

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 7

**РОЗРАХУНКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ТРИФАЗНИХ
КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ**

1. Розрахунок складових струму короткого замикання від вузлів навантаження

Розраховуючи струми КЗ, слід зважати на можливе підживлення місця КЗ від тимчасових джерел у вузлах. Накопичення в них енергії та їх спроможність як джерел залежать від типу й складу навантаження окремих вузлів системи електропостачання. Загалом навантаження за складом – комплексне і в ньому можна виділити основні типи: асинхронні та синхронні двигуни, тягові агрегати на постійному чи змінному струмі, статичні електроспоживачі (печі, освітлення, зварювальні агрегати, перетворювальні установки тощо), компенсуючі та симетруючі пристрої. Точне визначення впливу на значення струму КЗ сумарного навантаження сукупності електроспоживачів у СЕП різного складу, режимів роботи та схем живлення – нелегке завдання.

У зв'язку з викладеним в інженерних розрахунках обмежуються наближеним обліком підживлення місця КЗ від вузлів промислового навантаження.

При КЗ у системі зовнішнього електропостачання (живильні мережі напругою понад 35 кВ) вузол навантаження здебільшого електрично віддалений від місця КЗ і його облік – лиш додатково уточнювальний чинник, який подають у вигляді узагальненого навантаження з параметрами:

для обліку підживлювального ефекту при $t = 0$

$$E_{*н0нв} = 0,85; \quad x_{*н0нв} = 0,35; \quad (1)$$

у схемах заміщення

$$\underline{Z}_{нв} = \frac{U_{нв}^2}{S_{нв}} (\cos \varphi_{нв} + j \sin \varphi_{нв}), \quad (2)$$

де $U_{нв}$ – напруга у вузлі, куди ввімкнене узагальнене навантаження; $S_{нв}$, $\varphi_{нв}$ – потужність та кут навантаження відповідно.

При КЗ у системах внутрішнього електропостачання (розподільні мережі напругою 10 кВ і нижче) слід виділяти окремо й враховувати вузлові тимчасові

джерела у підживленні місця КЗ: двигуни, компенсувальні установки реактивної потужності.

1.1. Розрахунок складових струму КЗ від двигунів, що перейшли на генераторний режим

Місце КЗ у СЕП може живитися від двигунів, що містяться поблизу та внаслідок КЗ перейшли на генераторний режим і продовжують за інерцією обертатися за рахунок накопиченої у робочих машинах агрегатів кінетичної енергії. За час перехідного процесу значення струму змінюються у бік зменшення: від синхронного двигуна – до сталого (визначається струмом збудження), а від асинхронного – до нуля. Через перехід потужних двигунів на генераторний режим збільшення значення струму в місці КЗ може бути досить суттєвим, якщо вони безпосередньо ввімкнені до місця КЗ. Це – характерне для мереж та електроустановок напругою 6...10 кВ з двигунами потужністю 1000 кВ·А та більше. Насамперед, слід урахувувати двигуни, зв'язані з місцем КЗ безпосередньо або через ЛЕП, струмоводи, лінійні реактори чи двообмотковий трансформатор, що мають порівняно невеликий електричний опір. Із знаком питання перехід на генераторний режим і врахування двигунів, увімкнених до здорових секцій багатосекційного розподільного улаштування підстанції та сполучених із секцією, де сталося КЗ, – через розщеплену обмотку трансформатора або плече зведеного реактора.

Критерій переходу двигуна на генераторний режим – умова

$$U_{ост} < E_d, \quad (3)$$

де $U_{ост}$ – значення залишкової напруги у точці ввімкнення двигуна (для розрахункової схеми КЗ у СЕП без урахування підживлення від двигуна); E_d – е.р.с. двигуна.

За значеннями залишкових напруг у вузлах СЕП можна виділити зону, в якій двигуни переходять на генераторний режим, чим уточнюється розрахункова схема СЕП за числом підживлювальних місць КЗ джерел.

Струм від двигунів урахувують для перевірки апаратів розподільних улаштувань 6...10 кВ та провідників за умов роботи при КЗ, а також для розрахунку та регулювання засобів захисту установок внутрішнього і зовнішнього електропостачання. Для цього визначають початкове значення періодичної складової струму від двигуна $I_{п0 д}$, ударний струм $i_{уд}$, а також періодичну $I_{пт д}$ та аперіодичну $I_{ат д}$ складові струму у довільний момент часу t перехідного процесу чи в момент τ вимкнення КЗ.

При обчисленнях у відносних одиницях виміру за базисні величини беруть номінальні напруги та потужність двигунів.

Зміст розрахунку струму КЗ від двигунів генераторного режиму, залежить від схем ввімкнення до СЕП. Схему заміщення вузла можна перетворити на:

1) радіальну, де кожен двигун сполучений з точкою КЗ через індивідуальний опір (рис. 1,а);

2) складну, в якій точка КЗ міститься за спільним опором для групи різнотипних двигунів та електричної системи (рис. 1,б,в).

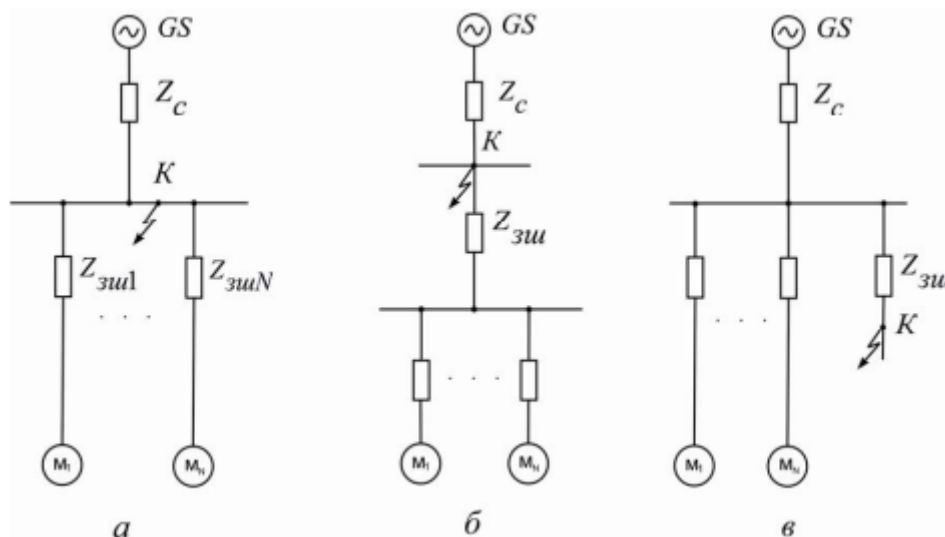


Рис. 10. Розрахункові схеми з двигунами: а – радіальна; б – складна із загальним опором для двигунів; в – складна із загальним опором для всіх джерел

Увімкнені за радіальною схемою різнотипні двигуни слід розглядати індивідуально, складна схема ввімкнення повинна бути перетворена відносно точки КЗ на еквівалентну з визначенням її результуючих параметрів.

Асинхронні двигуни. Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ з урахуванням зовнішнього опору, через який ввімкнено двигун, обчислюють за виразом:

$$I_{\text{ПО АД}} = E_{*n0} I_{\text{н АД}} / \sqrt{\left(x_{*n \text{ АД}}'' + x_{*n \text{ зш}}''\right)^2 + r_{*n \text{ зш}}^2}, \quad (4)$$

де E_{*n0} – надперехідна е.р.с. двигуна; $x_{*n \text{ АД}}'$ – надперехідний опір двигуна.

З відсутністю початкових даних наближено вважають, що $E_{*n0} = 0,9$. Облік значень зовнішнього опору здійснюють спрощено. Повний зовнішній опір можна не враховувати при співвідношенні $z_{*n \text{ зш}} < (0,1 \dots 0,2) \cdot x_{*n \text{ АД}}''$ (опір кабелів завдовжки до 200...300 м та перерізом не менше 50...70 мм²). Тоді

$$I_{\text{ПО АД}} = \kappa I_{*n \text{ пуск}} I_{\text{н АД}}, \quad (5)$$

де $\kappa = 1,2$ – для двигунів спеціального виконання; $\kappa = 1$ – для інших асинхронних двигунів. Якщо зовнішній опір відповідає співвідношенню

$z_{*n \text{ зш}} > 0,2 x_{*n \text{ АД}}'$, то його необхідно брати до уваги при розрахунку:

$$I_{\text{ПО АД}} = \kappa I_{*n \text{ пуск}} I_{\text{н АД}} / \left(1 + z_{*n \text{ зш}} / x_{*n \text{ АД}}''\right). \quad (6)$$

Діюче значення періодичної складової струму КЗ у довільний момент часу при радіальній схемі ввімкнення можна обчислити за спрощеним методом, використавши типові криві для електродвигунів (рис. 2). Такі залежності характеризують: зміну цієї складової струму у часі (до 0,2 с) за різної електричної віддаленості від точки КЗ; значення періодичної складової струму КЗ у довільний момент часу t , віднесені до початкового значення при $t = 0$ цієї складової

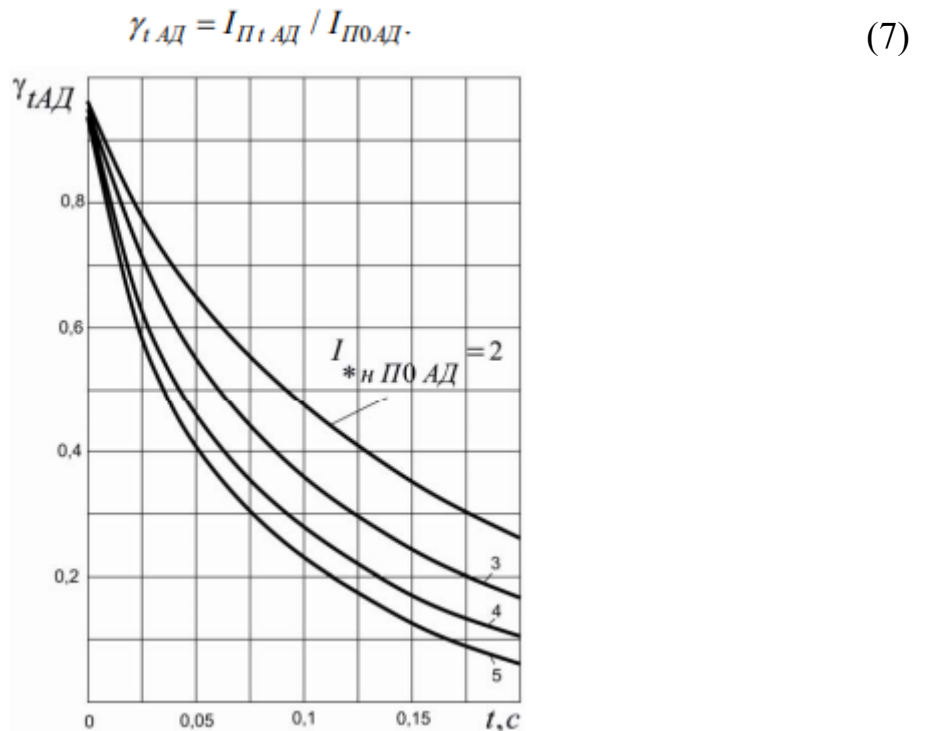


Рис. 2. Зміна у часі та від електричної віддаленості точки КЗ періодичної складової струму КЗ, створюваної асинхронними двигунами

Електрична віддаленість місця КЗ від асинхронного двигуна оцінюється відношенням діючого значення перехідної складової струму двигуна у початковий момент часу виникнення КЗ до його номінального струму:

$$I_{*н ПО АД} = I_{ПО АД} / I_{н АД} \quad (8)$$

Послідовність дій в обчисленні діючого значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу t . Натуральне значення періодичної складової струму КЗ для моменту часу t

$$I_{ПтAD} = \gamma_{tAD} I_{ПО АД} \quad (9)$$

або (при розрахунку у відносних одиницях виміру за базисними умовами)

$$I_{ПтAD} = \gamma_{tAD} I_{*б ПО АД} I_{б} \quad (10)$$

Синхронні двигуни. Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ з урахуванням зовнішнього опору також обчислюють за (4), де замість $x'_{*н АД}$ підставляють $x'_{*н СД}$. При цьому знаходять е.р.с. $E_{*н 0}$, вважаючи, що до КЗ двигун працював у номінальному режимі з перезбудженням. За відсутності первинних даних наближено беруть $E_{*н 0} = 1,1$.

