

• НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ •

**СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ
В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЗМІННОГО
СТРУМУ**

**Частина 0. Обчислення сили струму
(ІЕС/TR 60909-0:2000, IDT)**

ДСТУ ІЕС 60909 - 0:2008





НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ У ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Частина 0. Обчислення сили струму

(IEC 60909-0:2001, IDT)

ДСТУ IEC 60909-0:2007

БЗ № 12-2007/736

Видання офіційне

Київ

ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ

2009

ПЕРЕДМОВА

1 ВНЕСЕНО: Приватне науково-виробниче підприємство «Синапс»

ПЕРЕКЛАД І НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ РЕДАГУВАННЯ: **С. Федоров** (науковий керівник); **С. Облакевич**; **Е. Островський**, канд. техн. наук

2 НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Держспоживстандарту України від 24 грудня 2007 р. №386 з 2010-01-01, згідно з наказом Держспоживстандарту від 14 серпня 2008 р. № 284 чинність встановлено з 2009-01-01

3 Національний стандарт відповідає IEC 60909-0:2001 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems — Part 0: Calculation of currents (Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 0. Обчислювання сили струму) з поправкою IEC 60909-0 Corr. 1:2002

Ступінь відповідності — ідентичний (IDT)

Переклад з англійської (en)

4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей стандарт є тотожний переклад IEC 60909-0:2001 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems — Part 0: Calculation currents (Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 0. Обчислювання сили струму) з поправкою IEC 60909-0 Corr. 1:2002.

Організація, відповідальна за цей стандарт, — Приватне науково-виробниче підприємство «Синапс».

Стандарт містить вимоги, які відповідають чинному законодавству України.

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

- безпосередньо в текст стандарту внесено поправку Corr. 1:2002, виділену в тексті подвійною вертикальною рисою на березі;
- слова «ця частина IEC 60909» змінено на «цей стандарт»;
- структурні елементи цього стандарту: «Титульний аркуш», «Передмову», «Національний вступ» першу сторінку, «Терміни та визначення понять» і «Бібліографічні дані» — оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;
- вилучено «Передмову» до IEC 60909-0;
- до підрозділу 1.3 «Нормативні посилання» долучено «Національне пояснення», виділене в тексті рамкою;
- долучено національний додаток НА;
- виправлено помилки оригіналу:
 - до 1.4.2 долучено позначку A і її пояснення: « A Допоміжна шина»;
 - у примітці до 3.3.3 виправлено позначку повного опору прямої послідовності $Z_{(1)B}$;
 - у 4.5.2.3 з позначками X''_{Mj} , ΔU_{Gi} , ΔU_{Mi} у формулах (76), (77) узгоджено позначки в поясненнях до них і в подальшому тексті підпункту;
 - у 4.8 виправлено помилку у формулі (104): позначку I''^2_{ki} замінено на позначку I''^2_{ki} .

Додаток НА — довідковий.

У цьому стандарті є посилання на IEC 60050(131), IEC 60050(151), IEC TR 60909-4, які впроваджено в Україні як національні. Решту стандартів не впроваджено в Україні як національні, і чинних замість них документів немає.

Копії документів, на які є посилання в цьому стандарті, можна отримати в Головному фонді нормативних документів.

ДСТУ IEC 60909-0:2007

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ У ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Частина 0. Обчислення сили струму

ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Часть 0. Расчет силы тока

SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN THREE-PHASE A.C. SYSTEMS

Part 0. Calculation of currents

Чинний від 2009-01-01

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Сфера застосування

Цей стандарт застосовують для обчислювання сили струмів короткого замикання в таких випадках:

- у низьковольтних трифазних системах змінного струму;
- у високовольтних трифазних системах змінного струму, які працюють на номінальній частоті 50 Гц або 60 Гц.

Системи з найвищою напругою 550 кВ і вище з довгими лініями електропередавання потребують окремого розгляду.

Цей стандарт установлює загальну, практичну і коротку процедуру, яка звичайно дає результати прийнятної точності. Для цього методу обчислювання використовують еквівалентне джерело напруги в місці короткого замикання. Це не виключає ймовірності використання спеціальних методів, наприклад методу накладання, скоригованого під ці обставини, за умови забезпечення принаймні такої самої точності. Метод накладання дає струм короткого замикання, пов'язаний з передбачуваним розподілом навантаги. Отже, цей метод необов'язково призводить до формування максимального струму короткого замикання.

Цей стандарт описує обчислення сили струму короткого замикання у разі симетричних і несиметричних коротких замикань.

У разі випадкового чи навмисного утворення шляху проходження струму між одним лінійним проводом і локальною землею можна виділити два такі випадки залежно від їхніх фізичних властивостей і результатів (отже, це призводить до різних вимог для їх обчислення):

- коротке замикання фаза—земля, що відбувається в системі нейтралі з глухим уземленням або уземленням повного опору;
- однофазне коротке замикання на землю, що відбувається в системі з ізольованою нейтраллю чи уземленням нейтралі через дугогасний реактор. Ця несправність не належить до сфери застосування цього стандарту, і тому її не розглядають у цьому документі.

Щоб одержати інформацію про струми під час двох окремих одночасних однофазних коротких замикань фаза—земля в системі з ізольованою нейтраллю чи в системі з уземленням нейтралі через дугогасний реактор, див. IEC 60909-3.

Струми короткого замикання та повні опори короткого замикання можна також визначити через системні випробовування, вимірювання на мережному аналізаторі чи використовуванням комп'ютера. У наявних низьковольтних системах можна визначати повний опір короткого замикання на основі вимірювань у місці обчисленого короткого замикання.

Обчислення повного опору короткого замикання в основному ґрунтується на номінальних даних електроустаткування і топологічній структурі системи, його перевага полягає в тому, що проведення такого обчислення можливо як для вже наявних систем, так і для запланованих систем.

Взагалі необхідно розглядати два струми короткого замикання, які розрізняються за своїм значенням:

- максимальна сила струму короткого замикання, що визначає потужність або категорію електроустаткування; і
- мінімальна сила струму короткого замикання, яка може бути, наприклад, основою для вибору запобіжників, для установлення захисних пристроїв і для перевірки надмірного розігріву двигунів.

Примітка. Припускають, що струм у разі трифазного короткого замикання протікає одночасно на всіх полюсах. Дослідження неодноразових коротких замикань, які можуть призвести до вищих аперіодичних складників струму короткого замикання, не входять в сферу застосування цього стандарту.

Цей стандарт не охоплює струми короткого замикання, які свідомо створюють у регульованих умовах (станції для проведення випробовувань на коротке замикання).

Цей стандарт не містить обчислення сили струму короткого замикання в установках на кораблях і літаках.

1.2 Нормативні посилання

Наведені нижче нормативні документи містять положення, які через посилання в цьому тексті становлять положення цього стандарту. У разі датованих посилань подальші зміни чи перегляд будь-якої з цих публікацій не застосовують. Проте учасникам угод, базованим на цьому стандарті, рекомендовано користуватися останнім виданням наведених нижче документів. У разі недатованих посилань застосовують останнє видання зазначених нормативних документів. Члени ISO та IEC впорядковують каталоги чинних міжнародних стандартів.

IEC 60038:1983 IEC standard voltages

IEC 60050(131): 1978 International Electrotechnical Vocabulary — Chapter 131: Electric and magnetic circuits

IEC 60050(151): 1978 International Electrotechnical Vocabulary — Chapter 151: Electric and magnetic devices

IEC 60050-195:1998 International Electrotechnical Vocabulary — Part 195: Earthing and protection against electric shock

IEC 60056:1987 High-voltage alternating-current circuit-breakers

IEC 60071-1:1993 Insulation coordination — Part 1: Definitions, principles and rules

IEC 60781:1989 Application guide for calculation of short-circuit currents in low-voltage radial systems

IEC 60865-1:1993 Short-circuit currents — Calculation of effects — Part 1: Definitions and calculation methods

IEC TR 60909-1 Short-circuit currents calculation in three-phase a.c. systems — Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents in three-phase a.c. systems according to IEC 60909-0

IEC TR3 60909-2:1992 Electrical equipment — Data for short-circuit current calculations in accordance with IEC 60909

IEC 60909-3:1995 Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems — Part 3: Currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth

IEC TR 60909-4:2000 Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems — Part 4: Examples

for the calculation of short-circuit currents

IEC 60949:1988 Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects

IEC 60986:1989 Guide to the short-circuit temperature limits of electrical cables with a rated voltage from 1,8/3 (3,6) kV to 18/30 (36) kV.

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

IEC 60038:1983 Стандартні напруги IEC

IEC 60050(131): 1978 Міжнародний електротехнічний словник. Розділ 131. Електричні та магнітні кола

IEC 60050(151):1978 Міжнародний електротехнічний словник. Розділ 151. Електричні та магнітні пристрої

IEC 60050-195:1998 Міжнародний електротехнічний словник. Частина 195. Уземлення та захист від ураження електричним струмом

IEC 60056:1987 Високовольтні автоматичні вимикачі змінного струму IEC 60071-1:1993 Координація ізоляції. Частина 1. Визначення понять, принципи та правила IEC 60781:1989 Настанова щодо обчислювання сили струму короткого замикання в низьковольтних радіальних системах

IEC 60865-1:1993 Струми короткого замикання. Обчислювання коефіцієнтів. Частина 1. Визначення понять і методи обчислювання

IEC TR 60909-1 Обчислювання сили струму короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 1. Коефіцієнти для обчислювання сили струму короткого замикання в трифазних системах змінного струму згідно з IEC 60909-0

IEC TR3 60909-2:1992 Електроустатковання. Дані для обчислювання сили струму короткого замикання відповідно до IEC 60909

IEC 60909-3:1995 Обчислювання сили струму короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 3. Струми під час двох окремих одночасних однофазних коротких замикань фаза—земля і часткові струми короткого замикання, які проходять через землю

IEC TR 60909-4:2000 Обчислювання сили струму короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання

IEC 60949:1988 Обчислювання сили термічно допустимого струму короткого замикання, враховуючи неадіабатні ефекти нагрівання

IEC 60986:1989 Настанова щодо обмежень температури під час короткого замикання електричних кабелів з номінальною напругою від 1,8/3 (3,6) кВ до 18/30 (36) кВ.

1.3 Терміни та визначення понять

У цьому стандарті використано терміни та визначення понять, наведені в IEC 60050(131), і такі:

1.3.1 коротке замикання (*short circuit*)

Випадковий або навмисний шлях проходження струму між двома чи більше електропровідними частинами, за якого різниця електричних потенціалів між цими провідними частинами дорівнює або приблизно дорівнює нулю

1.3.1.1 міжфазне коротке замикання (*line-to-line short circuit*)

Випадковий або навмисний шлях проходження струму між двома чи більше лінійними проводами лінії із замиканням на землю або без нього

1.3.1.2 коротке замикання фаза—земля (*line-to-earth short circuit*)

Випадковий або навмисний шлях проходження струму в системі нейтралі з глухим уземленням або уземленням повного опору між лінійним проводом і локальною землею

1.3.2 струм короткого замикання (*short-circuit current*)

Надструм, спричинений коротким замиканням в електричній системі.

Примітка. Потрібно розрізняти струм короткого замикання в точці короткого замикання і часткові струми короткого замикання у відгалуженнях мережі в будь-якій точці мережі (відповідно до рисунка 3)

1.3.3 розрахунковий (можливий) струм короткого замикання (*prospective (available) short-circuit current*)

Струм, який протікатиме, якщо коротке замикання замінити ідеальним сполученням незначного повного опору без зміни живлення (відповідно до примітки в 1.1)

1.3.4 сила струму симетричного короткого замикання (*symmetrical short-circuit current*)

Дійове значення симетричного складника змінного струму розрахункового (можливого) струму

короткого замикання (відповідно до 1.3.3) без урахування аперіодичного складника струму (якщо є)

1.3.5 початкова сила струму симетричного короткого замикання I''_k (initial symmetrical short-circuit current I''_k)

Дійове значення симетричного складника змінного струму розрахункового (можливого) струму короткого замикання (відповідно до 1.3.3), застосованого в момент короткого замикання, коли повний опір залишається таким, як у початковий момент часу (відповідно до рисунків 1 і 2)

1.3.6 початкова потужність симетричного короткого замикання S''_k (initial symmetrical short-circuit power S''_k)

Уявне значення, що дорівнює добутку початкової сили струму симетричного короткого замикання I''_k (відповідно до 1.3.5), номінальної напруги системи U_n (відповідно до 1.3.13) і коефіцієнта $\sqrt{3}:S''_k = \sqrt{3}U_n I''_k$

Примітка. Початкову потужність симетричного короткого замикання S''_k не використовують, щоб виконувати обчислювання в цьому стандарті.

Якщо, незважаючи на це, S''_k використовують разом з обчисленням короткого замикання, наприклад, для обчислення внутрішнього повного опору мережної лінії живлення в точці з'єднання Q, то це визначення потрібно використовувати в такій формі:

$$S''_{kQ} = \sqrt{3}U_{nQ} I''_{kQ} \text{ або } Z_Q = cU_{nQ}^2 / S''_{kQ}$$

1.3.7 згасний (аперіодичний) складник сили струму $i_{d.c.}$ короткого замикання (decaying (aperiodic) component $i_{d.c.}$ of short-circuit current)

Середнє значення сили струму короткого замикання, згасного від початкового значення до нуля згідно з рисунками 1 і 2, між верхньою і нижньою обвідними лініями

1.3.8 максимальна сила струму короткого замикання I_p (peak short-circuit current i_p)

Максимально можливе миттєве значення розрахункового (можливого) струму короткого замикання (відповідно до рисунків 1 і 2).

Примітка. Значення максимальної сили струму короткого замикання змінюється відповідно до моменту, в який відбувається коротке замикання. Обчислення максимальної сили струму трифазного короткого замикання I_p застосовують до лінійного проводу в момент існування найбільшого можливого струму короткого замикання. Послідовні короткі замикання не розглядають

1.3.9 сила струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b (symmetrical short-circuit breaking current I_b)

Дійове значення інтегрального циклу симетричного складника змінного струму для розрахункового струму короткого замикання у момент розмикання контактів першого полюса для розмикання перемикача

1.3.10 сила струму сталого короткого замикання I_k (steady-state short-circuit current I_k)

Дійове значення струму короткого замикання, яке залишається після згаснення перехідних явищ (відповідно до рисунків 1 і 2)

1.3.11 симетричний струм загальмованого ротора I_{LR} (symmetrical locked-rotor current I_{LR})

Найбільший симетричний дійовий струм асинхронного двигуна із загальмованим ротором, на який подається номінальна напруга U_{rM} з номінальною частотою

1.3.12 еквівалентне електричне коло (equivalent electric circuit)

Модель для опису роботи кола з використанням мережі ідеальних елементів [IEV 131-01-33]

1.3.13 номінальна напруга системи U_n (nominal system voltage U_n)

Напруга (міжфазна), для якої призначена система і на якій основані певні робочі характеристики.

Примітка. Значення наведено в IEC 60038

1.3.14 еквівалентне джерело напруги $cU_n/\sqrt{3}$ (equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$)

Напруга ідеального джерела, що подається на точку короткого замикання в системі прямої послідовності для обчислювання сили струму короткого замикання згідно з 2.3. Лише це є активною напругою мережі

1.3.15 коефіцієнт напруги c (voltage factor c)

Відношення між напругою еквівалентного джерела напруги та номінальною напругою системи U_n , поділене на $\sqrt{3}$. Ці значення наведено в таблиці 1.

Примітка. Уведення коефіцієнта напруги c необхідно з різних причин, а саме, щоб врахувати наведені нижче чинники:

- змінювання напруги залежно від часу та місця;
- змінювання відгалужень обмотки трансформатора;
- нехтування навантагами і ємністю під час обчислювання згідно з 2.3.1 ;
- робота генераторів і двигунів у надперехідному режимі

1.3.16 електрорушійна сила E'' синхронної машини (subtransient voltage E'' of a synchronous machine)

Дійове значення симетричної електрорушійної сили синхронної машини, активної після надперехідного реактивного опору X_d'' у момент короткого замикання

1.3.17 коротке замикання, віддалене від генератора (far-from-generator short circuit)

Коротке замикання, під час якого значення симетричного складника змінного струму розрахункового (можливого) короткого замикання залишається практично сталим (відповідно до рисунка 1)

1.3.18 коротке замикання поблизу генератора (near-to-generator short circuit)

Коротке замикання, до якого принаймні одна синхронна машина додає розрахункову початкову силу струму симетричного короткого замикання, сила якого більше ніж вдвічі перевищує номінальну силу струму машини, або коротке замикання, до якого асинхронні двигуни додають більше ніж 5 % від початкової сили струму симетричного короткого замикання I^* , визначеного без двигунів (відповідно до рисунка 2)

1.3.19 повні опори короткого замикання в точці короткого замикання F (*short-circuit impedances at the short-circuit location F*)

1.3.19.1 повний опір короткого замикання прямої послідовності $Z_{(1)}$ трифазної системи змінного струму (*positive-sequence short-circuit impedance $Z_{(1)}$ of a three-phase a.c. system*)

Повний опір системи прямої послідовності з точки короткого замикання (відповідно до 2.3.2 і рисунка 5a)

1.3.19.2 повний опір короткого замикання зворотної послідовності $Z_{(2)}$ трифазної системи змінного струму (*negative-sequence short-circuit impedance $Z_{(2)}$ of a three-phase a.c. system*)

Повний опір системи зворотної послідовності з точки короткого замикання (відповідно до 2.3.2 і рисунка 5b)

1.3.19.3 повний опір короткого замикання нульової послідовності $Z_{(0)}$ трифазної системи змінного струму (*zero-sequence short-circuit impedance $Z_{(0)}$ of a three-phase a.c. system*)

Повний опір системи нульової послідовності з точки короткого замикання (відповідно до 2.3.2 і рисунка 5c). Охоплює потрібний повний опір нейтраль—земля Z_N

1.3.19.4 повний опір короткого замикання Z_k трифазної системи змінного струму (*short-circuit impedance Z_k three-phase a.c. system*)

Скорочений вираз повного опору короткого замикання прямої послідовності $Z_{(1)}$ згідно з 1.3.19.1 для обчислювання трифазних струмів короткого замикання

1.3.20 повні опори короткого замикання електроустаткування (*short-circuit impedances of electrical equipment*)

1.3.20.1 повний опір короткого замикання електроустаткування прямої послідовності $Z_{(1)}$ (*positive-sequence short-circuit impedance $Z_{(1)}$ of electrical equipment*)

Відношення напруги фаза—нейтраль до сили струму короткого замикання відповідного лінійного проводу електроустаткування у разі живлення від симетричної системи напруг прямої послідовності (відповідно до розділу 2 і IEC 60909-4).

Примітка. Індекс у позначці $Z_{(1)}$ можна опустити, якщо унеможливується ймовірність переплутати його з повним опором короткого замикання зворотної та нульової послідовності

1.3.20.2 повний опір короткого замикання електроустаткування зворотної послідовності $Z_{(2)}$ (*negative-sequence short-circuit impedance $Z_{(2)}$ of electrical equipment*)

Відношення напруги фаза—нейтраль до сили струму короткого замикання відповідного лінійного проводу електроустаткування у разі живлення від симетричної системи напруг зворотної послідовності (відповідно до розділу 2 і IEC 60909-4)

1.3.20.3 повний опір короткого замикання електроустаткування нульової послідовності $Z_{(0)}$ (*zero-sequence short-circuit impedance $Z_{(0)}$ of electrical equipment*)

Відношення напруги фаза—земля до сили струму короткого замикання одного лінійного проводу електроустаткування у разі живлення від джерела напруги змінного струму, якщо три паралельні лінійні проводи використовують для вихідного струму, а четверту лінію та/чи землю використовують як зворотне з'єднання (відповідно до розділу 2 і IEC 60909-4)

1.3.21 надперехідний реактивний опір синхронної машини X''_d (*subtransient reactance X''_d of a synchronous machine*)

Ефективний реактивний опір у момент короткого замикання. Для обчислення сили струму короткого замикання беруть граничне значення X''_d

Примітка. Якщо реактивний опір X_d в омах ділять на номінальний повний опір $Z_{TG} = U_{TG}^2 / S_{TG}$ синхронної машини, то результат у відносних одиницях позначається малою літерою $x''_d = X''_d / Z_{TG}$

1.3.22 мінімальна тривалість затримки t_{min} (*minimum time delay t_{min}*)

Найменше значення проміжку часу між початковим моментом протікання струму короткого замикання та моментом розмикання контактів першого полюса під час розмикання перемикача.

Примітка. Час t_{min} — сума найменшого можливого часу спрацювання захисного реле і найменшого часу розмикання автоматичного вимикача. Не враховує регульовану тривалість затримки спрацювання пристроїв розчіплювання

1.3.23 тепловий еквівалент сили струму короткого замикання I_{th} (*thermal equivalent short-circuit current I_{th}*)

Дійове значення струму, що має ту саму термічну дію і ту саму тривалість, що й фактична сила струму короткого замикання, яка може містити сталий складник струму та може з часом згасати.

1.4 Позначки, нижні та верхні індекси

Рівняння в цьому стандарті подано без зазначення одиниць фізичних величин. Позначки, які представляють фізичні величини, містять числові значення і розміри, які не залежать від системи одиниць, за умови вибору послідовної системи одиниць, наприклад Міжнародної системи одиниць (SI). Позначки комплексних величин підкреслюють, наприклад, $Z = R + jX$.

