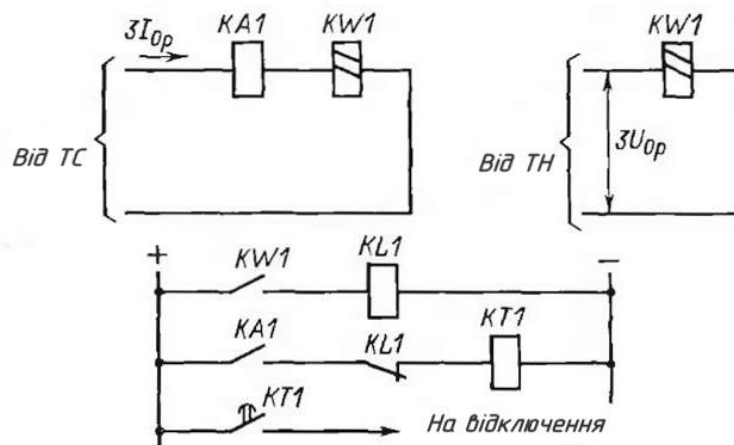


Рис.ДVII.1. Принципова схема ступеня спрямованого струмового захисту нульовий послідовності із блокувальним реле напрямку

потужності, що спрацьовують при напрямі потужності КЗ до шин підстанції.

2. Неспрацьовування ступеня захисту за рис.ДVII.1 при замиканні на землю в напрямі, протилежному тому, який захищається, буде забезпечено, якщо при спрацьовуванні реле струму буде спрацьовувати реле напрямку потужності. Ця умова для індукційного реле напрямку потужності буде виконуватися, якщо при потроєному струмі нульової послідовності в місці включення захисту, рівному струму спрацьовування розглянутого ступеня $I_{0сз}$, напруга, яка підводиться до реле напрямку потужності, буде не нижче мінімальної напруги $U_{0.ср}$, при якій це реле спрацьовує при струмі, що відповідає $I_{0сз}$. Спосіб перевірки захисту за зазначеною умовою розглядається нижче, у пп.3 - 5 даного додатку.

3. Розглядається випадок, коли захист встановлений на одиночній лінії (рис.ДVII.2).

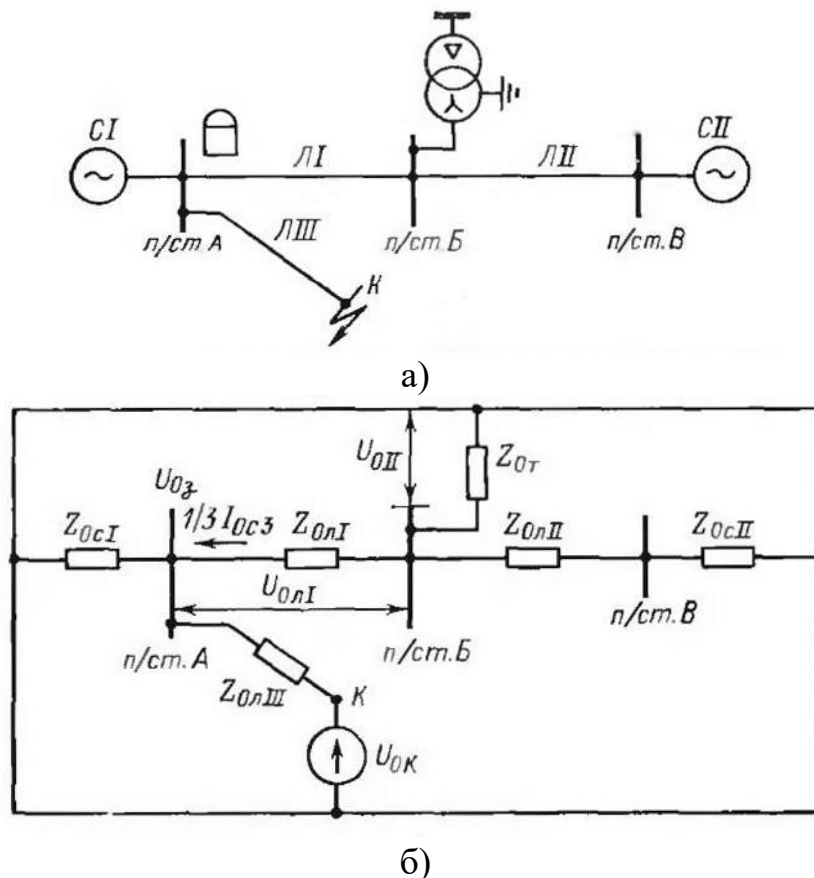


Рис.ДVII.2. Перевірка роботи реле напрямку потужності захисту одиночної лінії: а – вихідна схема; б – схема заміщення;
 $Z_{0лI}$, $Z_{0лII}$, $Z_{0лIII}$ - опори нульової послідовності ліній, відповідно *ЛI*, *ЛII* й

ЛІІІ;

Z_{0cl} і Z_{0cII} - опори нульової послідовності систем, відповідно *СІ* й *СІІ*;

$U_{0к}$ – напруга нульової послідовності в місці КЗ.

Розрахунковим є замикання на землю (можливо, віддалене або через великий перехідний опір), при якому в місці установки захисту проходить потроєний струм нульової послідовності, який дорівнює струму спрацьовування досліджуваного ступеня $I_{0с.з.}$.

Первинна напруга нульової послідовності в місці установки захисту рівна:

$$U_{0з} = U_{0II} + U_{0лI}, \quad (ДVII.1)$$

де U_{0II} - падіння напруги на результуючому опорі від шин *п/ст.Б* до нульової точки системи;

$U_{0лI}$ - падіння напруги на опорі лінії $Z_{0лI}$.

З метою спрощення для наближеної оцінки із запасом можна прийняти $U_{0II} = 0$. При цьому напруга $3U_{0з}$ при протіканні по лінії струму $I_{0с.з.}$, визначається за виразом

$$3U_{0з} = Z_{0лI} I_{0с.з.} \quad (ДVII.2)$$

Як вказувалося, для спрацьовування реле напряму потужності необхідне виконання умови

$$3U_{0з} \geq U_{0с.р} K_U, \quad (ДVII.3)$$

де $U_{0с.р}$ - мінімальна напруга спрацьовування реле напряму потужності при заданому струмі;

K_U - коефіцієнт трансформації трансформатора напруги.

Довжина лінії, що захищається, l , при якій припустимо використання розглянутого варіанта захисту, визначається з урахуванням виразів (ДVII.2) і (ДVII.3) на підставі наступного співвідношення:

$$\frac{3U_{0з}}{K_U} = \frac{x_{0л.нит} I_{0с.з.}}{K_U} \geq U_{0с.р}, \quad (ДVII.4)$$

де $x_{0л.нит} \approx Z_{0л.нит}$ - питомий опір нульової послідовності лінії.

З виразу (ДVII.4) випливає:

$$l \geq \frac{U_{0c.p} K_U}{x_{0л.н\text{ит}} I_{0c.з}}. \quad (\text{ДVII.5})$$

Мінімальна напруга спрацьовування індукційного реле напруги потужності $U_{0c.p}$ найвірогідніше може бути визначена за вольт-амперною характеристикою реле. При відсутності останньої можна виходити з даних заводу-виробника, відповідно до яких можна вважати, що при струмі в реле $3I_{0p.n} = I_{0c.p} < I_{ном}$

$$U_{0c.p} = S_{0c.p} / I_{0c.p}, \quad (\text{ДVII.6})$$

де $S_{0c.p}$ - потужність спрацьовування реле при номінальному струмі ($3I_{0p.n} = I_{ном}$);

$I_{0c.p}$ - струм спрацьовування реле струму досліджуваного ступеня захисту.

З урахуванням зазначеного розглянутий варіант захисту може бути використаний при довжині лінії

$$l \geq \frac{S_{0c.p} K_U}{x_{0л.н\text{ит}} I_{0c.p}^2 K_I}, \quad (\text{ДVII.7})$$

де K_I – коефіцієнт трансформації трансформаторів струму.

Для реле напруги потужності типу РБМ-177/1 або РБМ-178/1 значення $S_{0c.p}$ відповідно рівні 3 і 1 ВА. Приймаючи $I_{0c.p} = 0,15I_{ном}$, значення K_I для ліній 110, 220 і 330 кВ рівними відповідно 600/5, 1500/5 і 2000/5, значення K_U відповідно рівними $\frac{100}{\sqrt{3}}$, $\frac{2200}{\sqrt{3}}$ і $\frac{3300}{\sqrt{3}}$ й $x_{0л.н\text{ит}} = 1,4$ Ом/км, з виразу (ДVII.7) можна отримати мінімальні значення довжини лінії, при яких припустимо використання розглянутого варіанта захисту:

Для лінії	l_{min} , км для реле типу	
	РБМ-177/1	РБМ-178/1
110 кВ	20	6,7
220 кВ	16,6	5,5

Практично довжини ліній, на яких виникає необхідність установки захисту із блокувальним реле напрямку потужності, перевищують значення, обчислені за (ДVII.7).

У реальних умовах можливість використання розглянутого варіанта захисту може бути перевірена на підставі даних розрахунків струмів замикань на землю в розрахунковому режимі.

Виходячи із пропорційності зміни струму нульової послідовності I_{03} і напруги U_{03} у місці включення захисту в схемі за рис.ДVII.2,а, умова (ДVII.3) може бути записана як

$$3U_{03} \frac{I_{0c,3}}{3I_{03}} \geq k_{відб} U_{0c,p} K_U, \quad (\text{ДVII.8})$$

де U_{03} і I_{03} значення напруги й струму нульової послідовності в місці включення захисту, отримані при розрахунках струму замикання на землю в схемі заміщення за рис.ДVII.2,б;

$k_{відб}$ - коефіцієнт відбудовування, прийнятий рівним 1,1.