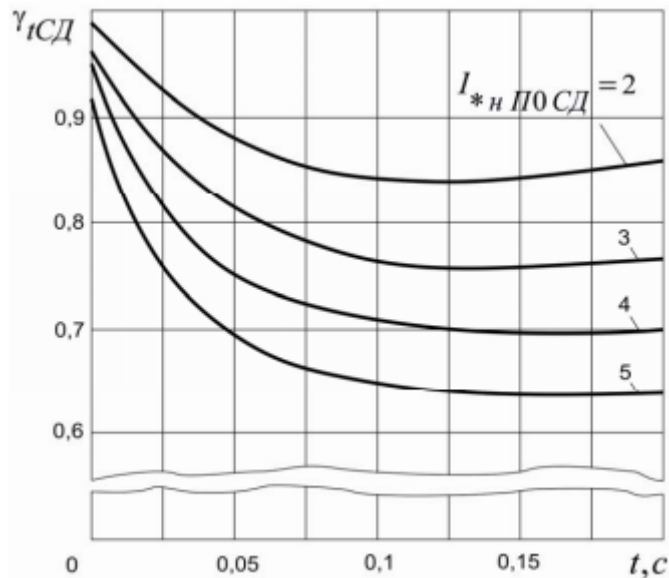


Рис. 3. Зміна у часі та від електричної віддаленості точки КЗ періодичної складової струму КЗ, створюваної синхронними двигунами

Діюче значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу в радіальній схемі ввімкнення до місця КЗ визначають за типовими кривими синхронних двигунів (рис. 3). Криві характеризують зміну періодичної складової струму у часі до 0,2 с для різної електричної віддаленості точки КЗ від двигуна. На графіках значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу віднесені до значення цієї складової при $t = 0$:

$$\gamma_{тсд} = I_{птсд} / I_{посд} \quad (11)$$

Електрична віддаленість місця КЗ оцінюється відношенням початкового значення періодичної складової струму двигуна при $t = 0$ до його номінального струму

$$I_{*н\ посд} = I_{посд} / I_{нсд} \quad (12)$$

Послідовність дій в обчисленні діючого значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу аналогічна викладеній для генератора та асинхронного двигуна. Натуральне значення цієї складової струму в довільний момент часу t

$$I_{птсд} = \gamma_{тсд} I_{посд} = \gamma_{тсд} I_{*б\ посд} I_b \quad (13)$$

Уточнені методи передбачають розрахунки періодичної складової струму КЗ від асинхронних або синхронних двигунів для довільного моменту часу на основі розв'язку відповідних систем диференціальних рівнянь перехідних процесів цих машин з використанням комп'ютерної техніки.

Аперіодичну складову струму КЗ, створювану синхронним чи асинхронним двигуном, для довільного моменту часу розраховують за формулою

$$i_{атд} = \sqrt{2} I_{п0д} \exp(-t / T_{ад}), \quad (14)$$

де $T_{ад}$ – стала часу затухання аперіодичної складової струму КЗ двигуна, наведена в табл. 1 (асинхронні двигуни), або визначається за типовими кривими рис. 4 (синхронні двигуни).

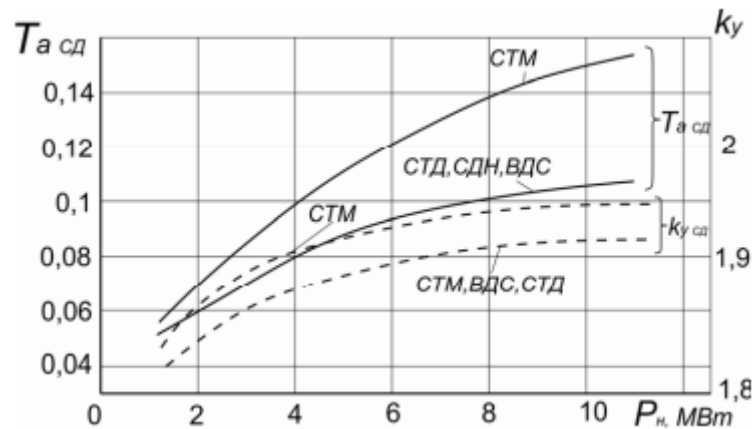


Рис. 4. Криві для визначення значень ударного коефіцієнта та сталої часу затухання аперіодичної складової струму КЗ, створюваної синхронними двигунами залежно від їх потужності та типу

У разі врахування зовнішнього опору сталу часу $T_{ад}$ обчислюють за формулами:

- для асинхронних двигунів

$$T_{ад роз} = \frac{x_{*н АД}'' + x_{*н зш}}{\omega \left[x_{*н АД}'' / (\omega T_{ад}) + r_{*н зш} \right]}; \quad (15)$$

- для синхронних двигунів

$$T_{ад роз} = \frac{x_{*н СД}'' + x_{*н зш}}{\omega \left[x_{*н СД}'' / (\omega T_{ад}) + r_{*н зш} \right]}. \quad (16)$$

Таблиця 1

Значення сталої часу та ударного коефіцієнта асинхронних двигунів при короткому замиканні на їх затискачах

Параметр	Двигун						
	А	АО	ДАЗО	АТД	АТМ	ВДД, ДВДА	ДАМСО
$T'_{Д роз}, c$	0,04	0,04	0,09	$0,04/S_n$	0,075	0,06	0,044
$T_{ад}, c$	0,04	0,03	0,02	0,058	0,043	0,05	0,035
$\kappa_{у Д}$	1,56	1,49	1,5	1,6	1,67	1,66	1,55

Ударний струм КЗ від двигуна

$$i_{у Д} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{у Д} I_{Под}^{(3)}. \quad (17)$$

Тут $\kappa_{у Д}$ – ударний коефіцієнт, обчислюваний з урахуванням зовнішнього опору:

- для асинхронного двигуна

$$\kappa_{yAD} = \exp(-0,01 / T'_{d\text{роз}}) + \exp(-0,01 / T_{aAD\text{роз}}); \quad (18)$$

- для синхронного двигуна

$$\kappa_{yCD} = 1 + \exp(-0,01 / T_{aCD\text{роз}}), \quad (19)$$

де $T'_{d\text{роз}}$ – розрахункова стала часу затухання періодичної складової струму асинхронного двигуна (табл. 1), обчислена аналогічно (15) з урахуванням зовнішнього опору мережі.

Коли зовнішній опір не враховують $Z_{*н\text{зи}} < (0,1...0,2)x''_{*нд}$, то значення ударного коефіцієнта визначають за табл.1 або типовими кривими рис. 4.

Повний струм у місці КЗ в радіальній схемі вмикання N двигунів знаходять підсумовуванням за періодичними та аперіодичними складовими струму від всіх джерел живлення місця КЗ:

$$\begin{aligned} I_{\Pi t} &= I_{\Pi tGS} + \sum_{i=1}^N I_{\Pi tДi}; \\ i_{at} &= \sqrt{2}I_{\Pi 0GS} \exp(-t / T_{aGS}) + \\ &+ \sqrt{2} \sum_{i=1}^N I_{\Pi 0Дi} \exp(-t / T_{aДi}). \end{aligned} \quad (20)$$

Ударний струм у точці КЗ визначається за виразом

$$i_{yД} = \sqrt{2} \cdot \left(\kappa_{yGS} I_{\Pi 0GS}^{(3)} + \sum_{i=1}^N \kappa_{yДi} I_{\Pi 0Дi}^{(3)} \right). \quad (21)$$

При розрахунку підживлення за $t < 0,2$ с асинхронні m та синхронні n двигуни можна заміняти еквівалентним двигуном й визначати початкове сумарне значення періодичних складових струму групи електродвигунів

$$I_{\Pi 0Д\Sigma} = \sum_{i=1}^m I_{\Pi 0ADi} + \sum_{j=1}^n I_{\Pi 0CDj}. \quad (22)$$

Для еквівалентного двигуна також розраховують:

– сумарний номінальний струм

$$I_{нДек} = \sum_{i=1}^m I_{нADi} + 1,2 \sum_{j=1}^n I_{нCDj}; \quad (23)$$

– кратність пускового струму

$$I_{*н\text{пуск ек}} = I_{\Pi 0Д\Sigma} / I_{нДек}; \quad (24)$$

– надперехідний опір

$$x''_{*нек} = 1 / I_{*н\text{пуск ек}}; \quad (25)$$

– сталу часу затухання періодичної складової струму КЗ

$$T_{\Pi ек} = \sum_{i=1}^m T_{\Pi AD\text{роз}i} I_{\Pi 0ADi} / \sum_{i=1}^m I_{\Pi 0ADi}; \quad (26)$$

– сталу часу затухання аперіодичної складової струму КЗ

$$T_{a\text{ ек}} = \left(\sum_{i=1}^m T_{a\text{ АД роз } i} I_{\text{П0 АД } i} + \sum_{j=1}^n T_{a\text{ СД роз } j} I_{\text{П0 СД } j} \right) / I_{\text{П0 Д } \Sigma}. \quad (27)$$

Тут $I_{n\text{ АД } i}$, $I_{n\text{ СД } j}$ – номінальні струми груп $\{1;m\}$ асинхронних та $\{1;n\}$ синхронних двигунів; $T_{\text{П АД } i}$ – розрахункові сталі часу затухання періодичної складової струму у групі асинхронних двигунів; $T_{a\text{ АД } i}$, $T_{a\text{ СД } j}$ – постійні часу затухання аперіодичної складової струму у групах асинхронних та синхронних двигунів.

