



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

---

# СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Частина 4. Приклади обчислення сили струму  
короткого замикання  
(IEC/TR 60909-4:2000, IDT)

ДСТУ IEC/TR 60909-4:2008

БЗ № 3-2008/64

*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 4 березня 2008 р. № 85 з 2010-01-01,  
згідно з наказом Держспоживстандарту від 14 серпня 2008 р. № 284 чинність встановлено з 2009-01-01;  
згідно з наказом Держспоживстандарту від 22 грудня 2008 р. № 490 змінено назву

Національний стандарт відповідає ІЕС/TR 60909-4:2000 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems —  
Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents (Струми короткого замикання у трифазних сис-  
темах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислювання сили струму короткого замикання)

Ступінь відповідності — ідентичний (ІДТ)

Переклад з англійської (en)

4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

---

Право власності на цей документ належить державі.  
Відтворювати, тиражувати та розповсюджувати його повністю чи частково  
на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу заборонено.  
Стосовно врегулювання прав власності треба звертатися до Держспоживстандарту України

Держспоживстандарт України, 2009

## ЗМІСТ

	с.
Національний вступ .....	V
1 Загальні положення .....	1
1.1 Сфера застосування та призначеність .....	1
1.2 Нормативні документи .....	1
1.3 Терміни та визначення понять, позначки, індекси та рівняння .....	2
2 Повні опори електроустановки прямої, зворотної та нульової послідовності .....	2
2.1 Повітряні, кабельні лінії та реактори, які обмежують струм короткого замикання .....	2
2.2 Трансформатори .....	3
2.3 Генератори й енергоблоки станції .....	8
3 Обчислювання сили струму короткого замикання в системі низької напруги $U_n = 400$ В .....	12
3.1 Поставлення задачі .....	12
3.2 Визначення повних опорів прямої послідовності .....	12
3.2.1 Мережна лінія живлення .....	12
3.2.2 Трансформатори .....	13
3.2.3 Лінії (кабельні та повітряні) .....	14
3.3 Визначення повних опорів нульової послідовності .....	14
3.3.1 Трансформатори .....	14
3.3.2 Лінії (кабельні та повітряні) .....	14
3.4 Обчислювання $I_k''$ та $i_p$ для трифазних коротких замикань .....	14
3.4.1 Точка короткого замикання F1 .....	14
3.4.2 Точка короткого замикання F2 .....	16
3.4.3 Точка короткого замикання F3 .....	16
3.5 Обчислювання $I_{k1}''$ та $i_{p1}$ для коротких замикань фаза—земля .....	16
3.5.1 Точка короткого замикання F1 .....	16
3.5.2 Точка короткого замикання F2 .....	17
3.5.3 Точка короткого замикання F3 .....	17
3.6 Результати обчислень .....	18
4 Обчислювання трифазних струмів короткого замикання в системі середньої напруги. Вплив двигунів .....	18
4.1 Поставлення задачі .....	18
4.2 Комплексні обчислювання з абсолютними величинами .....	19
4.3 Обчислювання із реактивним опором короткого замикання електроустановки .....	21
4.4 Обчислювання із величинами у відносних одиницях .....	23
4.5 Обчислювання методом накладання .....	24
5 Обчислювання трифазних струмів короткого замикання для енергоблоку станції та допоміжної мережі .....	27
5.1 Поставлення задачі .....	27
5.2 Повні опори короткого замикання електроустановки .....	29
5.2.1 Мережна лінія живлення .....	29
5.2.2 Енергоблок станції .....	29
5.2.3 Допоміжні трансформатори .....	30
5.2.4 Трансформатори низької напруги 2,5 МВА та 1,6 МВА .....	30

5.2.5 Асинхронні двигуни .....	32
5.3 Обчислювання сили струму короткого замикання .....	32
5.3.1 Точка короткого замикання F1 .....	32
5.3.2 Точка короткого замикання F2 .....	34
5.3.3 Точка короткого замикання F3 .....	35
5.3.4 Точка короткого замикання F4 .....	37
5.3.5 Точка короткого замикання F5 .....	38
6 Перевірочна мережа для обчислювання сили струму короткого замикання з цифровими програмами згідно з ІЕС 60909-0 .....	40
6.1 Загальні положення .....	40
6.2 Перевірочна мережа високої напруги 380 кВ/110 кВ/30 кВ/10 кВ .....	41
6.2.1 Топологія й опис мережі .....	41
6.2.2 Повні опори короткого замикання електроустановки .....	43
6.3 Результати .....	44
6.3.1 Трифазні струми короткого замикання .....	44
6.3.2 Струми короткого замикання фаза—земля .....	44
Додаток НА Перелік національних стандартів України, згармонізованих з міжнародними стандартами (або розроблених на їхній основі), посилання на які є в цьому стандарті .....	45

## НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей стандарт є тотожний переклад ІЕС/TR 60909-4:2000 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems — Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents (Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислювання сили струму короткого замикання).

Організація, відповідальна за цей стандарт, — Приватне науково-виробниче підприємство «Синапс». Стандарт містить вимоги, які відповідають чинному законодавству України.

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

- слова «ця частина ІЕС 60909» і «цей технічний звіт» змінено на «цей стандарт»;
- структурні елементи 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 ІЕС TR 60909-4;
- до підрозділу 1.2 «Нормативні документи» та до 2.3.2 долучено «Національне пояснення» і «Національну примітку», виділені в тексті рамкою;
- долучено національний додаток НА;
- виправлено помилки оригіналу:
  - у 2.2 долучено виноску <sup>1)</sup> до рисунка 3;
  - у 2.2 в останньому рядку розрахунків під рисунком 4 позначку  $S_{ГТНVLV}$  замінено на  $S_{ГТМVLV}$ ;
  - внесено зміни до рисунка 18 у 3.5.1 (із системи зворотної послідовності вилучено продубльовану позначку  $I_{(2)}$ ) та до рисунка 11 у 4.5 (додано позначки щодо коефіцієнта трансформації) згідно із оригіналом французькою мовою;
  - у 4.4 в обчисленні  $I''_{KM2}$  у кілоамперах замінено позначку  $I''_{KM1}$  на  $I''_{KM2}$ ;
  - у 5.1 в поясненні до рисунка 12 замінено позначку  $U_{ГТС}$  на  $u_{ГТС}$ ;
  - у тексті 5.2.5 узгоджено позначку  $I''_{KM}$  з відповідною позначкою у формулі;
  - у 5.3.4 у формулі на визначення  $I_{PF4}$  додано коефіцієнт  $k$  у позначку  $K_{(15-20)}$ ;
  - у 5.3.5 в обчислення  $I''_{KT20}$  долучено знак «=».

Додаток НА — довідковий.

У цьому стандарті є посилання на ІЕС 60050(131), ІЕС 60050(151), ІЕС 60909-0, 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.

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ  
ЗМІННОГО СТРУМУ

Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання  
ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЬКАНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Часть 4. Примеры расчета токов короткого замыкания

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

Part 4. Examples for the calculation of short-circuit currents

Чинний від 2009-01-01

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Сфера застосування та призначеність

Цей стандарт призначено для сприяння застосуванню ІЕС 60909-0 стосовно обчислювання сили струму короткого замикання в трифазних системах змінного струму 50 Гц або 60 Гц.

Цей стандарт не охоплює додаткові вимоги, але надає підтримку під час моделювання електроустаткування в системах прямої, зворотної та нульової послідовності (розділ 2) і під час практичного виконання обчислювань у системах низької напруги (розділ 3), системах середньої напруги з асинхронними двигунами (розділ 4) й енергоблоках станції з допоміжною мережею, що живить велику кількість асинхронних двигунів середньої напруги та груп двигунів низької напруги (розділ 5).

Три приклади, описані в розділах 3, 4 і 5, аналогічні розділам в ІЕС 60909 (1988), але виправлені згідно з ІЕС 60909-0, який його замінює.

Наприклад, до розділу 3 додано підрозділ, щоб порівняти результати застосування еквівалентного джерела напруги в точці короткого замикання згідно з процедурою, описаною в ІЕС 60909-0, з одного боку, і результати, одержані методом накладання, з іншого боку, враховуючи різні умови поточного розподілу навантаги до виникнення короткого замикання.

Розділ 6 цього стандарту описує графік і дані перевірконої мережі та результати обчислення, проведеного згідно з ІЕС 60909-0, який дає можливість порівняти результати цифрової програми для обчислення сили струму короткого замикання й отримані результати для  $I_k''$ ,  $i_p$ ,  $I_b$ ,  $I_k$ ,  $I_{k1}''$  та  $i_{p1}$  у мережі високої напруги з енергоблоками, генераторами, асинхронними двигунами і лініями в чотирьох різних рівнях напруги 380 кВ, 110 кВ, 30 кВ і 10 кВ.

1.2 Нормативні документи

ІЕС 60038:1983 IEC standard voltages

ІЕС 60909-0:2000 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems — Part 0: Calculation of currents

ІЕС 60909-1:1991 Short-circuit current 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

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

IEC 60909-3:1995 Short-circuit currents 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 60865-1:1993 Short-circuit currents — Calculation of effects — Part 1: Definitions and calculation methods.

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ  
 ІЕС 60038:1983 Стандартні напруги ІЕС  
 ІЕС 60909-0:2000 Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 0. Обчислювання сили струму  
 ІЕС 60909-1:1991 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 ІЕС 60909  
 ІЕС 60909-2:1992 Електроустатковання. Дані для обчислювання сили струму короткого замикання відповідно до ІЕС 60909  
 ІЕС 60909-3:1995 Струми 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  
 ІЕС 60865-1:1993 Струми короткого замикання. Обчислювання коефіцієнтів. Частина 1. Визначення понять і методи обчислювання.

**1.3 Терміни та визначення понять, позначки, індекси та рівняння**

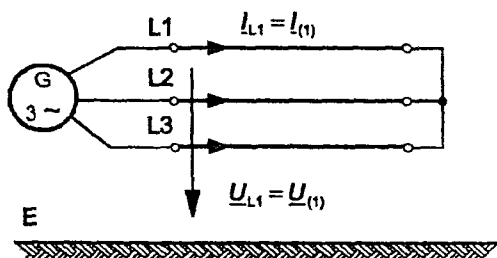
Терміни та визначення понять, позначки, індекси та рівняння аналогічні використовуваним в ІЕС 60909-0.

**2 ПОВНІ ОПОРИ ЕЛЕКТРОУСТАТКОВАННЯ ПРЯМОЇ, ЗВОРотноЇ ТА НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ**

Додатково до розділу 3 ІЕС 60909-0 подано моделювання й обчислювання повних опорів електроустатковання прямої та нульової послідовності. У більшості випадків повні опори зворотної послідовності дорівнюють повним опорам прямої послідовності під час обчислювання початкової сили струму короткого замикання, але див. 3.6.1 з ІЕС 60909-0 і ІЕС 60909-2.

**2.1 Повітряні, кабельні лінії та реактори, які обмежують струм короткого замикання**

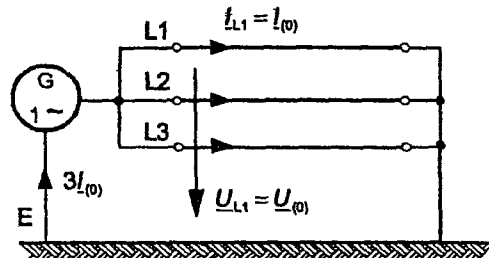
На рисунку 1 зображено значення й порядок вимірювання повних опорів прямої та нульової послідовності повітряних ліній з одним контуром L1, L2, L3.



IEC 951/2000

а) пряма послідовність

$$\begin{aligned} Z_{(1)\Sigma} &= U_{L1} / I_{L1} = U_{(1)} / I_{(1)} \\ \sum U_{L1} + U_{L2} + U_{L3} &= 0 \\ i U_{L1} &= U_{L2} = U_{L3} \end{aligned}$$



IEC 952/2000

б) нульова послідовність

$$\begin{aligned} Z_{(0)\Sigma} &= U_{L1} / I_{L1} = U_{(0)} / I_{(0)} \\ \sum U_{L1} &= U_{L2} = U_{L3} = U_{(0)} \\ i I_{L1} &= I_{L2} = I_{L3} = I_{(0)} \end{aligned}$$

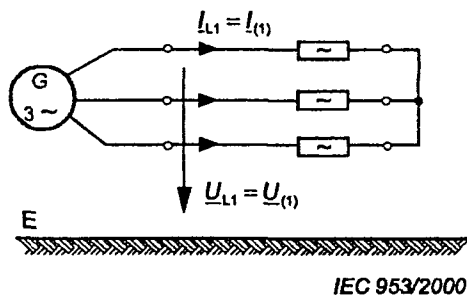
**Рисунок 1** — Повні опори прямої та нульової послідовності повітряних ліній (однокільна лінія електропередавання)

На практиці вимірювання напруги  $U_{L1}$  і сили струму  $I_{L1}$  призводить до абсолютної величини  $Z$  повного опору. Разом з вимірюванням сумарних витрат  $P_V$  з використанням сили струму  $I_{L1}$  можна визначити комплексне значення  $Z$  повного опору:

$$Z = \frac{U_{L1}}{I_{L1}}; R = \frac{P_V}{3I_{L1}^2}; X = \sqrt{Z^2 - R^2}; \underline{Z} = R + jX.$$

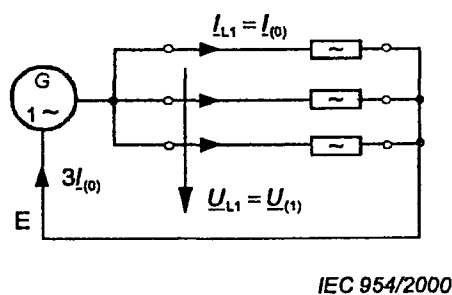
Рівняння для обчислювання повних опорів системи прямої та нульової послідовності повітряних ліній з одним або двома паралельними контурами (двокільна лінія електропередавання) з одним або двома проводами уземлення або без них подані в ІЕС 60909-2. Повний опір зворотної послідовності дорівнює повному опору прямої послідовності. Вимірювання для обчислювання повних опорів прямої та нульової послідовності для кабелів з покриттям, екранованих і броньованих кабелів аналогічні зображеним на рисунку 1. Приклади наведено в ІЕС 60909-2. У разі повного опору нульової послідовності уземлення покриття, екрану чи броні важливе так, як і кількість паралельних кабелів. У разі чотирижильних кабельних ліній низької напруги поперечний переріз уземлених жил впливає на повний опір нульової послідовності.

На рисунку 2 наведено значення й основне вимірювання повного опору прямої та нульової послідовності трифазного реактора, що обмежує струм короткого замикання змінного струму.