З виразів (ДVII.8) і (ДVII.6) може бути отримана умова перевірки можливості застосування розглянутого варіанта захисту (виконуваного за схемою рис.ДVII.1) при використанні індукційного реле напрямку потужності:

$$3U_{03} \geq \frac{k_{відб} S_{0c,p} K_U 3I_{03}}{I_{0c,p}^2 K_I}, \quad (\text{ДVII.9})$$

Значення $3U_{03}$ і $3I_{03}$ визначаються для режиму, у якому відношення $\frac{U_{03}}{I_{03}}$ мінімальне.

При використанні реле напрямку потужності, виконаного на схемі порівняння абсолютних значень або на схемі порівняння фаз, розглянутий

варіант захисту може бути застосовано при одночасному виконанні двох умов:

$$3U_{0з} \geq \frac{k_{відб} U_{0с.р} K_U 3I_{0з}}{I_{0с.з}}, \quad (ДVII.10)$$

$$\frac{I_{0с.з}}{K_I} \geq k_{відб} I_{0с.р.п}, \quad (ДVII.11)$$

де $I_{0с.р.п}$ - струм спрацьовування реле напрямку потужності.

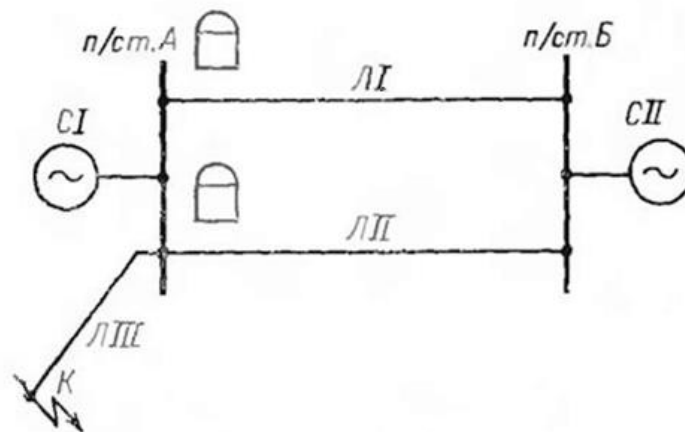
У випадку, коли розрахункова схема заміщення нульової послідовності при розглянутому зовнішньому замиканні на землю може бути наведена до найпростішого виду, замість виразів (ДVII.9) і (ДVII.10) можуть бути використані відповідно вирази

$$S_{0с.р} \leq \frac{I_{0с.з}^2 Z_{0екв}}{k_{відб} K_I K_U}; \quad (ДVII.12)$$

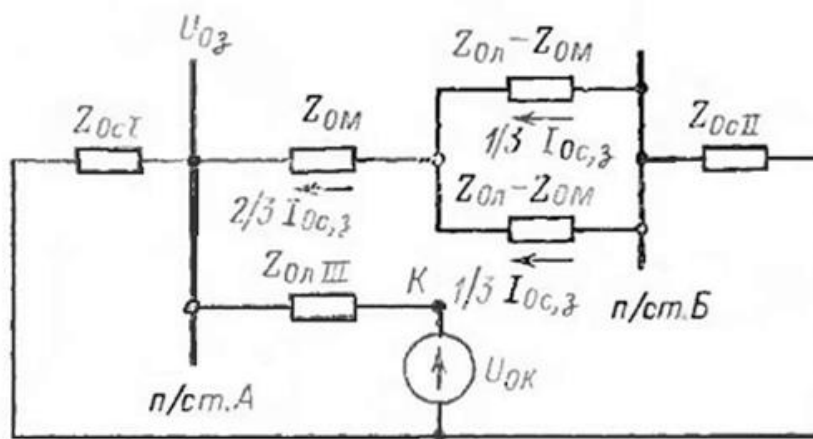
$$U_{0с.р} \leq \frac{I_{с.з} Z_{0екв}}{k_{відб} K_U}, \quad (ДVII.13)$$

де $Z_{0екв}$ - еквівалентний опір схеми заміщення нульової послідовності від місця установки захисту до нульової точки еквівалентної системи, пов'язаної із протилежною стороною лінії, що захищається, [наприклад, на рис.ДVII.2 $Z_{0екв} = Z_{0лI} + Z_{0T} \parallel (Z_{0лII} + Z_{0сII})$].

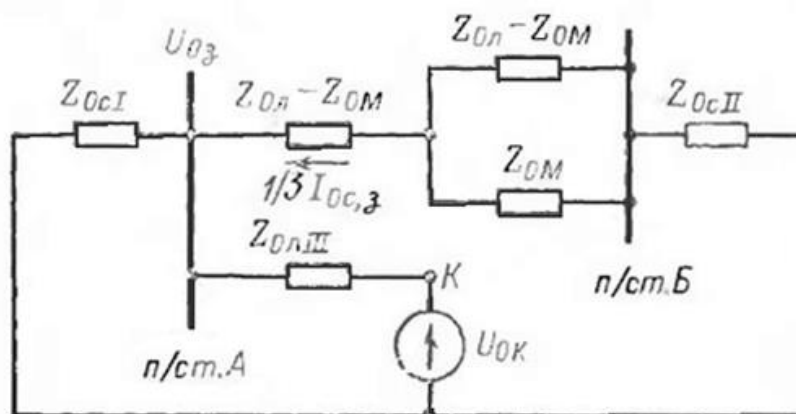
4. Розглядається випадок, коли захист установлений на паралельних лініях при наявності взаємодукції між ними (рис.ДVII.3,а).



а)



б)



в)

Рис.ДVII.3. Перевірка роботи реле напрямку потужності захисту паралельної лінії при замиканні на землю на одній з ліній, приєднаних до шин тієї ж підстанції: а – вихідна схема;

б – схема заміщення для випадку паралельної роботи обох ліній;

в – схема заміщення нульової послідовності для випадку, коли одна з паралельних ліній відключена й заземлена на обох кінцях;

$Z_{0л}$ - опір нульової послідовності ліній ЛІ й ЛІІ;

$Z_{0лIII}$ - опір нульової послідовності лінії ЛІІІ;

Z_{0M} - опір взаємодукції між лініями ЛІ й ЛІІ;

Z_{0cI} і Z_{0cII} - опори нульової послідовності систем, відповідно СІ й СІІ;

$U_{0к}$ - напруга нульової послідовності в місці КЗ.

Визначаються розрахункові умови для узгодження параметрів реле напрямку потужності й реле струму захисту, установленого на одній з паралельних ліній, при зовнішньому замиканні на землю (за винятком замикання на землю на паралельній лінії).

У випадку, коли ввімкнені обидві паралельні лінії, первинна напруга $3U_{0з}$, яка підводиться до реле напрямку потужності при рівності опорів нульової послідовності ліній $Z_{0лI} = Z_{0лII} = Z_{0л}$, може бути визначена за аналогією з (ДVII.2) за виразом

$$3U_{0з} = Z_{0л} \left(1 + \frac{Z_{0М}}{Z_{0л}} \right) I_{0с.з}, \quad (\text{ДVII.14})$$

де $Z_{0л}$ - опір нульової послідовності лінії;

$Z_{0М}$ - опір взаємоіндукції між паралельними лініями.

Схема заміщення для розглянутого випадку наведена на рис.ДVII.3,б. З порівняння виразів (ДVII.2) і (ДVII.14) випливає, що при роботі обох паралельних ліній і проходженні по кожній з них струму $I_{0с.з}$ падіння напруги $U_{0з}$ більше, ніж у випадку, коли включена тільки одна лінія. Таким чином, режим, коли включено обидві паралельні лінії, не є розрахунковим для перевірки правильної дії розглянутого варіанта захисту при замиканні на землю поза зоною, що захищається.

У випадку, коли одна з паралельних ліній відключена й заземлена (схема заміщення за рис.ДVII.3,в), за аналогією з (ДVII.2) може бути отримано:

$$3U_{0з} = Z_{0л} \left(1 - \frac{Z_{0М}^2}{Z_{0л}^2} \right) I_{0с.з}, \quad (\text{ДVII.15})$$

звідки видно, що даний режим для розглянутого узгодження виявляється більш складним, ніж режим роботи обох паралельних ліній і режим відключення без заземлення по обидва боки однієї з ліній.

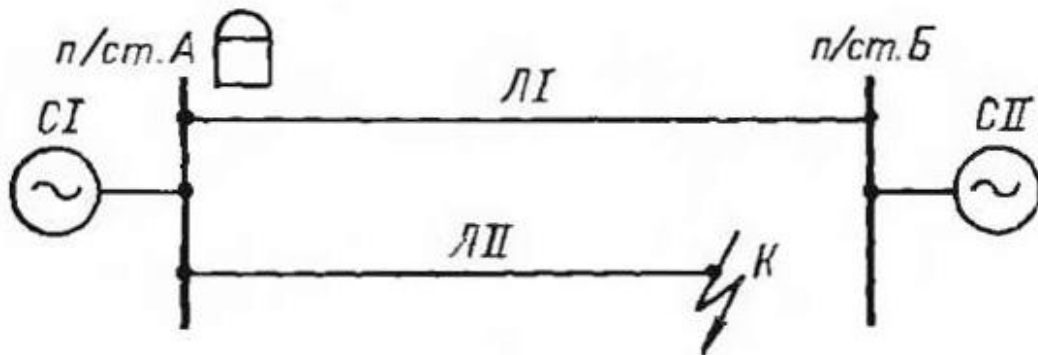
За аналогією з попереднім для розглянутого випадку можна одержати (приймаючи $Z_{0л.нум} \approx x_{0л.нум} = 1,4 \text{ Ом/км}$ і $Z_{0М.нум} \approx x_{0М.нум} = 0,8 \text{ Ом/км}$) мінімальні значення довжини лінії l_{min} , при яких забезпечується розглянуте узгодження:

Для лінії	l_{min} , км для реле типу	
	РБМ-177/1	РБМ-178/1
110 кВ	29,6	10

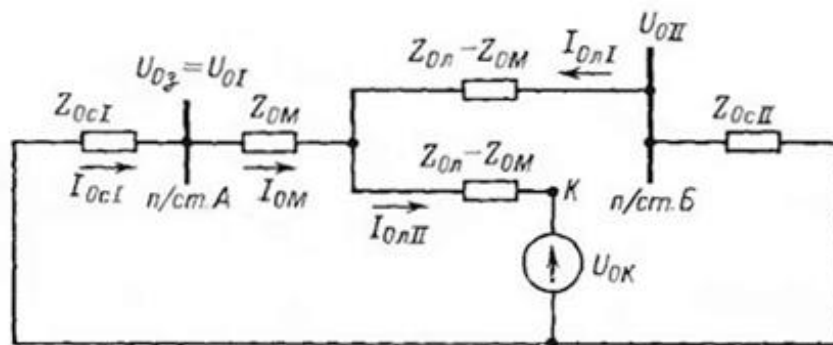
У конкретних випадках розглянуте узгодження в даному режимі може бути виконано по виразах (ДVII.9) – (ДVII.13).