При КЗ за узагальненим зовнішнім опором початкове значення періодичної складової струму КЗ від еквівалентного двигуна

$$I_{\text{П0 Д ек}} \approx I_{*n\text{ пуск Д ек}} I_{n\text{ Д ек}} / \left(1 + \frac{Z_{*n\text{ зш}}}{X_{*n\text{ ек}}} \right). \quad (28)$$

Складові струму КЗ від еквівалентного двигуна розраховують за формулами:

- періодична

$$I_{\text{П } t\text{ ек}} = I_{\text{П0 Д ек}} \exp(-t / T_{\text{П } \Sigma}), \quad (29)$$

де

$$T_{\text{П } \Sigma} = T_{\text{П ек}} \left(1 + \frac{Z_{*n\text{ зш}}}{X_{*n\text{ ек}}} \right);$$

- аперіодична

$$i_{a\text{ т } \Sigma} = \sqrt{2} I_{\text{П0 Д ек}} \exp(-t / T_{a\text{ } \Sigma}), \quad (30)$$

де

$$T_{a\text{ } \Sigma} = \frac{X_{*n\text{ ек}} + X_{*n\text{ зш}}}{\omega \left[X_{*n\text{ ек}} / (\omega T_{a\text{ ек}}) + r_{*n\text{ зш}} \right]}.$$

Ударний струм КЗ, створюваний еквівалентним електродвигуном, визначається виразом

$$i_{y\text{ } \Sigma} = \sqrt{2} \kappa_{y\text{ } \Sigma} I_{\text{П0 Д ек}}^{(3)}, \quad (31)$$

де

$$\kappa_{y\text{ } \Sigma} = \exp(-0,01 / T_{\text{П } \Sigma}) + \exp(-0,01 / T_{a\text{ } \Sigma}).$$

Якщо точка КЗ у схемі знаходиться за узагальненим зовнішнім опором для групи двигунів та електричної системи, то при $t > 0,2\text{ с}$ струми КЗ розраховують за рис. 1,б,в та розглянутими з ним виразами обчислення струмів КЗ.

1.2. Особливості підживлення місця короткого замикання від двигунів теплових електростанцій

При оцінці аварійних режимів, що виникають внаслідок КЗ, в електроустановках власних потреб теплових електростанцій (ТЕС) необхідно враховувати струми, генеровані в місці КЗ двигунами. У визначенні цих струмів на відгалуженні від секції розподільного улаштування рекомендується обирати груповий облік двигунів. Останні заміняють еквівалентним двигуном із сумарною потужністю P_n та середніми значеннями розрахункових параметрів:

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{ек}$	0,87
К.К.Д $\eta_{ек}$	0,94
Кратність пускового струму $I_{*n \text{ пуск ек}}$	5,6
Стала часу затухання періодичної складової струму $T_{П ек, c}$	0,07
Стала часу затухання аперіодичної складової струму $T_{а ек, c}$	0,04
Ударний коефіцієнт κ_y	1,85

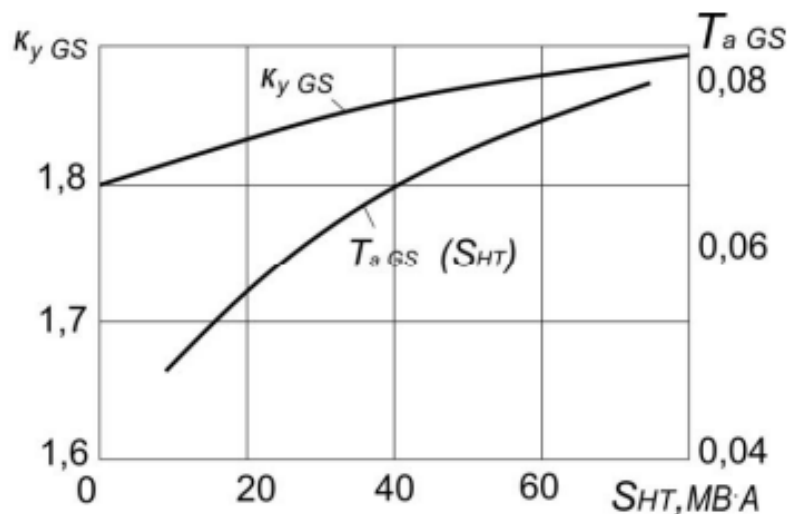


Рис. 5. Криві для визначення сталої часу затухання аперіодичної складової струму КЗ та ударного коефіцієнта залежно від потужності трансформатора секції власних потреб ТЕС

Розрахункову схему стану при КЗ слід вибирати з урахуванням відповідної схеми робочого електропостачання. При врахуванні резерву за розрахункові умови КЗ доцільно брати такі, за яких секція розподільного улаштування власних потреб живиться за контуром з меншим значенням електричного опору і в підживленні місця КЗ беруть участь всі двигуни секції. Для врахування прихованого резервування вважають, що один з робочих

трансформаторів живлення власних потреб вимкнений і місце КЗ підживлюють двигуни двох секцій, сполучених міжсобою резервно.

Обчислення струмів КЗ в електроустановках власних потреб ТЕС з метою вибору або перевірки параметрів їх провідників та апаратів передбачає визначення описаного далі. Передусім на основі отриманої схеми заміщення знаходять періодичну складову струму КЗ від джерел електричної системи GS. Сталу часу затухання аперіодичної складової струму від електричної системи T_{aGS} можна визначати за графічною залежністю (рис. 5), побудованою з урахуванням номінальної потужності трансформатора $S_{н\tau}$ (при використанні трансформатора з розщепленими обмотками розуміють номінальну потужність обмотки, до якої приєднана секція розподільного улаштування). Якщо трансформатор сполучений з секцією через протяжний струмовід, то сталу часу T_{aGS} розраховують за опором струмоводу.

Далі обчислюють:

- початкове значення періодичної складової струму КЗ, створюване двигунами секції (при прихованому резервуванні двох секцій)

$$I_{П0Дек} = I_{*нпускек} P_{н\Sigma} / (\sqrt{3} \eta_{ек} U_n \cos \varphi_n), \quad (32)$$

де U_n – номінальна напруга двигунів секції;

- сумарне початкове значення періодичної складової струму КЗ

$$\tilde{I}_{П0\Sigma} = I_{П0GS} + I_{П0Дек}; \quad (33)$$

- сумарне значення періодичної складової струму КЗ у момент часу τ

$$\begin{aligned} I_{П\tau\Sigma} &= I_{П\tau GS} + I_{П0Дек} \exp(-\tau / T_{Пек}) = \\ &= I_{П\tau GS} + \gamma_{\tau ек} I_{П0Дек}, \end{aligned} \quad (34)$$

де $\gamma_{\tau ек}$ – коефіцієнт затухання періодичної складової струму КЗ (рис. 6);

- сумарне значення аперіодичної складової струму КЗ у момент часу τ

$$\begin{aligned} i_{a\tau\Sigma} &= \sqrt{2} I_{П0GS} \cdot \exp(-\tau / T_{aGS}) + \\ &+ \sqrt{2} I_{П0Дек} \cdot \exp(-\tau / T_{aек}) = \\ &= \sqrt{2} I_{П0GS} \cdot \exp(-\tau / T_{aGS}) + \\ &+ \sqrt{2} \beta_{\tau ек} I_{П0Дек}, \end{aligned} \quad (35)$$

де $\beta_{\tau ек}$ – коефіцієнт затухання аперіодичної складової струму КЗ (рис. 6); $i_{y\Sigma}$ – сумарний ударний струм КЗ

$$i_{y\Sigma} = \sqrt{2} \cdot (\kappa_{yGS} I_{П0GS} + \kappa_{yек} I_{П0Дек}). \quad (36)$$

Значення κ_{yGS} знаходять за рис. 5, якщо не зважати на опір струмопроводу в колі трансформатора власних потреб.

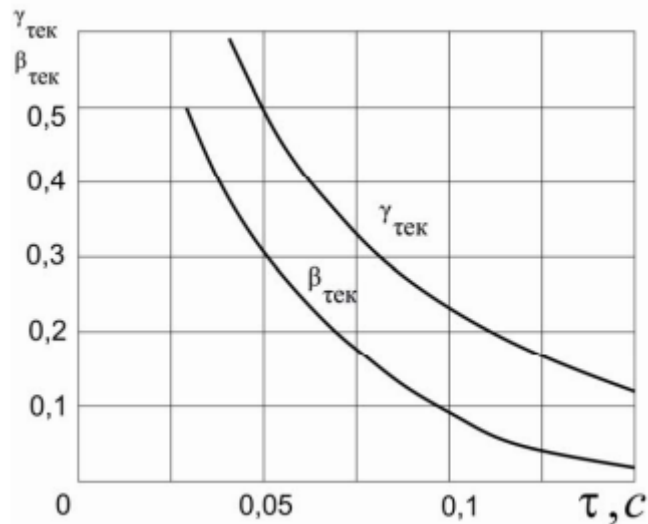


Рис. 6. Криві для визначення залежно від часу коефіцієнтів затухання аперіодичної та періодичної складових струму КЗ, створюваних еквівалентним двигуном власних потреб ТЕС

1.3. Урахування комплексного навантаження у підживленні місця короткого замикання

При розрахунках струмів КЗ ураховують вплив, складових комплексного навантаження, коли частка їх струму складає не менше 5 % у місці КЗ. Струм КЗ від комплексного навантаження визначають загалом як векторну суму струмів його складових. Спрощений розрахунок допускає еквівалентування комплексного навантаження з поданням у вигляді еквівалентного джерела е.р.с. з внутрішнім опором.

Складові струму КЗ від конденсаторних батарей визначають таким чином. Найбільшу амплітуду струму КЗ від конденсаторних батарей поперечної компенсації знаходять за виразом

$$I_{max KB} = U_0 / [\sqrt{3} \omega_0 (L_{KB} + L_{зш})], \quad (37)$$

де U_0 – середня номінальна напруга на конденсаторній батареї до КЗ, кВ; L_{KB} та $L_{зш}$ – індуктивності відповідно конденсаторної батареї та контуру між батареєю і точкою КЗ, Гн; ω_0 – кутова частота власних коливань контуру з конденсаторною батареєю, рад/с, $\omega_0 = 1/\sqrt{(L_{KB} + L_{зш})C}$; C – ємність конденсаторної батареї, Ф.

Вільна складова струму КЗ від конденсаторної батареї

$$i_{KB} = I_{max KB} \exp(-bt) \sin(\omega_0 t + \pi), \quad (38)$$

де $b = (R_{(\omega_0)KB} + R_{зш}) / [2(L_{KB} + L_{зш})]$ – коефіцієнт затухання, Ом/Гн; $R_{(\omega_0)KB}$ – активний опір конденсаторної батареї за частоти ω_0 , Ом; $R_{зш}$ – активний опір зовнішнього щодо конденсаторної батареї контуру з КЗ, Ом.