1.4.1 Позначки

A	Початкове значення сталого складника сили струму /°с
\underline{a}	Комплексний оператор
a	Відношення струму несиметричного короткого замикання до струму трифазного короткого замикання
c	Коефіцієнт напруги
$cU_n/\sqrt{3}$	Еквівалентне джерело напруги (дійове значення)
E''	Електрорушійна сила синхронної машини
f	Частота (50 Гц або 60 Гц)
I_b	Сила струму вимкнення симетричного короткого замикання (дійове значення)
I_k	Сила струму сталого короткого замикання (дійове значення)
I_{kP}	Сила струму сталого короткого замикання на клеммах (полюсах) генератора зі змішаним збудженням
I''_k	Початкова сила струму симетричного короткого замикання (дійове значення)
I_{LR}	Симетричний струм загальмованого ротора асинхронного двигуна
I_r	Номінальний струм електроустаткування
I_{th}	Тепловий еквівалент сили струму короткого замикання
$I_{d.c.}$	Сталий складник струму короткого замикання
i_p	Максимальна сила струму короткого замикання
K	Коригувальний коефіцієнт для повного опору
m	Коефіцієнт термічної дії сталого складника струму
n	Коефіцієнт термічної дії змінного складника струму
P	Кількість пар полюсів асинхронного двигуна
P_G	Діапазон регулювання напруги генератора
P_T	Діапазон регулювання напруги трансформатора
$P_{кеТ}$	Сумарні втрати в обмотках трансформатора за номінального струму
P_{eM}	Номінальна активна потужність асинхронного двигуна ($P_m = B_m \text{ соБфгм ті}^\wedge$)
q	Коефіцієнт для обчислювання сили струму вимкнення асинхронних двигунів
q_n	Номінальний поперечний переріз
R відповідно до r	Опір, абсолютне значення відповідно до відносного значення
R_G	Опір синхронної машини
R_{GF}	Уявний опір синхронної машини під час обчислювання $/_p$
S''_k	Початкова потужність симетричного короткого замикання (відповідно до 1.3.6)
S_r	Номінальна позірна потужність електроустаткування
t_{\min}	Мінімальна тривалість затримки
t_r	Номінальний коефіцієнт трансформації (перемикач відгалужень трансформатора перебуває в нульовому положенні); $i_r > 1$
T_k	Тривалість струму короткого замикання
U_m	Найвища напруга для устаткування, міжфазна (дійове значення)
U_n	Номінальна напруга системи, міжфазна (дійове значення)
U_r	Номінальна напруга, міжфазна (дійове значення)
U_{kr}	Номінальна напруга короткого замикання трансформатора, у відсотках
U_{vR}	Напруга короткого замикання реактора, що обмежує струм короткого замикання, у відсотках
U_{Rr}	Номінальне значення активного складника напруги короткого замикання трансформатора, у відсотках
U_{xr}	Номінальне значення реактивного складника напруги короткого замикання трансформатора, у відсотках
$U_{(1)}, U_{(2)}, U_{(0)}$	Напруга прямої, зворотної та нульової послідовності
X відповідно до x	Реактивний опір, абсолютне значення відповідно до відносного значення
X_d відповідно до X_d	Синхронний реактивний опір, вздовж подовжньої осі відповідно до поперечної пгі
X_{dp}	Значення позірного реактивного опору генератора із змішаним збудженням у разі сталого короткого замикання на клеммах (полюсах)
X_d відповідно до X_q	Надперехідний реактивний опір синхронної машини (граничне значення), вздовж подовжньої осі відповідно до поперечної осі
X_d	Неграничне значення синхронного реактивного опору, відносне значення
$X_{d \text{ sat}}$	Граничний синхронний реактивний опір, відносне значення, зворотне граничному коефіцієнту короткого замикання нульової навантаги
Z відповідно до z	Повний опір, абсолютне значення відповідно до відносного значення
Z_k	Повний опір короткого замикання трифазної системи змінного струму
$Z_{(1)}$	Повний опір короткого замикання прямої послідовності
$Z_{(2)}$	Повний опір короткого замикання зворотної послідовності
$Z_{(0)}$	Повний опір короткого замикання нульової послідовності
η	ККД асинхронних двигунів
κ	Коефіцієнт для обчислювання максимального струму короткого замикання
λ	Коефіцієнт для обчислювання сили струму сталого короткого замикання
μ	Коефіцієнт для обчислювання сили струму симетричного вимкнення короткого замикання
μ_0	Абсолютна провідність вакууму, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$

ρ	Питомий опір
φ	Кут зсуву фаз
θ_0	Температура проводу в кінці короткого замикання
01	Нейтраль прямої послідовності
02	Нейтраль зворотної послідовності
00	Нейтраль нульової послідовності

1.4.2 Нижні індекси

(1)	Складник прямої послідовності
(2)	Складник зворотної послідовності
(0)	Складник нульової послідовності
a.c.	Змінний струм
d.c.	Постійний струм
f	Уявна
k або k3	Трифазне коротке замикання (відповідно до рисунка 3a)
k1	Коротке замикання фаза—земля, коротке замикання фаза—нейтраль (відповідно до рисунка 3d)
k2	Міжфазне коротке замикання (відповідно до рисунка 3b)
k2E відповідно до kE2E	Міжфазне коротке замикання із замиканням на землю (відповідно до рисунка 3c)
K	Повні опори або реактивні опори, розраховані з коригувальним коефіцієнтом повного опору K_t , K_G або K_S стосовно K_{SO}
max	Максимум
min	Мінімум
n	Номінальне значення (IEU151-04-01)
r	Граничнодопустиме значення (IEU 151-04-03)
rsl	Результат
t	Перенесене значення
A	Допоміжна шина
AT	Допоміжний трансформатор
B	Шинопровід
E	Земля
P	Точка короткого замикання
O	Генератор
HV	Висока напруга, високовольтна сторона трансформатора
LV	Низька напруга, низьковольтна сторона трансформатора
L	Лінія
LR	Загальмований ротор
L1, L2, L3	Лінійні проводи трифазної системи змінного струму
M	Асинхронний двигун або група асинхронних двигунів
M	Без двигуна
MV	Середня напруга, сторона середньої напруги трансформатора
N	Нейтраль трифазної системи змінного струму, нейтральна точка зірки генератора чи трансформатора
p	Клема, полюс
Q	Точка зв'язку з лінією живлення
R	Реактор, що обмежує струм короткого замикання
S	Енергоблок станції (генератор і трансформатор із перемикачем відгалужень під навантагою)
SO	Енергоблок станції (генератор і трансформатор зі сталим коефіцієнтом трансформації чи перемиканням відгалужень без навантаги)
T	Трансформатор

1.4.3 Верхні індекси

"	Надперехідне (початкове) значення
'	Опір або реактивний опір на одиницю довжини
b	До короткого замикання

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ МЕТОД ОБЧИСЛЮВАННЯ

2.1 Загальні положення

Повне обчислення сили струму короткого замикання має дати змогу представити струми як функцію часу в точці короткого замикання від початку короткого замикання до його кінця, що відповідає миттєвому значенню напруги на початку короткого замикання (відповідно до рисунків 1 і 2).

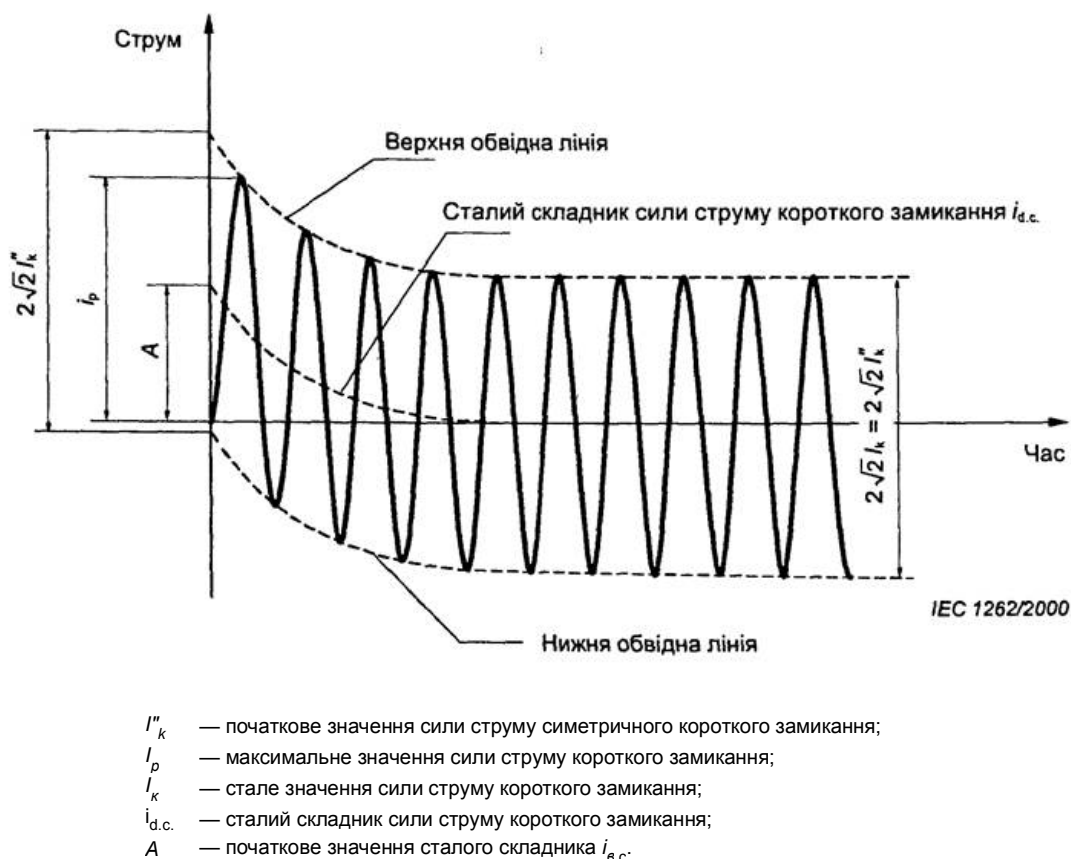


Рисунок 1 — Струм віддаленого від генератора короткого замикання із сталим за значенням змінним складником струму (принципова схема)

На практиці в більшості випадків не потрібне таке визначення. Залежно від застосування отриманих результатів важливим є дійове значення симетричного змінного складника та максимальне значення i_p струму короткого замикання, наступного за виникненням короткого замикання. Найбільше значення i_p залежить від сталої часу згасного аперіодичного складника та частоти f тобто від відношення R/X або X/R повного опору короткого замикання Z_k . Це значення досягається, якщо коротке замикання починається за нульової напруги. Значення i_p також залежить від згасання симетричного складника змінного складника струму короткого замикання.

У замкнених електромережах використовують декілька сталих часу постійного струму. Тому і нема простого методу обчислювання i_p та $i_{d.c.}$. Спеціальні методи обчислювання i_p , які характеризуються достатньою точністю, наведено в 4.3.

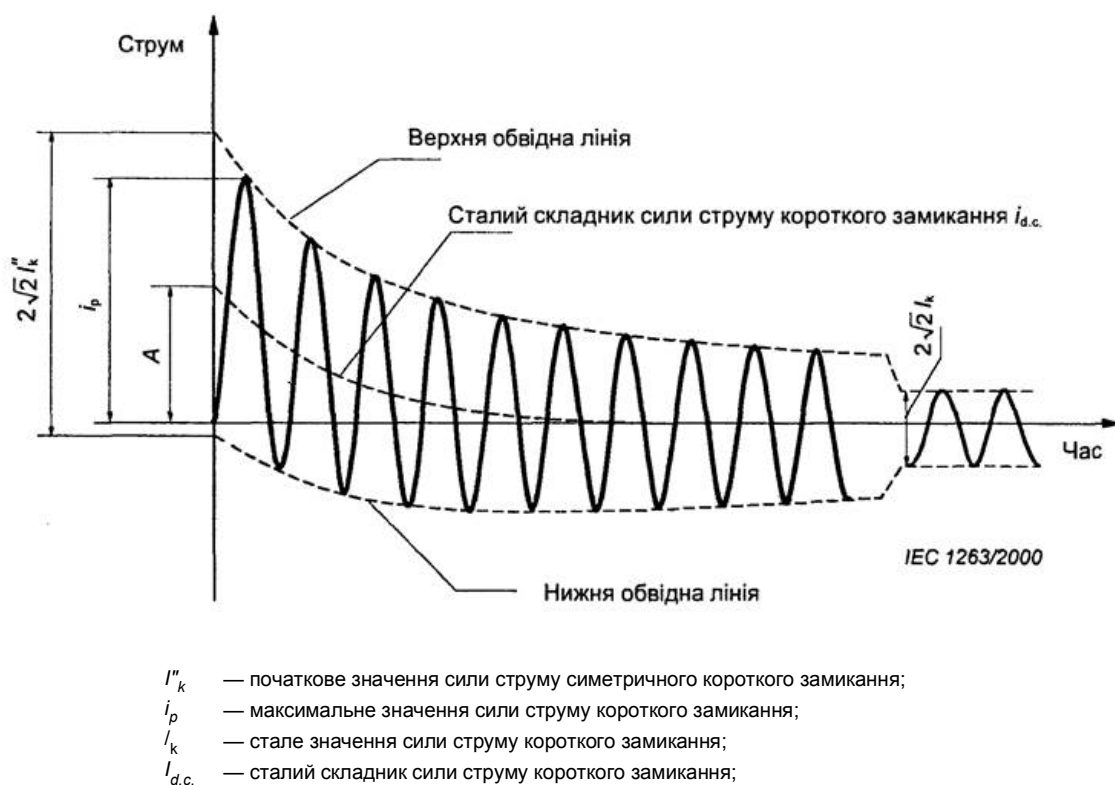


Рисунок 2 — Струм короткого замикання поблизу генератора із згасним змінним складником (принципова схема)

2.2 Припущення під час обчислювання

Обчислення максимального та мінімального струмів короткого замикання ґрунтується на наведених нижче припущеннях.

- Під час обчислювання тривалості короткого замикання виходимо з припущення про незмінність типу короткого замикання, тобто під час всього короткого замикання трифазне коротке замикання залишається трифазним коротким замиканням, а коротке замикання фаза—земля залишається коротким замиканням фаза—земля.
- Під час обчислювання тривалості короткого замикання виходимо з припущення про незмінність параметрів мережі.
- Повний опір трансформаторів відповідає нульовому (середньому) положенню перемикача відгалужень. Це припущення можливо, тому що вводять коригувальний коефіцієнт повного опору K_T для мережних трансформаторів.
- Опором дуги нехтуємо.
- До уваги не беремо всі ємнісні опори лінії, поперечну повну провідність лінії та необертів навантаж, окрім тих, які стосуються системи нульової послідовності.

Незважаючи на те, що ці припущення не повністю підходять для розгляду енергетичних систем, отриманий результат обчислення відповідає вимогам точності.

Для симетричних і несиметричних коротких замикань, як показано на рисунку 3, доцільно розраховувати струми короткого замикання, застосовуючи метод симетричних складників (відповідно до 2.3.2).

Під час обчислювання сили струму короткого замикання в системах із різними рівнями напруги необхідно переносити значення повного опору з одного рівня напруги в інший, зазвичай в той рівень напруги, за якого потрібно розрахувати струм короткого замикання. Для будь-якої системи одиниць, якщо системи узгоджуються, не потрібно провадити трансформацію одиниць, тобто $(U_{rTHV}/U_{rTLV} = U_{nHV}/U_{nLV})$ для кожного трансформатора в системі з частковими струмами короткого замикання. U_{rTHV}/U_{rTLV} зазвичай не дорівнює U_{nHV}/U_{nLV} (відповідно до IEC 60909-2 і прикладів в IEC 60909-4).

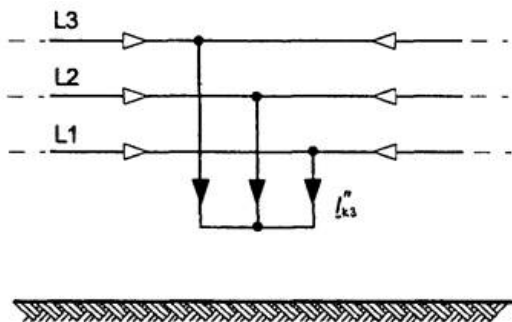
Повні опори устаткування в накладених або підлеглих мережах потрібно розділити або помножити на квадрат номінального коефіцієнта трансформації t_T . Напруги та сили струму потрібно перевести номінальним коефіцієнтом трансформації t_T .

2.3 Метод обчислювання

2.3.1 Еквівалентне джерело напруги в точці короткого замикання

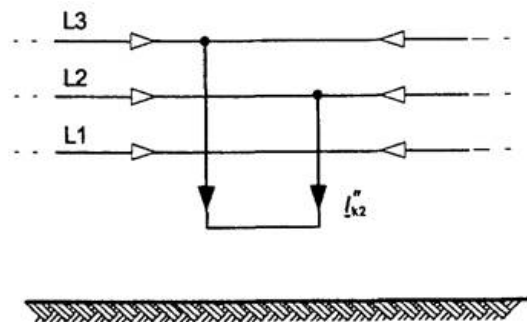
Метод, використовуваний для обчислювання, оснований на введенні еквівалентного джерела напруги в точку короткого замикання. Еквівалентне джерело напруги — це єдина активна напруга системи. Усі мережні лінії живлення, синхронні й асинхронні машини замінені внутрішніми повними опорами (відповідно до розділу 3).

З використанням еквівалентного джерела напруги можна завжди визначити силу струму в точці короткого замикання E . Робочі дані, навантаги споживачів, положення перемикача відгалужень трансформатора, збудження генераторів тощо не обов'язкові; не потрібні і додаткові обчислювання різних можливих розподілів потоку навантаги у момент короткого замикання.



IEC 1264/2000

Рисунок 3а — Трифазне коротке замикання



IEC 1265/2000

Рисунок 3б — Міжфазне коротке замикання



Рисунок 3d — Коротке замикання фаза—земля

Рисунок 3 — Характеристика коротких замикань і їхніх струмів

Якщо нема державного стандарту, то досить вибрати коефіцієнт напруги s згідно з таблицею 1, враховуючи те, що вища напруга в нормальній (незбудженій) системі в середньому не відрізняється більше ніж на +5 % (деякі низьковольтні системи) або +10 % (деякі високовольтні системи) від номінальної напруги системи U_n .



Рисунок 4а — Схема системи



Рисунок 4b — Еквівалентна принципова схема системи прямої послідовності

Рисунок 4 — Ілюстрація обчислення початкової сили струму симетричного короткого замикання I''_k згідно з процедурою для еквівалентного джерела напруги

Таблиця 1 — Коефіцієнт напруги c

Номінальна напруга U_n	Коефіцієнт напруги с для обчислювання	
	максимального струму короткого замикання $c_{\max}^{1)}$	мінімального струму короткого замикання $c_{\min}^{1)}$
Низька напруга 100 В—1000 В (IEC 60038, таблиця 1)	1,10 ⁴⁾	0,95
Середня напруга >1 кВ—35 кВ (IEC 60038, таблиця 3)	1,10	1,00
Висока напруга²⁾ >35 кВ (IEC 60038, таблиця 4)		
<p>¹⁾ $c_{\max} U_n$ не повинен перевищувати найвищу напругу U_m для устаткування систем живлення.</p> <p>²⁾ Якщо номінальну напругу не визначено, то застосовують формулу $C_{\max} U_n = U_m$ або $c_{\min} U_n = 0,90 \cdot U_m$.</p> <p>³⁾ Для низьковольтних систем з допустимим відхилом +6 %, наприклад, для систем, перейменованих з 380 В на 400 В.</p> <p>⁴⁾ Для низьковольтних систем з допустимим відхилом +10 %.</p>		

2.3.1 Застосування методу симетричних складників

У трифазних системах змінного струму обчислення сили струму в результаті симетричних і несиметричних коротких замикань спрощується у разі використання симетричних складників. При цьому допускається, що електроустановка має збалансовану структуру, наприклад, у разі перехрещених ліній електропередавання. Результати обчислення сили струму короткого замикання мають прийнятну точність і в разі неперехрещуваних ліній електропередавання.

Використовуючи цей метод, обчислюють струми в кожному лінійному проводі накладанням струмів трьох симетричних складників систем:

- струм прямої послідовності $I_{(1)}$;
- струм зворотної послідовності $I_{(2)}$;
- струм нульової послідовності $I_{(0)}$.

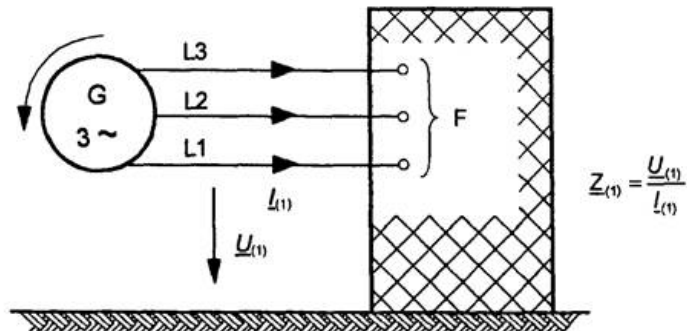
Якщо прийняти лінійний провід L1 за основу, то струми I_{L1} , I_{L2} і I_{L3} визначають так:

$$I_{L1} = I_{(1)} + I_{(2)} + I_{(0)} \quad (1a)$$

$$I_{L2} = a^2 I_{(1)} + a I_{(2)} + I_{(0)} \quad (1b)$$

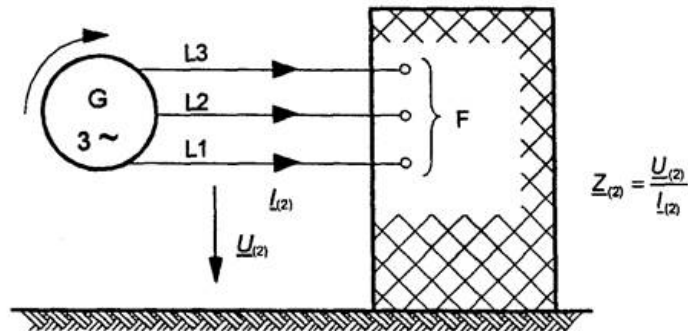
$$I_{L3} = a I_{(1)} + a^2 I_{(2)} + I_{(0)} \quad (1c)$$

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2)$$



IEC 1270/2000

Рисунок 5а — Повний опір короткого замикання прямої послідовності $Z_{(1)}$



IEC 1271/2000

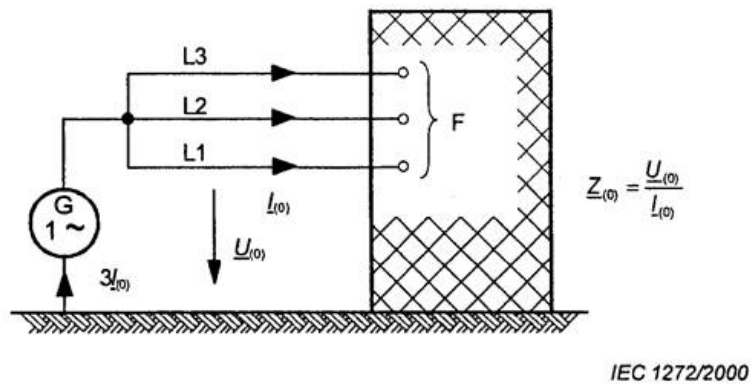


Рисунок 5с — Повний опір короткого замикання нульової послідовності $Z_{(0)}$

Рисунок 5 — Повні опори короткого замикання трифазної системи змінного струму в точці короткого замикання F

Кожен з трьох симетричних складників систем має свій власний повний опір.