5. При ушкодженні на паралельній лінії й каскадному її відключенні розрахунковим є замикання на землю на паралельній лінії поблизу шин протилежної підстанції через великий перехідний опір, при якому струм у місці установки захисту дорівнює струму спрацьовування $I_{0с.з}$ досліджуваного ступеня захисту.

Вихідна схема й варіанти схеми заміщення для розглянутого випадку наведені на рис.ДVII.4.



а)



б)

Рис.ДVII.4. Перевірка роботи реле напряму потужності захисту паралельних ліній при каскадному відключенні замикання на землю на одній із цих ліній:

а – вихідна схема; б – схема заміщення.

На підставі схеми заміщення по рис.ДVII.4,б можна одержати наступні співвідношення:

$$U_{0I} = Z_{0cI} I_{0з} \frac{I_{0M}}{I_{0лI}};$$

$$U_{0II} = Z_{0cII} I_{0з};$$

$$U_{0I} \leq U_{0II} \text{ при } \frac{Z_{0cII}}{Z_{0cI}} \geq \frac{I_{0M}}{I_{0лI}} = \frac{Z_{0cII} + Z_{0л} - Z_{0M}}{Z_{0cI} + Z_{0M}};$$

$$\text{при } Z_{0л} = 3,5Z_{1л}; Z_{0M} = 2Z_{1л}$$

$$\frac{Z_{0cII}}{Z_{0cI}} \geq \frac{Z_{0cII} + 1,5Z_{1л}}{Z_{0cI} + 2Z_{1л}},$$

$$\text{звідки } \frac{Z_{0cII}}{Z_{0cI}} \geq 0,75.$$

Таким чином, при певних співвідношеннях між Z_{0cI} , Z_{0cII} напруга U_{0I} може бути менше U_{0II} ; зменшення значення U_{0I} під впливом взаємодукції ускладнює розглянуте узгодження, особливо для останнього (чутливого) ступеню захисту.

6. Приклад розрахунків. У вихідній схемі за рис.ДVII.4,а: для системи I опір нульової послідовності $Z_{0cI} = 5 \text{ Ом}$, відношення $\frac{I_{0M}}{I_{0лI}} = 2$;

первинний струм спрацьовування передостаннього ступеня захисту $I_{0с.з} = 500 \text{ А}$;

номінальна напруга лінії 220 кВ, коефіцієнт трансформації трансформаторів струму $K_I = 600/5$.

Визначається значення первинної напруги на реле:

$$3U_{0з} = 3U_{0I} = \frac{I_{0M}}{I_{0лI}} I_{0с.з} Z_{0cI} = 2 \cdot 500 \cdot 5 = 5000 \text{ В.}$$

Вторинна напруга на реле

$$3U_{0p} = \frac{3U_{0з}}{K_U} = \frac{5000}{1270} = 3,9 \text{ В.}$$

Напруга спрацьовування реле типу РБМ-177 при вторинному струмі

$$I_{0c.p} = \frac{500}{600 / 5} = 4,16 \text{ A}$$

рівна:

$$U_{0c.p} = \frac{S_{0c.p}}{I_{0c.p}} = \frac{3}{4,16} = 0,72 \text{ В.}$$

Отже, використання розглянутого варіанта припустимо.

У конкретних умовах розглянуте узгодження в даному режимі може бути виконано також за виразами (ДVII.9) - (ДVII.13).

Додаток VIII

РОЗРАХУНКИ СТРУМУ НЕБАЛАНСУ В НУЛЬОВОМУ ПРОВІДІ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ В УСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ МІЖ ТРЬОМА ФАЗАМИ

1. Струм небалансу в нульовому провіді трансформаторів струму в усталеному режимі КЗ між трьома фазами $I_{\text{нб.уст}}$ може бути з достатньою для практичних розрахунків точністю визначений за виразом

$$I_{\text{0нб.уст}} = k_{\text{зан}}'' \sqrt{(k_{\text{зан}}' I_{\text{0нб1}})^2 + I_{\text{0нб3}}^2}, \quad (\text{ДVIII.1})$$

де $I_{\text{0нб1}}$ - перша гармоніка струму небалансу, рівна геометричній сумі перших гармонік намагнічуючих струмів трьох трансформаторів струму;

$I_{\text{0нб3}}$ - третя гармоніка струму небалансу, рівна арифметичній сумі третіх гармонік намагнічуючих струмів трьох трансформаторів струму;

$k_{\text{зан}}$ - коефіцієнт запасу, що показує наявність ряду неврахованих факторів, що впливають на збільшення тільки першої гармоніки струму небалансу $I_{\text{1нб}}$ (конструктивні відмінності трансформаторів струму, зокрема можливість неоднакового числа витків вторинних обмоток, і т.д.);

$k_{\text{зан}}''$ - коефіцієнт запасу, що показує наявність ряду неврахованих факторів, що впливають на збільшення як першої $I_{\text{1нб}}$, так і третьої $I_{\text{3нб}}$ гармоніки струму небалансу (неточність різного роду вихідних даних, які визначають за характеристиками сталі, неточність розрахунків і т.д.); приймається $k_{\text{зан}}' = k_{\text{зан}}'' = 1,4$.

2. Перша гармоніка струму небалансу $I_{\text{1нб}}$ обумовлена відмінністю намагнічуючих струмів трансформаторів струму в окремих фазах.

Це визначається відмінністю кривих намагнічування сталей, застосовуваних для виготовлення трансформаторів струму, неоднаковістю вторинних навантажень на трансформатори струму в окремих фазах, їхніми конструктивними відмінностями, зокрема

неоднаковою кількістю витків їх вторинних обмоток. Значення $I_{0нб1}$ із запасом може бути визначене як різниця найбільшого $I_{нам.мах}$ і найменшого $I_{нам.мін}$ намагнічуючих струмів трансформаторів струму різних фаз:

$$I_{0нб1} \approx I_{нам.мах} - I_{нам.мін}, \quad (ДVIII.2)$$

де $I_{нам.мах}$, $I_{нам.мін}$ - відповідно максимальний і мінімальний з намагнічуючих струмів трансформаторів струму досліджуваного комплекту; визначаються за розрахунковим значенням індукції $B_{т.розр}$ для кожної фази, який визначають, виходячи зі значення розрахункового струму КЗ і вторинного навантаження трансформаторів струму окремих фаз за виразами (ДVIII.4) і (ДVIII.5).

У проектних умовах оцінити значення $I_{нам.мах}$ і $I_{нам.мін}$ важко, оскільки відсутні дані по розкиду кривих намагнічування сталей. Однак в умовах експлуатації ці значення можуть бути отримані з вольт-амперних характеристик конкретних трансформаторів струму. При відсутності таких даних можна користуватися кривими намагнічування, наведеними на рис.ДVIII.1.