При наявності в електричних мережах статичних керованих конденсаторних батарей їх вводять (залежно від схеми) до розрахункової схеми

заміщення відповідним сполученням опорів ємнісного та індуктивного характеру.

2. Розрахунок струмів короткого замикання в електроустановках напругою до 1 кВ

Місце КЗ в електроустановках напругою до 1 кВ більшості систем електропостачання промислових підприємств характеризується як значно електрично віддалене від джерел ЕЕС. Установлена потужність цих електроустановок звичайно помітно перевищує споживану. Якщо остання більш як у 25 разів виходить за межі потужності їх знижувальних трансформаторів, то на стороні низької напруги знижувальних трансформаторів амплітуду періодичної складової струму КЗ від енергосистеми можна вважати незмінною.

Ці ознаки обґрунтовують припущення, що електроустановки напругою до 1 кВ промислових підприємств ввімкнені до джерела необмеженої потужності. Останнє еквівалентують значенням е.р.с., рівним значенню напруги у місці вмикання, і опором зв'язку джерел ЕЕС з точкою вмикання. Значення опору зв'язку зводиться до нижчої напруги за формулою, мОм:

$$x_{GS} = U_{cp\ HH}^2 / (\sqrt{3} I_{II\ BH} U_{cp\ BH}) = U_{cp\ HH}^2 \cdot 10^{-3} / S_k \quad (39)$$

або

$$x_{GS} = U_{cp\ HH}^2 / (\sqrt{3} I_{вим\ н} U_{cp\ HH}), \quad (40)$$

де $U_{cp\ HH}$ – середня номінальна напруга мережі, ввімкненої до обмотки нижчої напруги трансформатора, В; $U_{cp\ BH}$ – середня номінальна напруга мережі, до якої ввімкнена обмотка вищої напруги трансформатора, В; $I_{II\ BH}$ – діюче значення періодичної складової струму при трифазному КЗ біля виводів обмотки вищої напруги трансформатора, кА; S_k – потужність КЗ біля виводів обмотки вищої напруги трансформатора, МВА; $I_{вим\ н}$ – номінальний струм вимкнення для вимикача, встановленого у приєднанні знижувального трансформатора, кА.

У випадках, коли знижувальний трансформатор увімкнений до мережі енергосистеми через реактор, повітряну чи кабельну лінію (завдовжки понад кілометр), необхідно враховувати індуктивну та активну складові їх опору.

У розрахунках струмів КЗ в електроустановках з автономними джерелами електроенергії слід знаходити значення параметрів усіх елементів автономної електричної системи разом з автономними джерелами (синхронними генераторами), розподільною мережею та споживачами, а також урахувати:

– зміну активної складової опору провідників короткозамкненого кола внаслідок їх нагрівання при КЗ;

– вплив комплексного навантаження (двигуни, перетворювачі, термічні установки, лампи освітлення) на значення струму КЗ, якщо його номінальний

струм перевищує 10 % від початкового значення періодичної складової струму КЗ (без навантаження);

– вплив конденсаторних батарей при розрахунку струму КЗ для вибору запобіжників.

При цьому допускається:

- максимально спрощувати і еквівалентувати всю зовнішню мережу стосовно місця КЗ та індивідуально враховувати лише автономні джерела електроенергії і двигуни, що безпосередньо прилягають до місця КЗ;
- не враховувати вплив асинхронних двигунів, якщо їх сумарний номінальний струм не перевищує 10 % від початкового значення періодичної складової струму в місці КЗ (без уваги на двигуни).

Струми КЗ в електроустановках напругою до 1 кВ обчислюють в іменованих одиницях виміру. Під час складання еквівалентних схем заміщення параметри елементів початкової розрахункової схеми зводять до ступеня напруги, де міститься точка КЗ, і виражають значення опорів усіх еквівалентів у схемі заміщення в міліомах.

Вірогідність результатів розрахунку струмів КЗ залежить від того, наскільки правильно оцінені та повно враховані елементи і їх опори у колі КЗ. В електроустановках напругою до 1 кВ на значення струмів КЗ суттєво впливають активні складові опорів кола КЗ. Їхні значення сумірні, а іноді й перевищують значення індуктивних складових опорів. Тому при визначенні результуючого опору кола КЗ ураховують опори ділянок збірних шин, магістральних та розподільних шинопроводів, опори струмових котушок автоматичних вимикачів та реле, обмоток трансформаторів струму, контактів комутаційних апаратів, перехідних контактів у мережі та розподільних улаштуваннях, опір дуги у місці КЗ.

Параметри елементів короткозамкненого кола обчислюють таким чином.

Силові трансформатори. Повне значення, активна та індуктивна складові опору знижувального трансформатора, зведені до ступеня НН(мОм), розраховують за формулами:

$$Z_T = u_k \tilde{U}_{нНН}^2 \cdot 10^4 / S_T^2; \quad (41)$$

$$r_T = p_k U_{нНН}^2 \cdot 10^6 / S_T^2; \quad (42)$$

$$x_T = \sqrt{u_k^2 - (100 p_k / S_T)^2} \cdot U_{нНН}^2 \cdot 10^4 / S_T, \quad (43)$$

де S_T – номінальна потужність трансформатора, кВА; $U_{нНН}$ – номінальна лінійна напруга обмотки НН трансформатора, кВ; p_k – втрати активної потужності КЗ у трансформаторі, кВт; u_k – напруга короткого замикання трансформатора, %.

Активні та індуктивні складові опори нульової послідовності знижувальних трансформаторів, обмотки яких з'єднані за схемою Δ / Y_0 при КЗ

у мережі нижчої напруги, беруть рівними відповідно до активних та індуктивних складових опору прямої послідовності. За інших схем з'єднання обмоток трансформаторів активні та індуктивні складові опори нульової послідовності необхідно брати відповідно до вимог виробників.

Шини та струмоводи з шин. Опори визначають значеннями активних та індуктивних складових, віднесених до одиниці довжини. У табл. 2 ці значення подані для плоских шин, а в табл. 3 – для комплектних струмоводів.

Таблиця 2

Активна та індуктивна складові електричного опору лоских шин

Переріз шин, мм ²	Питомі складові опору, мОм/м					
	активна (при 65 °С) для матеріалу		індуктивна при середній геометричній відстані між фазами, мм			
	Мідь	Алюміній	100	150	200	300
25×3	0,268	0,457	0,179	0,200	0,295	0,244
30×3	0,223	0,394	0,163	0,189	0,206	0,235
30×4	0,167	0,296	0,163	0,189	0,206	0,235
40×4	0,125	0,222	0,145	0,170	0,189	0,214
40×5	0,100	0,177	0,145	0,170	0,189	0,214
50×5	0,080	0,142	0,137	0,156	0,180	0,200
50×6	0,067	0,118	0,137	0,156	0,180	0,200
60×6	0,056	0,099	0,119	0,145	0,163	0,189
60×8	0,042	0,074	0,119	0,145	0,163	0,189
80×8	0,031	0,055	0,102	0,126	0,145	0,170
80×10	0,025	0,044	0,102	0,126	0,145	0,170
100×10	0,020	0,035	0,090	0,113	0,133	0,157
2(60×8)	0,0209	0,037	0,120	0,145	0,163	0,189
2(80×8)	0,0157	0,0277	–	0,126	0,145	0,170
2(80×10)	0,0125	0,0222	–	0,126	0,145	0,170
2(100×10)	0,010	0,0178	–	–	0,133	0,157

Таблиця 3

Параметри комплектних струмоводів з шин

Тип	Номинальний струм, А	Питомі складові опору, мОм/м	
		активна	індуктивна
ШМА73	1600	0,031	0,017
ШМА68Н	2500	0,027	0,023
ШМА68Н	4000	0,013	0,020
ШЗМ16	1600	0,017	0,014
ШРА73	250	0,200	0,100
ШРА73	400	0,130	0,100
ШРА73	630	0,085	0,075

Повітряні та кабельні лінії. Значення активного та індуктивного опорів ЛЕП також обчислюють з використанням табличних даних, які достатньо повно наведені у довідковій літературі. Індуктивний опір наближено для ПЛ дорівнює 0,4, а для КЛ – 0,08 мОм/м.

Реактори. Активна складова опору струмообмежувального реактора (мОм)

$$r_p = \Delta p_{np} \cdot 10^3 / I_{np}^2, \quad (44)$$

де Δp_{np} – втрата активної потужності у фазі реактора за номінального струму, Вт; I_{np} – номінальний струм реактора, А.

Індуктивну складову опору реактора беруть за інформацією його виготовлювача або розраховують за формулою (мОм)

$$x_p = \omega(L - M) \cdot 10^3, \quad (45)$$

де ω – кутова частота напруги мережі, рад/с; L – індуктивність котушки трифазного реактора, Гн; M – взаємна індуктивність віток реактора, Гн.

Трансформатори струму, комутаційні апарати та реле. Значення їх опорів – у довідковій літературі залежно від номінального струму. Для первинних обмоток усіх багатовиткових вимірювальних трансформаторів струму варто використовувати їхні паспортні дані або середні значення, що у табл. 4. Для одновиткових трансформаторів (на струми понад 500 А) при розрахунку струмів КЗ опором можна нехтувати.

Коефіцієнт трансформації	Клас точності			
	перший		другий	
	x	r	x	r
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	2,7	1,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,088
400/5	0,17	0,17	0,04	0,05
500/5	0,07	0,07	0,02	0,02

Для котушок розчіплювачів автоматичних вимикачів припускається (з відсутністю даних виготівників про індуктивні та активні складові опорів) використовувати значення опорів котушок розчіплювачів та перехідних опорів рухомих контактів, наведених у табл. 5. Там подані узагальнені сумарні значення опорів котушок розчіплювачів та контактів автоматичних вимикачів (А3700, “Електрон” та ВА) залежно від номінального струму.

Таблиця 5

Значення електричних опорів котушок розчіплювачів та контактів автоматичних вимикачів

Номінальний струм, А	Складові опору, мОм	
	активна	індуктивна
50	7	4,5
70	3,5	2,0
100	2,15	1,2
140	1,3	0,7
200	1,1	0,5
400	0,65	0,17
600	0,41	0,13
1000	0,25	0,1
1600	0,14	0,08
2500	0,13	0,07
4000	0,1	0,05

Контактні переходи в електричній мережі. Значення опорів контактів у з'єднанні кабелів, різних контактів комутаційних апаратів та струмоводів наведені відповідно у табл. 6...8 (опори контактних з'єднань для найхарактерніших місць з'єднання: струмовід з шин – автоматичний вимикач, кабель – автоматичний вимикач).