У цьому стандарті розглянуто такі види несиметричних коротких замикань:

- міжфазне коротке замикання (відповідно до рисунка 3b);
- міжфазне коротке замикання із замиканням на землю (відповідно до рисунка 3с);
- коротке замикання фаза—земля (відповідно до рисунка 3еї).

У цьому стандарті необхідно розрізняти повний опір короткого замикання в точці короткого замикання Б і повний опір короткого замикання індивідуального електроустаткування.

Повний опір короткого замикання прямої послідовності $Z_{(1)}$ у точці короткого замикання Б отримують згідно з рисунком 5а, якщо до точки короткого замикання Б застосовують симетричну систему напруг із порядком фаз прямої послідовності та всі синхронні й асинхронні машини замінено їхніми внутрішніми повними опорами.

Повний опір короткого замикання зворотної послідовності $Z_{(2)}$ у точці короткого замикання Б отримують згідно з рисунком 5б, якщо до точки короткого замикання Б застосовують симетричну систему напруг із порядком фаз зворотної послідовності.

Значення повних опорів прямої та зворотної послідовності можуть відрізнятися один від одного лише за наявності в мережі обертових машин. Під час обчислювання віддалених від генератора коротких замикань зазвичай допустимо прирівнювати повні опори $Z_{(2)} = Z_{(1)}$.

Повний опір короткого замикання нульової послідовності $Z_{(0)}$ у точці короткого замикання Б отримують згідно з рисунком 5с, якщо напругу змінного струму застосовують між трьома короткозамкненими лінійними проводами і зворотним з'єднанням (наприклад, системи уземлення, нейтральний провідник, провід уземлення, оболонка кабелю, обплетення кабелю).

Під час обчислювання несиметричних струмів короткого замикання в середньо- чи високовольтних системах і за використання еквівалентного джерела напруги в точці короткого замикання необхідно враховувати ємнісний опір лінії нульової послідовності і поперечну повну провідність лінії нульової послідовності для систем з ізольованою нейтраллю, систем з уземленням нейтралі через дугогасний реактор і систем з уземленою нейтраллю з коефіцієнтом небажаного замикання на землю (відповідно до IEC 60071-1) вище ніж 1,4.

Ємнісний опір ліній (лінії електропередавання та кабелі) низьковольтних мереж можна не враховувати в системах прямої, зворотної і нульової послідовності.

Використовування занижених значень ємнісного опору лінії нульової послідовності в системах з уземленою нейтраллю призводить до одержання результатів дещо вищих, ніж фактичні значення струмів короткого замикання. Відхилення залежать від конфігурації мережі.

За винятком особливих випадків повні опори короткого замикання нульової послідовності в точці короткого замикання відрізняються від повних опорів короткого замикання прямої та зворотної послідовності.

2.3 Максимальні струми короткого замикання

Під час обчислювання максимальних струмів короткого замикання необхідно дотримуватися таких умов:

— якщо немає національного стандарту, то потрібно застосовувати коефіцієнт напруги c_{\max} згідно з таблицею 1 для обчислювання максимальної сили струму короткого замикання;

— вибирають конфігурацію системи і передбачають облік максимального впливу електростанцій і мережних ліній живлення, внаслідок чого формують максимальне значення струму в точці короткого замикання, або можна провести допустиме секціонування мережі для контролю струму короткого замикання;

— застосовуючи еквівалентний повний опір Z_{Σ} , для представлення зовнішніх мереж треба застосувати мінімальний еквівалентний повний опір короткого замикання, який відповідає максимальному вкладенню струму короткого замикання від мережних ліній живлення;

— потрібно увімкнути двигуни (якщо вони є) згідно з 3.8 і 3.9;

— треба ввести опори ліній R_L (лінії електропередавання та кабелі) за температури 20 °C.

2.4 Мінімальні струми короткого замикання

Під час обчислювання мінімальних струмів короткого замикання необхідно дотримуватися таких умов:

- треба використовувати коефіцієнт напруги c_{\min} згідно з таблицею 1 для обчислювання мінімальних струмів короткого замикання;
- вибирають конфігурацію системи та мінімальний вплив електростанцій і мережних ліній живлення, внаслідок чого утворюється мінімальне значення сили струму в точці короткого замикання;
- двигуни не враховують;
- потрібно ввести опори ліній (лінії електропередавання та кабелі, лінійні проводи і нейтральні провідники) за вищих температур:

$$R_L = (1 + \alpha(\theta_e - 20\text{ °C})) \cdot R_{L20}, \quad (3)$$

де R_{L20} — опір за температури 20 °C;

θ_e — температура провідника в градусах Цельсія в кінці короткого замикання;

α — коефіцієнт, що дорівнює 0,004/К, використовуваний для міді, алюмінію і алюмінієвих сплавів стосовно більшості практичних цілей з достатньою точністю.

Примітка. Щоб одержати інформацію про θ_e , див. IEC 60865-1, IEC 60949 і IEC 60986.

3 ПОВНІ ОПОРИ КОРТКОГО ЗАМИКАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАТКОВАННЯ

3.1 Загальні положення

У мережних лініях живлення, трансформаторах, повітряних лініях електропередавання, кабельних лініях, реакторах і подібному устаткованні повні опори короткого замикання прямої та зворотної послідовності дорівнюють один одному: $Z_{(1)} = Z_{(2)}$.

Повний опір короткого замикання нульової послідовності $Z_{(0)} = U_{(0)}/I_{(0)}$ визначають на основі напруги змінного струму між трьома паралельними провідниками та зворотним з'єднанням (наприклад земля, структура уземлення, нейтральний провідник, провід уземлення, оболонка і броня кабелю). У цьому разі через зворотне з'єднання проходить триразовий струм нульової послідовності.

Згідно з цим стандартом повні опори генераторів (G), мережних трансформаторів (T) і енергоблоків (S) множать на коригувальні коефіцієнти повного опору K_G , K_T , K_S або K_{SO} під час обчислювання сили струму короткого замикання з еквівалентним джерелом напруги в точці короткого замикання.

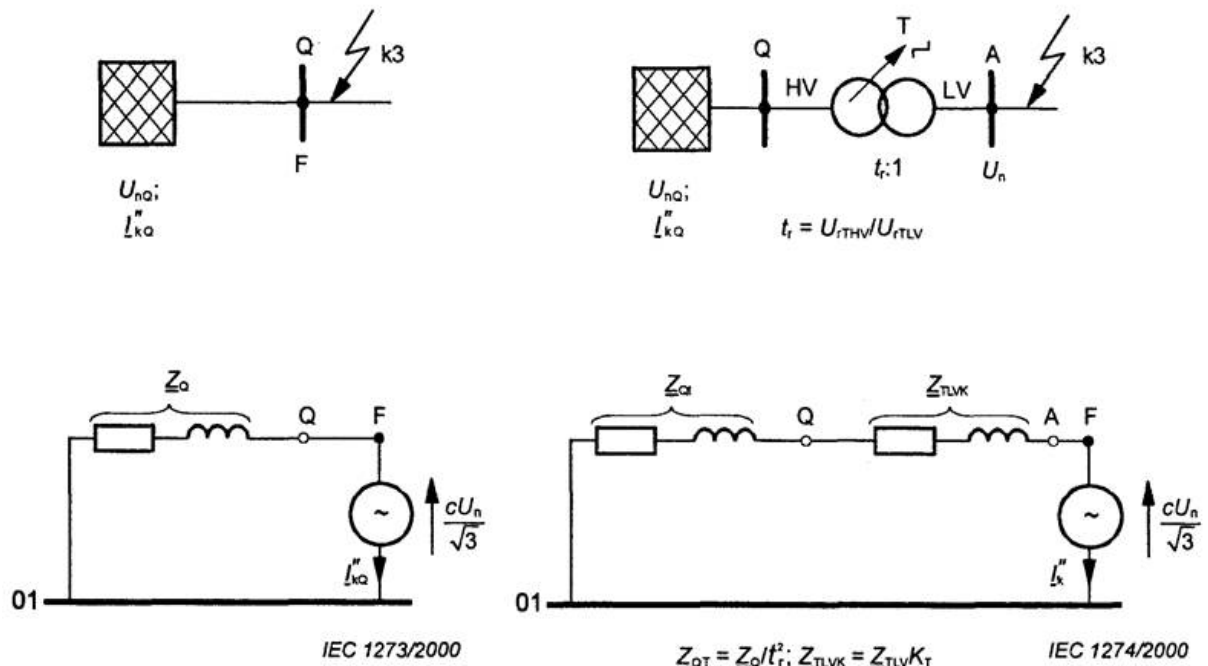
Примітка. Приклади використання коригувальних коефіцієнтів повного опору наведено в IEC 60909-4.

3.2 Мережні лінії живлення

Якщо трифазне коротке замикання відповідно до рисунка «а» живиться від мережі, в якій відома лише початкова сила струму симетричного короткого замикання I''_{kQ} у точці з'єднання лінії живлення Q, то еквівалентний повний опір мережі Z_a (повний опір короткого замикання прямої послідовності) в точці з'єднання лінії живлення Q визначають так:

$$Z_a = \frac{cU_{no}}{\sqrt{3}I''_{kQ}}. \quad (4)$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}}. \quad (5)$$



Якщо R_Q/X_Q відомий, то X_Q розраховують таким чином:

Якщо коротке замикання згідно з рисунком 6б живиться трансформатором середньо- або високовольтної мережі, в якій відома лише початкова сила струму симетричного короткого замикання I_{k0} у точці з'єднання лінії живлення і О, то еквівалентний повний опір короткого замикання прямої послідовності $Z_{Q\phi}$ який стосується низьковольтної сторони трансформатора, визначають так:

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2}, \quad (6)$$

де U_{nQ} — номінальна напруга системи в точці з'єднання лінії живлення Q;
 I_{kQ} — початкова сила струму симетричного короткого замикання в точці з'єднання лінії живлення Q;
 c — коефіцієнт напруги (відповідно до таблиці 1) для напруги U_{nQ} ;
 t_r — номінальний коефіцієнт трансформації, за якого перемикач відгалуження під навантагою перебуває в нульовому положенні.

У разі високовольтних ліній живлення з номінальними напругами вище ніж 35 кВ з живленням від ліній електропередавання еквівалентний повний опір у багатьох випадках можна розглядати як реактивний опір, тобто $Z_Q = 0 + jX_Q$. В інших випадках, коли не відоме точне значення опорів r_0 мережних ліній живлення, його можна замінити: $R_Q = 0,1X_Q$, де $X_Q = 0,995Z_Q$.

Початкову силу струму симетричного короткого замикання I_{kQmax} і I_{kQmin} на високовольтній стороні трансформатора має надавати компанія-постачальник, або її має бути отримано з адекватного обчислювання згідно з цим стандартом.

У спеціальних випадках еквівалентний повний опір короткого замикання нульової послідовності мережних ліній живлення можна розглядати залежно від конфігурації обмотки й уземлення нейтральної точки зірки трансформатора.

Примітка. Відповідно до пунктів 6 і 8 у таблиці 1 IEC 60909-4.

3.3 Трансформатори

3.3.1 Двообмоткові трансформатори

Повні опори короткого замикання прямої послідовності двообмоткових трансформаторів з $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ з перемикачем відгалужень під навантагою чи без нього можна розрахувати на основі номінальних даних трансформатора, як зазначено нижче:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}; \quad (7)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2}; \quad (8)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (9)$$

де U_{rT} — номінальна напруга трансформатора на високовольній або низьковольній стороні;
 I_{rT} — номінальна сила струму трансформатора на високовольній або низьковольній стороні;
 S_{rT} — номінальна повна потужність трансформатора;
 P_{krT} — сумарні втрати трансформатора в обмотках за номінальної сили струму;
 u_{kr} — напруга короткого замикання за номінальної сили струму, %;
 u_{Rr} — номінальна активна складова напруги короткого замикання, %.

Активний складник u_{Rr} можна розрахувати на основі сумарних втрат P_{krT} в обмотках за номінальної сили струму I_{rT} , якщо вони стосуються однієї сторони трансформатора (відповідно до рівняння (8)).

Співвідношення R_T/X_T загалом зменшується з розміром трансформатора. Для великих трансформаторів опір настільки малий, щоможна припустити, що повний опір складається лише з реактивного опору під час обчислювання сили струму короткого замикання. Опір необхідний для обчислювання максимальної сили струму короткого замикання I_p або сталого складника струму i_{dc} .

Необхідні дані для обчислювання $\underline{Z}_T = R_T + jX_T = \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ можна узяти з таблицки з технічними даними. Повний опір короткого замикання нульової послідовності $\underline{Z}_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$ можна одержати з таблицки з технічними даними чи у виробника.

Примітка. Фактичні дані для двообмоткових трансформаторів, використовуваних як мережні трансформатори чи на електростанціях, наведено в IEC 60909-2. Структуру повного опору нульової послідовності для обчислювання сили струмів несиметричного короткого замикання описано в IEC 60909-4.

3.3.2 Триобмоткові трансформатори

У разі триобмоткових трансформаторів повні опори короткого замикання прямої послідовності \underline{Z}_A , \underline{Z}_B і \underline{Z}_C згідно з рисунком 7 можна розрахувати на основі трьох повних опорів короткого замикання (стосуються сторони трансформатора А):

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{сторона С відкрита}); \quad (10a)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{сторона В відкрита}); \quad (10b)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{сторона А відкрита}); \quad (10c)$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (10d)$$

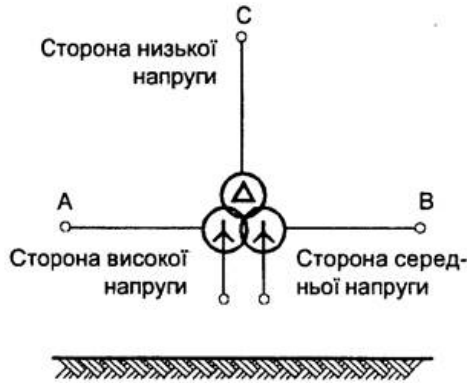
за рівняннями:

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}); \quad (11a)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}); \quad (11b)$$

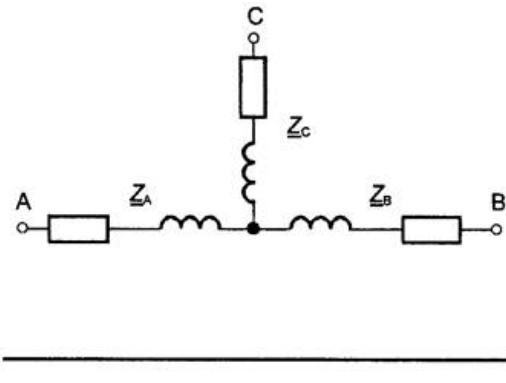
$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2}(\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}), \quad (11c)$$

- де U_{rTA} — номінальна напруга сторони A;
 S_{rTAB} — номінальна позірна потужність між сторонами A і B;
 S_{rTAC} — номінальна позірна потужність між сторонами A і C;
 S_{rTBC} — номінальна позірна потужність між сторонами B і C;
 U_{rTAB}, U_{xrTAB} — номінальні активна та реактивна напруги короткого замикання у відсотках між сторонами A і B;
 U_{rTAC}, U_{xrTAC} — номінальні активна та реактивна напруги короткого замикання у відсотках між сторонами A і C;
 U_{rTBC}, U_{xrTBC} — номінальні активна та реактивна напруги короткого замикання у відсотках між сторонами B і C.



IEC 1275/2000

Рисунок 7a — Позначення схеми з'єднань трансформатора



IEC 1276/2000

Рисунок 7b — Еквівалентна принципова схема (пряма послідовність)

Рисунок 7 — Триобмотковий трансформатор (приклад)

Повні опори нульової послідовності триобмоткових трансформаторів можна одержати у виробника.

Примітка. Приклади повного опору триобмоткових трансформаторів наведено в IEC 60909-2. Додаткову інформацію можна знайти в IEC 60909-4.

3.3.3 Коригувальні коефіцієнти повного опору для дво- і триобмоткових мережних трансформаторів

Мережний трансформатор — це трансформатор, що з'єднує дві чи більше мережі різних напруг. Для двообмоткових трансформаторів із перемикачем відгалужень під навантагою і без нього потрібно використовувати коригувальний коефіцієнт повного опору K_T додатково до повного опору, обчисленого згідно з рівняннями (7)–(9): $\underline{Z}_{TK} = K_T \underline{Z}_T$, де $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$.

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T}, \quad (12a)$$

де X_T — відносний реактивний опір трансформатора $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$, та c_{max} з таблиці 1 пов'язано з номінальною напругою мережі, приєднаної до низьковольтної сторони мережного трансформатора. Цей коригувальний коефіцієнт не потрібно використовувати для одиничних трансформаторів енергоблоків станції (відповідно до 3.7).

Якщо точно відомі тривалі робочі умови мережних трансформаторів до короткого замикання, то замість рівняння (12а) можна використовувати наведене нижче рівняння (12b).

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{C_{\max}}{1 + x_T(I_T^b / I_{IT}) \sin \varphi_T^b}, \quad (12b)$$

де C_{\max} - коефіцієнт напруги з таблиці 1, пов'язаний з номінальною напругою мережі, приєднаної до низьковольтної сторони мережного трансформатора;

$x_T = X_T / (U_{2T} / S_T)$;

U^b — найвища робоча напруга до короткого замикання;

I_T^b — найвища сила робочого струму до короткого замикання (це залежить від конфігурації мережі та наявних принципів надійності);

φ_T^b — кут коефіцієнта потужності до короткого замикання.

Коригувальний коефіцієнт повного опору треба застосовувати також до повного опору зворотної та нульової послідовності трансформатора під час обчислювання сили струму несиметричного короткого замикання. Повні опори Z_N між нейтральною точкою зірки трансформаторів і землею потрібно використовувати як $3 Z_N$ у системі нульової послідовності без коригувального коефіцієнта.

Для триобмоткових трансформаторів із перемикачем відгалужень під навантагою і без нього можна визначити три коригувальні коефіцієнти повного опору, використовуючи відносні значення реактивних опорів трансформатора (відповідно до 3.3.2):

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{C_{\max}}{1 + 0,6 x_{TAB}}; \quad (13a)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{C_{\max}}{1 + 0,6 x_{TAC}}; \quad (13b)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{C_{\max}}{1 + 0,6 x_{TBC}}. \quad (13c)$$

Разом з повними опорами Z_{AB} , Z_{AC} і Z_{BC} згідно з рівнянням (10) можна визначити скориговані значення $Z_{ABK} = K_{TAB} Z_{AB}$, $Z_{ACK} = K_{TAC} Z_{AC}$ і $Z_{BCK} = K_{TBC} Z_{BC}$. З використанням цих повних опорів можна розрахувати виправлені еквівалентні повні опори Z_{AK} , Z_{BK} і Z_{CK} , використовуючи процедуру, наведену в рівнянні (11).

Три коригувальні коефіцієнти повного опору, описані в рівнянні (13), потрібно використовувати також для систем зворотної та нульової послідовності триобмоткового трансформатора.

Повні опори між нейтральною точкою зірки та уземленням використовують без коригувального коефіцієнта.

Примітка. Еквівалентні схеми системи прямої та нульової послідовності наведено в IEC 60909-4, таблиця 1, пункти 4—7 з описом різних випадків уземлення нейтральної точки зірки. Взагалі повні опори $Z_{(0)A}$, $Z_{(0)B}$ або $Z_{(0)C}$ аналогічні $Z_{(1)A}$, $Z_{(1)B}$ або $Z_{(1)C}$. Приклад використання коригувальних коефіцієнтів рівняння (13) в повних опорах системи прямої та нульової послідовності еквівалентних схем описано в 2.2 IEC 60909-4.

Якщо в особливих випадках, наприклад у разі автотрансформаторів із перемикачем відгалужень під навантагою, обидві напруги короткого замикання трансформаторів U_K^* у положенні $+r_T$ і U_K^- в положенні мінус r_T (відповідно до IEC 60909-2) значно вищі, ніж значення u , може бути непотрібним використання коригувального коефіцієнта повного опору K_m .

3.4 Повітряні лінії електропередавання та кабельні лінії зв'язку

Повний опір короткого замикання прямої послідовності $Z_L = R_L + jX_L$ можна розрахувати на основі даних про проводи, наприклад, про поперечний перетин і відстань між центрами проводів.