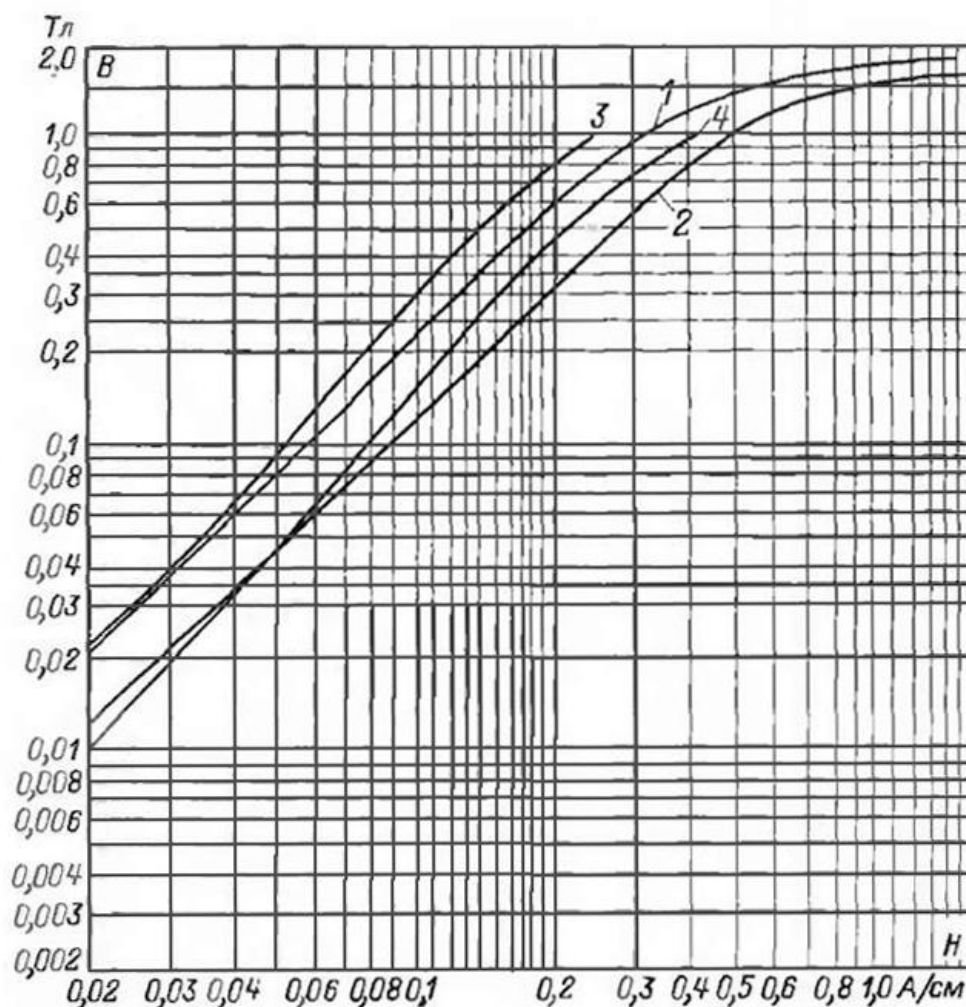


Рис.ДVIII.1. Криві намагнічування деяких електротехнічних сталей, застосовуваних для виготовлення трансформаторів струму:
1, 2 – для сталей різних марок, що мають відповідно кращі й гірші характеристики; 3, 4 – граничні (діапазонні) криві намагнічування для сталі марки (3411) ХВП.

Примітки. 1. Криві 1 і 2 запозичені з [29].

2. Криві 3 і 4 запозичені з [30].

3. Третя гармоніка струму небалансу $I_{0н63}$ може бути приблизно визначена на підставі кривої, що дає для розглянутої марки сталі відношення струмів третьої й першої гармонік у струмі намагнічування I_3 / I_1 , залежно від індукції B_m .

На рис.ДVIII.2 наведена така крива для сталі марки 3411. Струм $I_{0н63}$ визначається за виразом

$$I_{0нбЗ} \approx 3I_{нам.мах} \frac{I_3}{I_1}, \quad (ДVIII.3)$$

де $I_{нам.мах}$ - максимальний з повних намагнічуючих струмів трансформаторів струму досліджуваного комплекту при розрахунковому значенні індукції (рекомендується використовувати в розрахунках з метою збільшення запасу);

I_3 / I_1 - відношення струмів третьої й першої гармонік у струмі намагнічування для розрахункового значення індукції, визначається за кривими $\frac{I_3}{I_1} = f(B_m)$.

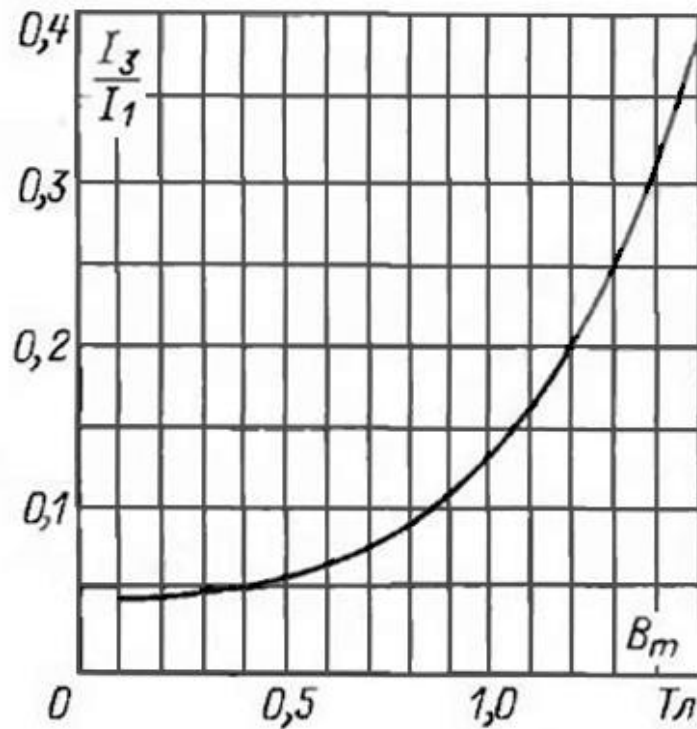


Рис.ДVIII.2. Співвідношення третьої й першої гармонік у струмі намагнічування для стрічкових сердечників.

Примітки. Крива $\frac{I_3}{I_1} = f(B_m)$ запозичена з [30].

4. Приклад розрахунків. Визначається струм небалансу в нульовому проводі захисту при зовнішньому КЗ між трьома фазами.

Для захисту використовуються трансформатори струму типу ТВ-220 з коефіцієнтом трансформації $K_I = 600/5$.

Конструктивні дані трансформаторів струму:

число витків вторинної обмотки $w_2 = 119$;

повний опір вторинної обмотки $z_2 = 0,4 \text{ Ом}$;

переріз сердечника $Q = 94 \text{ см}^2$;

довжина середньої магнітної лінії $l = 210 \text{ см}$.

Максимальне вторинне навантаження (опір вторинного ланцюга однієї фази) $z_B = 2 \text{ Ом}$.

Розрахунковий струм у місці установки захисту при розглянутому зовнішньому КЗ між трьома фазами $I_3^{(3)} = 1500 \text{ А}$.

Розрахунки виконується в наступному порядку:

А) визначається вторинна ЕРС трансформаторів струму за виразом

$$E_\epsilon = \frac{I_3}{K_I} (z_2 + z_\epsilon); \quad (\text{ДVIII.4})$$

$$E_\epsilon = \frac{1500}{600/5} (0,4 + 2) = 30 \text{ В}.$$

Б) визначається розрахункове значення індукції для максимального вторинного навантаження за виразом

$$B_{\text{т.розр}} = \frac{E_\epsilon \cdot 10^4}{4,44 f w_2 Q}; \quad (\text{ДVIII.5})$$

$$B_{\text{т.розр}} = \frac{30 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 119 \cdot 94} = 0,121 \text{ Тл}.$$

У зв'язку з відсутністю даних по марках сталей, з яких зазвичайно виготовлені сердечники магнітопроводів трансформаторів струму, для розрахунків використовуються криві намагнічування 1 і 2 за рис.ДVIII.1.

Приймається, що вторинні навантаження всіх фаз рівні між собою. Виходячи зі значення $B_{\text{т.розр}}$, за кривим 1 і 2 рис.ДVIII.1 визначаються

$$H_{\text{нам.мах}} = 0,098 \frac{\text{А}}{\text{см}}; \quad H_{\text{нам.мін}} = 0,062 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

В) визначається значення першої гармоніки струму небалансу за виразом, складеним з урахуванням (ДVIII.2):

$$I_{0\text{нб}1} = (H_{\text{нам.мах}} - H_{\text{нам.мін}}) \frac{l}{w_2}; \quad (\text{ДVIII.6})$$

$$I_{0\text{нб}1} = (0,098 - 0,062) \frac{210}{119} = 0,0635 \text{ А}.$$

Г) визначається значення третьої гармоніки струму небалансу за виразом, складеним з урахуванням (ДVIII.3):

$$I_{0\text{нб}3} = H_{\text{нам.мах}} \frac{l}{w_2} \left(3 \frac{I_3}{I_1} \right); \quad (\text{ДVIII.7})$$

$$I_{0\text{нб}3} = 0,098 \frac{210}{119} \cdot 3 \cdot 0,045 = 0,0234 \text{ А},$$

де значення $\frac{I_3}{I_1} = 0,045$ визначене для $B_m = B_{\text{т.розр}} = 0,121 \text{ Тл}$ за кривою

$\frac{I_3}{I_1} = f(B_m)$, наведеною на рис.ДVIII.2 (приймаючи приблизно, що ця

крива відповідає розглянутій марці стали).

Г) Визначається значення усталеного струму небалансу $I_{0\text{нб.у}}$ у нульовому проводі трансформаторів струму захисту за (ДVIII.1):

$$I_{0\text{нб.у}} = k_{\text{зан}}'' \sqrt{(k_{\text{зан}}' I_{0\text{нб}1})^2 + I_{0\text{нб}3}^2} = 1,4 \sqrt{(1,4 \cdot 0,0635)^2 + 0,0234^2} = 0,13 \text{ А}.$$

Відносне значення усталеного струму небалансу:

$$I_{0\text{нб.у.відн}} = \frac{I_{0\text{нб.у}} K_I}{I_3} = \frac{0,13 \cdot 600 / 5}{1500} = 0,0104.$$

Д) Визначається значення усталеного струму небалансу $I_{0\text{нб.у}}'$ у нульовому проводі трансформаторів струму захисту без врахування третьої гармоніки за виразом, отриманим з (ДVIII.1):

$$I_{0\text{нб.у}}' = k_{\text{зан}}'' k_{\text{зан}}' I_{0\text{нб}1}; \quad (\text{ДVIII.8})$$

$$I'_{0нб.у} = 1,4 \cdot 1,4 \cdot 0,0635 = 0,127 \text{ А.}$$

Вплив третьої гармоніки намагнічуючого струму можна оцінити за значенням похибки при неврахуванні третьої гармоніки:

$$\Delta I_{*0нб} = \frac{I_{0нб.у} - I'_{0нб.у}}{I_{0нб.у}} 100\% = \frac{0,130 - 0,127}{0,130} 100\% = 2,3\%.$$