а) пряма послідовність

$$\begin{aligned} Z_{(1)R} &= U_{L1} / I_{L1} = U_{(1)} / I_{(1)} \\ \sum U_{L1} + U_{L2} + U_{L3} &= 0 \\ I_{L1} &= I_{L2} = I_{L3} \end{aligned}$$



б) нульова послідовність

$$\begin{aligned} Z_{(0)R} &= U_{L1} / I_{L1} = U_{(0)} / I_{(0)} \\ \sum U_{L1} = U_{L2} = U_{L3} &= U_{(0)} \\ I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} &= I_{(0)} \end{aligned}$$

Рисунок 2 — Повний опір прямої та нульової послідовності реактора, що обмежує струм короткого замикання, зазвичай  $R_R \ll X_R$

Якщо магнітне з'єднання між трьома котушками із залізним осердям або без нього невелике, то повний опір нульової послідовності  $Z_{(0)R}$  приблизно дорівнює повному опору прямої послідовності  $Z_{(1)R}$ . Під час обчислювання сили струму короткого замикання в системах високої напруги часто досить використовувати лише реактивний опір.

## 2.2 Трансформатори

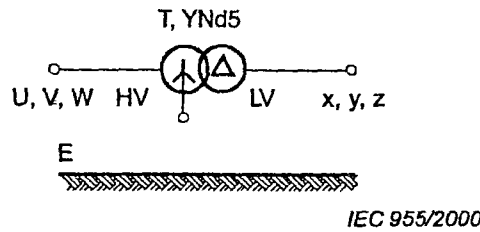
Одиничні трансформатори енергоблоків станції також розглядають у 2.3.

Мережні трансформатори мають дві, три або навіть більше трифазних обмоток. На рисунку 3 зображено приклад повних опорів системи прямої та нульової послідовності двообмоткового трансформатора з групою з'єднань YNd5.

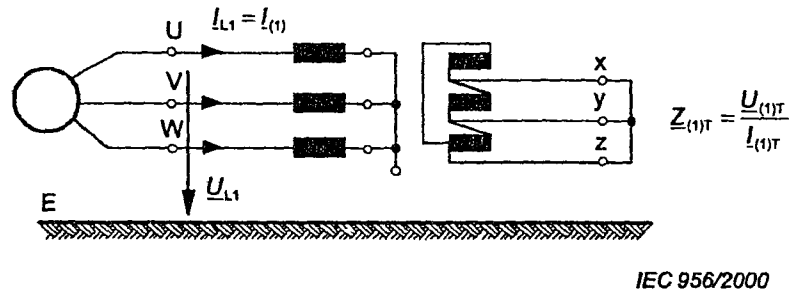
У разі триобмоткових трансформаторів (приклади подано в таблиці 3б з ІЕС 60909-2), необхідно виміряти три різні повні опори, а потім обчислити три повні опори еквівалентного контуру в системі прямої чи нульової послідовності трансформатора (див. 3.3.2 з ІЕС 60909-0 і приклад у кінці цього розділу).

У таблиці 1 подано приклади еквівалентних контурів у системі прямої та нульової послідовності дво- і триобмоткових трансформаторів із різними умовами уземлення на стороні високої та середньої напруги. Повні опори в таблиці 1 пов'язані зі стороною А, яка може бути стороною трансформатора високої або середньої напруги.

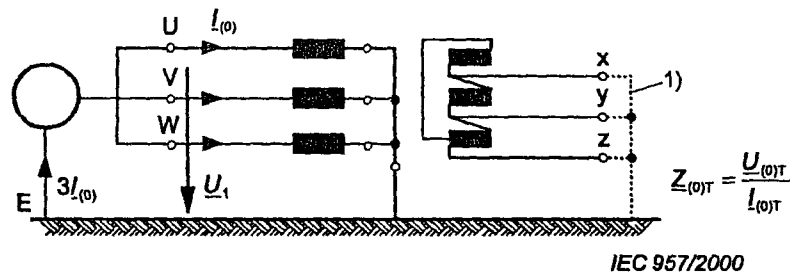




а) Двообмотковий трансформатор з клемми U, V, W на стороні високої напруги і x, y, z на стороні низької напруги



б) Повний опір прямої послідовності  $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ ,  $Z_{(2)}$  — повний опір зворотної послідовності



в) Повний опір нульової послідовності  $Z_{(0)}$

<sup>1)</sup>Примітка. У разі обмотки, з'єднаної за схемою трикутника, не треба проводити коротке замикання і замикання на землю.

Рисунок 3 — Повні опори системи прямої та нульової послідовності двообмоткового трансформатора YNd5

Як показано в таблиці 2, трансформатори з групою з'єднань Yy не потрібно використовувати в системах низької напруги з уземленням низького повного опору на стороні низької напруги (TN-мережа), тому що  $Z_{(0)}$  може бути великим, тому захист від короткого замикання може не спрацювати. Для живлення TN-мереж потрібно використовувати трансформатори № 2 або № 3 з таблиці 1.

Трансформатори з групою з'єднань YNуп,d типові в мережах високої напруги зазвичай з уземленням нейтралі лише на одній стороні (А або В). Приклади 4b і 6 таблиці 1 показують, що система нульової послідовності обох мереж з'єднана, якщо уземлено обидві нейтральні точки А або В (що уземлює перемикач ES, якщо 4b замкнено). У цих випадках необхідно виконати додаткові обчислювання, особливо якщо коефіцієнт трансформації високий, щоб визначити допустимість з'єднання. Випадок 5 таблиці 1 описує приклад, як уникнути такого з'єднання в системі нульової послідовності. Випадок 9 таблиці 1 описує приклад, як уникнути з'єднання в системі нульової послідовності, якщо є два паралельні трансформатори в одному місці чи в різних місцях.

У випадку 8 для автотрансформаторів з уземленням нейтралі  $Z_N \neq \infty$ , трьома окремими пристроями і додатковою допоміжною обмоткою, з'єднаною за схемою трикутника, не можна уникнути з'єднання між системами нульової послідовності мереж, з'єднаних з обома сторонами трансформатора. Щоб визначити повні опори  $*Z_1$ ,  $*Z_2$  і  $*Z_3$  як функції  $Z_N \neq \infty$ , необхідно виконати спеціальні обчислювання, описані у випадку 6 таблиці 1.

Вольтододаткові трансформатори (або регульовальні трансформатори для контролю напруги та/чи кута зсуву фаз) подано як мережні трансформатори, зазвичай еквівалентні формі в таблиці 1. Конструкція і схема з'єднання трансформаторів напруги визначає, чи має  $Z_{(0)C}$  обмежене низьке значення, тоді виникає необхідність вимірювання трьох різних повних опорів, як у випадку з триобмотковими трансформаторами, щоб обчислити повні опори еквівалентної схеми.

Таблиця 1 — Приклад еквівалентних схем з'єднання трансформаторів у системі прямої та нульової послідовності

№	Трансформатор	Система прямої послідовності	Система нульової послідовності
1a			
1b			
2			
3			
4a			
4b			
5			

<sup>1)</sup>  $Z_{(1)K} = K_T Z_{(1)}$ ;  $K_T$  з рівняння (12a) або (12b) ІЕС 60909-0.

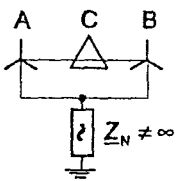
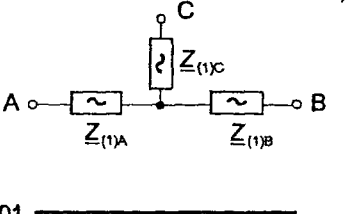
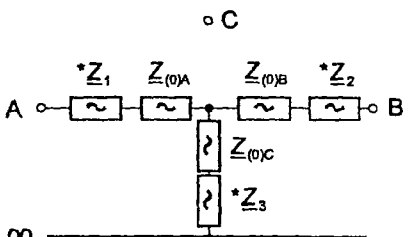
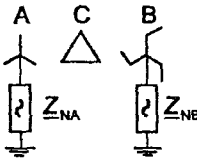
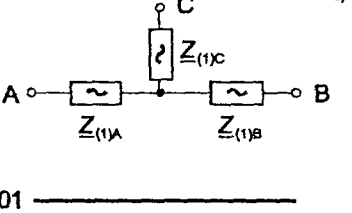
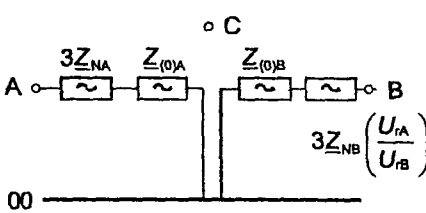
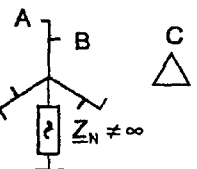
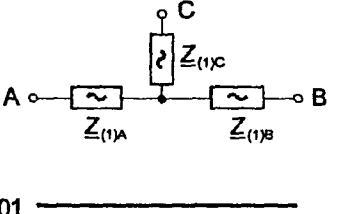
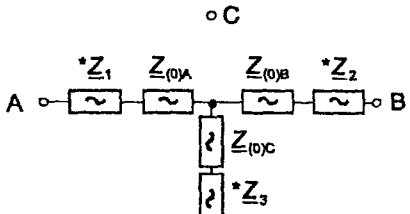
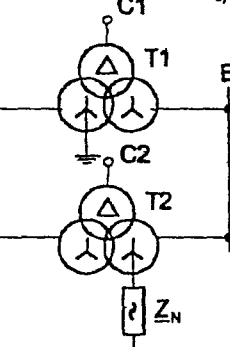
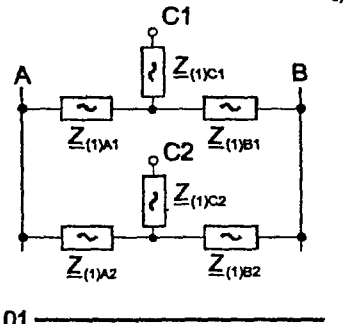
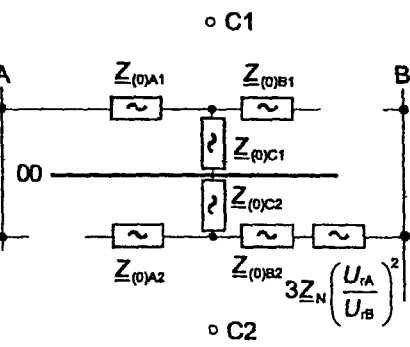
<sup>2)</sup>  $Z_{(0)K} = K_T Z_{(0)}$ ;  $K_T$  з рівняння (12a) або (12b) ІЕС 60909-0,  $Z_N$  — без коригувального коефіцієнта.

<sup>3)</sup>  $K_{TAB}$ ,  $K_{TAC}$ ,  $K_{TBC}$  з рівняння (13) ІЕС 60909-0.

<sup>4)</sup> Коригувальні коефіцієнти, як зазначено в <sup>3)</sup>;  $Z_N$  і  $X_S$  — без коригувального коефіцієнта.

<sup>5)</sup> Перемикач уземлення.

Кінець таблиці 1

№	Трансформатор	Система прямої послідовності	Система нульової послідовності
6		 <p style="text-align: right;">6)</p>	 <p style="text-align: right;">7)</p> <p style="text-align: center;">00</p> <p style="text-align: center;">*Z<sub>1</sub> = -3Z<sub>N</sub>(t-1); *Z<sub>2</sub> = 3Z<sub>N</sub>t(t-1); *Z<sub>3</sub> = 3Z<sub>N</sub>t; t = U<sub>A</sub>/U<sub>B</sub></p>
7		 <p style="text-align: right;">6)</p>	 <p style="text-align: right;">7)</p> <p style="text-align: center;">00</p>
8	<p>Автотрансформатор з трьома окремими пристроями</p>  <p>Δ З'єднання назовні трансформаторів</p>	 <p style="text-align: right;">6)</p>	 <p style="text-align: right;">7)</p> <p style="text-align: center;">00</p> <p style="text-align: center;">*Z<sub>1</sub>, *Z<sub>2</sub>, *Z<sub>3</sub>, як у випадку № 6 Z_{(0)A} = Z_{(1)A}; Z_{(0)B} = Z_{(1)B}; Z_{(0)C} = Z_{(1)C}</p>
9		 <p style="text-align: right;">6)</p>	 <p style="text-align: right;">7)</p> <p style="text-align: center;">00</p>

<sup>6)</sup> K<sub>ТАВ</sub>, K<sub>ТАС</sub>, K<sub>ТВС</sub> з рівняння (13) ІЕС 60909-0.

<sup>7)</sup> Коригувальні коефіцієнти, як зазначено в <sup>3)</sup>; Z<sub>N</sub> — без коригувального коефіцієнта.

<sup>8)</sup> Два паралельні двообмоткові трансформатори з уземленням для поділу систем нульової послідовності мереж А і В.

У таблиці 2 подано наближені значення для відношень  $X_{(0)T}/X_T$  трансформаторів, якщо уземлена одна нейтральна точка трансформатора. У разі триобмоткових трансформаторів (випадки 4—7 і 9 таблиці 1) реактивні опори  $X_T = X_{(1)T}$  розраховують за формулою  $X_{(1)T} = X_{(1)A} + X_{(1)B}$ .

Таблиця 2 — Наближені значення для відношень  $X_{(0)T}/X_T$  дво- і триобмоткових трансформаторів

Конструкція трансформатора	Група з'єднань			
	YNd або Dyn	Yzn	YNyn,d	YNy <sup>3)</sup> або YNz
Три жили	Від 0,7 до 1,0 <sup>1)</sup>			Від 3 до 10
П'ять жил	1,0	Від 0,1 до 0,15	Від 1 до 3,5 <sup>2)</sup>	Від 10 до 100
Три одножильні трансформатори	1,0			Від 10 до 100

<sup>1)</sup> Трансформатори з малою повною потужністю:  $X_{(0)T}/X_T \approx 1,0$  (наприклад, для трансформаторів низької напруги Dyn5 з  $S_{rT} = 400$  кВА,  $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10$  кВ/0,4 кВ).  
<sup>2)</sup> Відношення  $X_{(0)T}/X_T$  залежить від конструкції трансформатора, див. ІЕС 60909-2.  
<sup>3)</sup> Трансформатори Yy не можна використовувати в мережах з невеликим повним опором уземлення, наприклад в TN-мережах низької напруги (див. ІЕС 61200-413).

Приклад повних опорів і еквівалентних контурів триобмоткового мережного трансформатора YNyn,d5,  $S_{rTHMV} = 350$  МВА.