Щодо вимірювання повного опору прямої послідовності $Z(1) = R_{(1)} + jX_{(1)}$ і повного опору короткого замикання нульової послідовності $Z(0) = R_{(0)} + jX_{(0)}$ див. IEC 60909-4. Іноді можна розраховувати повні опори нульової послідовності з відношень $R(0)/R_L$ і $X_{(0)L}/X_L$ (відповідно до IEC 60909-2).

Повні опори $Z_{(1)L}$ і $Z_{(0)L}$ низьковольтних і високовольтних кабелів залежать від національних технологій і стандартів, також вони можуть бути узяті з IEC 60909-2, настанов або даних виробника.

Стосовно температур вище 20 °C див. рівняння (3).

Ефективний опір на одиницю довжини повітряних ліній електропередавання R'_L за температури проводу 20 °C можна розрахувати на основі номінального поперечного перетину q_n і питомого опору ρ :

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n}. \quad (14)$$

Примітка. Для обчислювання питомого опору можна використовувати наведені нижче значення:

мідь	$\rho = \frac{1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2}{54 \text{ м}};$	алюмінієвий сплав	$\rho = \frac{1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2}{31 \text{ м}}.$
алюміній	$\rho = \frac{1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2}{34 \text{ м}};$		

Реактивний опір на одиницю довжини X'_L для повітряних ліній електропередавання можна розрахувати з використанням такої трансформації:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right), \quad (15)$$

де $d = \sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L2L3}d_{L3L1}}$ — середня геометрична відстань між проводами чи центром скрутка;
 r — радіус одного проводу. У разі скрутка проводів r потрібно замінити на R — радіус скрутки (відповідно до IEC 60909-2);
 n — кількість проводів у скрутці; для одного проводу $n=1$;
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$.

3.5 Реактори, які обмежують струм короткого замикання

За принципом геометричної симетрії повні опори короткого замикання прямої, зворотної та нульової послідовності однакові. Струмообмежувальні реактори короткого замикання потрібно розглядати як частину повного опору короткого замикання.

$$Z_R = \frac{U_{KR}}{100\% \sqrt{3} I_{IR}} \quad \text{і} \quad R_R \ll X_R, \quad (16)$$

де U_{KR} та I_{IR} подані в таблиці з технічними даними;
 U_n — номінальна напруга системи.

3.6 Синхронні машини

3.6.1 Синхронні генератори

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (17)$$

з коригувальним коефіцієнтом:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}}, \quad (18)$$

Під час обчислювання початкових сил струму симетричного короткого замикання в системах, які живляться безпосередньо від генераторів без одиничних трансформаторів, наприклад у промислових мережах або низьковольтних мережах, треба використовувати наведений нижче повний опір у системі прямої послідовності (також див. рисунок 8):

де c_{\max} — коефіцієнт напруги згідно з таблицею 1;
 U_n — номінальна напруга системи;
 U_{rG} — номінальна напруга генератора;
 Z_{GK} — скоригований надперехідний повний опір генератора;
 Z_G — надперехідний повний опір генератора в системі прямої послідовності: $Z_G = R_G + jX_d''$
 φ_{rG} — кут зсуву фаз між i та U_{rG} ;
 X_d — відносний надперехідний реактивний опір генератора, пов'язаний з номінальним повним опором: $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$ де $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$

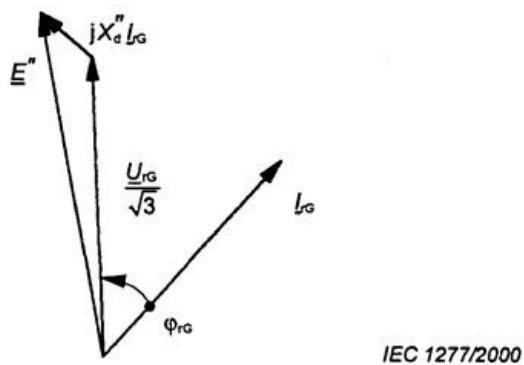


Рисунок 8 — Векторна діаграма синхронного генератора за номінальних умов

Використовують коригувальний коефіцієнт K_G (рівняння (18)) для обчислювання скоригованого надперехідного повного опору Z_{GK} (рівняння (17)), тому що замість електрорушійної сили E використовують еквівалентне джерело напруги $cU_n/\sqrt{3}$ після надперехідного реактивного опору синхронного генератора (відповідно до рисунка 8).

Наведені нижче значення уявних опорів R_{Gf} можна з достатнім ступенем точності використовувати для обчислювання максимальної сили струму короткого замикання.

$R_{Gf} = 0,05 X_d$ для генераторів з $U_{rG} > 1$ кВ і $S_{rG} > 100$ МВА;

$R_{Gf} = 0,07 X_d$ для генераторів з $U_{rG} > 1$ кВ і $S_{rG} < 100$ МВА;

$R_{Gf} = 0,15 X_d$ для генераторів з $U_{rG} < 1000$ В.

Окрім згасання сталого складника сили струму, коефіцієнти 0,05, 0,07 і 0,15 також враховують згасання змінного складника сили струму короткого замикання під час першого напівперіоду після виникнення короткого замикання. Вплив різних температур обмотки на R_{Gf} не розглядають.

Примітка. Значення R_a потрібно використовувати для обчислювання максимального струму короткого замикання. Ці значення не можна використовувати під час обчислювання аперіодичного складника i_{dc} сили струму короткого замикання згідно з рівнянням (64). Ефективний опір статора синхронних машин зазвичай значно нижче цих значень R_{sf} . У цьому разі потрібно використовувати значення R_a виробника.

Якщо напруга на клемі генератора відрізняється від U_{rG} , то може виникнути необхідність використання $U_G = U_{rG}(1 + p_G)$ замість U_{rG} для рівняння (18) під час обчислювання трифазних струмів короткого замикання.

$$\underline{Z}_{(2)GK} = K_G (R_{(2)G} + jX_{(2)G}) = K_G \underline{Z}_{(2)G} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d''). \quad (19)$$

Якщо значення X_d'' і X_q'' різні, то можна використовувати значення $X_{(2)G} = (X_d'' + X_q'')/2$.

Для повного опору короткого замикання синхронних генераторів у системі нульової послідовності використовують для наведеної нижче на основі рівняння (18):

$$\underline{Z}_{(0)GK} = K_G (R_{(0)G} + jX_{(0)G}). \quad (20)$$

Для повного опору короткого замикання синхронних генераторів у системі зворотної послідовності використовують таке з K_G на основі рівняння (18);

За наявності повного опору між нейтральною точкою зірки генератора та землею для цього повного опору не використовують коригувальний коефіцієнт K_0 .

Потреба в обчисленні мінімальної сили струму короткого замикання може виникнути через незбуджену роботу генераторів (умова низької навантаги в кабельних системах або в системах, які охоплюють довгі повітряні лінії електропередавання, водяні насосні станції). У цьому разі необхідно враховувати спеціальні вимоги, які виходять за рамки сфери застосування та процедури цього стандарту (відповідно до 2.2.1 IEC 60909-1).

3.6.2 Синхронні компенсатори та двигуни

Під час обчислювання початкової сили струму симетричного короткого замикання I_k'' , максимальної сили струму короткого замикання I_p , сили струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b та сили струму сталого короткого замикання I_k синхронні компенсатори розглядають аналогічно синхронним генераторам.

Якщо синхронні двигуни мають регулювання напруги, то їх розглядають аналогічно синхронним генераторам. Інакше вони підлягають додатковому вивченню.

3.7 Енергоблок станції

3.7.1 Енергоблоки станції з перемикачами відгалужень під навантагою

$$\underline{Z}_S = K_S (t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \quad (21)$$

з коригувальним коефіцієнтом:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{max}}{1 + |X_d'' - X_T| \sin \varphi_{rG}}, \quad (22)$$

Для обчислювання струмів короткого замикання енергоблоків станції (Б) з перемикачем відгалужень під навантагою використовують

наведене нижче рівняння для обчислювання повного опору цілого енергоблока станції щодо короткого замикання на високовольтній стороні одиничного трансформатора (відповідно до рисунка 11с):

де	Z_S	— скоригований повний опір енергоблока станції з перемикачем відгалужень під навантагою, пов'язаний з високовольтною стороною;
	Z_G	— надперехідний повний опір генератора $Z_G = R_G + jX_G$ (без коригувального коефіцієнта K_G);
	Z_{THV}	— повний опір одиничного трансформатора, пов'язаного з високовольтною стороною (без коригувального коефіцієнта K_T);
	U_{nQ}	— номінальна напруга системи в точці з'єднання лінії живлення енергоблока станції 0;
	U_{rG}	— номінальна напруга генератора;
	φ_{rG}	— кут зсуву фаз між I_{rG} і $U_{rG}/\sqrt{3}$;
	X''_d	— відносний надперехідний реактивний опір генератора, пов'язаний з номінальним повним опором: $X''_d = X''_d / Z_{rG}$, де $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$;
	X_T	— відносний реактивний опір одиничного трансформатора в нульовому положенні перемикача відгалужень під навантагою: $x_T = X_T / ((U_{rT}^2 / S_{rT}))$;
	t	— номінальний коефіцієнт трансформації одиничного трансформатора: $t = U_{rTHV} / U_{rTLV}$;

Якщо мінімальну робочу напругу $U_{Qmin}^b \geq U_{nQ}$ на високовольтній стороні одиничного трансформатора енергоблока станції встановлено на основі великого досвіду роботи системи, то в рівнянні (22) замість U_{nQ}^2 можна використовувати добуток $U_{nQ} \cdot U_{Qmin}^b$. Якщо, з іншого боку, потрібно визначити найвищу часткову силу струму короткого замикання енергоблока станції, то замість U_{Qmin}^b потрібно використовувати U_{nQ} , тобто потрібно вибрати рівняння (22).

Передбачається, що робоча напруга на клеммах генератора дорівнює U_{rG} . Якщо напруга U_G постійно вища, ніж U_{rG} , то потрібно використовувати $U_{Gmax} = U_{rG} (1 + p_G)$ замість наприклад, для обчислювання $p_G = 0,05$.

Якщо очікується лише перезбуджена робота, то для обчислювання сили струму несиметричних коротких замикань потрібно використовувати коригувальний коефіцієнт K_3 з рівняння (22) для повного опору системи прямої та зворотної послідовності енергоблока станції. Коригувальний коефіцієнт K_3 також використовують для повного опору системи нульової послідовності енергоблока станції, за винятком складника повного опору між нейтральною точкою зірки трансформатора та землею (якщо є).

Якщо протягом деякого часу очікується недозбуджена робота енергоблока станції (наприклад, великі гідроелектростанції), то застосування K_3 згідно з рівнянням (22) лише під час обчислювання сили струму несиметричного короткого замикання із замиканням на землю (відповідно до рисунків 3с і 3д) може вплинути на отримані результати. У цьому разі необхідно провести спеціальне вивчення, наприклад, методом накладання.

Під час обчислювання часткової сили струму короткого замикання I''_{kS} на високовольтній стороні одиничного трансформатора чи під час обчислювання повної сили струму в точці короткого замикання на високовольтній стороні енергоблока станції не потрібно враховувати вплив I''_{kS} двигунів, з'єднаних із допоміжним трансформатором, на коротке замикання.

Примітка. У таких випадках IEC 60909-4 надає довідкову інформацію для користувачів.

3.7.2 Енергоблоки станції без перемикача відгалужень під навантагою

Для обчислювання струмів короткого замикання енергоблоків станції (БО) без перемикача відгалужень під навантагою використовують наведене нижче рівняння для обчислювання повного опору цілого енергоблока станції щодо короткого замикання на високовольтній стороні одиничного трансформатора (відповідно до рисунка 11с):

$$Z_{SO} = K_{SO} (t^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (23)$$

з коригувальним коефіцієнтом:

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1+p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{C_{max}}{1 + X''_d \sin \varphi_{rG}}, \quad (24)$$

де Z_{SO} — скоригований повний опір енергоблока станції без перемикача відгалужень під навантагою на високовольтній стороні, пов'язаний з високовольтною стороною;

Z_G — надперехідний повний опір генератора $Z_G = R_G + jX''_d$ (без коригувального коефіцієнта X_c);

Z_{THV} — повний опір одиничного трансформатора, пов'язаний з високовольтною стороною (без коригувального коефіцієнта K_T);

U_{nQ} — номінальна напруга системи в точці з'єднання лінії живлення енергоблока станції 0;

U_{rG} — номінальна напруга генератора; $U_{Gmax} = U_{rG} (1 + p_G)$, наприклад, з p_G — від 0,05 до 0,10;

φ_{rG} — кут зсуву фаз між I_{rG} і $U_{rG}/\sqrt{3}$ (відповідно до 3.6.1);

X_d — відносний надперехідний реактивний опір генератора, пов'язаний з номінальним повним опором: $x''_d = X''_d / Z_{rG}$, де $Z_{rG} = Z_G = U_{rG}^2 / S_{rG}$;

t — номінальний коефіцієнт трансформації одиничного трансформатора: $t = U_{rTHV} / U_{rTLV}$;

$1 \pm p_T$ треба використовувати, якщо в одиничного трансформатора є перемикач відгалуження без навантаж, і якщо одне з цих відгалужень постійно використовують. Інакше потрібно використовувати $1 \pm p_T = 1$. Якщо потрібно визначити найвищу часткову силу струму короткого замикання енергоблока станції з відгалуженнями без навантаги, то треба вибирати $1 - p_T$.

Для обчислювання сили струму несиметричних коротких замикань треба використовувати коригувальний коефіцієнт K_{50} з рівняння

(24) для повних опорів системи прямої та зворотної послідовності енергоблока станції. Кориговальний коефіцієнт K_{50} також використовують для повного опору системи нульової послідовності енергоблока станції, за винятком складника повного опору між нейтральною точкою зірки трансформатора та землею.

Кориговальний коефіцієнт не залежить від перезбудження чи недозбудження генератора до короткого замикання.

Під час обчислювання часткового струму короткого замикання $I'_{к30}$ на високовольтній стороні одиничного трансформатора чи під час обчислювання повного струму короткого замикання в точці короткого замикання на високовольтній стороні енергоблока станції не потрібно враховувати вплив струму о двигунів, з'єднаних із допоміжним трансформатором, на коротке замикання.

3.8 Асинхронні двигуни

3.8.1 Загальні положення

Середньовольтні та низьковольтні двигуни впливають на початкову силу струму симетричного короткого замикання I'' , на максимальну силу струму короткого замикання I_p , на силу струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b , на несиметричні короткі замикання, а також на силу струму сталого короткого замикання I_k .

Середньовольтні двигуни треба враховувати під час обчислювання максимальної сили струму короткого замикання (відповідно до 2.4 і 2.5). Низьковольтні двигуни використовують для власних потреб електростанції, в промислових і аналогічних їм установках, наприклад у мережах хімічної та сталеливарної промисловості й на гідроелектростанціях.

Впливом асинхронних двигунів у низьковольтних системах електроживлення на силу струму короткого замикання I_k можна знехтувати, якщо цей внесок не перевищує 5 % від початкової сили струму короткого замикання I''_M , розрахованої без двигунів.

$$\Sigma I_{гМ} = 0,01 I''_{кМ}, \quad (25)$$

де $\Sigma I_{гМ}$ — сума номінальних сил струму двигунів, безпосередньо (без трансформаторів) з'єднаних із мережею, в якій відбувається коротке замикання;

I''_M — початкова сила струму симетричного короткого замикання без впливу двигунів.

Під час обчислювання сили струму короткого замикання середньо- і низьковольтні двигуни можна не враховувати за умови, що згідно з електричною схемою (блокування) чи згідно з процесом (реверсивний привід) їх не вмикають одночасно.

Повний опір $Z_M = R_M + jX_M$ асинхронних двигунів у системах прямої та зворотної послідовності можна визначити за наведеною нижче формулою:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{гМ}} \cdot \frac{U_{гМ}}{\sqrt{3} I_{гМ}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{гМ}} \cdot \frac{U_{гМ}^2}{S_{гМ}}, \quad (26)$$

де $U_{гМ}$ — номінальна напруга двигуна;

$I_{гМ}$ — номінальна сила струму двигуна;

$S_{гМ}$ — номінальна позірна потужність двигуна ($S_{гМ} = P_{гМ}/(\eta_{гМ} \cos \varphi_{гМ})$);

$I_{LR}/I_{гМ}$ — співвідношення сили струму загальмованого ротора до номінальної сили струму двигуна.

Якщо R_M/X_M відомо, то X_M можна розрахувати так:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}}. \quad (27)$$

Наведені нижче відношення можна використовувати з достатнім ступенем точності:

$R_M/X_M = 0,10$ з $X_M = 0,995 Z_M$ для середньовольтних двигунів потужністю $P_{гМ}$ на пару полюсів > 1 МВт;

$R_M/X_M = 0,15$ з $X_M = 0,989 Z_M$ для середньовольтних двигунів потужністю $P_{гМ}$ на пару полюсів < 1 МВт;

$R_M/X_M = 0,42$ з $X_M = 0,922 Z_M$ для низьковольтних груп двигунів із сполучними кабелями.

Для обчислювання початкових сил струму короткого замикання згідно з 4.2 асинхронні двигуни замінюють на повні опори z_M згідно з рівнянням (26) у системах прямої та зворотної послідовності. Повний опір системи нульової послідовності $2_{гМ}$ двигуна надає за необхідності виробник (відповідно до 4.7).

3.8.2 Вплив асинхронних двигунів на струми короткого замикання

Середньо- і низьковольтні двигуни, приєднані двообмотковими трансформаторами до мережі, в якій відбувається коротке замикання, можна не враховувати в обчислюваннях сили струму короткого замикання у разі короткого замикання в точці з'єднання лінії живлення О (відповідно до рисунка 9), якщо:

$$\frac{\Sigma P_{гМ}}{\Sigma S_{гТ}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c100 \Sigma S_{гТ}}{\sqrt{3} U_{нД} I''_{кД}} - 0,3 \right|}, \quad (28)$$

де $\Sigma R_{гМ}$ — сума номінальних активних потужностей середньо- і низьковольтних двигунів;

- $\Sigma S_{\Gamma\Gamma}$ — сума номінальних повних потужностей всіх трансформаторів, через які безпосередньо живляться двигуни;
 I''_{kQ} — початкова сила струму симетричного короткого замикання в точці з'єднання лінії живлення Q без додавання двигунів;
 U_{nQ} — номінальна напруга системи в точці з'єднання лінії живлення Q.

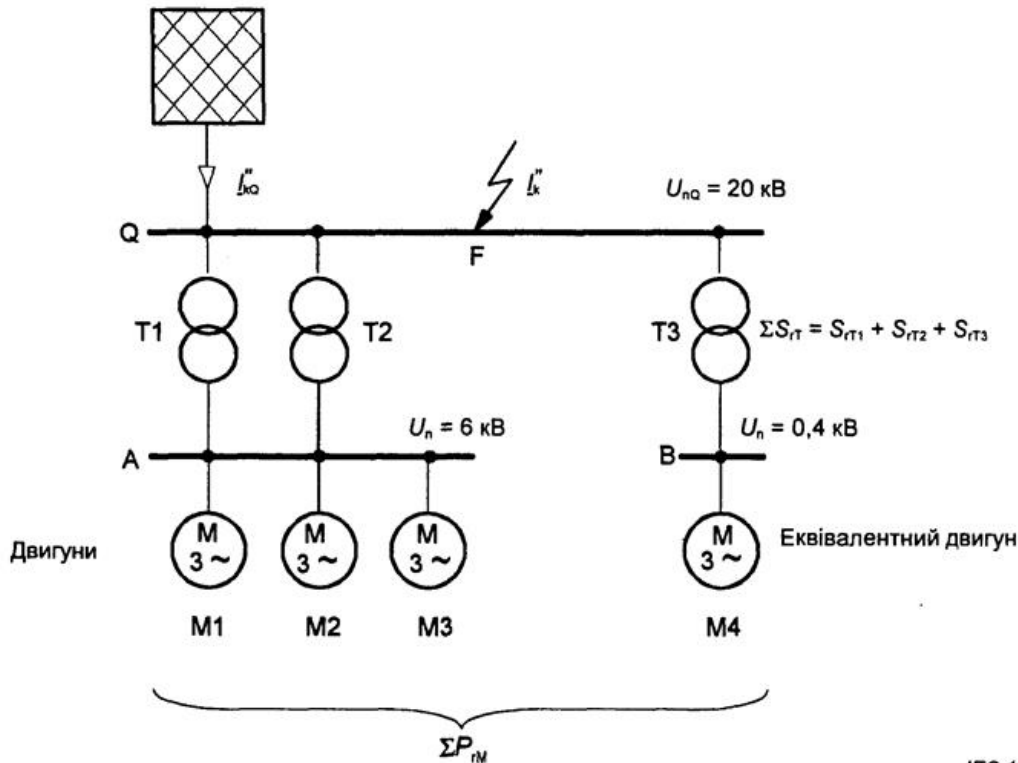


Рисунок 9 — Приклад для оцінювання впливу асинхронних двигунів на повну силу струму короткого замикання

Низьковольтні двигуни зазвичай з'єднані із шиною електроживлення кабелями різної довжини та поперечним перетином. Для спрощення обчислення групи двигунів, охоплюючи сполучні кабелі, можна з'єднати в один еквівалентний двигун (відповідно до двигуна M4 на рисунку 9).

Для цих еквівалентних асинхронних двигунів, охоплюючи сполучні кабелі, використовують таке:

Z_M — повний опір згідно з рівнянням (26);

I_{rM} — суму номінальних сил струму всіх двигунів у групі двигунів (еквівалентний двигун);

$I_{LR} I_{rM} \sim 5$;

$P_M / X_M = 0,42$, приведений до $k_M = 1,3$;

$P_M / p = 0,05$ МВт, якщо точно нічого не відомо, де p — кількість пар полюсів.