Слід зазначити, $\Delta I_{*0нб}$ може бути отримана без безпосереднього обчислення струму небалансу за наступним виразом, отриманому на підставі виразів (ДVIII.1), (ДVIII.6) – (ДVIII.8):

$$\Delta I_{*0нб} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3 \frac{I_3}{I_1} \frac{1}{k'_{зан}}}{1 - \frac{H_{нам.мін}}{H_{нам.мак}}} \right)^2}} \right) 100\%. \quad (\text{ДVIII.9})$$

5. На підставі (ДVIII.6) - (ДVIII.8) можна отримати:

$$\begin{aligned} I_{0нб.у} &= k''_{зан} \sqrt{\left(k'_{зан} (H_{нам.мак} - H_{нам.мін}) \right)^2 + \left(3 \frac{I_3}{I_1} H_{нам.мак} \right)^2} \frac{l}{w_2} = \\ &= C_{нам} \frac{l}{w_2}, \end{aligned} \quad (\text{ДVIII.10})$$

де

$$C_{нам} = k''_{зан} \sqrt{\left(k'_{зан} (H_{нам.мак} - H_{нам.мін}) \right)^2 + \left(3 \frac{I_3}{I_1} H_{нам.мін} \right)^2}. \quad (\text{ДVIII.11})$$

За виразом (ДVIII.11) з використанням кривих 1 і 2 рис.ДVIII.1 і кривої рис.ДVIII.2 побудована крива $C_{нам} = f(B_m)$ (рис.ДVIII.3), яка може бути використана для прискорення розрахунків струму небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму за виразом (ДVIII.10).

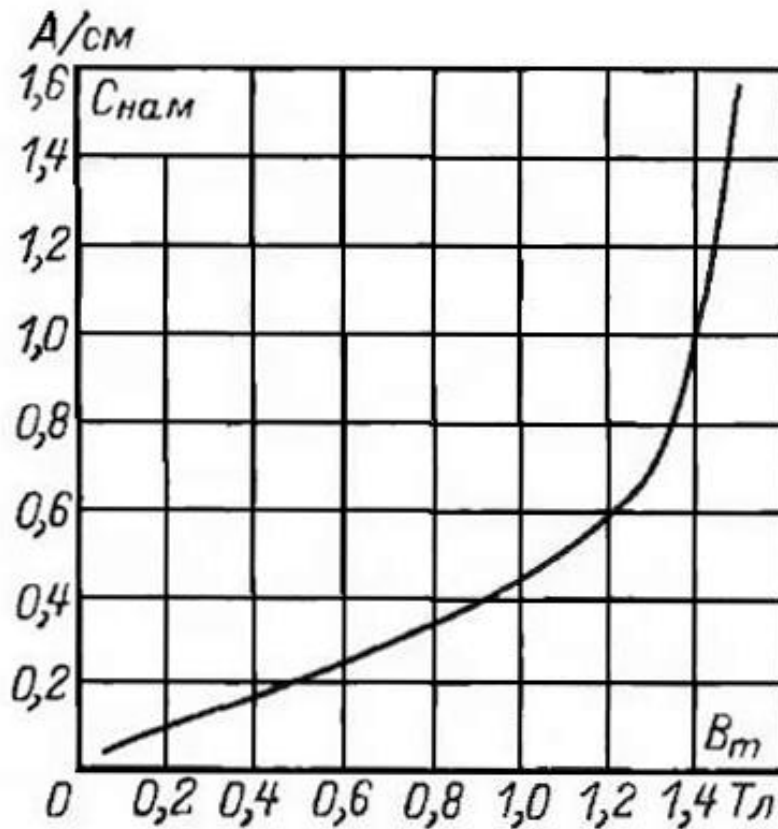


Рис.ДVIII.3. Залежність $C_{\text{нам}} = f(B_m)$.

Примітка. Крива $C_{\text{нам}} = f(B_m)$ побудована за виразом (ДVIII.11), у якому прийнято $k'_{\text{зан}} = k''_{\text{зан}} = 1,4$, значення $H_{\text{нам.мах}}$ і $H_{\text{нам.мін}}$ визначалися відповідно за кривими 1 і 2 рис.ДVIII.1, відношення $\frac{I_3}{I_1}$ - за кривою рис.ДVIII.2.

Розрахунки проводяться в наступному порядку.

А) визначається розрахункове значення індукції в сердечнику трансформатора струму для розглянутого КЗ $B_{\text{м.розр}}$ (за виразами (ДVIII.4) і (ДVIII.5));

Б) за кривою $C_{\text{нам}} = f(B_m)$ (рис.ДVIII.3) визначається значення $C_{\text{нам}}$;

В) при відомому відношенні l/w_2 за виразом (ДVIII.10) визначається $I_{\text{онб.у}}$.

Для вихідних даних з п.4 за даним способом можна визначити:

за кривою $C_{нам} = f(B_m)$ для $B_{т.розр} = 0,121$ Тл (визначається, як у

п.4) $C_{нам} = 0,073 \frac{А}{см};$

за виразом (ДVIII.10)

$$I_{0нб.у} = C_{нам} \frac{l}{w_2} = 0,073 \frac{210}{119} = 0,128 \text{ А.}$$

6. Приклад розрахунків. Оцінюється вплив третьої гармоніки на струм небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при струмі КЗ, якому відповідає значення індукції $B_{т.розр} = 1$ Тл.

А) Виходячи зі значення $B_{т.розр} = 1$ Тл за кривими 1 і 2 рис.ДVIII.1 визначаються $H_{нам.мах} = 0,49 \frac{А}{см}; H_{нам.мін} = 0,31 \frac{А}{см}.$

Б) Виходячи зі значення $B_{т.розр}$ за кривою рис.ДVIII.2 визначається відношення

$$\frac{I_3}{I_1} = 0,135.$$

В) Оцінюється вплив неврахування третьої гармоніки в струмі небалансу за значенням відносної похибки за виразом (ДVIII.9):

$$\Delta I_{*0нб} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3 \frac{I_3}{I_1} \frac{1}{k'_{зан}}}{1 - \frac{H_{нам.мін}}{H_{нам.мах}}} \right)^2}} \right) 100\% = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 0,135 \frac{1}{1,4}}{1 - \frac{0,31}{0,49}} \right)^2}} \right) 100\% = 21\%.$$

7. Приклад розрахунків. Оцінюється вплив першої гармоніки на струм небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму при кратностях, близьких до відповідних кривих граничної кратності.

А) Приймаємо $B_{т.розр} = 1,5$ Тл.

Б) Вплив першої гармоніки на струм небалансу оцінюється за аналогією з п.6 за значенням похибки при неврахуванні першої гармоніки:

$$\Delta I'_{*0нб} = \frac{I_{0нб.у}'' - I_{0нб.у}''}{I_{0нб.у}} 100\%; \quad (ДVIII.12)$$

струм небалансу в нульовому проводі трансформаторів струму захисту без урахування першої гармоніки визначається за виразом

$$I_{0нб.у}'' = k_{зан}'' I_{0нбз}. \quad (ДVIII.13)$$

В) Виходячи зі значення $B_{т.розр} = 1,5$ Тл за кривими 1 і 2 рис.ДVIII.1 визначаються значення:

$$H_{нам.мах} = 0,9 \frac{A}{см};$$

$$H_{нам.мін} = 0,55 \frac{A}{см}.$$

Г) На підставі виразів (ДVIII.1), (ДVIII.6), (ДVIII.7) і (ДVIII.13) за аналогією з (ДVIII.9) можна одержати вираз для визначення $\Delta I'_{*0нб}$ у відсотках:

$$\Delta I'_{*0нб} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1 - \frac{H_{нам.мін}}{H_{нам.мах}}}{3 \frac{I_3}{I_1} \frac{1}{k'_{зан}}} \right)^2}} \right) 100\%. \quad (ДVIII.14)$$

За цим виразом отримано $\Delta I'_{*0нб} = 9\%$; розрахунки проводилися в тому ж порядку, що й у п.6.

8. Розглянуті приклади підтверджують, що при невеликих первинних струмах і індукціях впливом третьої гармоніки в струмі небалансу можна знехтувати. При значних індукціях вплив третьої гармоніки виявляється значним і врахування його може бути необхідним.

Із кривих $\frac{I_3}{I_1} = f(B_m)$ (рис.ДVІІІ.2) і $C_{нам} = f(B_m)$ (рис.ДVІІІ.3) і

проведених розрахунків випливає, що вплив третьої гармоніки на повний струм небалансу стає значно помітним при значенні індукції 0,8 - 1 Тл, а при подальшому збільшенні індукції різко зростає й стає визначальним. Усе це обумовлює можливість спрощеної оцінки значення струму небалансу при орієнтовних розрахунках.

В умовах роботи трансформаторів струму, які характеризуються малими значеннями індукцій значення, коли визначальний вплив на струму небалансу виявляє перша гармоніка, можливе використання спрощеного виразу

$$I_{0нб.у} = k_{одн} \varepsilon I_{розр}, \quad (ДVІІІ.15)$$

де $k_{одн}$ - коефіцієнт однотипності, прийнятий 0,5 - 1;

ε - повна похибка трансформаторів струму.

Враховуючи, що при малих індукціях значення ε не перевищує декількох відсотків, з метою подальшого спрощення можна оцінювати $I_{0нб.у}$ за виразом

$$I_{0нб.у} = k_{нб} I_{розр}, \quad (ДVІІІ.16)$$

де $k_{нб}$ може прийматися:

при кратностях до 2 - 3 $I_{ном}$: $k_{нб} = 0,05$;

при більших кратностях, але суттєво менших граничної: $k_{нб} = 0,05 - 1$.