На рисунку 4 зображено еквівалентні контури триобмоткового мережного трансформатора в системі прямої та нульової послідовності. Система зворотної послідовності дорівнює системі прямої послідовності (див. 4 в таблиці 1).

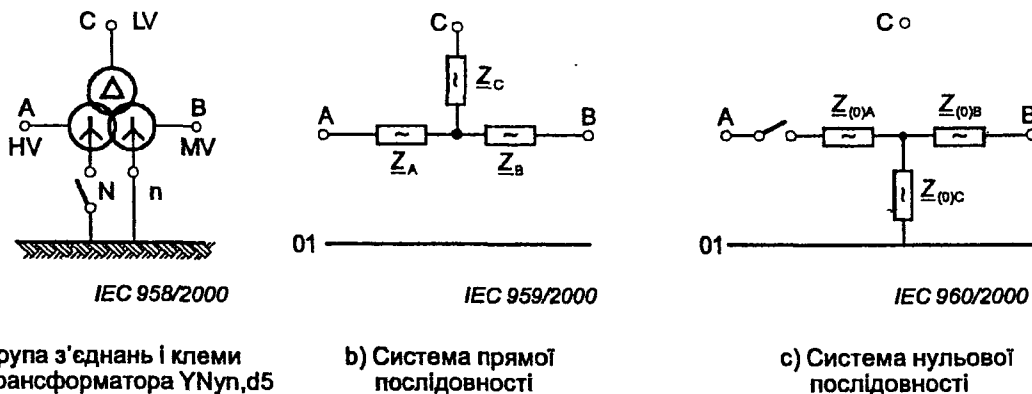


Рисунок 4 — Еквівалентні контури триобмоткового мережного трансформатора

Наведені нижче дані визначають розрахунковим способом:

- |   |                                   |                      |
|---|-----------------------------------|----------------------|
| $U_{rTHV} = 400$ кВ;                        | $U_{rTMV} = 120$ кВ;              | $U_{rTLV} = 30$ кВ;  |
| $S_{rTHV} = 350$ МВА;                       | $S_{rTMV} = 350$ МВА;             | $S_{rTLV} = 50$ МВА; |
| $u_{RTHMV} = 21\%$ ; $u_{RTHMV} = 0,26\%$ ; | стосується $S_{rTHMV} = 350$ МВА; | $U_{rTHV} = 400$ кВ; |
| $u_{RTHLV} = 10\%$ ; $u_{RTHLV} = 0,16\%$ ; | стосується $S_{rTHLV} = 50$ МВА;  | $U_{rTHV} = 400$ кВ; |
| $u_{RMLV} = 7\%$ ; $u_{RMLV} = 16\%$        | стосується $S_{rTMLV} = 50$ МВА;  | $U_{rTMV} = 120$ кВ. |

На основі рівнянь (10) в ІЕС 60909-0 можна визначити наведені нижче повні опори системи прямої послідовності, які стосуються сторони середньої напруги В:

$$Z_{AB} = \left( \frac{U_{RTHMV}}{100\%} + j \frac{U_{XTHMV}}{100\%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTHMV}} = (0,106971 + j8,639338) \text{ Ом};$$

$$Z_{AC} = \left( \frac{U_{RTHLV}}{100\%} + j \frac{U_{XTHLV}}{100\%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTHLV}} = (0,460800 + j28,796313) \text{ Ом};$$

$$Z_{BC} = \left( \frac{U_{RMLV}}{100\%} + j \frac{U_{XMLV}}{100\%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTMLV}} = (0,460800 + j20,154733) \text{ Ом}.$$

Цей приклад використовують також для випробувальної мережі в розділі 6 (трансформатори  $T_3 = T_4$ ), тому обчислювання виконують з шістьма знаками після коми.

З використанням номінального відносного реактивного опору  $X_T$ , визначеного на основі реактивної напруги короткого замикання  $u_{Xr} = \sqrt{u_{Kr}^2 - u_{Rr}^2}$  згідно з рівнянням (10d) ІЕС 60909-0, можна визначити такі коригувальні коефіцієнти повного опору (рівняння (13) ІЕС 60909-0):

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6X_{TAB}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,209984} = 0,928072;$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6X_{TAC}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,099987} = 0,985856;$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6X_{TBC}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,069982} = 1,002890.$$

Разом із зазначеними вище коригувальними коефіцієнтами, наприклад,  $Z_{ABK} = K_{TAB}Z_{AB}$ , можна знайти наступні скориговані повні опори (індекс K):

$$Z_{ABK} = (0,099277 + j8,017927) \text{ Ом};$$

$$Z_{ACK} = (0,454283 + j28,389024) \text{ Ом};$$

$$Z_{BCK} = (0,462132 + j20,212973) \text{ Ом}.$$

Скориговані еквівалентні повні опори прямої послідовності на рисунку 4b, пов'язані зі стороною середньої напруги, розраховують за рівнянням (11) ІЕС 60909-0.

$$Z_{AK} = (0,045714 + j8,096989) \text{ Ом};$$

$$Z_{BK} = (0,053563 - j0,079062) \text{ Ом};$$

$$Z_{CK} = (0,408568 + j20,292035) \text{ Ом}.$$

Для еквівалентної моделі трансформатора в системі нульової послідовності (рисунок 4c) відомі такі реактивні опори, пов'язані зі стороною середньої напруги B:

$$X_{(0)A} = 8,5551 \text{ Ом}; X_{(0)B} = -0,6881 \text{ Ом}; X_{(0)C} = 18,8307 \text{ Ом}.$$

У разі уземлення нейтральної точки трансформатора середньої напруги ефективний реактивний опір нульової послідовності дорівнює сумі  $X_{(0)B}$  і  $X_{(0)C}$ , що під час використання коригувального коефіцієнта повного опору  $K_{TBC}$  дає змогу отримати  $X_{(0)МК}$ :

$$X_{(0)МК} = K_{TBC} (X_{(0)B} + X_{(0)C}) = 18,195032 \text{ Ом}.$$

Це призводить до відношення  $X_{(0)Т}/X_T = (X_{(0)B} + X_{(0)C})/X_{AB} = 18,1426 \text{ Ом}/8,639338 \text{ Ом} = 2,0999 \approx 2,1$  без коригувального коефіцієнта.

У багатьох випадках триобмоткові мережні трансформатори з допоміжною обмоткою зі з'єднанням за схемою трикутника (наприклад,  $YNyn,d5$ ) можна розглядати як двообмотковий трансформатор (див., наприклад, трансформатори  $T_4$ ,  $T_5$  і  $T_6$  на рисунку 16).

У цьому прикладі (трансформатор  $T_4$  на рисунку 16) обчислювання суттєво полегшується, особливо якщо не брати до уваги реактивні опори ( $R_T/X_T \approx 0,012$ ):

$X_T = X_{AB} = 8,639338 \text{ Ом}$ ;  $K_T = K_{TAB} = 0,928072$ ;  $X_{TK} = K_T X_T = 8,017927 \text{ Ом}$ ;  $X_{(0)Т} = 2,1 \cdot X_T = 18,1426 \text{ Ом}$  і разом з  $K_T = K_{TAB}$ :  $X_{(0)ТК} = 16,838 \text{ Ом}$  на консервативній стороні порівняно з  $X_{(0)ТК} = K_{TBC} X_{(0)Т} = 18,195 \text{ Ом}$ , розраховані на основі наведеного вище рівняння.

### 2.3 Генератори й енергоблоки станції

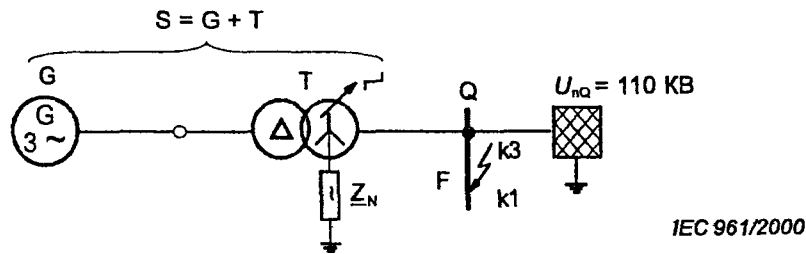
**2.3.1** Для синхронних генераторів без одиничних трансформаторів у мережах низької та середньої напруги реактивними опорами прямої послідовності є  $X_d''$ ,  $X_d'$  і  $X_d$  (див. ІЕС 60909-2). У перший момент короткого замикання надперехідний реактивний опір  $X_d''$  призводить до  $I_k''$ .

Реактивний опір системи зворотної послідовності приблизно дорівнює надперехідному реактивному опору:  $X_{(2)} = X_d''$ . Якщо  $X_d''$  значно відрізняється від  $X_d'$ , то треба використовувати  $X_{(2)} = 0,5(X_d'' + X_d')$  (див. ІЕС 60909-0).

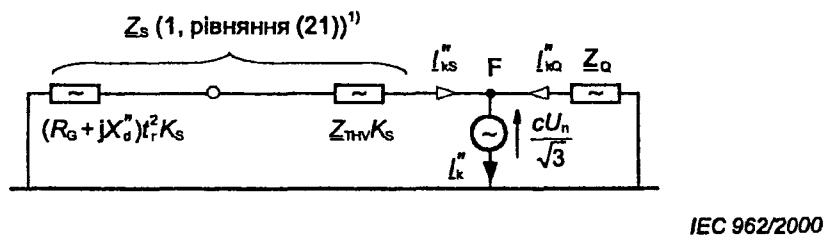
Реактивний опір нульової послідовності  $X_{(0)}$  менше надперехідного реактивного опору, залежно від конфігурації обмотки синхронної машини (див. ІЕС 60909-2). Якщо нейтральна точка зірки генера-

тора уземлена через додатковий повний опір, то краще використовувати реактивний опір між нейтральною точкою зірки і землею. Це потрібно для того, щоб обмежити струм короткого замикання між фазою і землею ( $I_{k1}'' \leq I_k''$ ), та/чи для того, щоб обмежити струми третього порядку у випадку паралельних генераторів або генераторів у паралелі з трансформатором з уземленням нейтральної точки зірки в тій самій частині мережі. При цьому потрібно використовувати коригувальний коефіцієнт повного опору  $K_G$  в системах прямої, зворотної та нульової послідовності. У цьому разі  $K_G$  не можна використовувати для додаткового повного опору нейтральної точки зірки (див. 3.6.1 ІЕС 60909-0).

а) Схема з'єднань



б) Система прямої послідовності для обчислювання  $I_k''$



в) Система прямої послідовності для обчислювання  $I_k''$ . Система прямої, зворотної та нульової послідовності для обчислювання  $I_{k1}''$  і часткових струмів короткого замикання  $I_{(1)S}''$ ,  $I_{(2)S}''$  та  $I_{(0)S}''$ ;  $X_{(2)G} = X_d''$ .

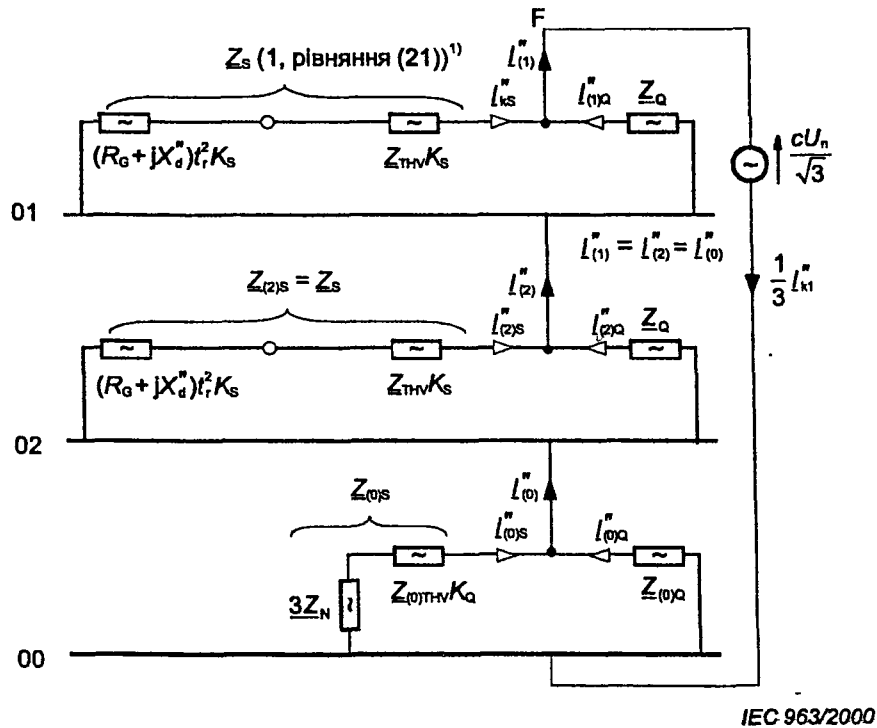


Рисунок 5 — Коротке замикання на стороні високої напруги енергоблока станції

У разі енергоблока станції (S) з перемикачем відгалужень під навантагою (див. 3.7.1 ІЕС 60909-0) або без нього (див. 3.7.2 ІЕС 60909-0) повний опір нульової послідовності на стороні високої напруги енергоблока станції дорівнює повному опору нульової послідовності одиничного трансформатора та потроєному повному опору  $Z_N$  між нейтральною точкою трансформатора (сторона високої напруги) і землею. На рисунку 5 зображено такий приклад. Повні опори прямої та зворотної послідовності енергоблока станції потрібно розраховувати за рівнянням (21) або рівнянням (23) ІЕС 60909-0 разом з коригувальним коефіцієнтом повного опору  $K_S$  з рівняння (22) або (24) ІЕС 60909-0. Повний опір нульової послідовності енергоблока станції підраховують так:  $Z_{(0)S} = Z_{(0)THV}K_S + 3Z_N$ . Отже, коригувальний коефіцієнт повного опору треба використовувати таким чином:

а) для повного опору прямої послідовності —

$$Z_S = [(R_G + jX_d'')t_r^2 + Z_{THV}]K_S,$$

б) для повного опору зворотної послідовності —

$$Z_{(2)S} = [(R_G + jX_{(2)})t_r^2 + Z_{THV}]K_S,$$

в) для повного опору нульової послідовності —

$$Z_{(0)S} = Z_{(0)THV}K_S + 3Z_N.$$

Струм  $3I_{(0)S}$  протікає від нейтральної точки одиничного трансформатора до повного опору  $Z_N$  у разі його наявності, таким чином, структура уземлення енергоблока станції призводить до можливого підвищення напруги торкання і крокової напруги.