Для короткого замикання на шині В на рисунку 9 частковою силою струму короткого замикання групи низьковольтних двигунів M4 можна знехтувати за дотримання умови $< 0,01 / \text{ктз}$ — I_{rM} — номінальна сила струму еквівалентного двигуна M4. I''_{T3} — початкова сила струму симетричного короткого замикання на низьковольтній стороні трансформатора T3 під час короткого замикання на В без впливу еквівалентного двигуна M4.

У разі короткого замикання на середньовольтній стороні (наприклад, в точці короткого замикання О або А на рисунку 9) можна спростити обчислення Z_M згідно з рівнянням (26), наприклад, з використанням номінальної сили струму трансформатора T3 (I_{T3LV}) на рисунку 9 замість номінальної сили струму I_{rM} еквівалентного двигуна M4.

Оцінювання згідно з рівнянням (28) не дозволено у разі триобмоткових трансформаторів.

3.9 Статичні конвертори

Реверсивні статичні приводи з живленням від конвертора (наприклад, приводи прокатного стану) розглядають лише для трифазних коротких замикань, якщо ротаційні маси двигунів і статичного усталювання забезпечують зворотне передавання енергії, щоб зменшити швидкість (робота від інвертора в умовах перехідних процесів) під час короткого замикання. Потім вони впливають лише на початкову силу струму симетричного короткого замикання i'' і на максимальну силу струму короткого замикання I_p . Вони не впливають на силу струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b та силу струму сталого короткого замикання I_k .

У результаті реверсивні статичні приводи з живленням від конвертора використовують для обчислювання струмів короткого замикання аналогічно асинхронним двигунам. Для цього використовують таке:

Z_M — повний опір згідно з рівнянням (26);

U_{rM} — номінальну напругу статичного перетворювального трансформатора на стороні мережі чи номінальну напругу статичного конвертора, якщо трансформатора немає;

I_{rM} — номінальну силу струму статичного перетворювального трансформатора на стороні

мережі чи номінальну силу струму статичного конвертора, якщо трансформатора немає;

$$I_{LR}/I_{RM} \geq 3;$$

$$R_M/X_M = 0,10 \text{ з } X_M = 0,9952 \text{ м.}$$

Усі інші статичні конвертори не враховують під час обчислювання сили струму короткого замикання згідно з цим стандартом.

3.10 Конденсатори та необертові навантаги

Методи обчислювання, описані в розділі 2, дають змогу не враховувати ємнісні опори мережі, паралельну повну провідність і необертові навантаги, як вказано в 2.3.2, за винятком системи нульової послідовності.

Незважаючи на час виникнення короткого замикання, силою струму розряду шунтувальних конденсаторів можна нехтувати під час обчислювання максимальної сили струму короткого замикання.

Вплив послідовних конденсаторів можна опустити під час обчислювання сили струму короткого замикання, якщо вони оснащені пристроями, які обмежують напругу, в паралелі, які спрацьовують під час виникнення короткого замикання.

У разі високовольтної системи передавання постійного струму потрібно звернути особливу увагу на батареї конденсаторів і фільтри під час обчислювання сили струму короткого замикання змінного струму.

4 ОБЧИСЛЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

4.1 Загальні положення

У разі віддаленого від генератора короткого замикання струм короткого замикання можна розглядати як суму двох таких складників:

- змінний складник струму із сталою амплітудою протягом всього короткого замикання,
- аперіодичний сталий складник струму, починаючи з початкового значення A і згасаючи до нуля.

На рисунку 1 схематично зображено звичайний курс струму короткого замикання у разі віддаленого від генератора короткого замикання. Симетричні змінні струми I''_k , I''_b та I_k є дійовими значеннями та майже однакові за своїм значенням.

Короткі замикання з однією лінією живлення від трансформатора згідно з рисунком 4 можна наперед розраховувати як віддалені від генератора короткі замикання, якщо $X_{TLVK} > 2X_{Qt}$, з X_{Qt} , розрахованим відповідно до 3.2, і $X_{TLVK} = K_T X_{TLV}$ відповідно до 3.3.

У разі короткого замикання поблизу генератора струм короткого замикання можна розглядати як суму двох таких складників:

- змінний складник струму з амплітудою, що запізнюється, протягом короткого замикання,
- аперіодичний сталий складник струму, починаючи з початкового значення A і згасаючи до нуля.

Під час обчислювання сили струму короткого замикання в системах, які живляться від генераторів, енергоблоків станції і двигунів (короткі замикання поблизу генератора та далеко від двигуна), потрібно не лише знати початкову силу струму симетричного короткого замикання I_k і максимальну силу струму короткого замикання I_p , але і силу струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b та силу струму сталого короткого замикання I_k . У цьому разі сила струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b менша за початкову силу струму симетричного короткого замикання I'' . Зазвичай сила струму сталого короткого замикання I_k менша за силу струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b .

У короткому замиканні поблизу генератора струм короткого замикання зазвичай поводить себе як показано на рисунку 2. У деяких особливих випадках може відбутися так, що сила струму згаслого короткого замикання досягає значення нуля вперше через декілька циклів після виникнення короткого замикання. Це стає можливим, якщо стала часу постійного струму синхронної машини більша за надперехідну сталу часу. Це явище не розглядають у цьому стандарті.

Згасавий аперіодичний складник $i_{d.c.}$ струму короткого замикання може бути розрахований згідно з 4.4.

Для обчислювання початкової сили струму симетричного короткого замикання можна допустити,

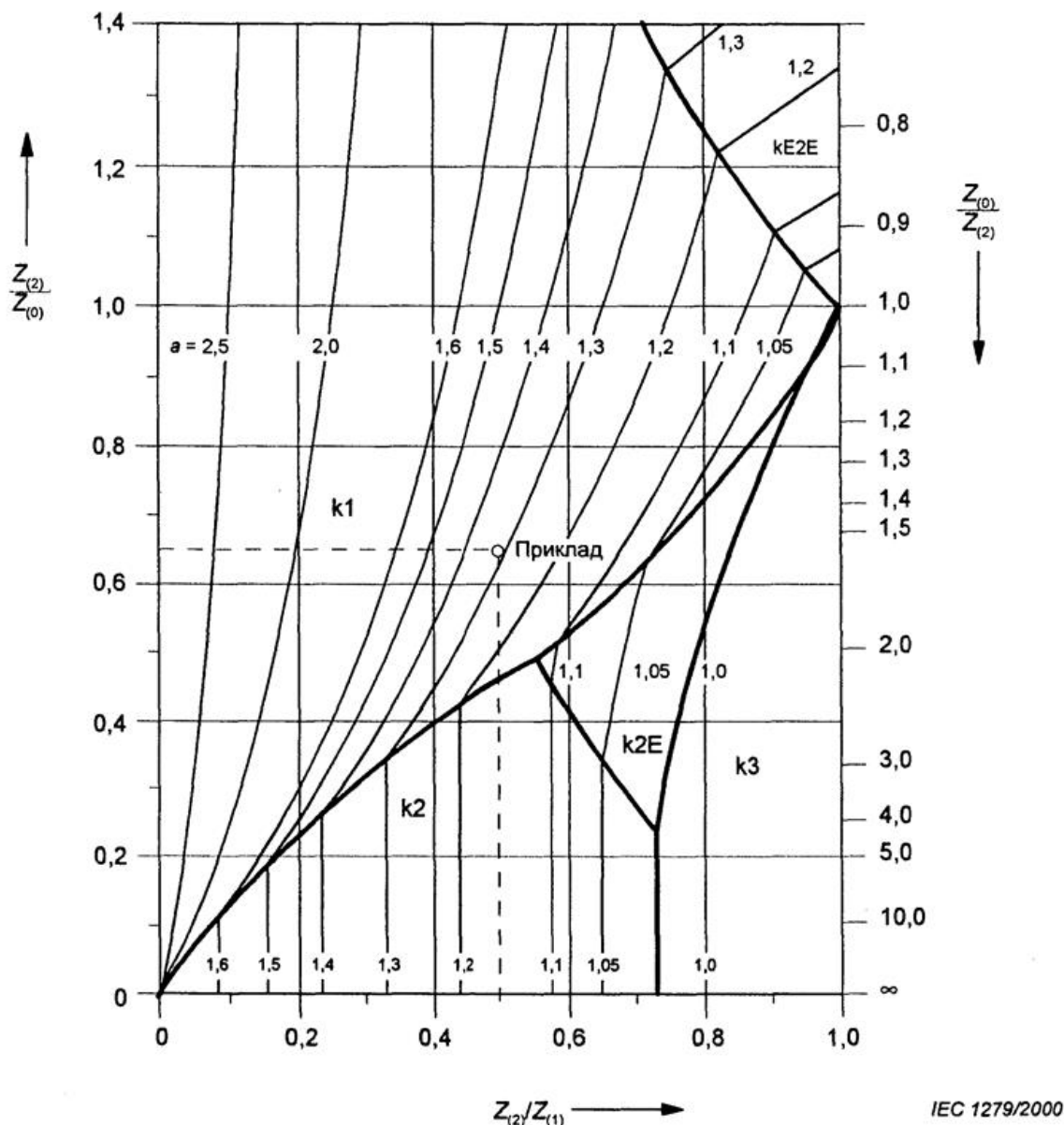
Вид короткого замикання, що призводить до найвищої сили струму короткого замикання, залежить від значень повних опорів короткого замикання прямої, зворотної та нульової послідовності системи. На рисунку 10 зображено цей особливий випадок, коли $Z_{(0)}$, $Z_{(1)}$ і $Z_{(2)}$ мають однаковий кут повного опору. Цей рисунок має довідковий характер, і його не треба використовувати замість обчислення.

Для обчислювання початкової сили струму симетричного короткого замикання I_k , сили струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b та сили струму сталого короткого замикання I_k в точці короткого замикання систему можна перетворити з використанням трансформації мережі в еквівалентний повний опір короткого замикання $2u$ у точці короткого замикання. Цю процедуру не використовують під час обчислювання максимальної сили струму короткого замикання I_p . У цьому разі необхідно розділити мережі з паралельними відгалуженнями та мережі без них (відповідно до 4.3.1.1 і 4.3.1.2).

У разі використання запобіжників або струмообмежувальних автоматичних вимикачів для захисту підстанцій спочатку розраховують початкову силу струму короткого замикання, наче цих пристроїв немає. На основі підрахованої початкової сили струму короткого замикання і характеристичних кривих запобіжників або струмообмежувальних автоматичних вимикачів визначають силу струму вимкнення, що є максимальною силою струму короткого замикання використовуваної підстанції.

Короткі замикання мають один або декілька джерел, як показано на рисунках 11, 12 і 14. Обчислення найпростіші для симетричних коротких замикань у радіальних системах, оскільки окремий вплив на симетричне коротке замикання можна розрахувати окремо для кожного джерела (рисунок 12 або 13).

Якщо джерела розосереджені в замкненій електромережі, як показано на рисунку 14, у всіх випадках несиметричного короткого замикання з використанням трансформації мережі необхідно розрахувати повні опори короткого замикання $Z_{(1)}$ - $Z_{(1)}$ та $Z_{(0)}$ у точці



$a = \frac{\text{струм несиметричного короткого замикання}}{\text{струм трифазного короткого замикання}}$

Приклад:

$\left. \begin{array}{l} Z_{(2)}/Z_{(1)} = 0,5 \\ Z_{(2)}/Z_{(0)} = 0,65 \end{array} \right\} \text{Одиничне коротке замикання дає вищий струм короткого замикання}$

Рисунок 10 — Діаграма для визначення типу короткого замикання (див. рисунок 3) для найвищого струму короткого замикання, що стосується струму симетричного трифазного короткого замикання в точці короткого замикання, якщо аргументи повного опору послідовності $Z_{(1)}$, $Z_{(2)}$, $Z_{(0)}$ ідентичні

4.2 Початкова сила струму симетричного короткого замикання I''_k

Зазвичай, якщо $Z_{(0)}$ більше ніж $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ то найвищий початковий струм короткого замикання протікає для трифазного короткого замикання. Проте для короткого замикання поблизу трансформаторів із низьким повним опором нульової послідовності $Z_{(0)}$ може бути менше за $Z_{(1)}$. У такому разі вищий початковий струм короткого замикання I''_{E2E} протікатиме для міжфазного короткого замикання із замиканням на землю (відповідно до рисунка 11 для $Z_{(2)}/Z_{(1)}=1$ і $Z_{(2)}/Z_{(1)}>1$, де $Z_{(2)}=Z_{(1)}$)

4.2.1 Трифазне коротке замикання

Зазвичай початкову силу струму симетричного короткого замикання I''_k розраховують за рівнянням (29) з еквівалентним джерелом напруги $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ в точці короткого замикання і з повним опором короткого замикання $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$.

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (29)$$

Еквівалентне джерело напруги $cU_n/\sqrt{3}$ використовують у точці короткого замикання (відповідно до рисунка 4) з коефіцієнтом c із таблиці 1.

4.2.1.1 Коротке замикання із живленням від одного джерела

Для віддаленого від генератора короткого замикання з живленням від одного джерела (відповідно до рисунка 11а) силу струму короткого замикання розраховують за рівнянням (29):

$$R_k = R_{Qt} + R_{TK} + R_L; \quad (30)$$

$$X_k = X_{Qt} + X_{TK} + X_L, \quad (31)$$

де R_k і X_k -- сума послідовно з'єднаних опорів і реактивних опорів системи прямої послідовності відповідно до рисунка 11а;

R_L -- опір лінії для температури проводів 20 °С під час обчислювання максимальних струмів короткого замикання.

Скоригований повний опір трансформатора $Z_{TK} = R_{TK} + jX_{TK} = K_T(R_T + jX_T)$ розраховують на основі рівнянь від (7) до (9) або від (10) до (11) з коригувальним коефіцієнтом K , з рівняння (12) або (13).

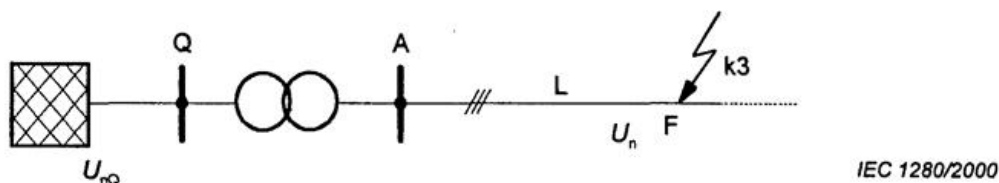


Рисунок 11а — Коротке замикання із живленням від мережної лінії живлення через трансформатор

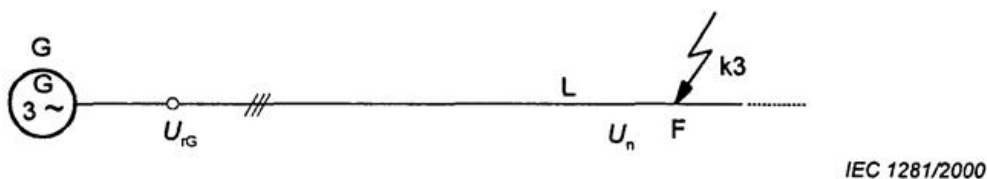


Рисунок 11b — Коротке замикання із живленням від одного генератора (без одиничного трансформатора)

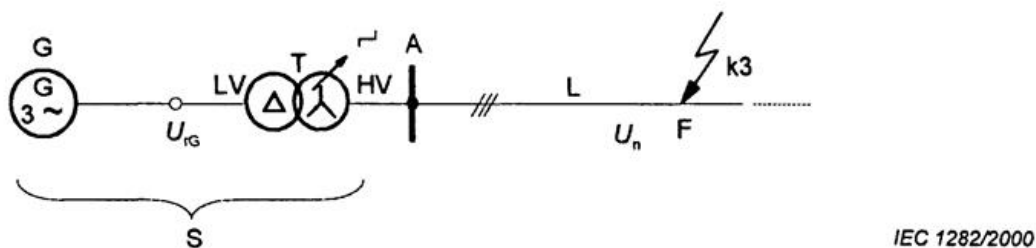


Рисунок 11с — Коротке замикання із живленням від одного енергоблока станції (генератор і одиничний трансформатор з перемикачем відгалужень під навантагою чи без нього)

Рисунок 11 — Приклади коротких замикань із живленням від одного джерела

Опорами R_k менше за $0,3 \cdot X_k$ можна знехтувати. Повний опір мережної лінії живлення $Z_{0l} = Y_0 + jX_{Qt}$ залежить від напруги сторони трансформатора, з'єднаної з точкою короткого замикання. (У випадку, зображеному на рисунку 4, наприклад, на низьковольтній стороні).

Для прикладів на рисунках 11b і 11c початкову силу струму симетричного короткого замикання розраховують послідовно з використанням виправленого повного опору генератора й енергоблока станції (відповідно до 3.6.1 і 3.7) з повним опором лінії $Z_L = R_L + jX_L$. Повні опори короткого замикання для прикладів на рисунках 11b і 11c подані з використанням таких рівнянь:

Приклад на рисунку 11b:
$$Z_k = Z_{GK} + Z_L = K_G(R_G + jX''_d) + Z_L \quad (32)$$

Приклад на рисунку 11c:
$$Z_k = Z_S + Z_L = K_S(t_r^2 Z_G + Z_{THV}) + Z_L \quad (33)$$

Z_{GK} визначають на основі рівняння (17), Z_S — рівняння (21) або (23) з K_S або K_{SO} згідно з рівнянням (22) або (24). Повний опір генератора потрібно перенести на високовольтну сторону з використанням номінального коефіцієнта трансформації i_r . Повний опір одиничного трансформатора $Z_{THV} = R_{THV} + jX_{THV}$ згідно з рівняннями від (7) до (9) без K_T відноситься до високовольтної сторони.

4.2.1.2 Короткі замикання із живленням від незамкнених електромереж

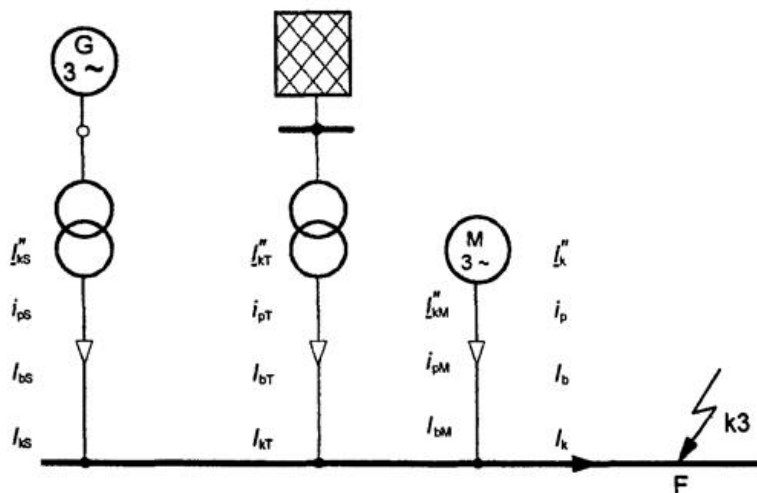
За наявності більше одного джерела, що впливає на струм короткого замикання, якщо ці джерела незамкнені, як показано, наприклад, на рисунку 12, то початкова сила струму симетричного короткого замикання I_k у точці короткого замикання Р дорівнює сумі сил струмів короткого замикання індивідуальних відгалужень. Окрему силу струму короткого замикання відгалуження можна розрахувати як незалежну силу струму трифазного короткого замикання від одного джерела згідно з рівнянням (29) і згідно з інформацією, поданою в 4.2.1.1.

Початкова сила струму короткого замикання в точці короткого замикання F дорівнює векторній сумі окремих часткових сил струму короткого замикання (відповідно до рисунка 12):

$$I_k'' = \sum I_{ki}'' \quad (34)$$

Дотримуючись вимог цього стандарту, часто достатнім є визначення струму короткого замикання в точці короткого замикання Р як суми абсолютних величин індивідуальних часткових струмів короткого замикання.

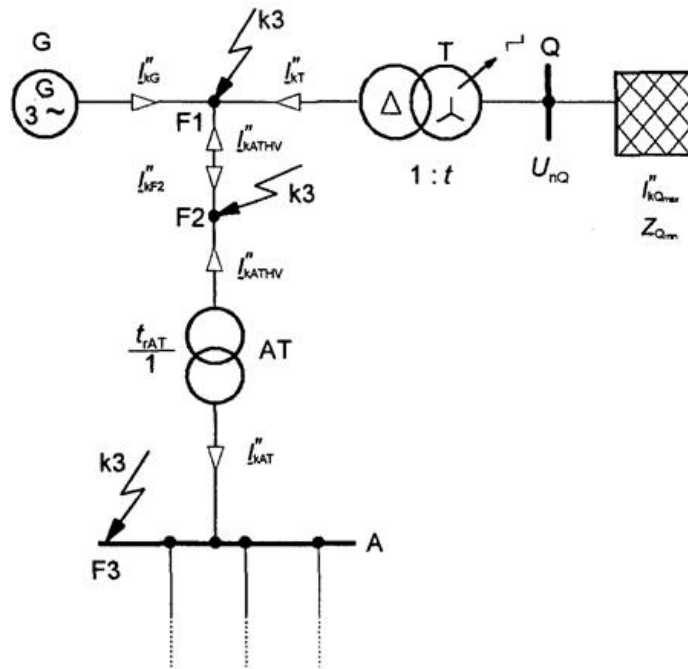
Зазвичай кращим є обчислення згідно з 4.2.1.5 для замкнених електромереж, особливо під час використання цифрових програм.