При кратностях, близьких до граничної, визначальний вплив на значення струму небалансу виявляє третя гармоніка. При цьому для оцінки значення $I_{0нб.у}$ також може використовуватися вираз (ДVІІІ.15), у

якому для кратностей, відповідних значенню індукції не вище 1,3 Тл, слід прийняти $k_{нб} = 0,1$.

При граничній кратності розрахунки повинні проводитися за виразом (ДVIII.1), при цьому з метою спрощення може бути прийнято $I_{0нб1} = 0$. Тоді

$$I_{0нб.у} \approx 1,4 I_{0нб3}. \quad (\text{ДVIII.17})$$

Додаток IX

ОЦІНКА ЗНИЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ЗАХИСТІВ ЛІНІЙ 110 - 220 КВ ДО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ ОДНІЄЇ ФАЗИ ПРИ ОДНОЧАСНОМУ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ МІЖ ФАЗАМИ ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ (АВТОТРАНСФОРМАТОРОМ)

У додатку розглядається випадок КЗ між фазами за трансформатором (автотрансформатором), приєднаним до відгалуження, і одночасного замикання на землю однієї фази на виводах його вищої напруги, обумовленого включенням короткозамикача.

Розглядалися режими роботи дво- і триобмоткових трансформаторів із глухозаземленою і ізольованою нейтраллю при наступних умовах:

опір нульової послідовності трансформаторів (автотрансформаторів) приймався рівним опору прямої послідовності;

приймалося, що автотрансформатори й триобмоткові трансформатори мають живлення тільки з боку вищої напруги;

розрахунки струмів нульової послідовності в місці замикання на землю проводилися за виразами (П-30) і (П-31) з додатку IV [31];

враховувалося, що струми нульової послідовності в місці установки захисту при замиканні на землю однієї фази й замиканні на землю однієї фази при одночасному КЗ між фазами за трансформатором (автотрансформатором) пропорційні струмам нульової послідовності в місці замикання на землю.

Для оцінки зміни струму замикання на землю однієї фази при одночасному КЗ між трьома фазами за трансформатором на підставі виконаних розрахунків були побудовані криві, за допомогою яких проводився аналіз.

Для замикання на землю однієї фази при одночасному КЗ між двома фазами за трансформатором розрахунки не проводилися, оскільки

попередній аналіз показав, що це ушкодження не є розрахунковим для перевірки чутливості захистів нульової послідовності ліній [32].

Випадок, коли трансформатор (автотрансформатор) працює паралельно з іншим трансформатором (автотрансформатором), не розглядався, оскільки до включення короткозамикача відбудеться відключення вимикача ушкодженого трансформатора на стороні середньої напруги.

Двообмотковий трансформатор зі схемою з'єднання обмоток (Y/Δ). Нейтраль трансформатора глухо заземлена. При замиканні на землю однієї фази на лінії, що захищається (включення короткозамикача) струм нульової послідовності в місці замикання на землю рівний:

$$I_{0\kappa}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{x_{1e} + x_{2e} + x_{0\Sigma}} = \frac{U_{\phi}}{2x_{1e} + \frac{x_{0e}x_{0T}}{x_{0e} + x_{0T}}}, \quad (\text{ДІХ.1})$$

де U_{ϕ} – фазна напруга мережі;

$x_{1e} = x_{2e}$ – еквівалентні опори прямої і зворотної послідовностей системи та лінії, яка захищається, до місця замикання на землю однієї фази;

x_{0e} – еквівалентний опір нульової послідовності системи та лінії, яка захищається, (включаючи відгалуження) до місця замикання на землю однієї фази;

x_{0T} – опір нульової послідовності трансформатора;

$x_{0\Sigma}$ – результуючий опір нульової послідовності стосовно точки замикання на землю однієї фази:

$$x_{0\Sigma} = \frac{x_{0e} + x_{0T}}{x_{0e} + x_{0T}}. \quad (\text{ДІХ.2})$$

Для замикання на землю однієї фази при одночасному КЗ між трьома фазами за трансформатором розрахунки проводилися з використанням принципу накладання двох режимів:

КЗ між трьома фазами за трансформатором – режим (3);

замикання на землю однієї фази на виводах вищої напруги трансформатора в схемі КЗ між трьома фазами – режим (1,3).

Струм нульової послідовності в місці замикання на землю в режимі (1,3) рівний:

$$I_{0\kappa}^{(1,3)} = \frac{U_{\kappa, \text{розр}}^{(3)}}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = \frac{I_{\kappa}^{(3)} x_{1T}}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}, \quad (\text{ДІХ.3})$$

де $U_{\kappa, \text{розр}}^{(3)}$ - напруга в місці наступного замикання на землю однієї фази (у місці установки короткозамикача), визначається за режимом (3);

x_{1T} - опір прямої послідовності трансформатора;

$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$ - результуючі опори прямої і зворотної послідовностей стосовно точки замикання на землю однієї фази:

$$x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma} = \frac{x_{1e} x_{1T}}{x_{1e} + x_{1T}}; \quad (\text{ДІХ.4})$$

$I_{\kappa}^{(3)}$ - струм і місці КЗ у режимі (3), рівний:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\phi}}{x_{1e} + x_{1T}}. \quad (\text{ДІХ.5})$$

З урахуванням (ДІХ.2), (ДІХ.4) і (ДІХ.5) вираз (ДІХ.3) набуває вигляду:

$$I_{0\kappa}^{(1,3)} = \frac{U_{\phi} x_{1T}}{(x_{1e} + x_{1T}) \left(2 \frac{x_{1e} x_{1T}}{x_{1e} + x_{1T}} + \frac{x_{0e} x_{0T}}{x_{0e} + x_{0T}} \right)}. \quad (\text{ДІХ.6})$$

Для двообмоткового трансформатора відповідно прийнятому вище допущенню маємо:

$$x_{1T} = x_{0T} = x_T; \quad (\text{ДІХ.7})$$

$$I_{0\kappa}^{(1,3)} = \frac{U_{\phi} x_{1T}}{(x_{1e} + x_{1T}) \left(2 \frac{x_{1e} x_{1T}}{x_{1e} + x_{1T}} + \frac{x_{0e} x_{0T}}{x_{0e} + x_{0T}} \right)} = \frac{U_{\phi}}{2x_{1e} + x_{0e} \frac{x_{1e} + x_T}{x_{0e} + x_T}}. \quad (\text{ДІХ.8})$$

Відношення струмів нульової послідовності в місці замикання на землю однієї фази в режимах (1,3) і замикання на землю однієї фази, рівне відношенню струмів нульової послідовності в захисті лінії при зазначених ушкодженнях, виходячи з виразів (ДІХ.8) і (ДІХ.1) рівне:

$$\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}} = \frac{U_{\phi} \left(2x_{1e} + \frac{x_{0e}x_{0T}}{x_{0e} + x_{0T}} \right)}{U_{\phi} \left(2x_{1e} + x_{0e} \frac{x_{1e} + x_T}{x_{0e} + x_T} \right)} = 1 - \frac{\frac{x_{0e}}{x_{1e}}}{3 \frac{x_{0e}}{x_{1e}} + 2 \frac{x_T}{x_{1e}} + \frac{x_{0e}}{x_{1e}} \cdot \frac{x_T}{x_{1e}}}. \quad (\text{ДІХ.9})$$

Нейтраль трансформатора ізольована. Відповідний розрахунковий вираз для відношення струмів при розглянутих ушкодженнях отримується із виразів (ДІХ.8) і (ДІХ.1) з урахуванням того, що нейтраль трансформатора розземлена, тобто при $x_{0\Sigma} = x_{0e}$

$$\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}} = \frac{U_{\phi} x_T (2x_{1e} + x_{0e})}{U_{\phi} (x_{1e} + x_T) \left(2 \frac{x_{1e}x_T}{x_{1e} + x_T} + x_{0e} \right)} = 1 - \frac{\frac{x_{0e}}{x_{1e}} \frac{x_{1e}}{x_T}}{2 + \frac{x_{0e}}{x_{1e}} \left(1 + \frac{x_{1e}}{x_T} \right)}. \quad (\text{ДІХ.10})$$

Триобмотковий трансформатор зі схемою з'єднання обмоток $\text{Y}/\text{Y}/\Delta$. Для триобмоткового трансформатора зі схемою з'єднання обмоток $\text{Y}/\text{Y}/\Delta$ у трипроменевій схемі заміщення опори рівні:

прямої і зворотної послідовностей

$$x_{1T} = x_{2T} = \Sigma x; \quad (\text{ДІХ.11})$$

нульової послідовності

$$x_{0T} = x_{в.Т} + x_{н.Т}, \quad (\text{ДІХ.12})$$

де Σx - сума опорів прямої (зворотної) послідовності обмоток трансформатора між місцем КЗ і виводами вищої напруги;

$x_{в.Т}$, $x_{н.Т}$ - опори прямої (зворотної) послідовності обмоток відповідно вищої й низької напруг трансформатора.

При ізольованій нейтралі для триобмоткового трансформатора при КЗ на стороні як низької, так і середньої напруги зберігаються ті ж

розрахункові умови, що й для двообмоткового, і відношення струмів $\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}}$ обчислюється за виразом (ДІХ.10), у якому $x_T = x_{1T}$.

При глухозаземленій нейтралі й замиканні на землю однієї фази при одночасному КЗ між трьома фазами на стороні низької напруги трансформатора $x_{1T} = x_{0T} = x_{e.T} + x_{n.T}$, тобто й для цього випадку розрахунковим є вираз (ДІХ.9), наведений вище для двообмоткового трансформатора, у якому $x_{1T} = x_{0T} = x_T$.