Таблиця 6

Значення електричних опорів контактних з'єднань алюмінієвих кабелів

Переріз, мм ²	16	25	35	70	95	120	150	240
Опір, мОм	0,085	0,064	0,056	0,043	0,029	0,027	0,021	0,12

Таблиця 7

Значення електричних опорів контактних з'єднань струмоводів з шин

Тип	ШРА73	ШРА73	ШРА73	ШРА73	ШМА68Н	ШМА68Н
Номінальний струм, А	250	400	630	1600	2500	4000
Опір, мОм	0,009	0,006	0,004	0,003	0,002	0,001

Дуга у місці КЗ. Для обліку дуги рекомендується використовувати наближені значення активного опору дуги (табл. 9). При розрахунку найбільших значень струму КЗ його не враховують.

Таблиця 8

**Наближені значення електричних опорів різних контактів
комутаційних апаратів напругою до 1 кВ**

Номінальний струм апарата, А	Значення опору, мОм		
	автоматичного вимикача	рубильника	роз'єднувача
50	1,3	–	–
70	1,0	–	–
100	0,75	0,5	–
150	0,65	–	–
200	0,6	0,4	–
400	0,4	0,2	0,2
600	0,25	0,15	0,15
1000	0,12	0,08	0,08
3000	–	–	0,02

Таблиця 9

Наближені значення активного електричного опору дуги

Розрахункові умови КЗ	Значення опору (мОм) при КЗ після трансформатора потужністю, кВА					
	250	400	630	1000	1600	2500
1. КЗ близько виводів вторинної напруги трансформатора:						
– у кабельній воронці;	15	10	7	5	4	3
– у струмоводі ШМА;	–	–	–	6	4	3
– у струмоводі ШРА	–	18	15	10	7	5
2. КЗ на кінці струмоводу ШРА (відстань 100 – 150 м)	–	30-45	25-45	20-40	15-30	20-40
3. КЗ на кінці струмоводу ШМА (відстань 100 – 150 м)	–	–	–	6-8	5-7	4-6
4. КЗ у КЛ перерізом 25 – 240 мм ² (відстань 100 м)	–	45-16	45-15	45-12	45-11	40-10

Активні складові електричних опорів елементів апаратури та пристроїв, контактів, дуги у місці КЗ можна також визначати у складі результуючого перехідного електричного опору:

$$r_{\Pi} = r_k + r_{AB} + r_{TC} + r_{\partial} \quad (46)$$

Тут r – перехідний електричний опір контактів у з'єднанні елементів мережі; r_{AB} – активний електричний опір автоматичного вимикача, що складається з активного опору струмових котушок розчіплювача та перехідного опору

контактів; r_{TC} – активний електричний опір первинної обмотки трансформатора струму; r_d – активний електричний опір дуги у місці КЗ.

Результуючий опір залежить від потужності знижувального трансформатора комплектної трансформаторної підстанції (КТП), електричної віддаленості місця КЗ за ступенями розподілу електричної енергії (ступінь КЗ) та мінімальної відстані між фазами у місці КЗ. Нижче наведені значення r_{II} при КЗ на стороні нижчої напруги КТП:

- потужність трансформаторів, кВ · А 400 630 1000 1800 2500
- перехідний опір, мОм 9,21 8,02 8,41 5,51 5,12

Зважаючи на зазначені чинники [5], отримана адекватна оцінка результуючого активного перехідного електричного опору (46) для місць КЗ у мережі, що за КТП:

$$\bar{r}_n = (2,5\sqrt{S_T}k_{CT}^3 + 320 \cdot a) / S_T, \quad (47)$$

де k_{CT} – коефіцієнт ступеня КЗ, що визначається за типовою розрахунковою схемою табл. 10; a – відстань між фазами провідників мережі у місці КЗ, значення якої (мм) для різних елементів мережі подані нижче:

КТП з трансформатором потужністю, кВ · А

400.....	60
630.....	60
1000.....	70
1600.....	120
2500.....	180

Струмовід

ШМА.....	10
ШРА.....	45

Кабель перерізом, мм²

2,5...10.....	1,6
16...35.....	2,4
50...95.....	2,8
120...150.....	4
240.....	4,8

Значення коефіцієнта ступеня КЗ

Розрахункова схема мережі за місцем КЗ	Змістовна характеристика ступеня КЗ	Значення
	РУ на електростанціях та підстанціях K_1	Для точки K_1 за вище-наведеними даними
	Первинні цехові розподільні пункти: затискачі апаратів, живильні радіальні лінії від щитів підстанцій або головних магістралей K_2	2
	Вторинні цехові розподільні пункти; затискачі апаратів, що живляться від первинних розподільних пунктів K_3	3
	Апаратура електроприймачів, що живляться від вторинних розподільних пунктів K_4	4

Автономні джерела електроенергії та синхронні двигуни для моменту часу $t = 0$ враховують у вигляді джерела е.р.с. з надперехідним опором синхронної машини за поздовжньою віссю x''_d . При спрощених розрахунках беруть: $x''_{nd} = 0,15$; $x''_{n2} = x''_{nd}$; $r_{нсд} = 0,15 x''_{nd}$.

Асинхронні двигуни для $t = 0$ слід вводити до схеми заміщення у вигляді джерела е.р.с. з надперехідним індуктивним опором $x''_{ад}$. За уточнених розрахунків струму КЗ асинхронні двигуни вводять до схеми заміщення джерелом е.р.с. з надперехідними індуктивною та активною складовими опорів статора. Сумарний активний електричний опір, що характеризує асинхронний двигун у момент КЗ, мОм:

$$r_{ад} = r_1 + 0,96\bar{r}_2, \quad (48)$$

де r_1 – активний опір статора, мОм; r_2 – активний опір ротора, що зводиться до статора й визначається виразом, мОм:

$$\bar{r}_2 = 0,36 M_{*n \text{ пуск}} (P_n + \Delta P_{мх}) \cdot 10^6 / [I_{*n \text{ пуск}}^2 (1 - s_n) I_n^2] \quad (48)$$

де $M_{*n \text{ пуск}}$ – кратність пускового моменту двигуна щодо його номінального моменту; P_n та I_n – номінальні потужність (кВт) та струм (А) двигуна; $\Delta P_{мх}$ – механічні втрати потужності в двигуні (разом з додатковими втратами), кВт, причому $\Delta P_{мх} = 0,01 P_n$; $I_{*n \text{ пуск}}$ – кратність пускового струму двигуна (відносно його номінального струму); s_n – номінальне ковзання, відн.од.

Активний електричний опір статора, якщо не заданий виробником, розраховують за формулами:

- для двигунів з фазним ротором та простою білячою кліткою на роторі, мОм:

$$r_1 = 0,52 \bar{r}_2 M_{*n \text{ пуск}} (1 / s_{кр} + s_{кр} - 2M_{*n \text{ max}} / M_{*n \text{ пуск}}) / [s_{кр} (M_{*n \text{ max}} - M_{*n \text{ пуск}})], \quad (50)$$

де $s_{кр}$ – критичне ковзання двигуна, значення якого дорівнює

$$s_{кр} = M_{*n \text{ max}} s_n (1 - M_{*n \text{ пуск}}) + \frac{\sqrt{s_n M_{*n \text{ пуск}} (M_{*n \text{ max}} - 1) (M_{*n \text{ max}} - M_{*n \text{ пуск}})}}{M_{*n \text{ max}} - M_{*n \text{ ном}}}, \quad (51)$$

- для двигунів, в яких електричні параметри ротора змінюються залежно від ковзання (двигуни з глибоким пазом або двома обмотками на роторі)

$$r_1 = \kappa_M P_n (1 - \eta_n) \cdot 10^6 / (3I_n^2 \eta_n), \quad (52)$$

де κ_M – відношення втрат потужності в обмотці статора до сумарних втрат в двигуні під час роботи у номінальному режимі (зазвичай $\kappa_M = 0,35$); η_n – номінальний к.к.д. двигуна.

Надперехідний індуктивний опір асинхронного двигуна, мОм

$$x_{AD}^* = \sqrt{[U_{\phi n} \cdot 10^3 / (I_{*n \text{ пуск}} I_n)]^2 - r_{AD}^2}, \quad (53)$$

де $U_{\phi n}$ – номінальна фазна напруга двигуна, В

При спрощених розрахунках беруть: $x_{*n AD} = 0,18$; $r_{*n AD} = 0,36$.

Комплексне навантаження при розрахунку струмів несиметричних КЗ подається параметрами прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Значення модулів повних електричних опорів прямої $Z_{*n1 \text{ не}}$, зворотної $Z_{*n2 \text{ не}}$, нульової $Z_{*n0 \text{ не}}$ послідовностей, а також е.р.с. комплексного навантаження $E_{*n0 \text{ не}}$ (відн. од.) можуть бути визначені за кривими, наведеними на рис. 7 залежно від відносного складу споживачів вузла навантаження P_i / P , де $P = P_{\Sigma}$ – сумарна номінальна активна потужність навантаження, кВт; P_i – установлена активна потужність i -го споживача навантаження, кВт (РАД – асинхронні двигуни; P_{CD} – синхронні двигуни; $P_{перетв}$ – перетворювачі; $P_{ету}$ – електротермічні установки).