Під час обчислювання часткових струмів короткого замикання  $I_{(1)S}$ ,  $I_{(2)S}$  і  $I_{(0)S}$  треба використовувати коригувальний коефіцієнт повного опору відповідно до рівняння (22) ІЕС 60909-0 для енергоблоків станції з перемикачем відгалужень під навантагою, залежно від можливого робочого діапазону генератора (див. ІЕС 60909-0). У разі енергоблока станції без перемикача відгалужень під навантагою можна використовувати коригувальний коефіцієнт  $K_{S0}$  з рівняння (24) ІЕС 60909-0 під час обчислювання  $I_{(1)S}$ ,  $I_{(2)S}$  і  $I_{(0)S}$ .

**2.3.2 Приклад обчислення повних опорів і сили струму короткого замикання у разі короткого замикання на стороні високої напруги енергоблока станції з перемикачем відгалужень під навантагою**

Для цього прикладу потрібно використовувати дані енергоблока станції S1 = G1 + T1 на рисунку 16. Нейтральна точка одиничного трансформатора YNd5 уземлена через реактивний опір  $X_{R1} = 22$  Ом ( $R_{R1} \ll X_{R1}$ ), щоб зменшити коефіцієнт замикання на землю у разі скидання навантаги і одночасного короткого замикання між фазою і землею на стороні високої напруги одиничного трансформатора (див. 6.2.1).

• Генератор:

$S_G = 150$  МВА;  $U_{rG} = 21$  кВ;  $x_d'' = 0,14$  в.о.;  $x_d = 1,8$  в.о.;  $\cos \varphi_{rG} = 0,85$ ;  $R_G = 0,002$  Ом (неявно-полюсний генератор працює лише в ділянці перезбудження).

#### Національна примітка

Зазначені тут надперехідний поздовжній реактивний опір  $x_d''$  і синхронний поздовжній реактивний опір  $x_d$  наведено у відносних одиницях (в.о., англ. — *p.u.*), що означає, що ці значення отримано приведенням до базових (зазвичай до номінальних) одиниць. У 4.4 наведено дві такі базові величини (*reference quantities*):  $U_R$  та  $S_R$ .

• Одиничний трансформатор:

$S_{rT} = 150$  МВА;  $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 115$  кВ/21 кВ;  $u_{kr} = 16$  %;  $u_{Rr} = 0,5$  %;  $p_T = \pm 12$  %;  $X_{(0)T}/X_T = 0,95$ ;  $R_{(0)T}/R_T = 1,0$ ;  $Z_N = jX_{R1} = j22$  Ом.

• Мережна лінія живлення (визначають на основі зменшення надлишковості схеми):

$U_{rQ} = 110$  кВ;  $c_{Qmax} = 1,1$ ;  $I_{rQ} = 13,61213$  кА;  $R_Q/X_Q = 0,20328$ ;  $X_{(0)Q}/X_Q = 3,47927$ ;  $R_{(0)Q}/R_Q = 3,03361$ .

У цьому прикладі визначають такі результати (див. рисунок 5):

$$Z_G = R_G + jX_d'' = (0,002 \text{ Ом} + j0,14 \frac{(21 \text{ кВ})^2}{150 \text{ МВА}}) = (0,002 + j0,4116) \text{ Ом};$$

$$Z_{Gt} = Z_G t_r^2 = (0,05998 + j12,34333) \text{ Ом з } t_r = 115 \text{ кВ}/21 \text{ кВ};$$

$$\underline{Z}_{THV} = \left( \frac{U_{Rr}}{100\%} + j \frac{U_{Xr}}{100\%} \right) \frac{U_{THV}^2}{S_{rT}} = (0,44083 + j14,09978) \text{ Ом};$$

$$\text{з } U_{Xr} = \sqrt{U_{kr}^2 - U_{Rr}^2} = 15,99219\% \text{ (} x_T = 0,1599219 \text{ в.о.)};$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2 \cdot U_{TLV}^2}{U_{rG}^2 \cdot U_{rTHV}^2} \cdot \frac{C_{max}}{1 + |x_d' - x_T| \sin \varphi_{rG}} = 0,99597;$$

$$\underline{Z}_S = (\underline{Z}_{G1r} + \underline{Z}_{THV})K_S = (0,49879 + j26,33668) \text{ Ом}.$$

У разі трифазного короткого замикання (рисунок 5) з  $U_n = U_{nQ}$ :

$$I_{kS}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_S} = (0,05022 - j2,65160) \text{ кА}; \quad I_{kS}'' = 2,65208 \text{ кА};$$

$$I_{kQ}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_Q} = (2,71161 - j13,33931) \text{ кА}; \quad I_{kQ}'' = 13,61213 \text{ кА};$$

$$\text{з } Z_Q = \frac{1,1U_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \quad \text{і } X_Q = \frac{1,1U_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} = 0,97996Z_Q;$$

$$I_k'' = I_{kS}'' + I_{kQ}'' = (2,76183 - j15,99091) \text{ кА}; \quad I_k'' = 16,22766 \text{ кА}.$$

Цей результат також наведено в таблиці 11 для перевірконої мережі.

Струм короткого замикання між фазою і землею  $I_{k1}''$  (див. рівняння (52) ІЕС 60909-0):

$$\underline{Z}_{(1)} = \frac{\underline{Z}_S \cdot \underline{Z}_Q}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_Q} = (0,73267 + j4,24215) \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)};$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)S} \cdot \underline{Z}_{(0)Q}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (2,09396 + j14,39889) \text{ Ом};$$

$$\text{з } \underline{Z}_{(0)S} = \underline{Z}_{(0)THV}K_S + 3\underline{Z}_N = (0,44083 + j0,95 \cdot 14,09978) \text{ Ом} \cdot 0,99597 + j66 \text{ Ом} = (0,43906 + j79,34081) \text{ Ом};$$

$$Z_{(0)Q} = (3,10149 + j17,49822) \text{ Ом};$$

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = (1,39090 - j8,94226) \text{ кА}; \quad I_{k1}'' = 9,04979 \text{ кА}.$$

Цей результат також наведено в таблиці 12 для перевірконої мережі. Часткові струми короткого замикання на рисунку 5:

$$I_{(1)S}'' = I_{(2)S}'' = \frac{I_{k1}''}{3} \cdot \frac{\underline{Z}_Q}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_Q} = (0,00109 - j0,49300) \text{ кА};$$

$$I_{(1)Q}'' = I_{(2)Q}'' = \frac{I_{k1}''}{3} \cdot \frac{\underline{Z}_S}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_Q} = (0,46255 - j2,48775) \text{ кА};$$

$$I_{(0)S}'' = \frac{I_{k1}''}{3} \cdot \frac{\underline{Z}_{(0)Q}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (0,00853 - j0,55314) \text{ кА};$$

$$I_{(0)Q}'' = \frac{I_{k1}''}{3} \cdot \frac{\underline{Z}_{(0)S}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (0,45510 - j2,42761) \text{ кА}.$$

На основі цих результатів, дійсних лише у разі роботи генератора з перезбудженням, можна визначити наступні загальні струми на стороні енергоблока:

$$I_{L1S}'' = I_{(0)S}'' + I_{(1)S}'' + I_{(2)S}'' = (0,01072 - j1,53914) \text{ кА};$$

$$I_{L2S}'' = I_{(0)S}'' + \underline{a}^2 I_{(1)S}'' + \underline{a} I_{(2)S}'' = (0,00744 - j0,06014) \text{ кА};$$

$$I_{L3S}'' = I_{(0)S}'' + \underline{a} I_{(1)S}'' + \underline{a}^2 I_{(2)S}'' = (0,00744 - j0,06014) \text{ кА}.$$

Струм з нейтральної точки трансформатора до структури уземлення:

$$I_{L1S}'' + I_{L2S}'' + I_{L3S}'' = 3I_{L(0)S}'' = (0,02560 - j1,65942) \text{ кА}.$$



### 3 ОБЧИСЛЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СИСТЕМІ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ $U_n = 400$ В

#### 3.1 Поставлення задачі

На рисунку 6 зображено систему низької напруги з  $U_n = 400$  В і  $f = 50$  Гц. Струми короткого замикання  $I_k''$  та  $i_p$  визначають у точках короткого замикання F1—F3. Можна припустити, що короткі замикання в точках F1—F3 стосуються віддалених від генератора коротких замикань (див. 1.3.17 ІЕС 60909-0).

Дані про устаткування для систем прямої, зворотної та нульової послідовності подано в таблиці 3.

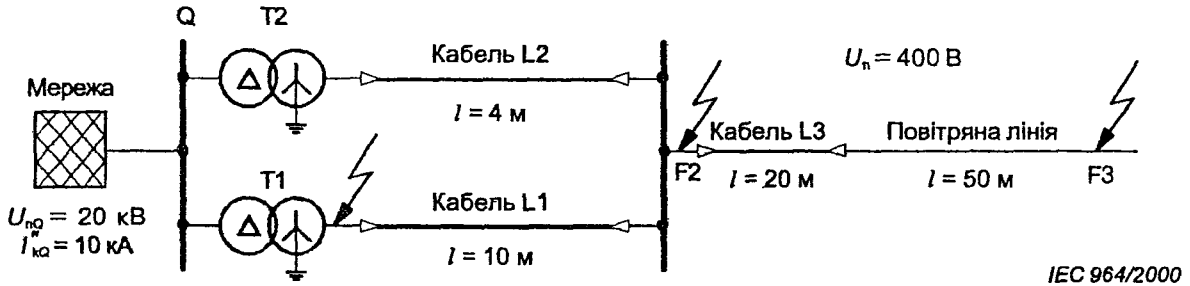


Рисунок 6 — Система низької напруги  $U_n = 400$  В з точками короткого замикання F1, F2 і F3

#### 3.2 Визначання повних опорів прямої послідовності

##### 3.2.1 Мережна лінія живлення

Згідно з рівнянням (6) ІЕС 60909-0 за  $c_Q = c_{Qmax} = 1,1$  (див. таблицю 1 ІЕС 60909-0) отримуємо таке:

$$Z_{Q\alpha} = \frac{c_Q U_{n0}}{\sqrt{3} I_{k0}} \cdot \frac{1}{t_f^2} = \frac{1,1 \cdot 20 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ кА}} \left( \frac{0,41 \text{ кВ}}{20 \text{ кВ}} \right)^2 = 0,534 \text{ МОм};$$

$$\left. \begin{aligned} X_{Q\alpha} &= 0,995 Z_{Q\alpha} = 0,531 \text{ МОм} \\ R_{Q\alpha} &= 0,1 X_{Q\alpha} = 0,053 \text{ МОм} \end{aligned} \right\} Z_{Q\alpha} = (0,053 + j0,531) \text{ МОм.}$$

Таблиця 3 — Дані про електроустаткування для прикладу на рисунку 6. Повні опори прямої та нульової послідовності ( $Z_2 = Z_1$ )

Устаткування	Дані про устаткування	Рівняння (ІЕС 60909-0)	$Z_{(1)} = Z_{(2)}$	$Z_{(0)}$
			МОм	
Мережна лінія живлення Q	$U_{n0} = 20$ кВ; $I_{k0} = 10$ кА; $c_Q = c_{Qmax} = 1,1$ (таблиця 1 ІЕС 60909-0); $R_Q = 0,1 X_Q$ ; $X_Q = 0,995 Z_Q$ .	(6)	$Z_{Q\alpha} = 0,053 + j0,531$	—
Трансформатори T1 (Дуп 5)	$S_{T1} = 630$ кВА; $U_{ГТНВ} = 20$ кВ; $U_{ГТЛВ} = 410$ В; $u_{kT} = 4$ %; $P_{кТ} = 6,5$ кВт; $R_{(0)T}/R_T = 1,0$ ; $X_{(0)T}/X_T = 0,95$ .	(7)—(9) $K_T з (12a)$	$Z_{T1K} = 2,68 + j10,054$	$Z_{(0)T1K} = 2,68 + j9,551$
T2 (Дуп 5)	$S_{T2} = 400$ кВА; $U_{ГТНВ} = 20$ кВ; $U_{ГТЛВ} = 410$ В; $u_{kT} = 4$ %; $P_{кТ} = 4,6$ кВт; $R_{(0)T}/R_T = 1,0$ ; $X_{(0)T}/X_T = 0,95$ .		$Z_{T2K} = 4,712 + j15,698$	$Z_{(0)T2K} = 4,712 + j14,913$

Кінець таблиці 3

Устаткування	Дані про устаткування	Рівняння (ІЕС 60909-0)	$Z_{(1)} = Z_{(2)}$	$Z_{(0)}$
			МОМ	МОМ
L1	Два паралельні 4-жильні кабелі: $l = 10 \text{ м}$ , $4 \cdot 240 \text{ мм}^2$ , мідь, $Z'_L = (0,077 + j0,079) \text{ Ом/км}$ ; $R_{(0)X} = 3,7R_L$ ; $X_{(0)X} = 1,81X_L$ .	Дані та коефіцієнти $\frac{R_{(0)X}}{R_L}$ ; $\frac{X_{(0)X}}{X_L}$	$Z_{L1} = 0,385 + j0,395$	$Z_{(0)X1} = 1,425 + j0,715$
L2	Два паралельні 3-жильні кабелі: $l = 4 \text{ м}$ , $3 \cdot 185 \text{ мм}^2$ , алюміній, $Z'_L = (0,208 + j0,068) \text{ Ом/км}$ ; $R_{(0)X} = 4,23R_L$ ; $X_{(0)X} = 1,21X_L$ .		$Z_{L2} = 0,416 + j0,136$	$Z_{(0)X2} = 1,760 + j0,165$
L3	4-жильний кабель: $l = 20 \text{ м}$ , $4 \cdot 70 \text{ мм}^2$ , мідь, $Z'_L = (0,271 + j0,087) \text{ Ом/км}$ ; $R_{(0)X} = 3R_L$ ; $X_{(0)X} = 4,46X_L$ .	надані виробником	$Z_{L3} = 5,420 + j1,740$	$Z_{(0)X3} = 16,260 + j7,760$
L4	Повітряна лінія: $l = 50 \text{ м}$ , $q_n = 50 \text{ мм}^2$ , мідь; $d = 0,4 \text{ м}$ ; $Z'_L = (0,3704 + j0,297) \text{ Ом/км}$ ; $R_{(0)X} = 2R_L$ ; $X_{(0)X} = 3X_L$ .	(14), (15)	$Z_{L4} = 18,50 + j14,85$	$Z_{(0)X4} = 37,04 + j44,55$

### 3.2.2 Трансформатори

Згідно з рівняннями (7)–(9) і (12а) ІЕС 60909-0:

а) Трансформатор T1:

$$Z_{T1} = \frac{u_{KT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{T1LV}^2}{S_{T1}} = \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{(410 \text{ В})^2}{630 \text{ кВА}} = 10,673 \text{ МОм};$$

$$R_{T1} = \frac{P_{KT1}}{3I_{T1LV}^2} = \frac{R_{KT1} \cdot U_{T1LV}^2}{S_{T1}^2} = \frac{6,5 \text{ кВт} \cdot (410 \text{ В})^2}{(630 \text{ кВА})^2} = 2,753 \text{ МОм};$$

$$u_{Rr} = \frac{R_{KT1}}{S_{T1}} \cdot 100\% = 1,032\%; \quad u_{Xr} = \sqrt{u_{Kr}^2 - u_{Rr}^2} = 3,865\%;$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 10,312 \text{ МОм};$$

$$Z_{T1} = (2,753 + j10,312) \text{ Ом};$$

$$K_{T1} = 0,95 \frac{C_{\max}}{1 + 0,6X_{T1}} = 0,95 \frac{1,05}{1 + 0,6 \cdot 0,03865} = 0,975;$$

$$Z_{T1K} = Z_{T1} K_{T1} = (2,684 + j10,054) \text{ Ом}.$$

б) Трансформатор T2:

$$Z_{T2} = \frac{u_{KT2}}{100\%} \cdot \frac{U_{T2LV}^2}{S_{T2}} = \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{(410 \text{ В})^2}{400 \text{ кВА}} = 16,810 \text{ МОм};$$

$$R_{T2} = \frac{P_{KT2} \cdot U_{T2LV}^2}{S_{T2}^2} = \frac{4,6 \text{ кВт} \cdot (410 \text{ В})^2}{(400 \text{ кВА})^2} = 4,833 \text{ МОм};$$

$$Z_{T2} = (4,833 + j16,100) \text{ Ом};$$

$$K_{T2} = 0,95 \frac{C_{\max}}{1 + 0,6X_{T2}} = 0,95 \frac{1,05}{1 + 0,6 \cdot 0,03831} = 0,975;$$

$$Z_{T2K} = Z_{T2} K_{T2} = (4,712 + j15,698) \text{ Ом}.$$

**3.2.3 Лінії (кабельні та повітряні)**

а) Лінія L1 (два паралельні кабелі):

$$\underline{Z}_{L1} = 0,5(0,077 + j0,079) \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 10 \text{ км} = (0,385 + j0,395) \text{ мОм.}$$

б) Лінія L2 (два паралельні кабелі):

$$\underline{Z}_{L2} = 0,5(0,208 + j0,068) \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4 \text{ м} = (0,416 + j0,136) \text{ мОм.}$$

в) Лінія L3 (кабель):

$$\underline{Z}_{L3} = (0,271 + j0,087) \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 20 \text{ м} = (5,420 + j1,740) \text{ мОм.}$$

г) Лінія L4 (повітряна лінія):

$$R'_{L4} = \frac{\rho}{q_n} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{54 \text{ м} \cdot 50 \text{ мм}^2} = 0,3704 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; \quad r = 1,14 \sqrt{\frac{q_n}{\pi}} = 4,55 \text{ мм};$$

$$X'_{L4} = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r} \right) = 2\pi \cdot 50 \text{ с}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Вс}}{2\pi \text{ А км}} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{0,4 \text{ м}}{0,455 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \right) = 0,297 \frac{\text{Ом}}{\text{км}};$$

$$\underline{Z}_{L4} = (R'_{L4} + jX'_{L4})l = (0,370 + j0,297) \cdot \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 50 \text{ м} = (18,50 + j14,85) \text{ мОм.}$$

**3.3 Визначання повних опорів нульової послідовності**

**3.3.1 Трансформатори**

Для трансформаторів T1 і T2 з групою з'єднань Дуn5 виробники надають такі відношення:

$$R_{(0)T} = R_T \text{ та } X_{(0)T} = 0,95X_T \text{ (див. таблицю 3).}$$

Разом з коригувальними коефіцієнтами повного опору  $K_T$  з 3.2.2 визначають повні опори нульової послідовності трансформаторів:

$$Z_{(0)T1K} = (R_{T1} + j0,95 X_{T1})K_{T1} = (2,684 + j9,551) \text{ мОм};$$

$$Z_{(0)T2K} = (R_{T2} + j0,95 X_{T2})K_{T2} = (4,712 + j14,913) \text{ мОм.}$$

**3.3.2 Лінії (кабельні та повітряні)**

а) Лінія L1:

$R_{(0)L} = 3,7R_L$ ;  $X_{(0)L} = 1,81X_L$  зі зворотним контуром по четвертому провіднику і найближчому провіднику:  $Z_{(0)L1} = (3,7R_{L1} + j1,81X_{L1}) = (1,425 + j0,715) \text{ мОм.}$

б) Лінія L2:

$R_{(0)L} = 4,23R_L$ ;  $X_{(0)L} = 1,21X_L$  з поверненням на покриві:

$$Z_{(0)L2} = (4,23R_{L2} + j1,21X_{L2}) = (1,760 + j0,165) \text{ мОм.}$$

в) Лінія L3:

$R_{(0)L} = 3R_L$ ;  $X_{(0)L} = 4,46X_L$  зі зворотним контуром по четвертому провіднику, оболонці та уземленні:

$$Z_{(0)L3} = (3R_{L3} + j4,46X_{L3}) = (16,260 + j7,760) \text{ мОм.}$$

г) Лінія L4:

Повітряна лінія з  $R_{(0)L} = 2R_L$  і  $X_{(0)L} = 3X_L$  під час обчислювання максимальної сили струму короткого замикання:

$$Z_{(0)L4} = (2R_{L4} + j3X_{L4}) = (37,04 + j44,55) \text{ мОм.}$$

**3.4 Обчислювання  $I_k^n$  та  $I_p$  для трифазних коротких замикань**

**3.4.1 Точка короткого замикання F1**

**3.4.1.1** Згідно з рисунком 7 для системи прямої послідовності визначають наведений нижче повний опір короткого замикання в точці F1:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Q1} + \frac{\underline{Z}_{T1K}(\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} = (1,881 + j6,746) \text{ мОм.}$$

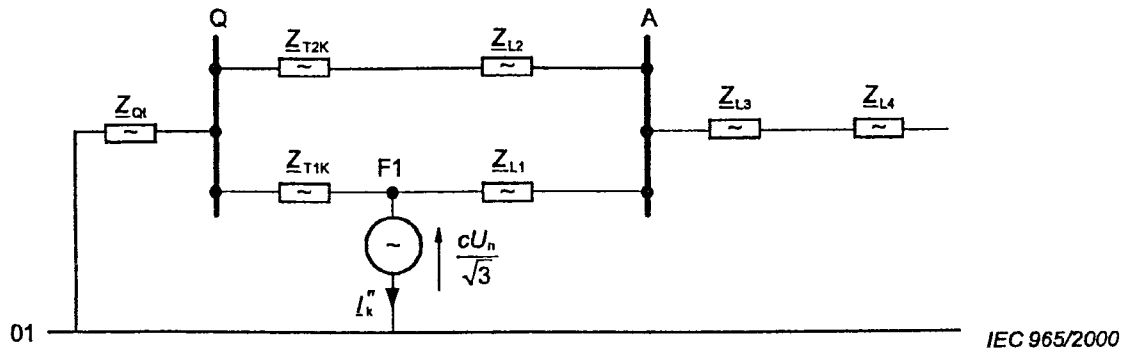


Рисунок 7 — Система прямої послідовності (згідно з рисунком 6) для обчислювання  $I_k''$  у точці короткого замикання F1

Максимальна початкова сила струму трифазного короткого замикання (рівняння (29) ІЕС 60909-0), якщо  $c = c_{max} = 1,05$  (таблиця 1 ІЕС 60909-0):

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1,05 \cdot 400 \text{ В}}{\sqrt{3} \cdot 7,003 \text{ МОм}} = 34,62 \text{ кА.}$$

**Примітка.** Відмінність від результату ІЕС 60909 головним чином спричинена номінальною напругою 400 В (ІЕС 60038). Різниця через використання  $K_T$  становить лише 0,25 %.

Через те, що  $Z_k$  обчислюють у комплексних числах, легко визначити  $i_p$  за методом (b), що використовує відношення  $R/X$  в точці короткого замикання або за методом з більшою точністю (c).

**3.4.1.2 Метод (b):** Відношення повного опору в точці короткого замикання (див. 4.3.1.2 ІЕС 60909-0)

$$\frac{R}{X} = \frac{R_k}{X_k} = 0,279;$$

$$K_{(b)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,445 \text{ (рівняння (55) ІЕС 60909-0).}$$

Оскільки відношення  $R/X$ , що дорівнює  $Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2}$ , вище за 0,3, потрібно використовувати коефіцієнт 1,15 в методі (b) (див. 4.3.1.2b) ІЕС 60909-0).

$$i_{p(b)} = 1,15K_{(b)}\sqrt{2} I_k'' = 1,15 \cdot 1,445 \cdot \sqrt{2} \cdot 34,62 \text{ кА} = 81,36 \text{ кА.}$$

**3.4.1.3 Метод (c):** Еквівалентна частота з  $R/X$  з рівняння (59) ІЕС 60909-0

Повний опір  $Z_c = R_c + jX_c$ , обчислений згідно з методом (c) з еквівалентною частотою  $f_c = 20$  Гц ( $f = 50$  Гц). Процедура обчислювання аналогічна обчислюванню  $Z_k$ , але використовує такі величини 20 Гц:

$$Z_{Qtc} = (0,053 + j0,212) \text{ МОм};$$

$$Z_{T1kc} = (2,684 + j4,0212) \text{ МОм}; \quad Z_{T2Kc} = (4,712 + j6,279) \text{ МОм};$$

$$Z_{L1c} = (0,385 + j0,158) \text{ МОм}; \quad Z_{L2c} = (0,416 + j0,054) \text{ МОм};$$

$$Z_c = Z_{Qtc} + \frac{Z_{T1kc}(Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c})}{Z_{T1kc} + Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c}} = (1,8738 + j2,7076) \text{ МОм};$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{1,874 \text{ МОм}}{2,707 \text{ МОм}} \cdot \frac{20 \text{ Гц}}{50 \text{ Гц}} = 0,277;$$

$$K_{(c)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,447;$$

$$i_{p(c)} = K_{(c)}\sqrt{2} I_k'' = 1,447 \cdot \sqrt{2} \cdot 34,62 \text{ кА} = 70,85 \text{ кА.}$$

**Примітка.** Метод (a) в цьому разі не зовсім адекватний (див. 4.3.1.2 ІЕС 60909-0). Цей метод потрібно використовувати лише як перше наближення, якщо обчислюють силу струму короткого замикання лише з реактивними опорами. Метод (a) призводить до  $K_{(a)} = 1,46$  на основі найменших відношень  $R/X$  з  $Z_{T1K}$  і  $Z_{T2K} + Z_{L2} + Z_{L1}$ . Якщо мережну лінію живлення з  $R_{Qc}/X_{Qc} = 0,1$  також розглядають як відгалуження мережі, то визначають коефіцієнт  $K_{(a)} = 1,75$  і максимальну силу струму короткого замикання  $i_{p(a)} = 85,5 \text{ кА} > i_{p(c)}$  (див. 2.3 ІЕС 60909-1).

### 3.4.2 Точка короткого замикання F2

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Q1} + \frac{(\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{L1})(\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} = (1,977 + j6,827) \text{ МОм};$$

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1,05 \cdot 400 \text{ В}}{\sqrt{3} \cdot 7,107 \text{ МОм}} = 34,12 \text{ кА}.$$

Обчислювання за методом (с) (див. 4.3.1.2 ІЕС 60909-0) призводить до такого:

$$\underline{Z}_c = (1,976 + j2,733) \text{ МОм};$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{1,976 \text{ МОм}}{2,733 \text{ МОм}} \cdot \frac{20 \text{ Гц}}{50 \text{ Гц}} = 0,289;$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_k'' = 1,432 \cdot \sqrt{2} \cdot 34,12 \text{ кА} = 69,10 \text{ кА}.$$

**Примітка.** Остаточне відношення  $R/X$  більшою мірою визначається двома відгалуженнями  $\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{L1}$  і  $\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L2}$  з  $R/X = 0,294$  та  $R/X = 0,324$ . Ці два відношення аналогічні  $R_c/X_c = 0,29$ , що призводить до  $\kappa_{(c)} = 1,431$ . Обчислювання за методом (b), але без додаткового коефіцієнта 1,15 призводить до такого:

$$i_{p(b)} = \kappa_{(b)} \sqrt{2} I_k'' = 1,432 \cdot \sqrt{2} \cdot 34,12 \text{ кА} = 69,10 \text{ кА}.$$

### 3.4.3 Точка короткого замикання F3

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Q1} + \frac{(\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{L1})(\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} + \underline{Z}_{L3} + \underline{Z}_{L4} = (25,897 + j23,417) \text{ МОм};$$

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1,05 \cdot 400 \text{ В}}{\sqrt{3} \cdot 34,914 \text{ МОм}} = 6,95 \text{ кА};$$

$$\underline{Z}_c = \underline{Z}_{F2c} + \underline{Z}_{L3c} + \underline{Z}_{L4c} = (1,976 + j2,733) \text{ МОм} + (23,90 + j6,636) \text{ МОм};$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{25,896 \text{ МОм}}{9,369 \text{ МОм}} \cdot \frac{20 \text{ Гц}}{50 \text{ Гц}} = 1,106;$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_k'' = 1,056 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,95 \text{ кА} = 10,38 \text{ кА}.$$

## 3.5 Обчислювання $I_{k1}''$ та $i_{p1}$ для коротких замикань фаза—земля

### 3.5.1 Точка короткого замикання F1

На рисунку 8 зображено еквівалентну схему системи прямої, зворотної та нульової послідовності мережі для рисунка 6 з коротким замиканням фаза—земля в точці F1.