При замиканні на землю однієї фази й одночасному КЗ між трьома фазами на стороні середньої напруги трансформатора із глухозаземленою нейтраллю розрахунковий вираз для відношення струмів $\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}}$ можна одержати з виразів (ДІХ.1) і (ДІХ.6):

$$\begin{aligned} \frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}} &= \frac{U_\phi x_{1T} \left(2x_{1e} + \frac{x_{0e}x_{0T}}{x_{0e} + x_{0T}} \right)}{U_\phi (x_{1e} + x_{1T}) \left(2 \frac{x_{1e}x_T}{x_{1e} + x_T} + \frac{x_{0e}x_{0T}}{x_{0e} + x_{0T}} \right)} = \\ &= 1 - \frac{\frac{x_{0T}}{x_{1T}}}{2 + 2 \frac{x_{0T}}{x_{1e}} \frac{1}{\frac{x_{0e}}{x_{1e}}} + \left(1 + \frac{x_{1T}}{x_{1e}} \right) \frac{x_{0T}}{x_{1T}}}. \end{aligned} \quad (\text{ДІХ.13})$$

У загальному випадку $x_{0T} = nx_{1T}$ (n - позитивне число) і вираз (ДІХ.13) набуває вигляду:

$$\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{2}{n} + 1 \right) + 2 \frac{x_{1T}}{x_{1e}} \frac{1}{\frac{x_{0e}}{x_{1e}}} + \frac{x_{1T}}{x_{1e}}}. \quad (\text{ДІХ.14})$$

Нижче розглянуто два випадки, коли напруги КЗ трансформатора (у відсотках) становлять:

$$1) \text{ ВН-СН} = 10,5; \text{ ВН-НН} = 17; \text{ СН-НН} = 6;$$

$$2) \text{ ВН-СН} = 17; \text{ ВН-НН} = 10,5; \text{ СН-НН} = 6.$$

Для першого випадку $x_{0T} = 1,62x_{1T}$, для другого випадку $x_{0T} = 0,618x_{1T}$, і вираз (ДІХ.14) набуває відповідно вигляду:

при $n = 1,62$

$$\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}} = 1 - \frac{1}{2,23 + 2 \frac{x_{1T}}{x_{1e}} \frac{1}{\frac{x_{0e}}{x_{1e}}} + \frac{x_{1T}}{x_{1e}}}; \quad (\text{ДІХ.15})$$

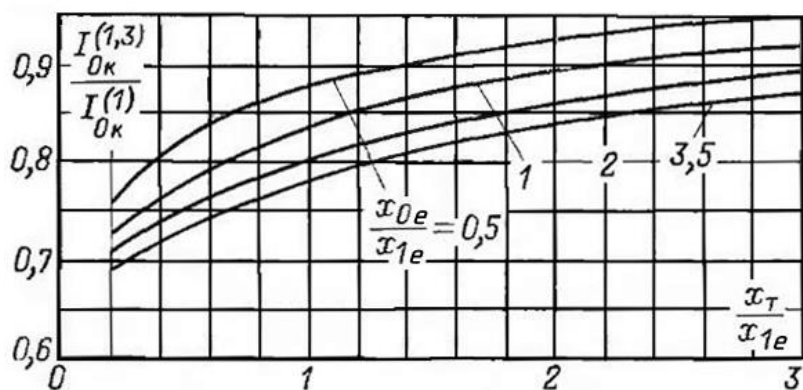
при $n = 0,618$

$$\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}} = 1 - \frac{1}{4,24 + 2 \frac{x_{1T}}{x_{1e}} \frac{1}{\frac{x_{0e}}{x_{1e}}} + \frac{x_{1T}}{x_{1e}}}; \quad (\text{ДІХ.16})$$

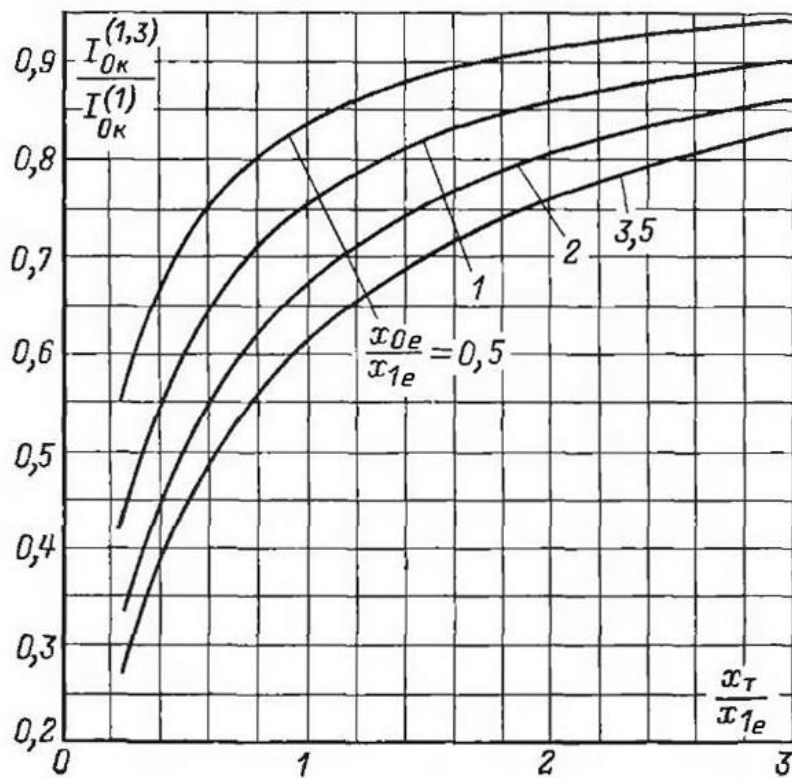
Автотрансформатор зі схемою з'єднання обмоток ∇/Δ . У випадку замикання на землю однієї фази при одночасному КЗ між трьома фазами на стороні низької напруги автотрансформатора розрахунковим є вираз (ДІХ.9), у якому $x_T = x_{e.AT} + x_{n.AT}$. При КЗ між трьома фазами на стороні середньої напруги розрахункові вирази можуть бути отримані так само, як і для триобмоткового трансформатора, з урахуванням конкретних величин x_{0AT} і x_{1AT} . Для автотрансформатора, у якого напруги КЗ (у відсотках) становлять ВН-СН = 11; ВН-НН = 31 і СН-НН = 19, тобто $x_{0AT} = 2,82x_{1AT}$, відношення струмів виходячи з виразу (ДІХ.14) рівне:

$$\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}} = 1 - \frac{1}{1,71 + 2 \frac{x_{1T}}{x_{1e}} \frac{1}{\frac{x_{0e}}{x_{1e}}} + \frac{x_{1T}}{x_{1e}}}. \quad (\text{ДІХ.17})$$

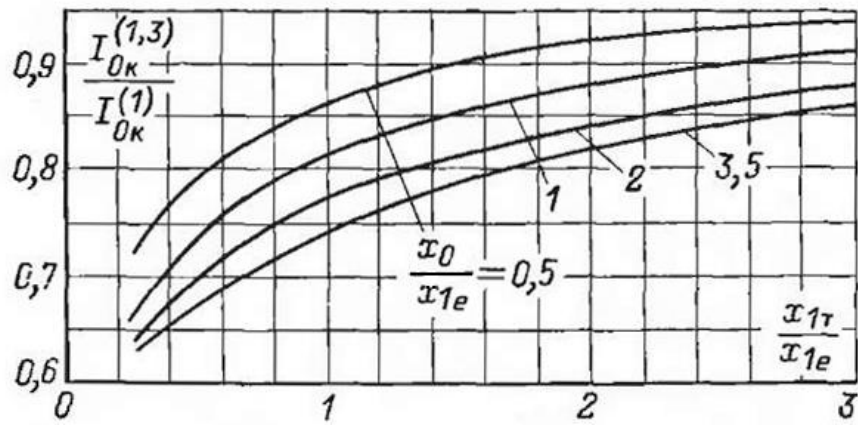
За виразами (ДІХ.9), (ДІХ.10), (ДІХ.15) - (ДІХ.17) на рис.ДІХ.1 побудовані криві залежності $\frac{I_{0\kappa}^{(1,3)}}{I_{0\kappa}^{(1)}}$ від відношення $\frac{x_T}{x_{1e}} \left(\frac{x_{AT}}{x_{1e}} \right)$ для різних значень $\frac{x_{0e}}{x_{1e}}$, які дозволяють визначити значення струму $3I_{0\kappa}^{(1,3)}$ в місці установки захисту лінії 110 - 220 кВ у режимі (1,3) виходячи зі значення струму $3I_{0\kappa}^{(1)}$ в режимі замикання на землю однієї фази.