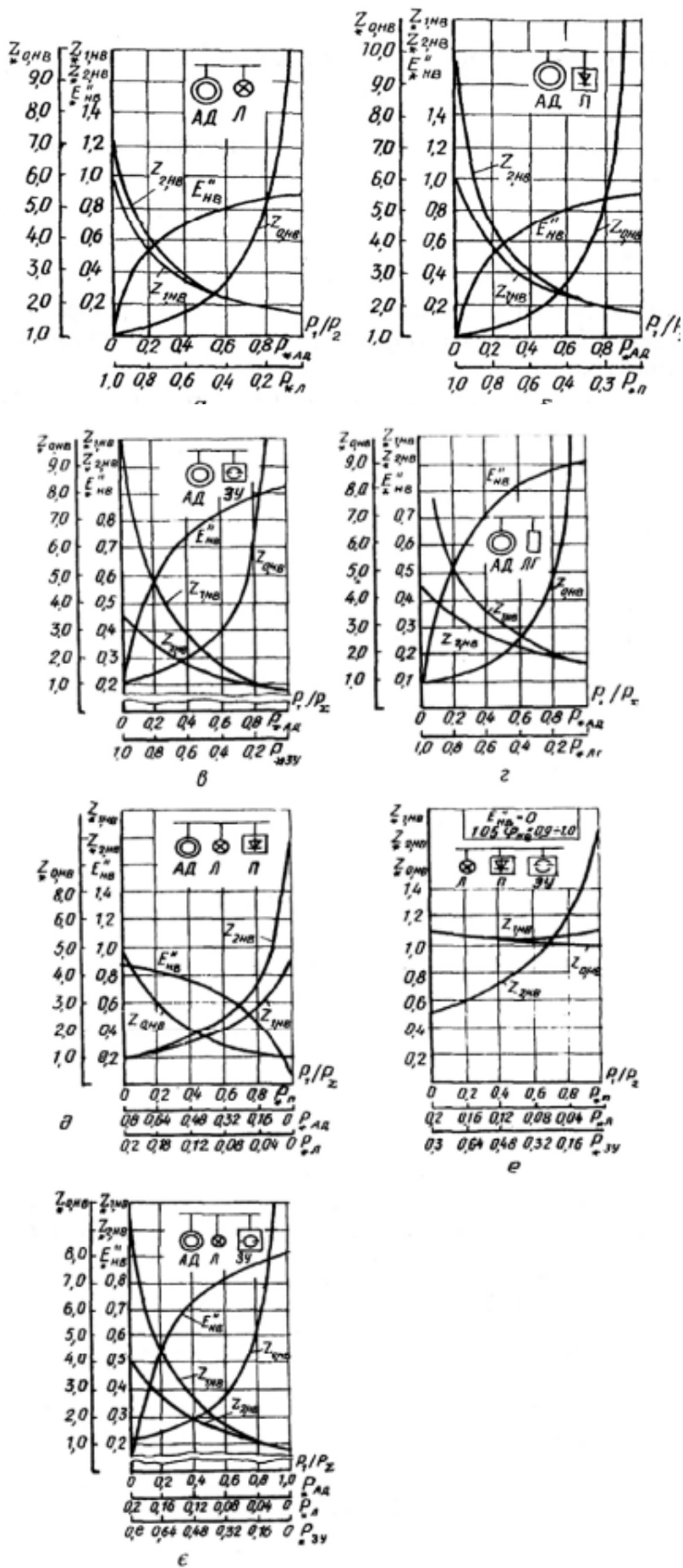


Рис. 7. Залежності параметрів комплексного навантаження від його складу

При спрощених розрахунках допускається еквівалентувати комплексне навантаження у місці КЗ значеннями модулів повних електричних опорів:

$$Z_{*n1n} = Z_{*n2n} = 0,4; \quad Z_{*n0n} = 0,3.$$

Конденсаторні батареї. Значення активної складової опору, індуктивності та ємності конденсаторних батарей беруть за даними заводів-виробників. Результируючі складові $x_{1\text{рез}}$ і $r_{1\text{рез}}$ опору прямої послідовності кола КЗ знаходять шляхом перетворення схеми заміщення за рекомендаціями з урахуванням активного перехідного опору. Струм КЗ визначають за знайденими значеннями активної та реактивної складових результируючого опору.

Якщо поблизу місця КЗ є синхронні та асинхронні двигуни або інші складові комплексних навантажень, то початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ з урахуванням підживлення слід визначати як суму струмів від енергосистеми (автономних джерел), двигунів чи інших складових комплексного навантаження.

Початкове діюче значення періодичної складової струму трифазного КЗ від енергосистеми розраховують за формулою, кА:

$$I_{П0GS} = U_{срн} / \left(\sqrt{3} \sqrt{r_{1\text{рез}GS}^2 + x_{1\text{рез}GS}^2} \right). \quad (54)$$

В електроустановках з автономними джерелами початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ визначають за формулою, кА:

$$I_{П0G} = E_{\phi 0G} / \left(\sqrt{r_{1\text{рез}G}^2 + x_{1\text{рез}G}^2} \right), \quad (55)$$

де $E_{\phi 0G}$ – еквівалентна надперехідна е.р.с. автономних джерел, В (її значення розраховують так, як і для синхронних двигунів).

Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ від синхронних двигунів визначають з виразу, кА:

$$I_{П0СД} = E_{\phi 0СД} / \left(\sqrt{r_{1\text{рез}СД}^2 + x_{1\text{рез}СД}^2} \right), \quad (56)$$

де $E_{\phi 0СД}$ – фазне значення надперехідної е.р.с. синхронного двигуна, В:

$$E_{\phi 0СД} = \sqrt{\left(U_{\phi 0} \pm I_0 x_d'' \sin \varphi_0 \right)^2 + \left(I_0 x_d'' \cos \varphi_0 \right)^2}, \quad (57)$$

де знак операції “+” – у стані перезбудження, а “-” – недозбудження; U_0 , I_0 , φ_0 – відповідно фазна напруга на затискачах двигуна, струм статора та кут зсуву фаз напруги і струму у момент часу, що передує КЗ (звичайно їх беруть тотожними номінальним значенням).

Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ від асинхронних двигунів розраховують за формулою, кА

$$I_{П0АД} = E_{\phi 0АД} / \left(\sqrt{r_{1\text{рез}АД}^2 + x_{1\text{рез}АД}^2} \right), \quad (58)$$

де $E_{\phi 0АД}$ – фазне значення надперехідної е.р.с. асинхронного двигуна, В,

$$E_{\phi 0АД} = \sqrt{\left(U_{\phi 0} \cos \varphi_0 - I_0 r_{АД} \right)^2 + \left(U_{\phi 0} \sin \varphi_0 - I_0 x_{АД}'' \right)^2}. \quad (59)$$

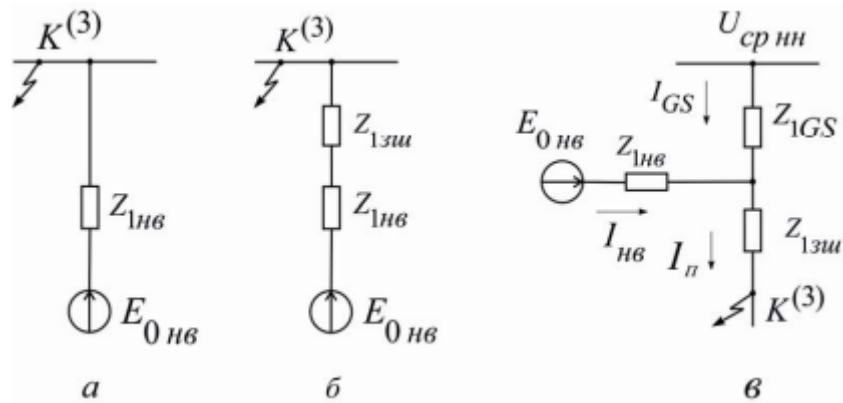


Рис. 8. Еквівалентні схеми заміщення комплексного навантаження: *а* – радіальна; *б* – радіальна з урахуванням зовнішнього опору; *в* – складна із загальним опором для всіх джерел

Вплив комплексного навантаження на сумарний струм КЗ оцінюється залежно від складових комплексного навантаження вузла (тимчасові джерела) та розташування відносно них точки КЗ (рис. 8). У радіальній схемі заміщення (рис. 8,а) допускається не враховувати вплив статичних споживачів (перетворювачі, електротермічні установки, електричне освітлення). При КЗ за спільним для складових джерел вузла навантаження опором (рис. 8,б) початкове значення періодичної складової струму трифазного КЗ визначається з урахуванням впливу двигунового та статичного навантаження, кА:

$$I_{\text{П}0 \text{ нв}} = E_{* \text{ н} 0 \text{ нв}} U_{\text{ср НН}} / (\sqrt{3} z_{\text{рез нв}}), \quad (60)$$

де

$$z_{\text{рез нв}} = \sqrt{\left(\frac{Z_{* \text{ н} 1 \text{ нв}} \cos \varphi_{\text{нв}} U_{\text{ср НН}}^2}{S_{\text{н нв}}} + r_{1 \text{ зш}} \right)^2 + \left(\frac{Z_{* \text{ н} 1 \text{ нв}} \sin \varphi_{\text{нв}} U_{\text{ср НН}}^2}{S_{\text{н нв}}} + x_{1 \text{ зш}} \right)^2}.$$

Тут $E_{* \text{ н} 0 \text{ нв}}$ та $Z_{* \text{ н} 1 \text{ нв}}$ – еквівалентна е.р.с. та опір прямої послідовності вузла навантаження; їхні значення (відн. од.) встановлюють за залежностями, наведеними на рис. 7 відповідно до складу споживачів; $S_{\text{н нв}}$ – сумарна номінальна потужність навантаження, кВА.

У разі розташування КЗ за спільним для перебігу струмів від навантаження та джерел енергосистеми опором (рис. 8,в) та близькими значеннями складових опорів x, r віток схеми заміщення початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ розраховують за формулою:

$$I_{\text{П}0 \text{ нв}} = \frac{U_{\text{ср НН}} Z_{1 \text{ нв}} + E_{* \text{ н} 1 \text{ нв}} U_{\text{ср НН}} Z_{\text{GS}}}{Z_{\text{GS}} Z_{1 \text{ нв}} + Z_{\text{GS}} Z_{1 \text{ зш}} + Z_{1 \text{ нв}} Z_{1 \text{ зш}}}. \quad (61)$$

Маючи у вузлі навантаження конденсаторну батарею, з (36) та (37) визначають найбільшу амплітуду високочастотної складової струму КЗ і вільну складову струму КЗ від конденсаторної батареї.

Найбільше початкове значення аперіодичної складової струму КЗ загалом вважають рівним амплітуді періодичної складової струму у початковий момент КЗ, тобто $i_{a0} = \sqrt{2}I_{\Pi 0}$.

У радіальних схемах аперіодичну складову струму для довільного моменту часу розраховують за формулою (14).

Якщо у точці КЗ радіальні незалежні одна від одної генеруючі вітки збігаються, то аперіодичну складову струму КЗ визначають як суму аперіодичних складових струмів окремих віток:

$$i_{a t \Sigma} = \sum_{j=1}^m i_{a 0 j} \cdot \exp(-t / T_{a j}), \quad (62)$$

де m – число незалежних віток схеми; $i_{a 0 j}$ – початкове значення аперіодичної складової струму КЗ у j -й вітці, кА.

Ударний струм трифазного КЗ в електроустановках з одним джерелом енергії (живлення від енергосистеми або автономного джерела) визначають за виразом

$$i_y = \sqrt{2} \kappa_y \dot{I}_{\Pi 0}, \quad (63)$$

де $\kappa_y = 1 + \exp(-t/T_a)$ – ударний коефіцієнт, який також може бути визначений за залежностями рис. 9; $\varphi_{\kappa} = \arctg(x_{\text{рез}} / r_{\text{рез}})$ – кут зсуву за фазою напруги або е.р.с. джерела та періодичної складової струму КЗ; t_y – момент часу появи ударного струму, с.

$$t_y = 0,01 \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{\kappa} \right) / \pi. \quad (64)$$

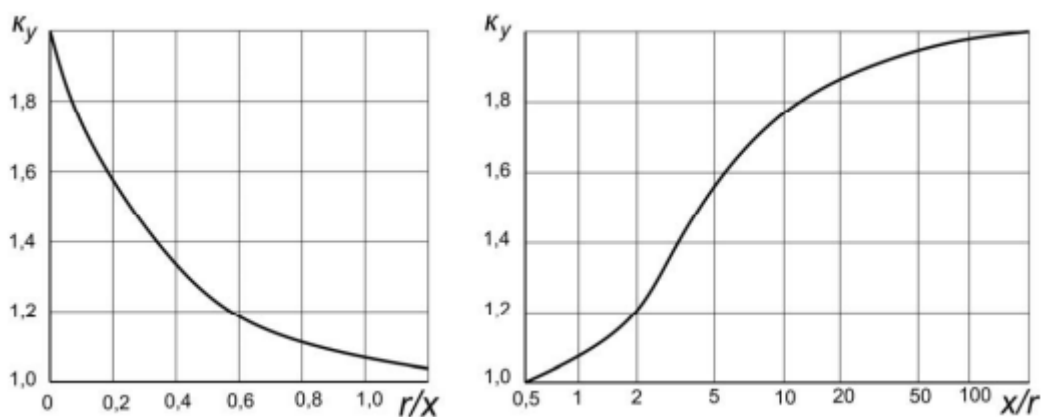


Рис. 9. Залежності для визначення ударного коефіцієнта у функції r / x (а) чи x / r (б)

Для наближеного розрахунку ударного струму КЗ на виводах автономних джерел чи синхронних (асинхронних) двигунів вважають, що ударний струм настає через 0,01 с після початку КЗ і амплітуда періодичної складової струму КЗ у момент $t = 0,01$ с дорівнює амплітуді цієї складової у початковий момент часу появи КЗ.