IEC 1283/2000

Рисунок 12 — Приклад незамкненої електромережі

4.2.1.3 Струми короткого замикання в енергоблоці станції з перемикачем відгалужень під навантагою



IEC 1284/2000

Рисунок 13 — Струми короткого замикання та часткові струми короткого замикання для трифазних коротких замикань між генератором і одиничним трансформатором з перемикачем відгалужень під навантагою чи без нього або в з'єднанні з допоміжним трансформатором енергоблока станції й на допоміжній шині А

Для обчислювання часткових сил струму короткого замикання I''_{kG} і I''_{kT} з коротким замиканням в точці F1 на рисунку 13 у разі енергоблока станції з перемикачем відгалужень під навантагою, часткові початкові сили струму симетричного короткого замикання розраховують за формулою:

$$I''_{kG} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}K_{G,S}Z_G} \quad (35)$$

3

$$K_{G,S} = \frac{c_{max}}{1 + x''_d \sin \varphi_{rG}}; \quad (36)$$

$$I''_{kT} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \left| Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin} \right|}, \quad (37)$$

- де Z_G -- надперехідний повний опір генератора $Z_G = R_G + jX''_d$
 x''_d -- надперехідний реактивний опір, що стосується номінального повного опору: $x''_d = X_d/Z_{rG}$ з $Z_{rG} = U_{rG}^2/S_{rG}$
 X_{TLV} -- повний опір короткого замикання трансформатора, що стосується низьковольтної сторони згідно з 3.3.1 і з рівняннями від (7) до (9);
 t_r -- номінальний коефіцієнт трансформації;
 Z_{Qmin} -- мінімальне значення повного опору мережної лінії живлення згідно з I''_{kQmax}

Для обчислювання I''_{kQmax} потрібно використовувати максимально можливе значення впродовж всього ресурсу енергоблока станції.

Для обчислювання часткової сили струму короткого замикання C_2 у точці короткого замикання E2, наприклад, в місці з'єднання з високовольтною стороною допоміжного трансформатора АТ на рисунку 13, досить узяти таке:

$$I_{KF2}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{K_{G,S}Z_G} + \frac{1}{K_{T,S}Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2}Z_{Qmin}} \right) = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_{rsi}} \quad (38)$$

3

$$K_{T,S} = \frac{C_{max}}{1 - x_T \sin \varphi_{rG}} \quad (39)$$

і K_{GS} згідно з рівнянням (36).

Якщо в одиничного трансформатора є перемикач відгалужень під навантагою на високовольтній стороні, передбачається, що робоча напруга на клеммах генератора дорівнює U_{rG} . Якщо навіть у цьому разі діапазон напруги генератора $U_G = U_{rG}(1+p_G)$ використовують постійно, то треба застосовувати рівняння від (40) до (44) замість від (35) до (39).

Повне коротке замикання в точці F1 або F2 (рисунок 13) визначають додаванням часткової сили струму короткого замикання I_{KATHV}'' від середньо- і низьковольтних допоміжних двигунів енергоблока станції.

4.2.1.4 Струми короткого замикання в енергоблоці станції без перемикача відгалужень під навантагою

$$I_{KG}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}K_{G,SO}Z_G} \quad (40)$$

3

$$K_{G,SO} = \frac{1}{1 + p_G} \cdot \frac{C_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (41)$$

$$I_{KT}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \left| Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin} \right|} \quad (42)$$

Для обчислювання Z_G , x_d'' , Z_{TLV} , t_r і Z_{Qmin} див. 4.2.1.3.

Часткову силу струму короткого замикання I_{KF2}'' на рисунку 13 можна розрахувати так:

$$I_{KF2}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{K_{G,SO}Z_G} + \frac{1}{K_{T,SO}Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2}Z_{Qmin}} \right) = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_{rsi}} \quad (43)$$

3

$$K_{T,SO} = \frac{1}{1 + p_G} \cdot \frac{C_{max}}{1 - x_T \sin \varphi_{rG}} \quad (44)$$

Для енергоблоків станції без перемикача відгалужень під навантагою для одиничного трансформатора часткові початкові сили струму симетричного короткого замикання, показані на рисунку 13, обчислюють так:

і K_{GSO} згідно з рівнянням (41).

Повний опір Z_{rsi} в рівнянні (38) або (43) використовують для визначання часткової сили струму короткого замикання I_{KAT}'' на рисунку 13 для короткого замикання в точці F3. Повний опір допоміжного трансформатора АТ на рисунку 13 потрібно виправити з використанням K_T з 3.3.3.

Повне коротке замикання в точці F1 або F2 (рисунок 13) визначають додаванням часткової сили струму короткого замикання I_{KATHV}'' від середньо- і низьковольтних допоміжних двигунів енергоблока станції.

4.2.1.5 Короткі замикання в замкнених електромережах

У замкнених електромережах, як наприклад на рисунку 14, зазвичай необхідно визначати повний опір короткого замикання $Z_K = Z_{(1)}$ з використанням трансформації мережі (послідовне з'єднання, паралельне з'єднання та трансформації з'єднання трикутник—зірка, наприклад), використовуючи повні опори короткого замикання електроустановки прямої послідовності (відповідно до розділу 3).

Повні опори в системах, приєднаних через трансформатори до системи, в якій відбувається коротке замикання, потрібно перетворити з використанням квадрата номінального коефіцієнта трансформації. Якщо між двома системами є декілька трансформаторів із номінальним коефіцієнтом трансформації (t_{T1} і $t_{T1} \dots t_{T1}$), що трохи відрізняється, то потрібно використовувати їхнє середньо-арифметичне значення.

Початкову силу струму симетричного короткого замикання треба розраховувати з використанням еквівалентного джерела напруги $cU_n/\sqrt{3}$ у місці короткого замикання, використовуючи рівняння (29).

4.2.2 Міжфазне коротке замикання

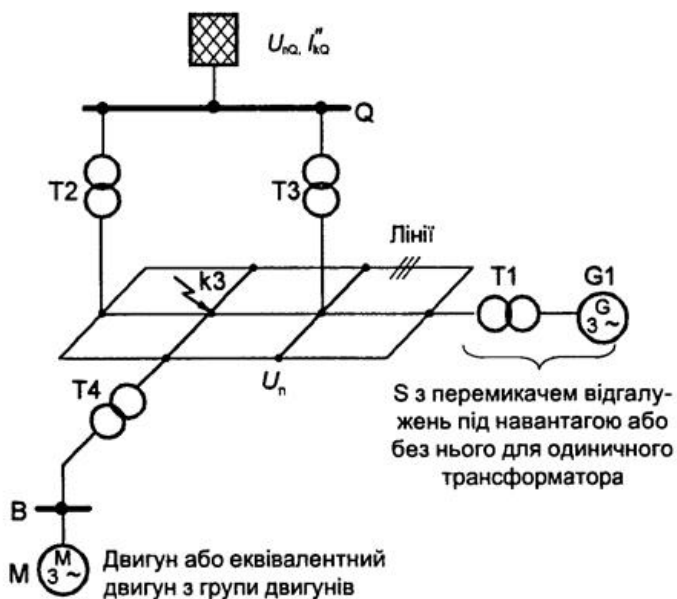
У разі міжфазного короткого замикання згідно з рисунком 3b початкову силу струму короткого замикання потрібно розраховувати за такою формулою:

$$I_{K2}'' = \frac{cU_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_K'' \quad (45)$$

Під час початкової стадії короткого замикання зворотний повний опір приблизно дорівнює повному опору прямої послідовності

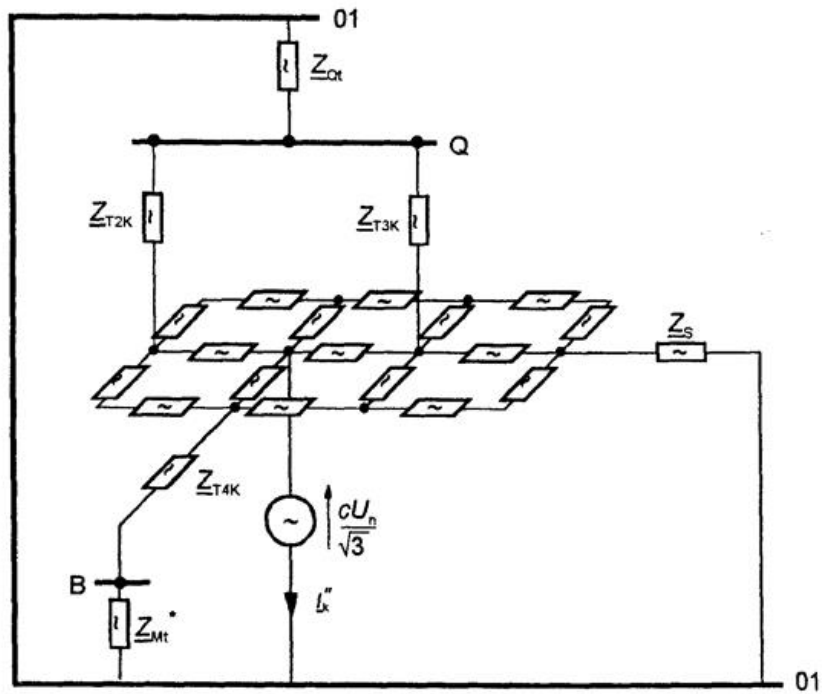
незалежно від того, яке це коротке замикання: поблизу генератора чи віддалене від генератора. Тому в рівнянні (45) можна використовувати $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

Лише під час перехідної чи усталеної стадії повний опір короткого замикання $\underline{Z}_{(2)}$ відрізняється від $\underline{Z}_{(1)}$, якщо коротке замикання відбувається поблизу генератора (відповідно до рисунка 10).



IEC 1285/2000

Рисунок 14а — Схема системи



IEC 1286/2000

* Z_{mt} — повний опір двигуна чи еквівалентний двигун з групи двигунів.

Рисунок 14b — Еквівалентна принципова схема для обчислювання з еквівалентним джерелом напруги $cU_n/\sqrt{3}$ у точці короткого замикання

Рисунок 14 — Приклад замкненої електромережі із живленням від кількох джерел

4.2.3 Міжфазне коротке замикання із замиканням на землю

Для обчислювання початкових сил струму симетричного короткого замикання необхідно розрізняти струми I''_{k2EL2} , I''_{k2EL3} та I''_{kE2E} (відповідно до рисунка 3с).

Для віддалених від генератора коротких замикань $Z_{(2)}$ приблизно дорівнює $Z_{(1)}$. Якщо в цьому разі $Z_{(0)}$ менше за $Z_{(2)}$, то зазвичай струм I''_{kE2E} у міжфазному короткому замиканні із замиканням на землю — найбільший з усіх початкових сил струму симетричного короткого замикання I'' , I''_{k2} , I''_{k2e} та I''_{k1} (відповідно до рисунка 10).

Рівняння (46) і (47) наведено для обчислювання I''_{k2EL2} і I''_{k2EL3} на рисунку 3с:

$$I''_{k2EL2} = -jcU_n \frac{Z_{(0)} - aZ_{(2)}}{Z_{(1)}Z_{(2)} + Z_{(1)}Z_{(0)} + Z_{(2)}Z_{(0)}}, \quad (46)$$

$$I''_{k2EL3} = jcU_n \frac{Z_{(0)} - a^2Z_{(2)}}{Z_{(1)}Z_{(2)} + Z_{(1)}Z_{(0)} + Z_{(2)}Z_{(0)}}. \quad (47)$$

Початкову силу струму короткого замикання I''_{kE2E} , що протікає до землі та/чи уземлених проводів згідно з рисунком 3с, обчислюють так:

$$I''_{kE2E} = -\frac{\sqrt{3}cU_n Z_{(2)}}{Z_{(1)}Z_{(2)} + Z_{(1)}Z_{(0)} + Z_{(2)}Z_{(0)}}. \quad (48)$$

Для віддаленого від генератора короткого замикання з $Z_{(2)} = Z_{(1)}$ в результаті цих рівнянь виходять абсолютні значення:

$$I''_{k2EL2} = cU_n \frac{|Z_{(0)}/Z_{(1)} - a|}{|Z_{(1)} + 2Z_{(0)}|}, \quad (49)$$

$$I''_{k2EL3} = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - a^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|}, \quad (50)$$

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|}. \quad (51)$$

4.2.4 Коротке замикання фаза—земля

Початкову силу струму короткого замикання фаза—земля I_{k1} на рисунку 3еї обчислюють так:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}}. \quad (52)$$

Для віддаленого від генератора короткого замикання з $2^\wedge - 2^\wedge$ обчислюють абсолютні значення за формулою:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|}. \quad (53)$$

Якщо $\underline{Z}_{(0)}$ менше за $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$, то початкова сила струму короткого замикання фаза—земля I''_{k1} буде більша, ніж сила струму трифазного короткого замикання I'' , але менша, ніж I''_{kE2E} (відповідно до рисунка 10). Проте I_{k1} буде вищою силою струму, який переривається автоматичним вимикачем, якщо $1,0 > \underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} > 0,23$.

4.3 Максимальна сила струму короткого замикання i_p

4.3.1 Трифазне коротке замикання

4.3.1.1 Короткі замикання в незамкнених електромережах

4.3.1.2 Для трифазних коротких замикань із живленням від незамкнених електромереж, як показано на рисунках 11 і 12, вплив кожного відгалуження на максимальну силу струму короткого замикання може бути виражений такою формулою:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} \cdot I''_k. \quad (54)$$

Коефіцієнт κ для відношення R/X або X/R можна одержати з рисунка 15 або з такої формули:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X}. \quad (55)$$

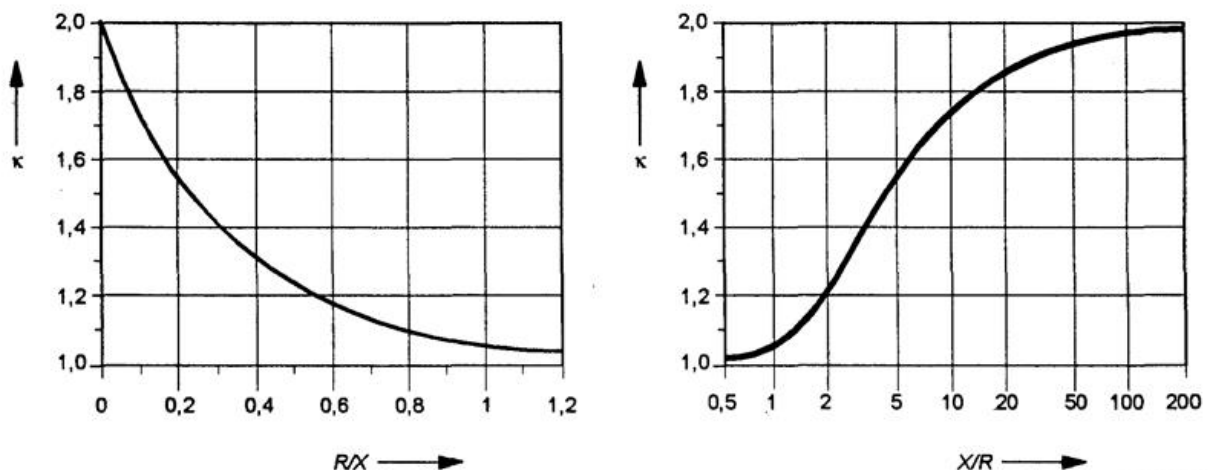


Рисунок 15 — Коефіцієнт κ для послідовного кола як функція відношення R/X або X/R

IEC 1287/2000

У рівняннях (54) і (55) припускають, що коротке замикання починається за нульової напруги, і що i_p досягається приблизно через один напівперіод (відповідно до IEC 60909-1, рисунка 24). Для синхронного генератора треба використовувати R_{Gr} (відповідно до 3.6.1).

Максимальна сила струму короткого замикання i_p в точці короткого замикання Б із живленням від джерел, незамкнених один з одним, згідно з рисунком 12, дорівнює сумі часткових сил струмів короткого замикання:

$$i_p = \sum_i i_{pi}. \quad (56)$$

Приклад на рисунку 12:

$$i_p = i_{pS} + i_{pT} + i_{pM}. \quad (57)$$

4.3.1.3 Короткі замикання в замкнених електромережах

Під час обчислювання максимальної сили струму короткого замикання I_p в замкнених електромережах використовують рівняння (54) з k , визначеним за одним з наведених нижче методів а), б) або с).

а) Загальноприйняте відношення R/X або X/R

Для цього методу коефіцієнт k визначають на основі рисунка 15, узявши найменше відношення R/X або найбільше відношення X/R всіх гілок мережі.

Необхідно лише вибрати гілки, які несуть часткові сили струму короткого замикання за номінальної напруги, що відповідає точці короткого замикання, і гілки з трансформаторами поряд з точкою короткого замикання. Будь-яка гілка може бути послідовною комбінацією кількох повних опорів.

б) Відношення R/X або X/R у точці короткого замикання

Для цього методу коефіцієнт k множать на коефіцієнт 1,15, щоб покрити похибки, спричинені використанням відношення R_k/X_k від трансформації мережі з комплексними повними опорами.

$$I_{p(b)} = 1,15 k_{(b)} \sqrt{2} I_k'' \quad (58)$$

Поки R/X залишається менше за 0,3 у всіх гілках, коефіцієнт 1,15 використовувати не потрібно. Не потрібно, щоб добуток $1,35 \cdot k_{(b)}$ перевищував 1,8 у низьковольтних мережах або 2,0 в середньо- і високовольтних мережах.

Коефіцієнт $k_{(b)}$ визначають на основі рисунка 15 для відношення R_k/X_k від повного опору короткого замикання $Z_k = R_k + jX_k$ у точці короткого замикання Б, розрахованого для частоти А, що дорівнює 50 Гц або 60 Гц.

с) Еквівалентна частота f_c

Еквівалентний повний опір Z_c системи в точці короткого замикання розраховують, виходячи з частоти $f_c = 20$ Гц (за номінальної частоти $f_c = 50$ Гц) або $A = 24$ Гц (за номінальної частоти $f_c = 60$ Гц). Потім визначають відношення R/X або X/R згідно з рівнянням (59).

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} \quad (59a)$$

$$\frac{X}{R} = \frac{X_c}{R_c} \cdot \frac{f}{f_c} \quad (59b)$$

де $Z_c = R_c + jX_c$ — еквівалентний повний опір системи в точці короткого замикання за передбачуваної частоти f_c ;
 R_c — дійсна частина Z_c (R_c зазвичай не дорівнює R за номінальної частоти);
 X_c — уявна частина Z_c (X_c зазвичай не дорівнює X за номінальної частоти).

Коефіцієнт k визначають на основі рисунка 15, використовуючи відношення R/X або X/R з рівняння (59) або на основі рівняння (55). Метод с) рекомендований для замкнених електромереж (відповідно до IEC 60909-1).

Використовуючи цей метод у замкнених електромережах із трансформаторами, генераторами й енергоблоками станції потрібно використовувати коригувальні коефіцієнти повного опору K_T , K_G , K_S і K_{S0} відповідно до таких самих значень, що і для обчислень 50 Гц або 60 Гц.

4.3.2 Міжфазне коротке замикання

Для міжфазного короткого замикання максимальну силу струму короткого замикання можна виразити такою формулою:

$$I_{p2} = k \sqrt{2} I_{k2}'' \quad (60)$$

Коефіцієнт k визначають згідно з 4.3.1.1 або 4.3.1.2 залежно від конфігурації системи. Щоб спростити обчислювання, можна використати таке саме значення k , що і для трифазного короткого замикання.

Коефіцієнт k визначають згідно з 4.3.1.1 або 4.3.1.2 залежно від конфігурації системи. Щоб спростити обчислювання, можна використати таке саме значення k , що і для трифазного короткого замикання.

Якщо $Z_{(1)} = Z_{(2)}$, то максимальна сила струму міжфазного короткого замикання I_{p2} буде менша за максимальну силу струму трифазного короткого замикання I_p , як показано в рівнянні (61):

$$I_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_p. \quad (61)$$

4.3.3 Міжфазне коротке замикання із замиканням на землю

Для міжфазного короткого замикання із замиканням на землю максимальний струм короткого замикання можна виразити такою формулою:

$$I_{p2E} = k \sqrt{2} I''_{k2E}. \quad (62)$$

Розраховувати I_{p2E} треба лише тоді, коли $Z_{(0)}$ набагато менше за $Z_{(1)}$ (менше ніж 1/4 від $Z_{(1)}$).

4.3.4 Коротке замикання фаза—земля

Для короткого замикання фаза—земля максимальну силу струму короткого замикання можна виразити формулою:

$$I_{p1} = k \sqrt{2} I''_{k1}. \quad (63)$$

Коефіцієнт k визначають згідно з 4.3.1.1 або 4.3.1.2 залежно від конфігурації системи. Щоб спростити обчислювання, можна використати таке саме значення k , що і для трифазного короткого замикання.

4.4 Сталій складник струму короткого замикання

Максимальний сталий складник $I_{d.c.}$ струму короткого замикання, як показано на рисунках 1 і 2, можна визначити з достатнім ступенем точності рівнянням (64).

$$I_{d.c.} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi f R/X}, \quad (64)$$

де I''_k — початкова сила струму симетричного короткого замикання;
 f — номінальна частота;
 t — час;
 R/X — відношення згідно з 4.3.1.1 або відношення згідно з методами а) і с) у 4.3.1.2 (також відповідно до примітки в 3.6.1).

Треба використовувати відповідний опір генератора R_G , а не R_{Gt} .

Для замкнених електромереж відношення R/X або X/R визначають за методом с) у 4.3.1.2. Залежно від добутку $f \cdot t$, де f — частота і t — час, використовують таку еквівалентну частоту f_c :

$f \cdot t$	<1	<2,5	<5	<12,5
f_c/f	0,27	0,15	0,092	0,055

4.5 Сила струму вимкнення симетричного короткого замикання I_b

Сила струму вимкнення в точці короткого замикання зазвичай складається із симетричного струму $I_{d.c.}$ і постійного струму $I_{d.c.}$ під час t_{min} згідно з рівнянням (64).