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1,881 + j6,764) \text{ МОм (див. 3.4.1);}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)T1K}(\underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} = (2,140 + j6,009) \text{ МОм};$$

$$\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} = 2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} = (5,902 + j19,537) \text{ МОм}.$$

Початкову силу струму короткого замикання фаза—земля розраховують згідно з рівнянням (53) ІЕС 60909-0:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 400 \text{ В}}{20,409 \text{ МОм}} = 35,64 \text{ кА}.$$

Максимальний струм короткого замикання  $i_{p1}$  розраховують, використовуючи коефіцієнт  $\kappa_{(c)} = 1,447$  із системи прямої послідовності в 3.4.1:

$$i_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}'' = 1,447 \cdot \sqrt{2} \cdot 35,64 \text{ кА} = 72,93 \text{ кА}.$$

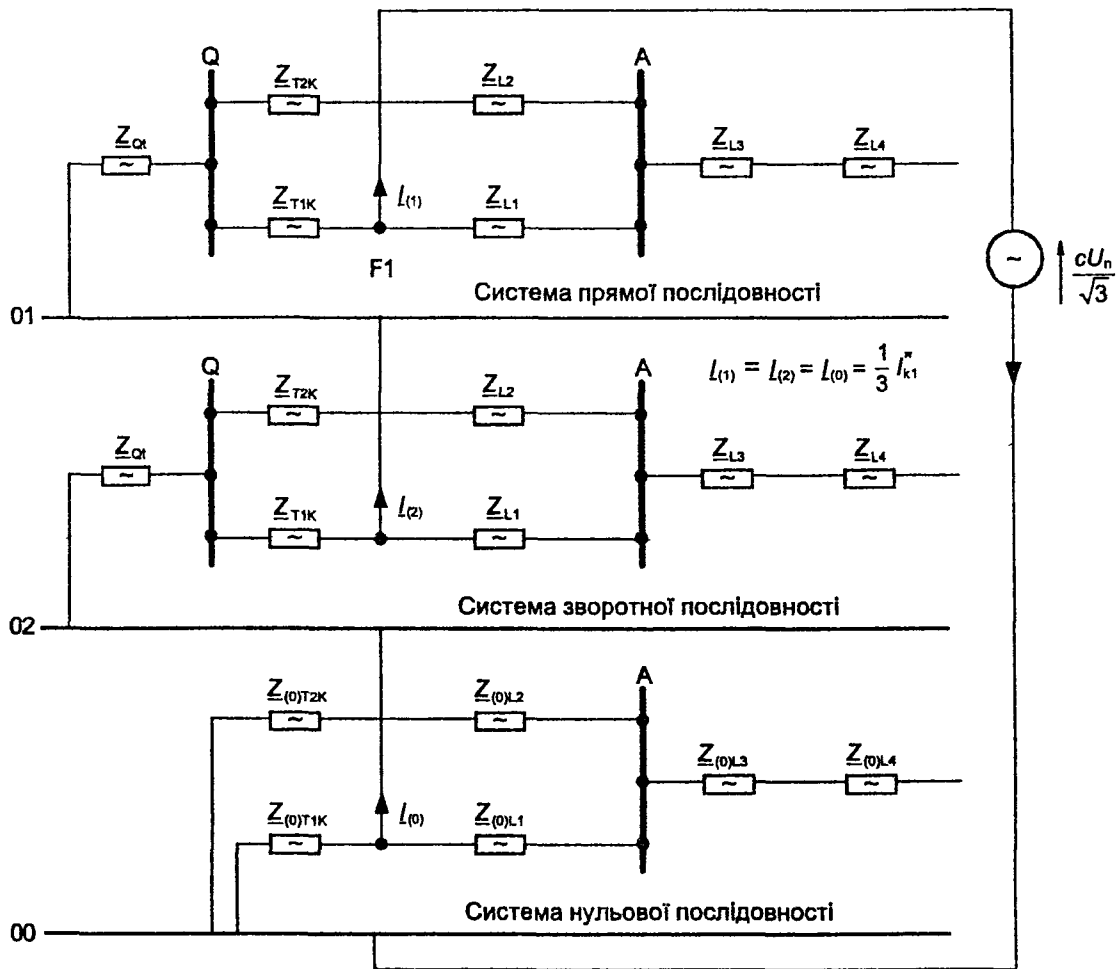
**Примітка.** Під час використання  $\underline{Z}_{(c)}$  і  $\underline{Z}_{(0)c}$  в докладнішому обчисленні  $\kappa_{(c)}$  та  $i_{p1(c)}$  можна визначити таке:

$$\frac{R}{X} = \frac{2R_c + R_{(0)c}}{2X_c + X_{(0)c}} \cdot \frac{f_c}{f} = \frac{5,828 \text{ МОм}}{7,875 \text{ МОм}} \cdot \frac{20 \text{ Гц}}{50 \text{ Гц}} = 0,296;$$

$$\kappa_{(c)} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,423;$$

$$i_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}'' = 1,423 \cdot \sqrt{2} \cdot 35,64 \text{ кА} = 71,72 \text{ кА}.$$

У цьому разі відмінність становить всього 1,7 %.



IEC 966/2000

Рисунок 8 — Система прямої, зворотної та нульової послідовності із з'єднаннями в точці короткого замикання F1 для обчислювання  $I_{k1}^n$

**3.5.2 Точка короткого замикання F2**

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_k = (1,977 + j6,827) \text{ МОм (див. 3.4.2);}$$

$$Z_{(0)} = \frac{(Z_{(0)T1K} + Z_{(0)L1})(Z_{(0)T2K} + Z_{(0)L2})}{Z_{(0)T1K} + Z_{(0)T2K} + Z_{(0)L1} + Z_{(0)L2}} = (2,516 + j6,109) \text{ МОм;}$$

$$I_{k1}^n = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2Z_{(1)} + Z_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 400 \text{ В}}{20,795 \text{ МОм}} = 34,98 \text{ кА;}$$

$$i_{p1(e)} = \kappa_{(e)} \sqrt{2} I_{k1}^n = 1,432 \cdot \sqrt{2} \cdot 34,98 \text{ кА} = 70,84 \text{ кА.}$$

**3.5.3 Точка короткого замикання F3**

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_k = (25,897 + j23,417) \text{ МОм (див. 3.4.3);}$$

$$Z_{(0)} = Z_{(0)F2} + Z_{(0)L3} + Z_{(0)L4} = (55,816 + j58,419) \text{ МОм;}$$

$$I_{k1}^n = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2Z_{(1)} + Z_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 400 \text{ В}}{150,550 \text{ МОм}} = 4,83 \text{ кА;}$$

$$i_{p1(e)} = \kappa_{(e)} \sqrt{2} I_{k1}^n = 1,056 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,83 \text{ кА} = 7,21 \text{ кА.}$$

### 3.6 Результати обчислень

У таблиці 4а наведено результати для прикладу на рисунку 6 для повних опорів і сил струму короткого замикання. У таблиці 4б подано Джоулевий інтеграл (рівняння (102) ІЕС 60909-0).

Таблиця 4а — Повні опори короткого замикання і струми короткого замикання

Точка короткого замикання	$Z_k = Z_{(1)}$	$Z_{(0)}$	$I_k''$	$I_{p(c)}$	$I_{k1}''$	$I_{p1(c)}$	$I_{k1}''/I_k''$
	МОм	МОм	кА	кА	кА	кА	—
F1	7,003	6,421	34,62	70,85	35,64	72,93	1,03
F2	7,107	6,601	34,12	69,10	34,98	70,84	1,03
F3	34,929	80,79	6,95	10,38	4,83	7,21	0,70

Джоулевий інтеграл розраховують у точках короткого замикання F2 і F3 на рисунку 6 з використанням коефіцієнтів  $m$  і  $n$  на рисунках 21 і 22 ІЕС 60909-0. Коефіцієнт  $m$  розраховують за рівнянням  $m$  у додатку А ІЕС 60909-0. Тривалість відсікання (тривалість короткого замикання  $T_k$ ) для запобіжників визначають на основі наданих характеристик для запобіжників низької напруги 250 А.

Таблиця 4б — Джоулевий інтеграл залежно від  $T_k$  в точці короткого замикання F2 і F3

Точка короткого замикання	Точка короткого замикання	Тип захисту	$T_k$	$\kappa$	$m^1$	$n^2$	Джоулевий інтеграл (рівняння (102) ІЕС 60909-0)
							(кА) <sup>2</sup> с
	кА	—	с	—	—	—	(кА) <sup>2</sup> с
F2	$I_k'' = 34,12$	Автоматичний вимикач 250 А	0,06	1,43	0,197	1	83,61
F3	$I_k'' = 6,95$		0,06	1,06	0,059	1	3,07
F3	$I_{k1}'' = 4,83$		0,06	1,06	0,059	1	1,48
F2	$I_k'' = 34,12$	Запобіжник 250 А	<0,005	—	—	—	<0,56 <sup>3)</sup>
F3	$I_k'' = 6,95$		0,02	1,06	0,178	1	1,19
F3	$I_{k1}'' = 4,83$		0,07	1,06	0,051	1	1,72

<sup>1)</sup> Розраховують за рівнянням  $m$  (див. додаток А ІЕС 60909-0).  
<sup>2)</sup> Віддалене від генератора коротке замикання:  $I_k = I_{k1}$ ,  $n = 1$ .  
<sup>3)</sup> Характеристика відсікання запобіжника.

**Примітка.** За певної тривалості короткого замикання  $T_k$ , що дорівнює тривалості для автоматичного вимикача з прикладу, для найбільшої сили струму короткого замикання має місце максимальний Джоулевий інтеграл. А за прямою протилежною характеристикою запобіжника з прикладу має місце найбільший Джоулевий інтеграл із найменшою силою струму короткого замикання (це може бути одиничне коротке замикання фаза—земля, як в прикладі в точці короткого замикання F3).

## 4 ОБЧИСЛЮВАННЯ ТРИФАЗНИХ СТРУМІВ КОРТКОГО ЗАМИКАННЯ В СИСТЕМІ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ. ВПЛИВ ДВИГУНІВ

### 4.1 Поставлення задачі

На рисунку 9 зображено систему середньої напруги 33 кВ/6 кВ (50 Гц). Силу струму короткого замикання обчислюватимуть з асинхронними двигунами з живленням від шини 6 кВ і без них, щоб показати їх вплив на струми короткого замикання в точці короткого замикання F.

Підстанція 33 кВ/6 кВ із двома мережними трансформаторами по  $S_{T1} = 15$  МВА живиться через два трижильні кабелі 30 кВ від мережної лінії живлення з  $U_{но} = 33$  кВ і  $I_{кq}'' = 13,12$  кА ( $S_{кq}'' = \sqrt{3} U_{кq} I_{кq}'' = 750$  МВА (див. 1.3.6 ІЕС 60909-0)). Цю інформацію про мережну лінію живлення, обчислену відповідно до ІЕС 60909-0, надає енергопостачальна компанія.

Обчислюють лише з комплексними опорами (див. 4.2) і з реактивними опорами (див. 4.3), щоб показати різницю між ними. Це необхідно, щоб показати, що у багатьох випадках на рівні високої та середньої напруги буває досить використовувати реактивні опори короткого замикання електроустановки лише під час обчислювання трифазних струмів короткого замикання. Крім того, обчислювання провадять з величинами системи відносних одиниць (див. 4.4).

Обчислення сили струму короткого замикання методом накладання подано в 4.5, і воно показує, що результати значень струмів короткого замикання залежать від поточкорозподілу навантаги, напруги в точці короткого замикання перед виникненням короткого замикання і положенням перемикача відгалужень трансформаторів під навантагою (див. рисунок 9).

На рисунку 9 зображено схему з'єднань трифазної системи змінного струму 33 кВ/6 кВ і дані електроустаткування.

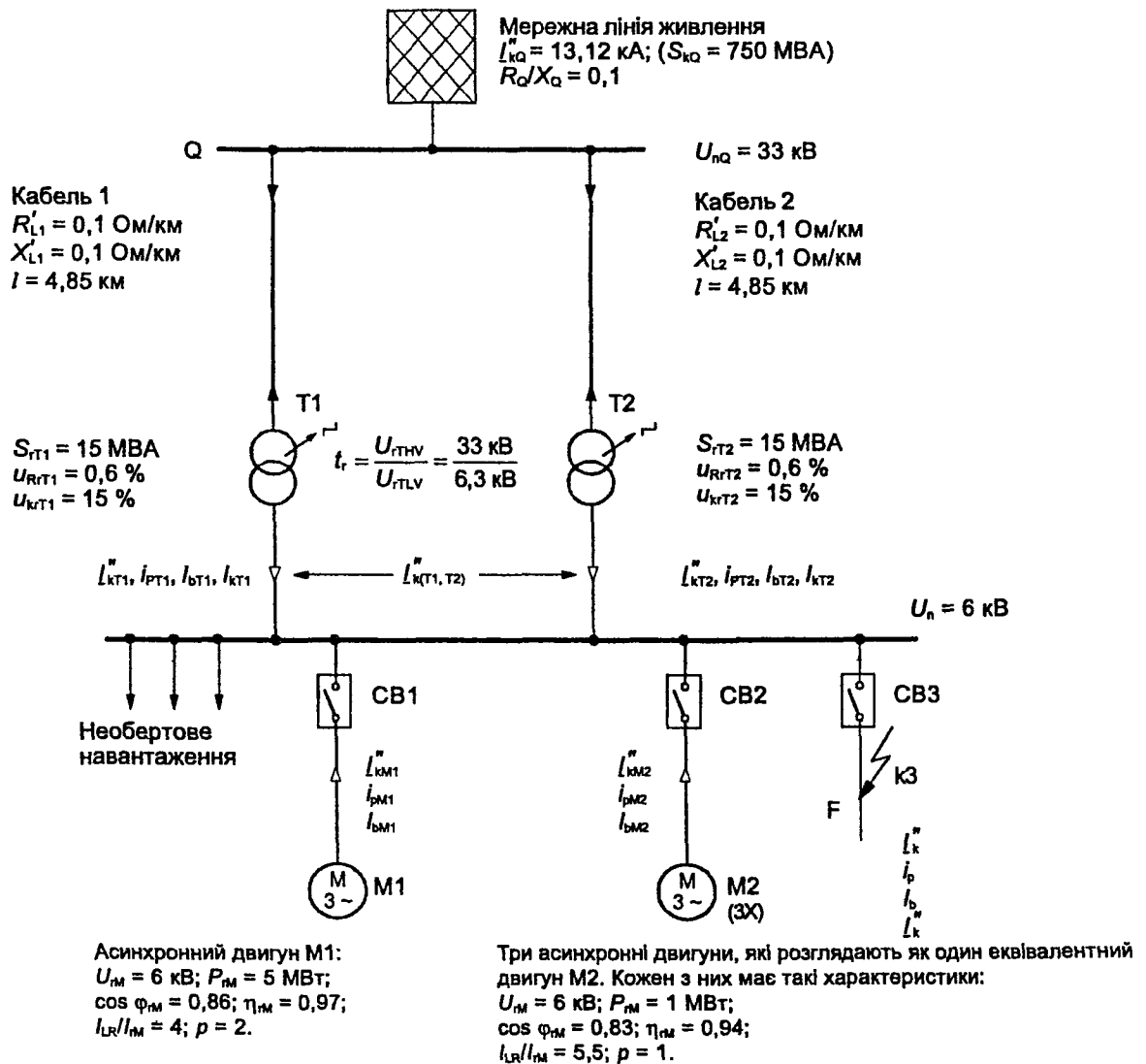
**4.2 Комплексні обчислювання з абсолютними величинами**

Комплексні опори короткого замикання в таблиці 5 розраховано на основі даних на рисунку 9 і рівнянь ІЕС 60909-0.