Ударний струм від асинхронного двигуна обчислюють, зважаючи на затухання амплітуди аперіодичної та періодичної складових струму КЗ, що можна обчислити за формулами (16) і (17). До обчислень визначають:

$$T_p = (x_{AD}'' + x_{1зм}) / (\omega \bar{r}_2);$$

$$T_a = (x_{AD}'' + x_{1зм}) / (\omega (r_1 + r_{1зм})),$$

де r_1 – активний опір статора; r_2 – активний опір ротора, зведений до статора й розраховується за виразом (49).

Якщо в точці КЗ збігаються радіальні незалежні одна від одної генеруючі вітки, то ударний струм КЗ визначають як суму ударних струмів окремих віток

$$i_{y\Sigma} = \sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^m k_{yi} I_{\text{по}i}. \quad (65)$$

Періодичну складову струму КЗ для довільного моменту часу від автономних джерел електроенергії радіальної схеми вмикання, а також від синхронних двигунів розраховують за допомогою відповідних типових кривих (рис. 10). Типові криві характеризують зміну відносних значень (до початкового значення складової) даної складової в часі за різних значень електричної віддаленості від точки КЗ $\gamma_{t\text{сд}} = I_{\text{п}t\text{сд}} / I_{\text{п}0\text{сд}}$. Електричну віддаленість від точки КЗ синхронного двигуна оцінюють відношенням діючого значення періодичної складової струму у початковий момент часу виникнення КЗ до її номінального струму

$$I_{*n\text{по}сд} = I_{\text{по}сд} / I_{n\text{сд}}.$$

Діюче значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу (або кількох однотипних синхронних двигунів, що в однакових умовах відносно точки КЗ) визначають за формулою

$$I_{\text{п}t\text{сд}} = \gamma_{t\text{сд}} I_{*n\text{по}сд} \cdot I_{n\text{сд}}. \quad (66)$$

При спрощеному методі визначення діючого значення періодичної складової струму КЗ для довільного моменту часу від асинхронних двигунів, у випадку радіальної схеми їх ввімкнення, використовують типові криві (рис. 11) $\gamma_{t\text{ад}} = I_{\text{п}t\text{ад}} / I_{\text{п}0\text{ад}}$. Вони побудовані для різної електричної віддаленості від точки КЗ, оцінюваної відношенням

$$I_{*n\text{по}ад} = I_{\text{по}ад} / I_{n\text{ад}}.$$

Тоді для асинхронного двигуна (або кількох, що в однакових умовах відносно точки КЗ) справедливе

$$I_{\text{п}t\text{ад}} = \gamma_{t\text{ад}} I_{*n\text{по}ад} \cdot I_{n\text{ад}}. \quad (67)$$

Для уточнення обчислень струму КЗ та його складових слід урахувати зміну активної складової опору провідників та елементів кола КЗ через їх нагрівання струмом КЗ.

Кабельні ЛЕП. Зміну значення активної складової електричного опору кабелю від нагрівання струмом КЗ визначають за формулою

$$r_{KL} = c_v r_{v=+20^\circ C} \quad (68)$$

де c_v – коефіцієнт, що враховує збільшення активної складової опору провідників кабелю (значення коефіцієнта c можна брати наближено рівним 1,5; при уточнених розрахунках коефіцієнт c треба визначати за графіками, наведеними в [36] залежно від матеріалу провідників, перерізу жили кабелю, потужності трансформатора, до якого він ввімкнений, і тривалості у часі КЗ); $r_{v=+20^\circ C}$ – активний опір жил кабелю за температури $+20^\circ C$.

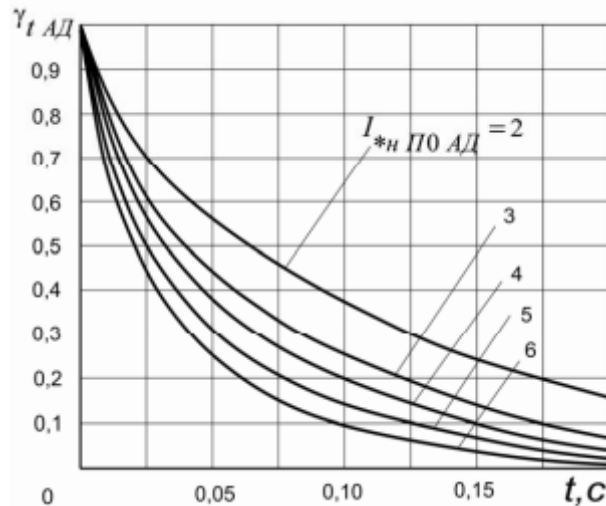


Рис. 11. Типові криві для визначення (залежно від часу та електричної віддаленості КЗ) значень періодичної складової струму КЗ, створюваної асинхронними двигунами

Повітряні ЛЕП. Активна складова опору провідників фази

$$r_{III} = \kappa_v \kappa_c \kappa_{ne} \rho_{v \text{ норм}} l / s, \quad (69)$$

де κ_v – коефіцієнт, що враховує зростання значення опору з підвищенням температури

$$\kappa_v = 1 + 0,004(v - 20^\circ C); \quad (70)$$

де κ_c – коефіцієнт з урахуванням збільшення значення опору через скручування провідників фази (для багатодровових фаз $\kappa_c = 1,2$, а для однодротових – $\kappa_c = 1,0$); κ_{ne} – коефіцієнт обліку поверхневого ефекту при змінному струмі (для мідного та алюмінієвого проводів $\kappa_{ne} = 1$); $\rho_{v \text{ норм}}$ – питомий опір провідника при $v=20^\circ C$; l, s – довжина провідника та його переріз відповідно.

Як розрахункову (допустиму) температуру для проводів з гумовою та пластмасовою ізоляцією беруть $v = 65^\circ C$.

Струмоводи з шин. Активна складова опору фази струмоводу за температури v

$$r_{III} = \rho_{v \text{ норм}} \cdot \frac{T + v}{T + v_{\text{норм}}} \kappa_{д} \cdot 10^3 l / s, \quad (71)$$

де $v_{\text{норм}}$ – температура, за якої задано питомий опір $\rho_{v \text{ норм}}$; T – постійна, що залежить від матеріалу провідника (для твердотягнутої міді $T = 242 \text{ }^\circ\text{C}$; для відпаленої міді $T = 234 \text{ }^\circ\text{C}$; для алюмінію $T = 234 \text{ }^\circ\text{C}$; для алюмінію $T = 236 \text{ }^\circ\text{C}$; k_D , k_v , $k_{\text{не}}$, k – коефіцієнти додаткових втрат від підвищення температури шини (70), поверхневого ефекту, ефекту близькості; значення коефіцієнтів $k_{\text{не}}$, k_D для мідних та алюмінієвих шин залежать від розмірів, розміщення та кількості шин.

Значення коефіцієнта k_D для алюмінієвих шин $100 \times 10 \text{ мм}^2$ залежно від кількості шин n у фазі:

при $n = 1 - 1,18$;

при $n = 2 - 1,25$;

при $n = 3 - 1,60$;

при $n = 4 - 1,72$.

При прокладанні струмоводу в галереї або тунелі коефіцієнт додаткових втрат збільшується на 25 % порівняно з умовами його прокладання на відкритому повітрі. Як розрахункову (допустиму) температуру нагрівання струмопроводу в тривалому режимі беруть $v=70 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Розрахунки струмів короткого замикання з використанням сучасного програмного забезпечення

Засоби обчислювальної техніки все частіше використовують для аналізу умов експлуатації та проектування СЕП великих підприємств, інфраструктури міст та сільськогосподарських районів, що потребує повнішого описання перехідних процесів з основних параметрів і характеристик електропостачання та електроспоживання. Розрахунки режимів СЕП при цьому ускладнюються через значну кількість накопичених показників, а при варіюванні початкових даних виникає необхідність в їх неодноразовому повторенні.

Складні схеми електричної мережі підприємств, застосування глибоких введів напругою понад 110 кВ, неоднорідність мережі, значне збільшення потужності джерел енергетичної системи, поєднання різних видів джерел у живленні КЗ, комплексний склад і різкозмінний характер навантаження та низка інших чинників зумовлюють підвищену точність обчислення значень струмів КЗ та автоматизації розрахунків.

Обчислення струмів КЗ з означених вимог до систем електропостачання являє собою містке інженерно-технічне завдання, розв'язання якого істотно полегшується завдяки використанню аналогових моделей та обчислювальної техніки. Застосування обчислювальної техніки дає змогу відмовитися від багатьох припущень при складанні схем заміщення електричної мережі. У розрахункових схемах при цьому вдається, наприклад, точніше враховувати

опис роторів та складові показників аварійного режиму. Вживання обчислювальної техніки для розрахунку електромагнітних перехідних процесів – у можливості “перегляду” в широкому діапазоні значень параметрів елементів системи та обліку не лише їх типу, а й конкретних особливостей. Отже, підвищується точність розрахунку, гарантується вірогідність отриманих результатів при заданих первинних значеннях параметрів для багатьох варіантів схем СЕП та видів КЗ.

Зауважимо, що точність будь-якого розрахунку на обчислювальній техніці залежить від досконалості закладеної до програми методики та певності початкових даних. Основна вимога до програми розрахунку струмів КЗ у складній електричній системі полягає в тому, що багатоваріантні розрахунки у різних її точках при можливих змінах (перехід від одного режиму до іншого, вмикання (вимикання) віток, аварійні чи оперативні комутації тощо) не повинні збільшувати час на обчислення. Програма має бути універсальною – допускати розрахунок перехідного процесу в будь-якій практично можливій схемі. Ставлять також загальні вимоги, що зводяться до простоти підготовки початкових даних та обробки отриманих результатів, компактності обчислювального алгоритму. Характеристики програми розрахунку струмів КЗ визначають вживаними методом розрахунку та способом реалізації. Основні параметри схеми слід розраховувати за стандартними програмами.