Примітка. Для деяких коротких замикань поблизу генератора значення $I_{d.c.}$ під час t_{min} може перевищувати максимальне значення I'' , що може призвести до зникання нулів у струмі.

4.5.1 Коротке замикання, віддалене від генератора

Для віддалених від генератора коротких замикань сили струму вимкнення короткого замикання дорівнюють початковим силам струму короткого замикання:

$$I_b = I''_k, \quad (65)$$

$$I_{b2} = I''_{k2}, \quad (66)$$

$$I_{b2E} = I''_{k2E}, \quad (67)$$

$$I_{b1} = I''_{k1}. \quad (68)$$

4.5.2 Коротке замикання поблизу генератора

4.5.2.1 Трифазне коротке замикання із живленням від одного джерела

Для короткого замикання поблизу генератора у разі короткого замикання з живленням від одного джерела, як показано на рисунках

11b і 11с, або у разі незамкнених електромереж, як показано на рисунку 12, згасання струму вимкнення симетричного короткого замикання враховують коефіцієнтом μ згідно з рівнянням (70).

$$I_b = \mu I''_{kG} \quad (69)$$

Коефіцієнт μ залежить від мінімального часу затримки t_{\min} і відношення I''_{kG}/I_{rG} , де I_{rG} — номінальна сила струму генератора. Значення μ в рівнянні (70) використовують, якщо синхронні машини збуджені обертовими чи статичними задавальними генераторами конвертора (за умови, що для статичних задавальних генераторів мінімальний час затримки t_{\min} становить менше ніж 0,25 с, а максимальна напруга збудження становить менше ніж 1,6 від номінальної напруги збудження). Для всіх інших випадків треба використовувати $\mu = 1$, якщо не відоме точне значення.

Якщо є одиничний трансформатор між генератором і точкою короткого замикання, то часткова сила струму короткого замикання на високовольтній стороні одиничного трансформатора (на рисунку 11с) з використанням номінального коефіцієнта трансформації переноситься на клему генератора $I''_{kG} = t_1 I''_{kS}$ перед обчислюванням μ , використовуючи такі рівняння:

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26e^{-0,26 I''_{kG}/I_{rG}} && \text{для } t_{\min} = 0,02 \text{ с} \\ \mu &= 0,71 + 0,51e^{-0,30 I''_{kG}/I_{rG}} && \text{для } t_{\min} = 0,05 \text{ с} \\ \mu &= 0,62 + 0,72e^{-0,32 I''_{kG}/I_{rG}} && \text{для } t_{\min} = 0,10 \text{ с} \\ \mu &= 0,56 + 0,94e^{-0,38 I''_{kG}/I_{rG}} && \text{для } t_{\min} \geq 0,25 \text{ с.} \end{aligned} \quad (70)$$

Якщо I''_{kG}/I_{rG} не більше за 2, то треба використовувати $\mu = 1$ для всіх значень мінімального часу затримки t_{\min} . Коефіцієнт μ можна також отримати на основі рисунка 16. Для інших значень мінімального часу затримки допустима лінійна інтерполяція між кривими.

Рисунок 16 можна використовувати також для низьковольтних генераторів змішаного збудження з мінімальним часом затримки t_{\min} не більше ніж 0,1 с. У цей стандарт не входить обчислювання низьковольтних струмів вимкнення після часу затримки t_{\min} , більше ніж 0,1 с; таку інформацію можуть надати виробники генераторів.

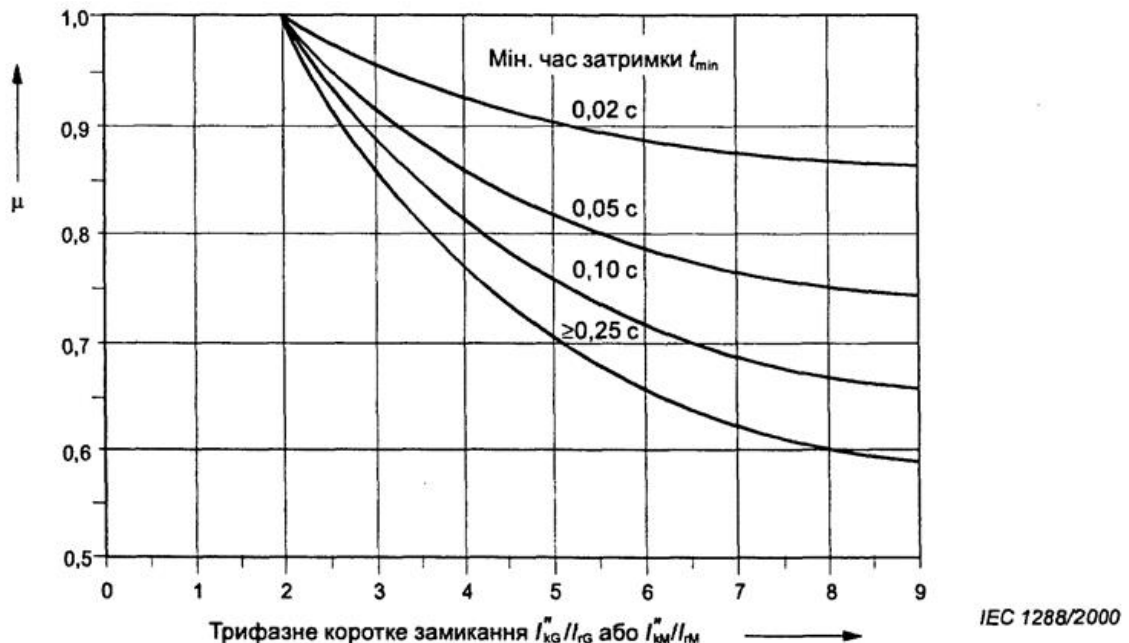


Рисунок 16 — Коефіцієнт μ для обчислювання сили струму вимкнення короткого замикання I_b

4.5.2.2 Трифазне коротке замикання у незамкнених електромережах

Для трифазних коротких замикань у незамкнених електромережах, як показано на рисунку 12, симетричний струм вимкнення в точці короткого замикання можна розрахувати підсумовуванням індивідуальних струмів вимкнення:

$$I_b = \sum_i I_{bi} \quad (71)$$

$$\text{Приклад на рисунку 12: } I_b = I_{bS} + I_{bT} + I_{bM} = \mu I''_{kS} + I''_{kT} + \mu q I''_{kM}, \quad (72)$$

де I''_{kS} , I''_{kT} і I''_{kM} — це вплив на С у точці короткого замикання (відповідно до рисунку 12);

μ — узятю з рівняння (70) або рисунка 16 для синхронних генераторів і асинхронних двигунів.

У разі асинхронних двигунів треба замінити I''_{kG} на I''_{kM}/I_{rM} (відповідно до таблиці 3).

Коефіцієнт q для обчислювання сили струму вимкнення симетричного короткого замикання для асинхронних двигунів можна визначити як функцію мінімального часу затримки t_{\min} .

$$\begin{aligned} q &= 1,03 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) && \text{для } t_{\min} = 0,02 \text{ с} \\ q &= 0,79 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) && \text{для } t_{\min} = 0,05 \text{ с} \\ q &= 0,57 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) && \text{для } t_{\min} = 0,10 \text{ с} \\ q &= 0,26 + 0,10 \ln(P_{rM}/p) && \text{для } t_{\min} \geq 0,25 \text{ с,} \end{aligned} \quad (73)$$

де $P_{гМ}^M$ -- номінальна активна потужність, МВт;
 P -- кількість пар полюсів двигуна.

Якщо в результаті обчислення за рівнянням (73) виходять значення q більше ніж 1, то вважають, що $q = 1$. Коефіцієнт q можна також одержати на основі рисунка 17.

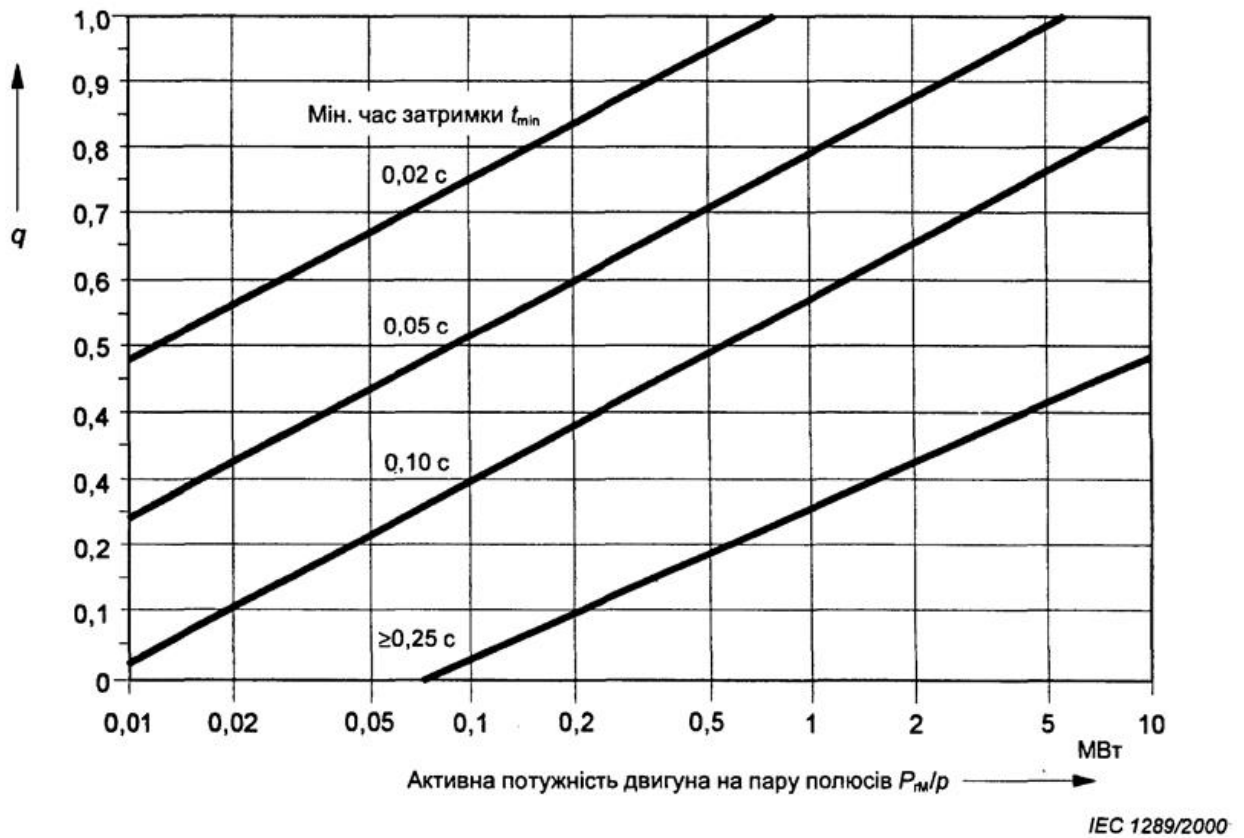


Рисунок 17 — Коефіцієнт q для обчислювання сили струму вимкнення симетричного короткого замикання для асинхронних двигунів

4.5.2.3 Трифазне коротке замикання в замкнених електромережах

Спочатку розраховують струм у точці короткого замикання під час вимикання, а потім — часткові струми у гілках, в яких розташовані автоматичні вимикачі.

Струм вимкнення короткого замикання I_b в замкнених електромережах розраховують за наведеною нижче формулою:

$$I_b = I_k'' \quad (74)$$

Струми, обчислені згідно з рівнянням (74), більші, ніж реальні струми вимкнення симетричного короткого замикання. Для збільшення ступеня точності можна використовувати рівняння (75), (76) і (77).

$$I_b'' = I_k'' - \sum_i \frac{\Delta U_{Gi}''}{cU_n/\sqrt{3}} (1 - \mu_i) I_{kGi}'' - \sum_j \frac{\Delta U_{Mj}''}{cU_n/\sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) I_{kMj}'', \quad (75)$$

$$\Delta U_{Gi} = j X_{diK}'' I_{kGi}'', \quad (76)$$

$$\Delta U_{Mj} = j X_{Mj}'' I_{kMj}'', \quad (77)$$

- де μ_i, μ_j — значення з рівняння (70) для синхронних (i) й асинхронних (j) машин;
 q_j — значення з рівняння (73) для асинхронних двигунів (j);
 $cU_n/\sqrt{3}$ — еквівалентне джерело напруги в точці короткого замикання;
 I_k, I_b — відповідно, початковий струм симетричного короткого замикання і струм вимкнення симетричного короткого замикання з впливом всіх мережних ліній живлення, синхронних машин і асинхронних двигунів;
 $\Delta U_{Gi}'', \Delta U_{Mj}''$ — початкове падіння напруги на клеммах синхронних машин (i) і асинхронних двигунів (j);
 X_{diK}'' — скоригований надперехідний реактивний опір синхронної машини (i): $X_{diK}'' = K_V X_{di}$ з $K_V = K_G, K_S$ або K_{SO} ;
 X_{Mj}'' — реактивний опір асинхронного двигуна (j);
 I_{kGi}'', I_{kMj}'' — вплив синхронних машин (i) і асинхронних двигунів (j) на початкову силу струму симетричного короткого замикання, виміряний на клеммах машин.

Потрібно пам'ятати, що значення I'' і ΔU рівнянь (76) і (77) вимірюють на клеммах машини, і вони стосуються однієї напруги.

Якщо коротке замикання стосується типу далеко від двигуна, тобто $\mu_j = 1$, то треба брати значення $1 - \mu_j q_j = 0$ незалежно від значення q_j .

4.5.2.4 Несиметричні короткі замикання

Для несиметричних струмів короткого замикання згасання густини потоку генератора не враховують, а застосовують рівняння від (66) до (68).

4.6 Сила струму сталого короткого замикання I_k

Обчислювання сили струму сталого короткого замикання I_k менш точне, чим обчислювання початкової сили струму короткого замикання I_k'' .

4.6.1 Трифазне коротке замикання одного генератора чи одного енергоблока станції

Для трифазних коротких замикань поблизу генератора із живленням безпосередньо від одного синхронного генератора чи одного енергоблока станції лише згідно з рисунками 11b або 11c струм сталого короткого замикання I_k залежить від системи збудження, роботи регулятора напруги та впливу насичення.

Синхронні машини (генератори, двигуни чи компенсатори) зі статичними задавальними генераторами із живленням через клема не впливають на I_k у разі короткого замикання на клеммах машини, але впливають на I_k , якщо між клеммами і точкою короткого замикання є повний опір. Вплив також виявляється, якщо у разі енергоблока станції відбувається коротке замикання на високовольтній стороні одиничного трансформатора (відповідно до рисунка 11c).

4.6.1.1 Максимальна сила струму сталого короткого замикання

Для обчислювання максимальної сили струму сталого короткого замикання синхронний генератор можна встановити на максимальне збудження.

$$I_{k \max} = \lambda_{\max} I_{rG}. \quad (78)$$

Для систем із статичним збудженням із живленням від клем генератора і для короткого замикання на клеммах напруга збудження сильно слабшає в міру ослаблення напруги на клеммах, тому треба використовувати $\lambda_{\max} = \lambda_{\min} = 0$.

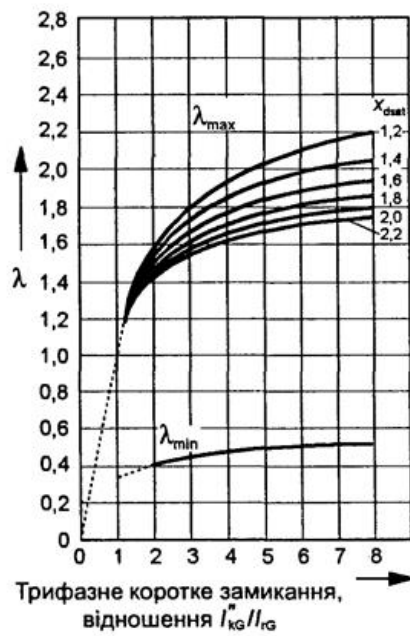
λ_{\max} можна одержати з рисунків 18 або 19 для неявнополюсних генераторів або генераторів з явновираженими полюсами. Насичений реактивний опір x_{dsat} дорівнює зворотному значенню відношення насиченого короткого замикання не під навантагою.

Криві λ_{\max} послідовності 1 ґсновані на найвищій можливій напрузі збудження в 1,3 разу більшій, ніж номінальне збудження за номінальної повної потужності та коефіцієнта потужності для неявнополюсних генераторів (рисунок 18a) або в 1,6 разу більшій, ніж номінальна напруга збудження для генераторів з явновираженими полюсами (рисунок 19a).

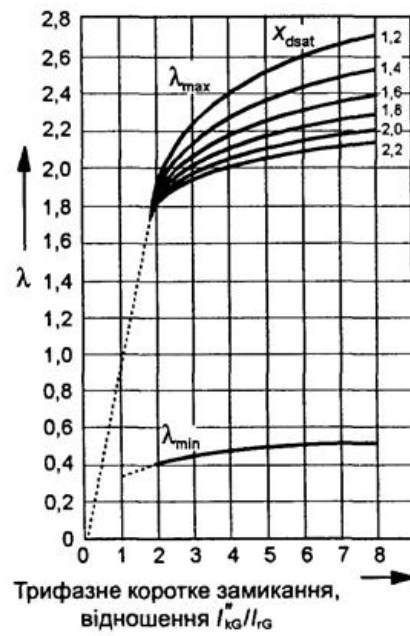
Криві λ_{\max} послідовності 2 ґсновані на найвищій можливій напрузі збудження в 1,6 разу більшій, ніж номінальне збудження за номінальної повної потужності та коефіцієнта потужності для неявнополюсних генераторів (рисунок 18b) або в 2,0 разу більшій, ніж номінальна напруга збудження для генераторів з явновираженими полюсами (рисунок 19b).

Криві λ_{\max} послідовності 1 або 2 також можна використовувати у разі статичних задавальних генераторів із живленням через клема, якщо коротке замикання відбувається на високовольтній стороні одиничного трансформатора енергоблока станції чи в системі і якщо вибрано максимальну напругу збудження щодо часткового електричного пробоя генератора під час короткого замикання.

Примітка. Обчислювання кривих λ_{\max} можливе за рівнянням (87) з IEC 60909-1, беручи до уваги, що $I_k''/I_{rG} = \lambda_{\max}$ дійсно для відношення $I_k''/I_{rG} < 2$. Це відбувається у разі віддаленого від генератора короткого замикання.



IEC 1290/2000



IEC 1291/2000

Рисунок 18a — Коефіцієнти λ_{\max} і λ_{\min} послідовності 1 (відповідно до 4.6.1.1) **Рисунок 18b** — Коефіцієнти λ_{\max} і λ_{\min} послідовності 2 (відповідно до 4.6.1.1)

Рисунок 18 — Коефіцієнти λ_{\max} і λ_{\min} для неявнополюсних генераторів



Рисунок 19а — Коефіцієнти λ_{\max} і λ_{\min} послідовності 1 (відповідно до 4.6.1.1)



Рисунок 19б — Коефіцієнти λ_{\max} і λ_{\min} послідовності 2 (відповідно до 4.6.1.1)

Рисунок 19 — Коефіцієнти λ_{\max} і λ_{\min} для генераторів з явновираженими полюсами

4.6.1.2 Мінімальний струм сталого короткого замикання

Для мінімального струму сталого короткого замикання у разі короткого замикання з одного джерела живлення від одного генератора чи одного енергоблока станції згідно з рисунками 11b і 11c, передбачається стале ненавантажене збудження (регулятор напруги не працює) синхронної машини:

$$I_{k\min} = \lambda_{\min} I_{rg}. \quad (79)$$

λ_{\min} визначають з рисунків 18 і 19. У разі мінімального струму сталого короткого замикання потрібно використовувати $c = c_{\min}$ згідно з таблицею 1.

Мінімальний струм сталого короткого замикання у разі короткого замикання поблизу генератора із живленням від одного чи кількох подібних і паралельних робочих генераторів із змішаним збудженням обчислюють так:

$$I_{k\min} = \frac{c_{\min} U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}}. \quad (80)$$

Для ефективного реактивного опору генераторів використовують:

$$X_{dp} = \frac{U_{rg}}{\sqrt{3} I_{kp}}. \quad (81)$$

I_{kp} — струм сталого короткого замикання генератора в трифазному короткому замиканні на клеммах. Значення можна отримати у виробника.

4.6.2 Трифазне коротке замикання в незамкнених електромережах

У разі трифазного короткого замикання в незамкнених електромережах, як показано на рисунку 12, струм сталого короткого замикання в точці короткого замикання можна розрахувати підсумовуванням індивідуальних впливів струмів сталого короткого замикання:

$$I_k = \sum_i U_{ki}. \quad (82)$$

$$\text{Приклад на рисунку 12: } I_k = I_{ks} + I_{kt} + I_{km} = \lambda I_{rgt} + I_{kt}'' \quad (83)$$

λ (λ_{\max} або λ_{\min}) визначаються на основі рисунків 18 і 19. I_{rgt} — номінальна сила струму генератора, переміщеного на високовольтну сторону (відповідно до 4.2.1.2) одиничного трансформатора на рисунку 12.

У разі мережних ліній живлення чи мережних ліній живлення, послідовно з'єднаних із трансформаторами (відповідно до рисунка 12), дійсне рівняння $I_k = I_k''$ (віддалене від генератора коротке замикання).

Що стосується рівняння (99) в таблиці 3, то сила струму сталого короткого замикання асинхронних двигунів дорівнює нулю у разі трифазного короткого замикання на клеммах (рисунку 12 і рівняння (83)).

Під час обчислювання $I_{k\max}$ або $I_{k\min}$ використовують коефіцієнт c_{\max} або c_{\min} з таблиці 1.