Силу струму короткого замикання  $I_k''$  у точці короткого замикання F визначають із комплексного складання часткових струмів короткого замикання на рисунку 9 (див. 4.2.1.2 ІЕС 60909-0).

$$I_k'' = I_{kT1}'' + I_{kT2}'' + I_{kM1}'' + I_{kM2}''$$

де  $I_{kM2}''$  — часткова сила струму короткого замикання від трьох паралельних двигунів з  $P_{M2} = 1$  МВт кожен (рисунок 9), які розглядають як один еквівалентний двигун M2.



IEC 967/2000

Рисунок 9 — Дані для мережі середньої напруги 33 кВ/6 кВ



Таблиця 5 — Обчислення повних опорів короткого замикання електроустановки і  $Z_{к(Т1, Т2)}$  в точці короткого замикання F без двигунів (автоматичні вимикачі СВ1 і СВ2 розімкнені)

№	Устаткування	Рівняння (ІЕС 60909-0) і обчислення	Повний опір, Ом
1	Мережна лінія живлення	(6) $Z_{Q1} = \frac{c_0 U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_f^2} = \frac{1,1 \cdot 33 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 13,12 \text{ кА}} \cdot \left( \frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$ $X_{Q1} = 0,995 Z_{Q1}$ ; $R_{Q1} = 0,1 X_{Q1}$ $Z_{Q1} = R_{Q1} + j X_{Q1}$	(0,0582)  0,0058 + j0,0579
2	Кабель L1 (= кабель L2)	$R_{L11} = R'_{L1} \frac{1}{t_f^2} = 0,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4,85 \text{ км} \cdot \left( \frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$ $X_{L11} = X'_{L1} \frac{1}{t_f^2} = 0,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4,85 \text{ км} \cdot \left( \frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$ $Z_{L11} = R_{L11} + j X_{L11}$	  0,0177 + j0,0177
3	Трансформатор Т1 (= трансформатор Т2)	(7) $Z_{T1} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{T1}} = \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{(6,3 \text{ кВ})^2}{15 \text{ МВА}}$ (8) $R_{T1} = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{T1}} = \frac{0,6\%}{100\%} \cdot \frac{(6,3 \text{ кВ})^2}{15 \text{ МВА}}$ (9) $X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2}$ (12a) $K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot 0,1499} = 0,9588$ $Z_{T1K} = (R_{T1} + j X_{T1}) K_T$	(0,3969)  (0,0159)  (0,3966)  0,0152 + j0,3803
4	L1 + T1 = L2 + T2	$Z_{L1K} + Z_{T1K} = Z_{L2} + Z_{T2K}$	0,0329 + j0,3980
5	(L1 + T1)    (L2 + T2) у паралелі	$\frac{1}{2} (Z_{L11} + Z_{T1K})$	0,0165 + j0,1990
6	Повний опір короткого замикання без двигунів	$Z_{к(Т1, Т2)} = Z_{Q1} + \frac{1}{2} (Z_{L11} + Z_{T1K})$	0,0223 + j0,2569
7	Двигун М1  Двигун М2 (три пристрої 1 МВт)	(26) $Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR} / I_{M1}} \cdot \frac{U_{M1}^2}{S_{M1}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(6 \text{ кВ})^2}{6 \text{ МВА}}$ з $S_{M1} = P_{M1} / (\cos \varphi_{M1} \eta_{M1}) = 6 \text{ МВА}$ (26) $Z_{M2} = \frac{1}{3} \frac{1}{I_{LR} / I_{M2}} \cdot \frac{U_{M2}^2}{S_{M2}} = \frac{1}{3} \frac{1}{5,5} \cdot \frac{(6 \text{ кВ})^2}{1,28 \text{ МВА}}$ з $S_{M2} = P_{M2} / (\cos \varphi_{M2} \eta_{M2}) = 1,28 \text{ МВА}$	1,500  1,705

Суму  $I''_{кТ1} + I''_{кТ2}$  на вторинній стороні трансформаторів визначають з використанням  $Z_{к(Т1, Т2)}$  з таблиці 5.

$$I''_{кТ1} + I''_{кТ2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{к(Т1, Т2)}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} (0,0223 + j0,2569) \text{ Ом}} = (1,28 - j14,72) \text{ кА};$$

$$I''_{к(Т1, Т2)} = |I''_{кТ1} + I''_{кТ2}| = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{к(Т1, Т2)}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 0,2579 \text{ Ом}} = 14,78 \text{ кА}.$$

Часткову силу струму короткого замикання двигунів визначають із  $Z_{M1}$  і  $Z_{M2}$ , використовуючи  $R_M = 0,1 X_M$  і  $X_M = 0,995 Z_M$  (див. 3.8.1 ІЕС 60909-0) для асинхронних двигунів з  $P_{M1}/p \geq 1 \text{ МВт}$ .

$$I''_{кМ1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} (0,149 + j1,493) \text{ Ом}} = (0,25 - j2,53) \text{ кА};$$

$$I''_{кМ2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} (0,170 + j1,696) \text{ Ом}} = (0,22 - j2,22) \text{ кА}.$$

Додавання  $I_{kT1}'' + I_{kT2}'' + I_{kM1}'' + I_{kM2}''$  призводить до такого:

$$I_k'' = (1,75 - j19,47) \text{ кА};$$

$$I_k'' = 19,55 \text{ кА}.$$

Згідно з 4.3.1.1 і рівнянням (57) ІЕС 60909-0 максимальну силу струму короткого замикання визначають так:

$$I_p = I_{p(T1,T2)} + I_{pM1} + I_{pM2} = (37,21 + 6,29 + 5,52) \text{ кА} = 49,02 \text{ кА}$$

з частковими максимальними силами струму короткого замикання;

$$I_{p(T1,T2)} = \kappa \sqrt{2} I_{k(T1,T2)}'' = 1,78 \cdot \sqrt{2} \cdot 14,78 \text{ кА} = 37,21 \text{ кА}$$

з  $R/X = 0,022 \text{ Ом}/0,257 \text{ Ом}$  і  $\kappa = 1,78$  (рівняння (55) ІЕС 60909-0);

$$I_{pM1} = \kappa \sqrt{2} I_{kM1}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,54 \text{ кА} = 6,29 \text{ кА}$$

з  $R_{M1}/X_{M1} = 0,1$  і  $\kappa = 1,75$  (таблиця 3 ІЕС 60909-0);

$$I_{pM2} = \kappa \sqrt{2} I_{kM2}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,23 \text{ кА} = 5,52 \text{ кА}$$

з  $R_{M2}/X_{M2} = 0,1$  і  $\kappa = 1,75$  (таблиця 3 ІЕС 60909-0).

Згідно з 4.5.2 і рівняннями (70) і (73) ІЕС 60909-0 струм відключення симетричного короткого замикання з мінімальним часом затримки  $t_{\min} = 0,1$  с визначають таким чином:

$$I_b = I_{b(T1,T2)} + I_{bM1} + I_{bM2} = I_{k(T1,T2)}'' + \mu_{M1} q_{M1} I_{kM1}'' + \mu_{M2} q_{M2} I_{kM2}'';$$

$$I_b = (14,78 + 0,80 \cdot 0,68 \cdot 2,54 + 0,72 \cdot 0,57 \cdot 2,23) \text{ кА} = 17,08 \text{ кА};$$

$$\mu_{M1} = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 \cdot 4,4} = 0,80;$$

$$q_{M1} = 0,57 + 0,12 \cdot \ln 2,5 = 0,68;$$

$$\mu_{M2} = 0,62 + 0,72 e^{-0,32 \cdot 6,05} = 0,72;$$

$$q_{M2} = 0,57 + 0,12 \cdot \ln 1,0 = 0,57.$$

Максимальне затушення періодичного складника  $i_{d.c.}$  сили струму короткого замикання за  $t = t_{\min} = 0,1$  с можна оцінити за рівнянням (64) ІЕС 60909-0.

$$i_{d.c.} = i_{d.c.(T1,T2)} + i_{d.c.M1} + i_{d.c.M2} = (1,420 + 0,155 + 0,137) \text{ кА} = 1,71 \text{ кА};$$

$$i_{d.c.(T1,T2)} = \sqrt{2} I_{k(T1,T2)}'' e^{-2\pi f(R/X)} = 1,420 \text{ кА};$$

$$i_{d.c.M1} = \sqrt{2} I_{kM1}'' e^{-2\pi f(R_{M1}/X_{M1})} = 0,155 \text{ кА};$$

$$i_{d.c.M2} = \sqrt{2} I_{kM2}'' e^{-2\pi f(R_{M2}/X_{M2})} = 0,136 \text{ кА}.$$

Цей сталий складник струму малий порівняно з  $I_b$ .

Оскільки асинхронні двигуни не впливають на струм сталого короткого замикання ( $I_{kM1} = 0$ ,  $I_{kM2} = 0$ ), то у разі короткого замикання на клеммах струм сталого короткого замикання в F набуває значення:

$$I_k = I_{k(T1,T2)} + I_{kM1} + I_{kM2} = I_{k(T1,T2)}'' = 14,78 \text{ кА}.$$

#### 4.3 Обчислювання із реактивним опором короткого замикання електроустаткування

Обчислювання із реактивним опором електроустаткування дійсне, лише коли  $R_k < 0,3X_k$  (див. 4.2.1.1 ІЕС 60909-0). Якщо ця умова задоволена, то це відображається на рисунку 9.

Таблиця 6 описує процедуру приблизного обчислення  $X_{k(T1,T2)}$  без впливу асинхронних двигунів (CB1 і CB2 розімкнені).

Таблиця 6 — Обчислення реактивних опорів короткого замикання електроустановки і  $X_{к(Т1, Т2)}$  в точці короткого замикання F

№	Устаткування	Рівняння (ІЕС 60909-0) і обчислення	Повний опір, Ом
1	Мережна лінія живлення ( $X_Q \approx Z_Q$ )	(6) $X_{Q1} \approx \frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{I_f^2} = \frac{1,1 \cdot 33 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 13,12 \text{ кА}} \cdot \left( \frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$	(0,0582)
2	Кабель L1	$X_{L11} = X'_{L1} l \frac{1}{I_f^2} = 0,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4,85 \text{ км} \cdot \left( \frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$	0,0177
3	Трансформатор Т1 ( $X_T \approx Z_T$ )	(7) $X_{T1} \approx \frac{u_{кТ1}}{100\%} \cdot \frac{U_{Г1LV}^2}{S_{Т1}} = \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{(6,3 \text{ кВ})^2}{15 \text{ МВА}}$ (12а) $K_T = 0,95 \frac{c_{\text{твк}}}{1+0,6 \cdot X_T} \approx 0,95 \frac{1,1}{1+0,6 \cdot 0,15}$ $K_T = 0,959$ $X_{Т1к} = X_{Т1} K_T$	(0,3969)   0,3805
4	L1 + T1 = L2 + T2	$X_{L11} + X_{Т1к} = X_{L21} + X_{Т2к}$	0,3982
5	(L1 + T1)    (L2 + T2)	$\frac{1}{2} (X_{L11} + X_{Т1к})$	0,1991
6	Повний опір короткого замикання без двигунів	$X_{к(Т1, Т2)} = X_{Q1} + \frac{1}{2} (X_{L11} + X_{Т1к})$	0,2573

Сила струму короткого замикання  $I_{к(Т1,Т2)}''$  без двигунів:

$$I_{к(Т1,Т2)}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}X_{к(Т1,Т2)}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 0,2573 \text{ Ом}} = 14,81 \text{ кА.}$$

Цей результат на +0,2 % відрізняється від результату, визначеного в 4.2, через незначне відношення R/X трансформаторів.

Реактивні опори та часткові струми короткого замикання двигунів:

$$X_{M1} \approx \frac{1}{I_{LR} / I_M} \cdot \frac{U_{ГМ}^2}{S_M} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(6 \text{ кВ})^2}{6 \text{ МВА}} = 1,5 \text{ Ом}; I_{кM1}'' = 2,54 \text{ кА};$$

$$X_{M2} \approx \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR} / I_M} \cdot \frac{U_{ГМ}^2}{S_M} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5,5} \cdot \frac{(6 \text{ кВ})^2}{1,28 \text{ МВА}} = 1,705 \text{ Ом}; I_{кM2}'' = 2,23 \text{ кА.}$$

Якщо асинхронні двигуни впливають на струм короткого замикання в F (CB1 і CB2 замкнуті), то сумарну силу струму короткого замикання в F визначають таким чином:

$$I_k'' = I_{к(Т1,Т2)}'' + I_{кM1}'' + I_{кM2}'' = (14,81 + 2,54 + 2,23) \text{ кА} = 19,58 \text{ кА.}$$

Цей результат приблизно дорівнює результату в 4.2 ( $I_k'' = 19,55 \text{ кА}$ ).

Максимальну силу струму короткого замикання визначають з використанням R/X трансформаторів:  $R_T/X_T \approx u_R/u_{кT} = 0,6\% / 15\% = 0,04$  (на консервативній стороні) і  $R_M/X_M = 0,1$ .

$$i_p = i_{p(Т1,Т2)} + i_{pM1} + i_{pM2} = (39,57 + 6,29 + 5,52) \text{ кА} = 51,38 \text{ кА};$$

$$\text{з } i_{p(Т1,Т2)} = K_{(Т1,Т2)} \sqrt{2} I_{к(Т1,Т2)}'' = 1,89 \cdot \sqrt{2} \cdot 14,81 \text{ кА} = 39,57 \text{ кА};$$

$$i_{pM1} = K_{(M1)} \sqrt{2} I_{кM1}'' = 1,75 \sqrt{2} \cdot 2,54 \text{ кА} = 6,29 \text{ кА};$$

$$i_{pM2} = K_{(M2)} \sqrt{2} I_{кM2}'' = 1,75 \sqrt{2} \cdot 2,23 \text{ кА} = 5,52 \text{ кА.}$$

Цей результат ( $i_p = 51,38 \text{ кА}$ ) приблизно на 5 % вище, ніж результат комплексного обчислення в 4.2 ( $i_p = 49,02 \text{ кА}$ ).

Обчислювання  $I_b$  і  $I_k$  вже описано в 4.2.