Математичний опис складної СЕП при взятих припущеннях може бути зведений до складання системи лінійних алгебраїчних рівнянь. У результаті звичайних припущень нехтують насиченням трансформаторів та реакторів, моделюють навантаження постійними опорами, подають синхронні генератори джерелами напруги з незмінною за амплітудою е.р.с. та відповідним опором.

Стан електричної мережі можна описати рівняннями контурних струмів, вузлових напруг або їх комбінаціями.

При розрахунку аварійних режимів – найпоширеніший метод вузлових напруг. Через складнішу реалізацію на обчислювальній техніці метод контурних струмів застосовується рідше, проте він простіший під час обліку взаємної індукції ЛЕП у системі нульової послідовності.

У проектній практиці досить уживані алгоритми та програми розрахунку струмів КЗ, запропоновані інститутом “Енергомережапроект” та Інститутом електродинаміки НАН України. Програми дають змогу здійснювати розрахунки з активними складовими опорів елементів та встановлених розбіжностей е.р.с. за модулем та фазою при всіх видах пошкоджень у складних мережах. Для розв’язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь у таких програмах застосовують метод Гаусса чи Z-метод.

Для розрахунку струмів трифазного КЗ за допомогою обчислювальної техніки запропоновано ітераційний метод, що ґрунтується на поданні електричного стану мережі при КЗ прямою формою системи рівнянь вузлових

напруг. Для прискорення збіжності ітераційного процесу обчислення вузлових напруг береться коефіцієнт прискорення. При ітераційному методі розрахунку струмів КЗ особливих вимог до обсягу пам'яті обчислювальної техніки не ставиться, а тому ним слід користуватися при розрахунках схем електричних мереж з великою кількістю вузлів та віток.

Прямий метод розрахунку струмів КЗ з матрицею вузлових опорів схеми ефективніший з такими перевагами перед ітераційним: відсутність труднощів, пов'язаних із збіжністю обчислювального процесу; скорочений час підрахунків; достатньо високий ступінь точності результатів. Тоді електричний стан мережі при КЗ подається оберненою формою системи рівнянь вузлових напруг. Нижче описується алгоритм розрахунку струмів КЗ в електричних мережах, розроблений на основі цього методу.

Початкові дані для розрахунку трифазного КЗ – це визначена схема заміщення мережі, опір віток якої зведений до базисної напруги. Вітки мережі заміщують комплексним опором, генератори задають активними вітками з джерелами е.р.с., увімкненими за перехідними опорами, навантаження – вітками з комплексними опорами. У початковий момент перехідного процесу е.р.с. генераторів не змінюють свого значення. Вузли схеми позначають номерами $1, 2, \dots, n$, а вузлу “земля” з напругою, що дорівнює нулю, надається номер $n + 1$.

Початкова інформація про електричну мережу містить такі дані: по кожній вітці схеми – пара вузлів i та j , що являють собою кінці вітки, дійсну та уявну частини комплексного опору (Z'_{ij} та Z''_{ij}); по кожному вузлу вмикання генераторів – номер вузла i , перехідні опори x_i , дійсну та уявну частини комплексної е.р.с. генератора (E'_i та E''_i); номери вузлів k схеми, де розглядають КЗ.

На першому етапі розрахунку первинну схему заміщення мережі необхідно перетворити, замінивши задані у схемі активні вітки з опорами x_i і е.р.с. генераторів E'_i та E''_i пасивними вітками з тим же опором і еквівалентними джерелами струму. Значення струму еквівалентного джерела визначається виразом

$$I_i = \frac{E'_i + jE''_i}{jx_i} \quad (72)$$

Вузлові струми джерел перетвореної схеми заміщення орієнтовані звичайно у тій системі координат, в якій раніше були визначені (для нормального усталеного режиму роботи мережі) перехідні е.р.с. генераторів.

До виникнення КЗ електричний стан мережі можна описати рівнянням

$$\sum_{j=1}^n Z_{ij} I_j = U_i^{(n)}, \quad (73)$$

де Z_{ij} – елемент матриці вузлових опорів мережі; I_j – вузловий струм (для вузлів ввімкнення генераторів, рівний струму еквівалентного джерела, а для

решти вузлів схеми – нулю); $U_i^{(n)}$ – напруга вузла i схеми у нормальному режимі мережі.

При появі трифазного КЗ у будь-якому вузлі k схеми мережі напруга у цьому вузлі $U_k = 0$. У вузлі k виникає додатковий вузловий струм від вузла та рівний струму КЗ I_k . Оскільки напруга у вузлі k схеми відома, то рівняння, що відповідає цьому вузлу, дає можливість знайти струм КЗ у місці пошкодження. Електричний стан мережі при трифазному КЗ у вузлі k схеми описаний нижче системою лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n \underline{Z}_{kj} \dot{I}_j - \underline{Z}_{kk} \dot{I}_k &= 0 \\ \sum_{j=1}^n \underline{Z}_{ij} \dot{I}_j - \underline{Z}_{ik} \dot{I}_k &= \dot{U}_i^{(n)} \end{aligned} \right\} \quad (74)$$

де $i=1,2,\dots,n; i \neq k$.

Із системи рівнянь (5.104) визначимо струм КЗ та залишкові напруги у вузлах схеми:

$$\dot{I}_k^{(3)} = \sum_{j=1}^n \underline{Z}_{kj} \dot{I}_j / \underline{Z}_{kk} = \dot{U}_i^{(n)} / \underline{Z}_{kk}; \quad (75)$$

$$\dot{U}_i = \sum_{j=1}^n \underline{Z}_{ij} \dot{I}_j - \dot{I}_k \underline{Z}_{ik} = \dot{U}_i^{(n)} - \dot{I}_k \underline{Z}_{ik}, \quad (76)$$

де $i=1,2,\dots,n; i \neq k$.

Знаючи залишкові напруги у вузлах схеми, визначають параметри режиму КЗ в електричній мережі:

струми у вітках перетвореної схеми мережі

$$\dot{I}_{ij} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j) / \underline{Z}_{ij}; \quad (77)$$

струм, створений кожним генератором у вихідній схемі мережі,

$$\dot{I}_{\Gamma i} = (\dot{E}_i - \dot{U}_i) / \underline{Z}_{ij}; \quad (78)$$

вхідний опір вихідної схеми мережі

$$\underline{Z}_{axi} = \dot{E}_i / \dot{I}_{\Gamma i}. \quad (79)$$

Розподіливши комплексні величини на дійсні та уявні частини

$$\begin{aligned} \dot{E}_i &= E_i' + jE_i''; & \dot{U}_i &= U_i' + jU_i''; \\ \dot{I}_i &= I_i' + jI_i''; & \underline{Z}_{ij} &= Z_{ij}' + jZ_{ij}'' \end{aligned}$$

і підставивши їх відповідно до (72), (73) та (75) – (79), отримаємо вирази, зручні для програмування та розрахунку на обчислювальній техніці.

Відзначимо, що обчислювальну техніку широко використовують для вирішення завдань, пов'язаних з дослідженнями і розрахунком електромагнітних параметрів аварійних режимів в енергетичній системі та великих СЕП. До них належать: визначення впливу на потужність КЗ активної складової опору та ємнісних провідностей ЛЕП напругою 110–750 кВ; розрахунок уставок спрацювання релейного захисту (дистанційного захисту, захисту від КЗ на землю, струмових захистів від міжфазних КЗ) у мережах напругою 500–750 кВ, зважаючи на додаткові чинники (доаварійний режим,

ємні провідності ЛЕП та ін.); розрахунок аварійних неповнофазних режимів у складній електричній мережі; дослідження та розрахунок струмів КЗ, створених групою асинхронних чи синхронних двигунів (визначення початкового значення періодичної складової струму КЗ, згасання періодичної та аперіодичної складових); аналіз та отримання розрахункових кривих для сучасних потужних генераторів.

Особливості роботи у програмному забезпеченні ELPLEK

Ця програма обчислює струми і напруги при різних аварійних ситуаціях. Розрахунки можуть бути виконані або згідно стандарту 60909 ІЕС, або використовуючи метод, подібний до методу накладення (метод такий же, як і метод накладення, за умови, що $X_d'' = X_q$). В останньому випадку, після виникнення короткого замикання струми обчислюються як функція часу. Режим перед коротким замиканням може бути обчислений як розрахунком електричної мережі безпосередньо, так і вирішуючи проблему поточкорозподілення для електричної мережі.

4. Похибки оцінки значень струмів короткого замикання

У більшості випадків висока точність оцінки струмів короткого замикання не може бути досягнута у зв'язку з неповнотою і некоректністю вихідної інформації, а також похибкою методів розрахунку. Тим часом на практиці спостерігається розвиток і використання складних і громіздких методів, призначених для отримання «точних» значень струмів короткого замикання, що не завжди забезпечує значимий ефект і не є необхідністю.

Розглянемо докладніше питання про можливу точність розрахунку струмів короткого замикання.

На точність оцінки значень струмів короткого замикання впливають похибки, з якими задаються номінальні параметри електроустаткування і електричних мереж, а також неповнота або невизначеність завдання складу електрообладнання та режимів його роботи. Це суттєво для нелінійних навантажень: вентиляльні перетворювачі, електротермічні установки, потужні зварювальні комплекси і подібні їм пристрої, параметри яких є функціями навантаження та інших режимних характеристик. Зазначимо наближеність завдання параметрів енергосистеми. Похибки оцінки номінальних даних деяких видів електрообладнання та елементів електричних мереж наведені нижче.

Так, відмінність опорів електричних машин від номінальних (паспортних) значень знаходиться в межах $\pm 5\%$, ЕРС короткого замикання трансформаторів – в тих же межах. Відхилення від номінальних значень індуктивності реакторів – на рівні $\pm 10\%$, ємності БК – в межах $(-5 \div +10)\%$.

Похибки еквівалентування опорів при розрахунках струмів короткого замикання без урахування енергосистеми принципово не можуть перевершувати найбільшу з похибок сумарного опору. Еквівалентування

полягає в основному в операціях додавання послідовних і паралельних активно-реактивних опорів.

Як правило, ця похибка не перевищує 5 %. Однак при наявності в мережі нелінійних пристроїв може бути значно більше. Те ж відноситься до опорів прямої і зворотної послідовностей, які використовуються для розрахунку струмів короткого замикання при несиметрії напруг.

Опір зворотній послідовності енергосистеми приймається рівним опору КЗ в розглянутому вузлі і знаходяться в межах $3 \div 13$ %.

Сьогодні розроблені методи вимірювання струмів короткого замикання для початкового моменту часу і похибкою не більше 3 % і дещо більшою – для подальших моментів часу. Численні розрахунки і відповідні їм експерименти в електричних мережах дозволяють зробити висновок, що струми КЗ при таких розрахунках визначаються з похибкою до ± 7 %, при спрощеному методі – до ± 12 %.