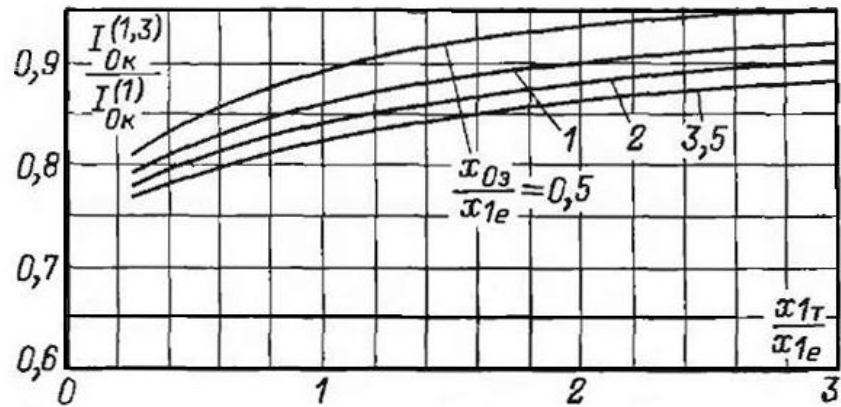
а)



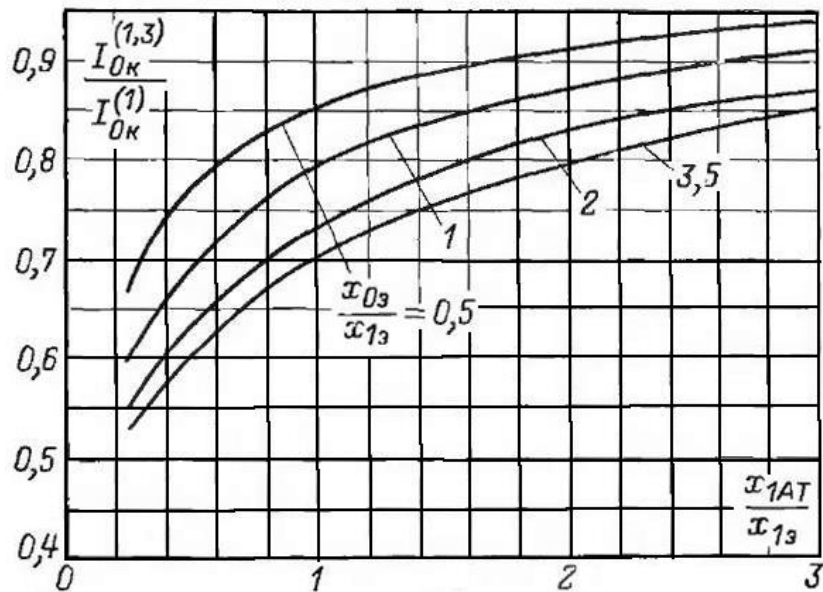
б)



в)



г)



г)

Рис.ДІХ.1. Розрахункові криві для наближеної оцінки зміни струму $I_{0K}^{(1)}$ в режимі замикання на землю однієї фази й одночасного КЗ між трьома фазами за дво- і триобмотковими трансформаторами й автотрансформаторами:

а – КЗ між трьома фазами на стороні низької напруги дво- або

- триобмоткового трансформатора із глухозаземленою нейтраллю;
 δ – КЗ між трьома фазами за дво- і триобмотковим трансформатором з ізолюваною нейтраллю;
 ϵ – КЗ між трьома фазами на стороні середньої напруги триобмоткового трансформатора ($x_{\epsilon T} = 0$) зі схемою з'єднання обмоток $\Upsilon/\Upsilon/\Delta$ із глухозаземленою нейтраллю;
 z – КЗ між трьома фазами на стороні середньої напруги триобмоткового трансформатора ($x_{zT} = 0$) зі схемою з'єднання обмоток $\Upsilon/\Upsilon/\Delta$ із глухозаземленою нейтраллю;
 t – КЗ між трьома фазами на стороні середньої напруги автотрансформатора з $u_{\kappa BH-CH} = 11\%$, $u_{\kappa BH-HH} = 31\%$, $u_{\kappa CH-HH} = 19\%$

У якості розрахункового повинен прийматися такий режим роботи системи, тобто така комбінація $I_{0\kappa}^{(1)}, \frac{x_{0e}}{x_{1e}}, \frac{x_T}{x_{1e}} \left(\frac{x_{AT}}{x_{1e}} \right)$, при якій $3I_{0\kappa}^{(1,3)}$ буде мінімально можливим.

Із кривих видно, що найбільш важким випадком для перевірки чутливості захисту лінії є КЗ між трьома фазами за трансформатором з ізолюваною нейтраллю. Однак і в цьому випадку при $\frac{x_T}{x_{1e}} > 3$ струм $3I_{0\kappa}^{(1)}$ зменшується не більше ніж на 17%.

Тому при $\frac{x_T}{x_{1e}} > 3$ припустимо зниження струму не розраховувати, а підвищити мінімальний коефіцієнт чутливості реле струму захисту приблизно до 1,8, а реле напряду потужності до 3,0 (за потужністю) і до 1,8 (за струмом й напругою).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Barinov V. M., Kiesewetter D. V., "Experimental study of the influence of single-phase short-circuits of power cable lines 110 and 220 kV on the operation of communications systems and automation," 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/RTUCON.2016.7763120.
2. Fedotov A. I., Mudarisov R. M. , Stability of Synchronous Motors Under Single Phase Grid Short Circuits, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602727.
3. Gai O., Didenko S. Automated calculation of short-circuit currents using software «Elplek». Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194-2. С. 82-90.
4. Guo, Y., G. Liu, J. Liang, L. Zhou, X. Jiang, Y. Xu, and J. Zhang. 2018. "Simulation Analysis on Transient Overvoltage of Asymmetric Short Circuit in Cable Collector Networks of Offshore Wind Farm." Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus 54 (5): 204-209 and 216. doi:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.05.032.
5. K. Mahmud, A. K. Sahoo, E. Fernandez, P. Sanjeevikumar and J. B. Holm-Nielsen, "Computational Tools for Modeling and Analysis of Power Generation and Transmission Systems of the Smart Grid," in IEEE Systems Journal, vol. 14, no. 3, pp. 3641-3652, Sept. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2020.2964436.
6. Kasikci Ismail. Short Circuits in Power Systems: A Practical Guide to IEC 60909, Second edition. Wiley VCH, 2003. DOI:10.1002/9783527803378
7. Khlopova Anastasiya, Sarin Leonid Transient processes in primary winding of voltage transformers under single-phase short circuits in 110 kV

power grids with cable fixings," 2008 Power Quality and Supply Reliability Conference, Parnu, 2008, pp. 175-178, doi: 10.1109/PQ.2008.4653756.

8. Li, Y., Zhang, H., & Xu, J. (2019). Analysis of single-phase short-circuit current suppression measures at converter stations and their effects on power system reliability. Paper presented at the 2019 Asia Power and Energy Engineering Conference, APEEC 2019, 5-9. doi:10.1109/APEEC.2019.8720680.

9. Nazarčík, T., & Benešová, Z. (2017). Transient analysis of multi-circuit overhead transmission lines with two voltage levels. Paper presented at the Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, 596-601.

10. Niculescu, T., Pasculescu, D., & Stoica, I. O. (2014). Study of electro-dynamic forces in short circuit regime using matlab - simulink software. Paper presented at the International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, , 1(2) 339-346.

11. Nowak, W., W. Szpyra, R. Tarko, and M. Benesz. 2016. "Calculation of Currents Flowing in the Towers Earthing System during Single-Phase Faults in High Voltage Overhead Lines." *Przegląd Elektrotechniczny* 92 (6): 203-206. doi:10.15199/48.2016.06.40.

12. Program Elplek: [Електронний ресурс]. – URL : <http://pp.kpnet.fi/ijl>.

13. Toader D. , Haragus S., Blaj C. Currents closing via the copper ribbon of MV cables at single-phase short-circuits on the HV side of a 110/20 kV station, 2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, 2008, pp. 191-196, doi: 10.1109/OPTIM.2008.4602365.

14. Turkia N, Phipia T, Bantsadze V. The creation of a mathematical model for simultaneous asymmetric faults in electric systems. In: Information

and computer technology, modeling and control: Proceedings of the international scientific conference devoted to the 85th anniversary of academician I. V. prangishvili. ; 2017. p 139-150.

15. Valiullin K. R. Detection of Faults on Power Line with Artificial Neural Networks, 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111987.

16. Yang, D., Zhang, B., Ma, L., Xing, L., & Wu, C. (2018). Two-step optimization for limiting three-phase and single-phase short circuit current. Paper presented at the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, EI2 2018 - Proceedings, doi:10.1109/EI2.2018.8582568

17. О.В. Гай, В.В. Козирський Перехідні процеси в енергетиці. – К. : ЦП «Компринт», 2016. – 489 с.

18. Вдов Т. В., Дмитренко О. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ «ELPLEK»–ПРОГРАМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИВІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ //Міжнародний науково-технічний журнал" Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2017. – С. 33-36.

19. Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен Перехідні процеси в системах електропостачання. Підручник для вузів. / за ред. Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий унів. – 2002. – 597 с.

20. Гай О. В., Гусятинський Д.О. Особливості представлення деяких елементів в програмному продукті «Elplek». Енергетика і автоматика, 2020, №3. С. 34-44.

21. Кухарчук А. В. и др. Анализ возможности использования программного продукта «Elplek» для моделирования работы релейной защиты //Фундаментальные исследования. – 2016. – Т. 3. – №. 11.

22. Приклади розрахунків неповнофазних режимів і коротких замикань.- 2-е вид., перероб, і доп.- Л.: Енергія. Ленінгр. від-ння, 1979.- 184 с., іл.

23. Руководящие указание по релейной защите. Вып. 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110-500кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980. – 88с.

24. Півняк Г.Г., Слесарєв В.В. Нова структура інформаційного забезпечення задач керування енергоємними технологічними процесами // Доповіді НАН України. Математика. Природознавство. Технічні науки. 2000, № 8.-С. 107-110.

25. Півняк Г.Г., Кириченко В.І. Електромеханічні системи енергонапружених барабанних млинів. – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.

26. Черемісін М.М. Перехідні процеси в системах електропостачання: Навч. Посібник. – Х.: Факт, 2005. – 176с.

27. ГКД 34.20.171-96 Обмеження струмів короткого замикання в електричних мережах 110-750 кВ. Методика

28. ДСТУ ІЕС/TR 60909-4:2008 Струми короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання (ІЕС/TR 60909-4:2000, IDT)

29. ДСТУ ІЕС 60909-0:2007 Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 0. Обчислення сили струму (ІЕС 60909-0:2001, IDT)

30. НПАОП 10.0-5.41-13 Інструкція з визначення струмів короткого замикання, вибору і перевірки уставок максимального струмового захисту в мережах напругою до 1200 В

31. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). Київ: 2017.