4.6.3 Трифазне коротке замикання в замкнених електромережах

У замкнених електромережах з кількома джерелами можна приблизно розрахувати струм сталого короткого замикання:

$$I_{k\max} = I''_{k\max M}, \quad (84)$$

$$I_{k\min} = I''_{k\min}. \quad (85)$$

$I''_{k\max} = I''_k$ визначають згідно з 2.4 і 4.2.1.5, а $I_{k\min}$ — згідно з 2.5 і 4.2.1.5.

Рівняння (84) і (85) дійсні для віддалених від генератора коротких замикань і коротких замикань поблизу генератора.

4.6.4 Несиметричні короткі замикання

У всіх випадках усталених несиметричних коротких замикань згасанням потоку в генераторі нехтують і використовують такі рівняння:

$$I_{k2} = I''_{k2}, \quad (86)$$

$$I_{k2E} = I''_{k2E}, \quad (87)$$

$$I_{kE2E} = I''_{kE2E}, \quad (88)$$

$$I_{k1} = I''_{k1}. \quad (89)$$

У разі мінімального сталого короткого замикання використовують $c = c_{mm}$ згідно з таблицею 1, відповідно до 2.5.

4.6.5 Короткі замикання на низьковольтній стороні трансформаторів, якщо один лінійний провід переривається на високовольтній стороні

Під час використання запобіжників для захисту на вході на високовольтній стороні мережних трансформаторів коротке замикання на вторинній стороні може призвести до розмикання одного запобіжника до того, як інші високовольтні запобіжники чи автоматичні вимикачі усунуть коротке замикання. Це може призвести до того, що часткові струми короткого замикання будуть занадто малі для дії на будь-який подальший захисний пристрій, особливо у разі мінімальних струмів короткого замикання. Електроустатковання може отримати перенапруження через тривалості короткого замикання.

На рисунку 20 зображено таку ситуацію із симетричними та несиметричними короткими замиканнями із замиканням на землю в точці короткого замикання F

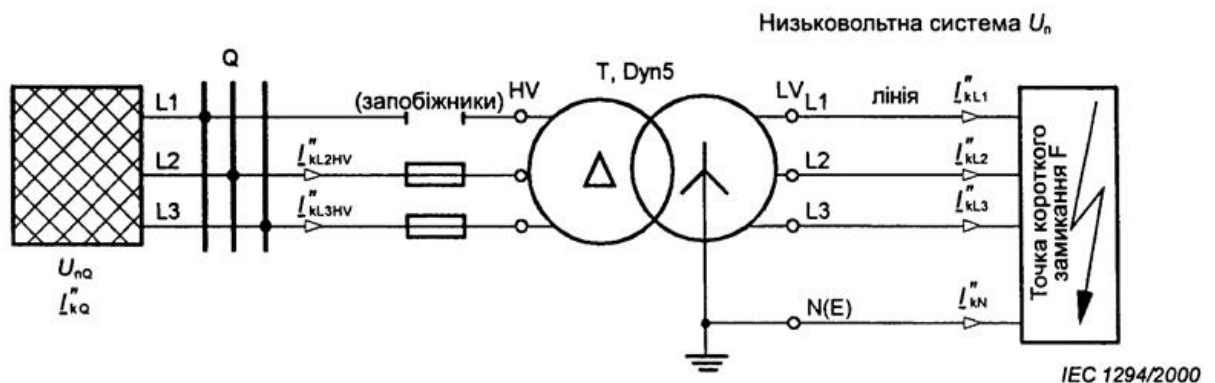


Рисунок 20 — Вторинні короткі замикання трансформатора, якщо розмикається одна лінія (запобіжник) на високовольтній стороні трансформатора Dyn5

Струми короткого замикання I''_{kL1} , I''_{kL2} , I''_{kL3} і I''_{kN} на низьковольтній стороні трансформатора на рисунку 20 можна розрахувати, використовуючи рівняння (90) з еквівалентним джерелом напруги $cU_n/\sqrt{3}$ у точці короткого замикання F. Часткові струми короткого замикання $I''_{kL2HV} = I''_{kL3HV}$ на високовольтній стороні на рисунку 20 можна також розрахувати за рівнянням (90), використовуючи відповідні значення коефіцієнта α . У всіх випадках I''_{kV} дорівнює I_{kV} , тому що це віддалені від генератора короткі замикання (відповідно до 1.3.17 і рисунка 1).

$$I''_{kV} = \alpha \frac{cU_n}{\sqrt{3} [Z_{Qt} + K_T Z_T + Z_L + \beta (K_T Z_{(0)T} + Z_{(0)L})]}, \quad (90)$$

де	V	L1, L2, L3, N(E) на низьковольтній стороні і L2 HV, L3 HV на високовольтній стороні;
	$Z_{Qt} + K_T Z_T + Z_L$	— вислідний повний опір у системі прямої послідовності на стороні низької напруги ($Z_T = Z_{TLV}$);
	$K_T Z_{(0)T} + Z_{(0)L}$	— вислідний повний опір у системі нульової послідовності на стороні низької напруги;
	α, β	— коефіцієнти в таблиці 2.

Будь-які міжфазні короткі замикання без замикання на землю спричиняють струми менші за номінальні струми, отже, цей випадок не враховано в таблиці 2.

Таблиця 2 — Коефіцієнти α і β для обчислювання струмів короткого замикання з використанням рівняння (90). Номінальний коефіцієнт трансформації $t_t = U_{THV}/U_{TLV}$

K3 у точці F (див. рисунок 20)	Трифазне K3	Міжфазне K3 із замиканням на	K3 фаза—земля
--------------------------------	-------------	------------------------------	---------------

		землю		
Задіяні лінії на низьковольтній стороні	L1, L2, L3 L1, L2, L3, N(E)	L1, L3, N(E)	L1, L2, N(E) L2, L3, N(E)	L2, N(E) ¹⁾
Коефіцієнт β	0	2	0,5	0,5
Коефіцієнт α (низька напруга) для струмів				
$I''_{кL1}$	0,5	1,5	—	—
$I''_{кL2}$	1,0	—	1,5	1,5
$I''_{кL3}$	0,5	1,5	—	—
$I''_{кN}$	—	3,0	1,5	1,5
Коефіцієнт α (висока напруга) для струмів $I''_{кV}$				
$I''_{кL2HV} = I''_{кL3HV}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$
¹⁾ У разі коротких замикань між фазою і землею L1, N(E) або L3, N(E) вислідні малі струми обумовлені розімкненими повними опорами трансформатора. Їх можна не враховувати.				

Немає струму короткого замикання на низьковольтній або високовольтній стороні трансформатора на рисунку ²⁰ вищого, ніж вищий струм симетричного чи несиметричного короткого замикання у разі непошкодженого живлення високої напруги (відповідно до рисунка 10). Тому рівняння (90) необхідне лише під час обчислювання мінімальних струмів короткого замикання (відповідно до таблиці 1 для $c = c_{\min}$ і 2.5).

4.7 Коротке замикання на клеммах асинхронних двигунів

У разі трифазних і міжфазних коротких замикань на клеммах асинхронних двигунів часткові струми короткого замикання $I''_{кМ}$, $I_{рМ}$, $I_{бМ}$ та $I_{кМ}$ розраховують згідно з таблицею 3. Для уземлених систем вплив двигунів на струм короткого замикання між фазою і землею не можна не враховувати. Потрібно взяти повні опори двигунів з $Z_{(1)М} = Z_{(2)М} = Z_{\Sigma М}$ і $Z_{(0)М}$. Якщо двигун не уземлено, то повний опір нульової послідовності стає $Z_{(0)М} = \infty$.

Таблиця 3 — Обчислення сили струму короткого замикання асинхронних двигунів у разі короткого замикання на клемі (відповідно до 4.7)

КЗ	Трифазне КЗ	Міжфазне КЗ	КЗ фаза—земля
Початкова сила струму симетричного КЗ	$I_{k3M}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_M} \quad (91)$	$I_{k2M}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3M}'' \quad (92)$	Див. 4.7
Максимальна сила струму КЗ	$I_{p3M} = K_M \sqrt{2} I_{k3M}'' \quad (93)$	$I_{p2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{p3M}'' \quad (94)$	$I_{p1M} = K_M \sqrt{2} I_{k1M}'' \quad (95)$
	Двигуни середньої напруги: $K_M = 1,65$ (відповідно до $R_M/X_M = 0,15$) для потужності двигуна на пару полюсів < 1 МВт $K_M = 1,75$ (відповідно до $R_M/X_M = 0,10$) для потужності двигуна на пару полюсів ≥ 1 МВт Групи низьковольтних двигунів із сполучними кабелями: $K_M = 1,3$ (відповідно до $R_M/X_M = 0,42$)		
Сила струму вимкнення симетричного КЗ	$I_{o3M} = \mu q I_{k3M}'' \quad (96)$	$I_{o2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3M}'' \quad (97)$	$I_{o1M} = I_{k1M}'' \quad (98)$
	μ відповідно до рівняння (70) або рисунка 16 з I_{KM}''/I_{PM} q відповідно до рівняння (73) або рисунка 17		
Сила струму сталого КЗ	$I_{k3M} = 0 \quad (99)$	$I_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k3M}'' \quad (100)$	$I_{k1M} = I_{k1M}'' \quad (101)$

3.6 Джоулевий інтеграл і тепловий еквівалент сили струму короткого замикання

Тепловий еквівалент сили струму короткого замикання:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n}. \quad (103)$$

Для серії i ($i = 1, 2, r$) послідовних окремих струмів трифазного короткого замикання використовують таке рівняння для обчислювання Джоулевого інтеграла чи теплового еквівалента сили струму короткого замикання:

$$\int i^2 dt = \sum_{i=1}^{i=r} I_{ki}''^2 (m_i + n_i) T_{ki} = I_{th}^2 T_k; \quad (104)$$

$$I_{th} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{T_k}}; \quad (105)$$

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=r} T_{ki}, \quad (106)$$

Джоулевий інтеграл $\int i^2 dt$ — міра енергії, що генерується в резистивному елементі системи струмом короткого замикання. У цьому стандарті його розраховують з використанням коефіцієнта m для залежного від часу теплового ефекту сталого складника струму короткого замикання та з використанням коефіцієнта n для залежного від часу теплового ефекту змінного складника струму короткого замикання (відповідно до рисунків 21 і 22).

$$\int_n^{T_k} i^2 dt = I_k''^2 (m+n) T_k = I_{th}^2 T_k. \quad (102)$$

де I_{ki}'' — початкова сила струму симетричного трифазного короткого замикання для кожного короткого замикання;
 I_{th} — тепловий еквівалент сили струму короткого замикання;
 m_i — коефіцієнт теплового ефекту сталого складника для кожного струму короткого замикання;
 n_i — коефіцієнт теплового ефекту змінного складника для кожного струму короткого замикання;
 T_{ki} — тривалість струму короткого замикання для кожного короткого замикання;
 T_k — сума тривалостей для кожного струму короткого замикання (відповідно до рівняння (106)).

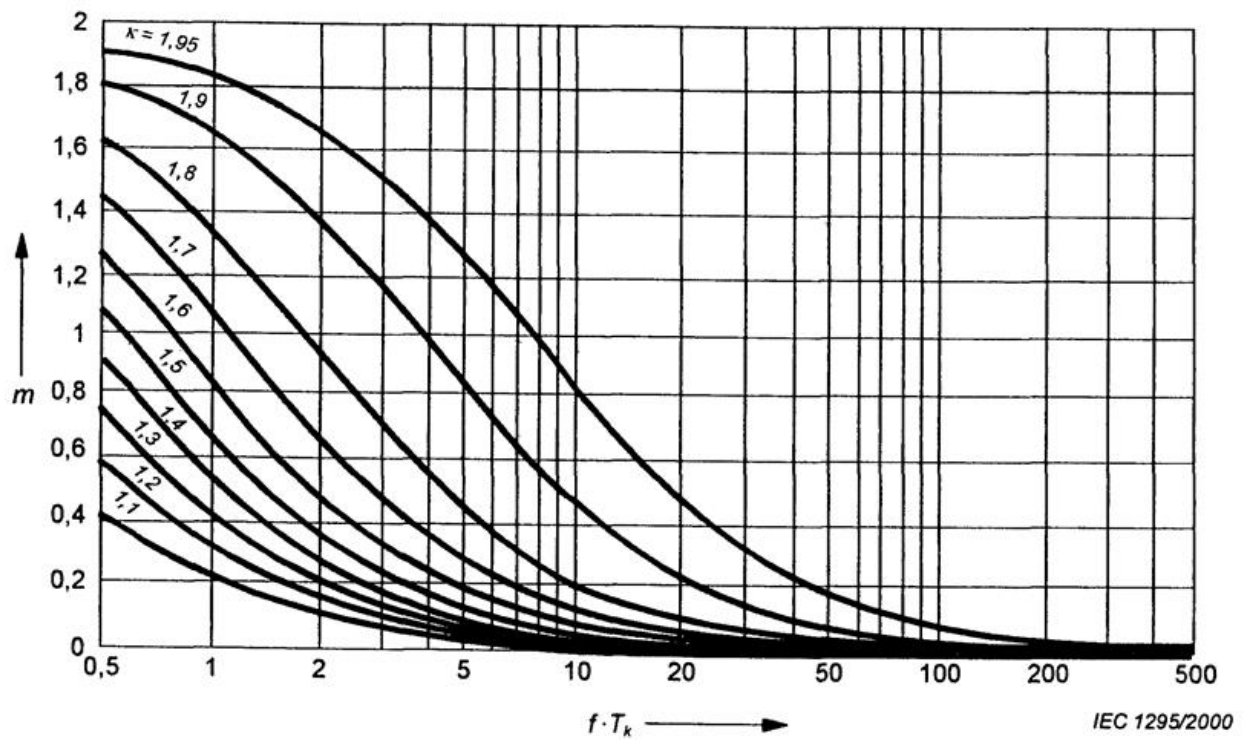


Рисунок 21 — Коефіцієнт m для теплового ефекту сталого складника струму короткого замикання (для програмування, рівняння для обчислювання m наведено в додатку А)

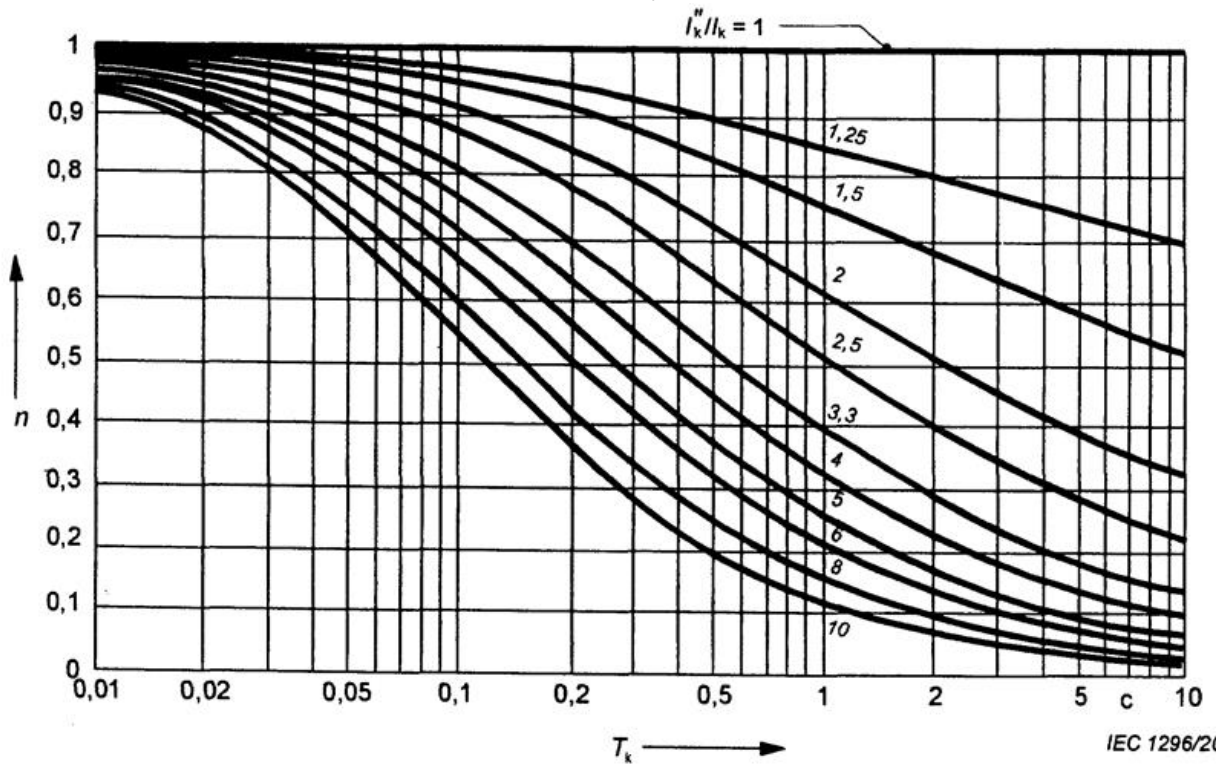


Рисунок 22 — Коефіцієнт n для теплового ефекту змінного складника струму короткого замикання (для програмування, рівняння для обчислювання n наведено в додатку А)

Джоулевий інтеграл і тепловий еквівалент сили струму короткого замикання треба завжди вказувати з тривалістю короткого замикання, до якого вони належать.

Коефіцієнти m , одержані з рисунка 21, використовуючи f T_{ki} і коефіцієнт κ , одержаний у 4.3. Коефіцієнти n_i одержані з рисунка 22, використовуючи T_{ki} і коефіцієнт I''_{ki}/I'_{ki} , де I'_{ki} — сила струму сталого короткого замикання для кожного короткого замикання.

Якщо кілька коротких замикань відбуваються з коротким проміжком часу між ними, то вислідний Джоулевий інтеграл дорівнює сумі Джоулевих інтегралів окремих струмів короткого замикання, як описано в рівнянні (104).

Для розподільчих мереж (віддалені від генератора короткі замикання) зазвичай можна використовувати $n = 1$.

Для віддаленого від генератора короткого замикання з номінальною тривалістю короткого замикання 0,5 с або більше допускається, що $m + n = 1$.

Якщо потрібно розрахувати Джоулевий інтеграл або тепловий еквівалент сили струму короткого замикання для несиметричних коротких замикань, то треба замінити I на відповідні струми несиметричного короткого замикання.

Примітка. Щоб обчислити Джоулевий інтеграл або тепловий еквівалент сили струму короткого замикання в трифазних системах змінного струму, велику роль може відігравати струм трифазного короткого замикання.

Якщо коло захищено запобіжниками чи струмообмежувальними автоматичними вимикачами, то їх Джоулевий інтеграл може обмежувати значення, нижче за розраховане значення, відповідно до рівняння (102) або (104). У цьому разі Джоулевий інтеграл визначають на основі характеристик стру-мообмежувального пристрою.

Примітка. На сьогодні тепловий еквівалент сили струму короткого замикання і Джоулевий інтеграл наведено в IEC 60865-1. Коефіцієнти m і n спочатку з'явилися на рисунках 12a і 12b в IEC 60865-1 та були ідентичні наведеним.

ДОДАТОК А (обов'язковий)

РІВНЯННЯ ДЛЯ ОБЧИСЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ m І n

Коефіцієнт m на рисунку 21 визначають за наведеною нижче формулою:

$$m = \frac{1}{2fT_k 1n(\kappa - 1)} (e^{4fT_k 1n(\kappa - 1)} - 1).$$

Коефіцієнт n на рисунку 22 визначають за наведеною нижче формулою:

$$\frac{I''_k}{I'_k} = 1; \quad n = 1;$$

$$\frac{I''_k}{I'_k} \geq 1,25:$$

$$n = \frac{1}{(I''_k/I'_k)^2} \left[1 + \frac{T'_d}{20T_k} (1 - e^{-20T_k/T'_d}) \left(\frac{I''_k}{I'_k} - \frac{I'_k}{I'_k} \right)^2 + \frac{T'_d}{2T_k} (1 - e^{-2T_k/T'_d}) \left(\frac{I'_k}{I'_k} - 1 \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{T'_d}{5T_k} (1 - e^{-10T_k/T'_d}) \left(\frac{I''_k}{I'_k} - \frac{I'_k}{I'_k} \right) + \frac{2T'_d}{T_k} (1 - e^{-T_k/T'_d}) \left(\frac{I'_k}{I'_k} - 1 \right) + \right. \\ \left. + \frac{T'_d}{5,5T_k} (1 - e^{-11T_k/T'_d}) \left(\frac{I''_k}{I'_k} - \frac{I'_k}{I'_k} \right) \left(\frac{I'_k}{I'_k} - 1 \right) \right],$$

$$\text{де } \frac{I_k'}{I_k} = \frac{I_k''/I_k}{0,88 + 0,17 I_k''/I_k};$$

$$T_d' = \frac{3,1с}{I_k'/I_k}.$$

ДОДАТОК НА (довідковий)

ПЕРЕЛІК НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ УКРАЇНИ, ЗГАРМОНІЗОВАНИХ З МІЖНАРОДНИМИ СТАНДАРТАМИ (АБО РОЗРОБЛЕНИХ НА ЇХНІЙ ОСНОВІ), ПОСИЛАННЯ НА ЯКІ Є В ЦЬОМУ СТАНДАРТІ

ДСТУ 2267-93 Вироби електротехнічні. Терміни та визначення (IEC 60050(151): 1978, МЕО)

ДСТУ 2815-94 Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення (IEC 60050 (131):1978, ІМЕО; IEC 60050(151): 1978, НЕО)

ДСТУ ІЕС 60909-4:2008 Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання (IEC TR 60909-4:2000, ІДТ).

Код УКНД 17.220.01; 29.240.01

Ключові слова: асинхронні двигуни, конденсатори, коротке замикання, мережна лінія живлення, необертові навантаги, обчислювання, повний опір короткого замикання, синхронні машини, статичні конденсатори, струм, трансформатор.