**4.4 Обчислювання із величинами у відносних одиницях**

Оскільки в цьому разі достатньо використовувати лише реактивні опори під час обчислювання сили струму короткого замикання, як показано в 4.2 і 4.3, то обчислювання у відносних одиницях треба проводити з реактивними опорами електроустановки.

Для обчислення у відносних одиницях (в.о.) потрібно вибрати дві базові величини. Ці базові величини (індекс *R*) мають бути такими:

$$U_R = U_n = 6 \text{ кВ або } U_R = U_n = 33 \text{ кВ і } S_R = 100 \text{ МВА.}$$

Таким чином, величини у відносних одиницях (із зірочкою\* у верхньому індексі перед позначкою) визначають так:

$$*U = \frac{U}{U_R}; *I = \frac{I \cdot U_R}{S_R}; *Z = \frac{Z \cdot S_R}{U_R^2}; *S = \frac{S}{S_R}.$$

Якщо система не послідовна, тобто  $U_{ГТНВ}/U_{ГТЛВ} \neq U_{ПНВ}/U_{ПЛВ}$ , то номінальний коефіцієнт трансформації, пов'язаний з напругами, вимірюваними у відносних одиницях (в.о.), стає:

$$*t_r = \frac{U_{ГТНВ}}{U_{ГТЛВ}} \cdot \frac{U_{R,6кВ}}{U_{R,33кВ}} = \frac{33 \text{ кВ}}{6,3 \text{ кВ}} \cdot \frac{6 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} = 0,9524.$$

Процедуру обчислювання реактивного опору короткого замикання  $*X_{к(Т1,Т2)}$  без впливу двигунів описано в таблиці 7 (аналогічно таблиці 6).

**Таблиця 7** — Обчислення реактивних опорів короткого замикання електроустановки у відносних одиницях і  $*X_{к(Т1, Т2)}$  у точці короткого замикання F

№	Устаткування	Рівняння (ІЕС 60909-0) і обчислення	Реактивний опір, в.о.
1	Мережна лінія живлення <sup>1)</sup>	(6) $*X_{кЛ} = \frac{c_0 *U_{пЛ}}{\sqrt{3} *I_{кЛ}} \cdot \frac{1}{*t_r^2} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ в.о.}}{\sqrt{3} \cdot 4,33 \text{ в.о.}} \cdot \frac{1}{0,9524^2}$	0,1617
2	Кабель L1 <sup>2)</sup>	$*X_{L1} = X'_{L1} \cdot \frac{S_R}{U_R^2} \cdot \frac{1}{*t_r^2} = 0,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4,85 \text{ км} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{(33 \text{ кВ})^2} \cdot \frac{1}{0,9524^2}$	0,0491
3	Трансформатор Т1 <sup>3)</sup>	(7) $*X_{Т1} = \frac{u_{кТ1}}{100 \%} \cdot \frac{U_{ГТЛВ}^2 \cdot S_R}{S_{Т1} \cdot U_R^2} = \frac{15 \%}{100 \%} \cdot \frac{(6,3 \text{ кВ})^2}{15 \text{ МВА}} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{(6 \text{ кВ})^2}$ (12а) $K_T = 0,95 \frac{c_{\text{max}}}{1 + 0,6 \cdot X_T} \approx 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,15}$ $K_T = 0,959$ (див. таблицю 6) $*X_{Т1к} = *X_{Т1} K_T$	(1,1025)  1,0573
4	L1 + T1 = L2 + T2	$*X_{L11} + *X_{Т1к} = *X_{L21} + *X_{Т2к}$	1,1064
5	(L1 + T1)    (L2 + T2)	$\frac{1}{2} (*X_{L11} + *X_{Т1к})$	0,5532
6	Реактивний опір короткого замикання (в.о.) без двигунів	$*X_{к(Т1, Т2)} = *X_{кЛ} + \frac{1}{2} (*X_{L11} + *X_{Т1к})$	0,7149

<sup>1)</sup>  $*I_{кЛ} = I_{кЛ} \cdot U_R / S_R = 13,12 \text{ кА} \cdot 33 \text{ кВ} / 100 \text{ МВА} = 4,33 \text{ в.о.}$   
<sup>2)</sup>  $U_R = 33 \text{ кВ.}$   
<sup>3)</sup>  $U_R = 6 \text{ кВ.}$

Сила струму короткого замикання  $*I_{к(Т1,Т2)}''$  без двигунів:

$$*I_{к(Т1,Т2)}'' = \frac{c *U_n}{\sqrt{3} *X_{к(Т1,Т2)}} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ в.о.}}{\sqrt{3} \cdot 0,7149 \text{ в.о.}} = 0,8884 \text{ в.о.};$$

$$I_{к(Т1,Т2)}'' = *I_{к(Т1,Т2)}'' \cdot \frac{S_R}{U_R} = 0,8884 \text{ в.о.} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{6 \text{ кВ}} = 14,81 \text{ кА.}$$

Реактивні опори та сили струму короткого замикання асинхронних двигунів у відносних одиницях ( $U_{FM} = U_R = 6 \text{ кВ}$ ):

$$*X_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{FM}} \cdot \frac{S_R}{S_{FM}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{6 \text{ МВА}} = 4,167 \text{ в.о.};$$

$$*X_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{FM}} \cdot \frac{S_R}{S_{FM}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5,5} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{1,28 \text{ МВА}} = 4,735 \text{ в.о.};$$

$$*I''_{KM1} = \frac{c \cdot *U_R}{\sqrt{3} \cdot *X_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ в.о.}}{\sqrt{3} \cdot 4,167 \text{ в.о.}} = 0,1524 \text{ в.о.}; \quad I''_{KM1} = *I''_{KM1} \cdot \frac{S_R}{U_R} = 2,54 \text{ кА};$$

$$*I''_{KM2} = \frac{c \cdot *U_R}{\sqrt{3} \cdot *X_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ в.о.}}{\sqrt{3} \cdot 4,735 \text{ в.о.}} = 0,134 \text{ в.о.}; \quad I''_{KM2} = *I''_{KM2} \cdot \frac{S_R}{U_R} = 2,23 \text{ кА}.$$

Якщо асинхронні двигуни впливають на струм короткого замикання в F, то

$$*I''_k = *I''_{k(T1,T2)} + *I''_{KM1} + *I''_{KM2} = (0,8884 + 0,1524 + 0,134) \text{ в.о.} = 1,1748 \text{ в.о.};$$

$$I''_k = *I''_k \cdot \frac{S_R}{U_R} = 1,1748 \text{ в.о.} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{6 \text{ кВ}} = 19,58 \text{ кА}.$$

Результати цього обчислення у відносних одиницях дорівнюють результатам в 4.2.

**Примітка.** Якщо в цьому випадку не враховується коригувальний коефіцієнт  $K_T$  ( $K_T = 1,0$ ), то результат буде таким, що дорівнює  $I''_{k(T1,T2)} = 14,35 \text{ кА} = 0,97 \cdot 14,81 \text{ кА}$ .

Якщо обчислюють без  $*t_r$  ( $*t_r = 1,0$ ), але з  $K_T = 0,959$ , то результат дорівнює  $I''_{k(T1,T2)} = 16,33 \text{ кА} = 1,10 \cdot 14,81 \text{ кА}$ . Якщо не використовують ні  $K_T$ , ні  $*t_r$ , то результат дорівнює  $I''_{k(T1,T2)} = 15,83 \text{ кА} = 1,07 \cdot 14,81 \text{ кА}$ .

#### 4.5 Обчислювання методом накладання

Головну процедуру визначання струмів короткого замикання і часткових струмів короткого замикання методом накладання описано в ІЕС 60909-1.

Струми короткого замикання залежать від поточкорозподілу навантаги до короткого замикання, робочої напруги системи 33 кВ і 6 кВ і положення перемикача відгалужень трансформаторів під навантагою (рисунок 9). Наведена нижче інформація додатково до вже наявної в 4.1 і на рисунку 9 необхідна для методу накладання:

а) Трансформатор T1, T2:

Перемикач відгалужень під навантагою  $p_T = \pm 18 \%$ ;  $u_{k+} = 16,5 \%$  для  $+p_T$  і  $u_{k-} = 14,0 \%$  для  $-p_T$ .

б) Струми навантаження на шині 6 кВ до короткого замикання (верхній індекс b):

$I^b = (0—2,75) \text{ кА}$  з  $\cos \varphi^b = 0,8$  або  $\cos \varphi^b = 0,9$ , визначений на основі рівняння  $\underline{S}^b = \sqrt{3} U^b I^{*b}$ .

в) Робочі напруги до короткого замикання:

$U^b = (6—6,6) \text{ кВ}$ ;  $U_n = 6 \text{ кВ}$ ;  $U_m = 7,2 \text{ кВ}$  (ІЕС 60038);

$U^b = (30—36) \text{ кВ}$ ;  $U_n = 33 \text{ кВ}$ ;  $U_m = 36 \text{ кВ}$  (ІЕС 60038).

Часткову силу струму короткого замикання  $I''_{k(T1,T2)S}$ , обчислювану методом накладання (індекс S), під час живлення від обох трансформаторів визначають на основі накладання струму навантаження  $I^b_{(T1,T2)}$  до короткого замикання і струму  $I''_{k(T1,T2)U^b}$  залежно від напруги  $U^b$ :

$$I''_{k(T1,T2)S} = I^b_{(T1,T2)} + I''_{k(T1,T2)U^b} = I^b_{(T1,T2)} + \frac{U^b}{\sqrt{3} \left[ 0,5Z_T(t) + \frac{1}{t^2} (Z_Q + 0,5Z_L) \right]}. \quad (1)$$

Повний опір  $Z_T(t) = Z_{T1}(t) = Z_{T2}(t)$  трансформаторів (без коригувального коефіцієнта) залежить від фактичного коефіцієнта трансформації  $t(u_{k+} \geq u_k(t) \geq u_{k-})$ .

Відношення між напругами  $\underline{U}^b_Q$  і  $U^b$  в останній точці короткого замикання визначають рівнянням:

$$\underline{U}^b_Q = t \left[ U^b + \sqrt{3} I^b (0,5Z_T(t) + \frac{1}{t^2} 0,5Z_L) \right]. \quad (2)$$

На рисунку 10 в першому випадку зображені результати рівнянь (1) і (2), якщо перемикач відгалужень перебуває в нульовому положенні ( $t = t_r = 33 \text{ кВ}/6,3 \text{ кВ} = 5,238$  і  $u_k(t) = u_{kr} = 15 \%$ ;  $u_{Rr} = 0,6 \%$ ),

залежно від параметрів  $S^b$  ( $\cos \varphi^b = 0,8$ ) і напруги  $U^b$ . Крім того, вплив  $\cos \varphi^b$  зазначений для прикладу  $U^b = 6,0$  кВ. Очікується, що напруга  $U_{\Omega}^b$  має значення в межах 33 кВ ( $U_{n\Omega}$ ) і 36 кВ ( $U_{m\Omega}$ ).

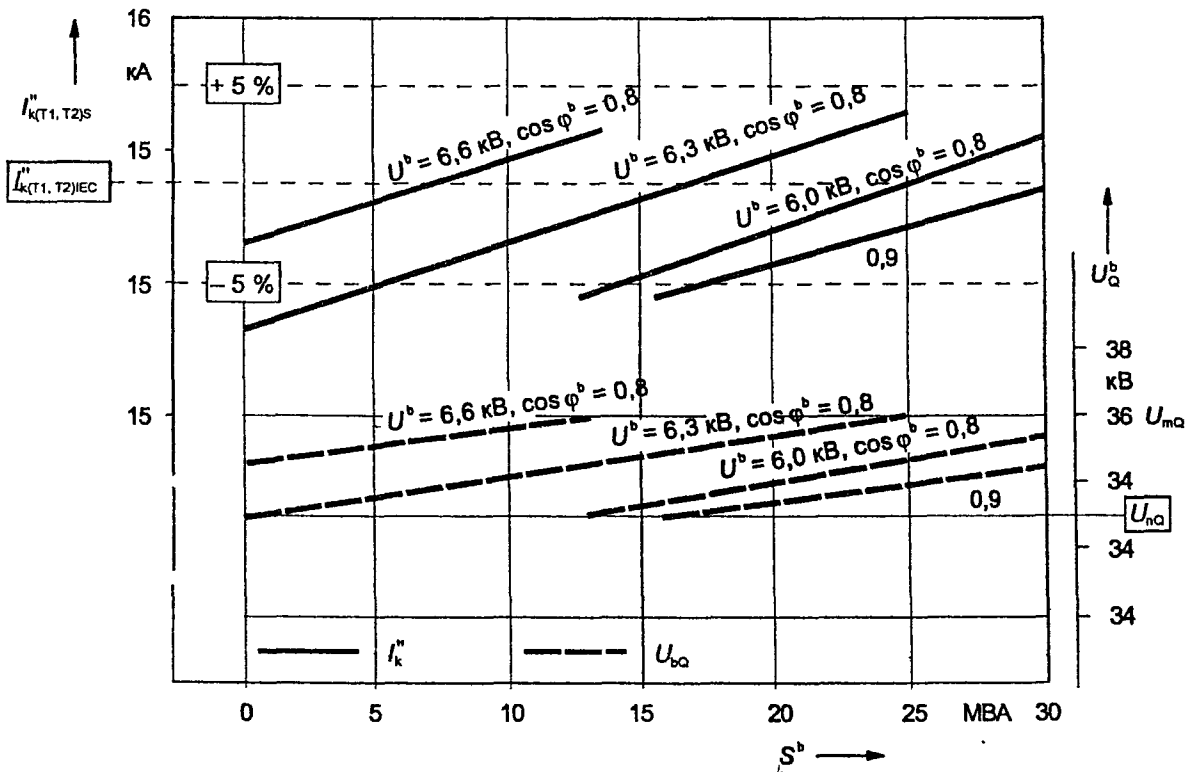
На рисунку 11 зображено результати сили струму короткого замикання  $I''_{kS}$ , визначені методом накладання в точці короткого замикання F (рисунк 9), якщо увімкнені двигуни (M1 і M2) і перемикачі відгалужень під навантагою мають різні положення. Крім того, в нижній частині рисунка графічно представлено  $u_k(t)$ . У короткому замиканні сила струму до короткого замикання дорівнює нулю, тому сумарну силу струму короткого замикання в точці короткого замикання визначають таким чином:

$$I''_{kS} = I''_{k(T1,T2)U^b} + I''_{k(M1,M2)U^b} \quad (3)$$

3

$$I''_{k(M1,M2)U^b} = \frac{U^b}{\sqrt{3} \frac{Z_{M1} Z_{M2}}{Z_{M1} + Z_{M2}}} \quad (4)$$

і  $I''_{k(T1,T2)U^b}$  згідно з рівнянням (1).



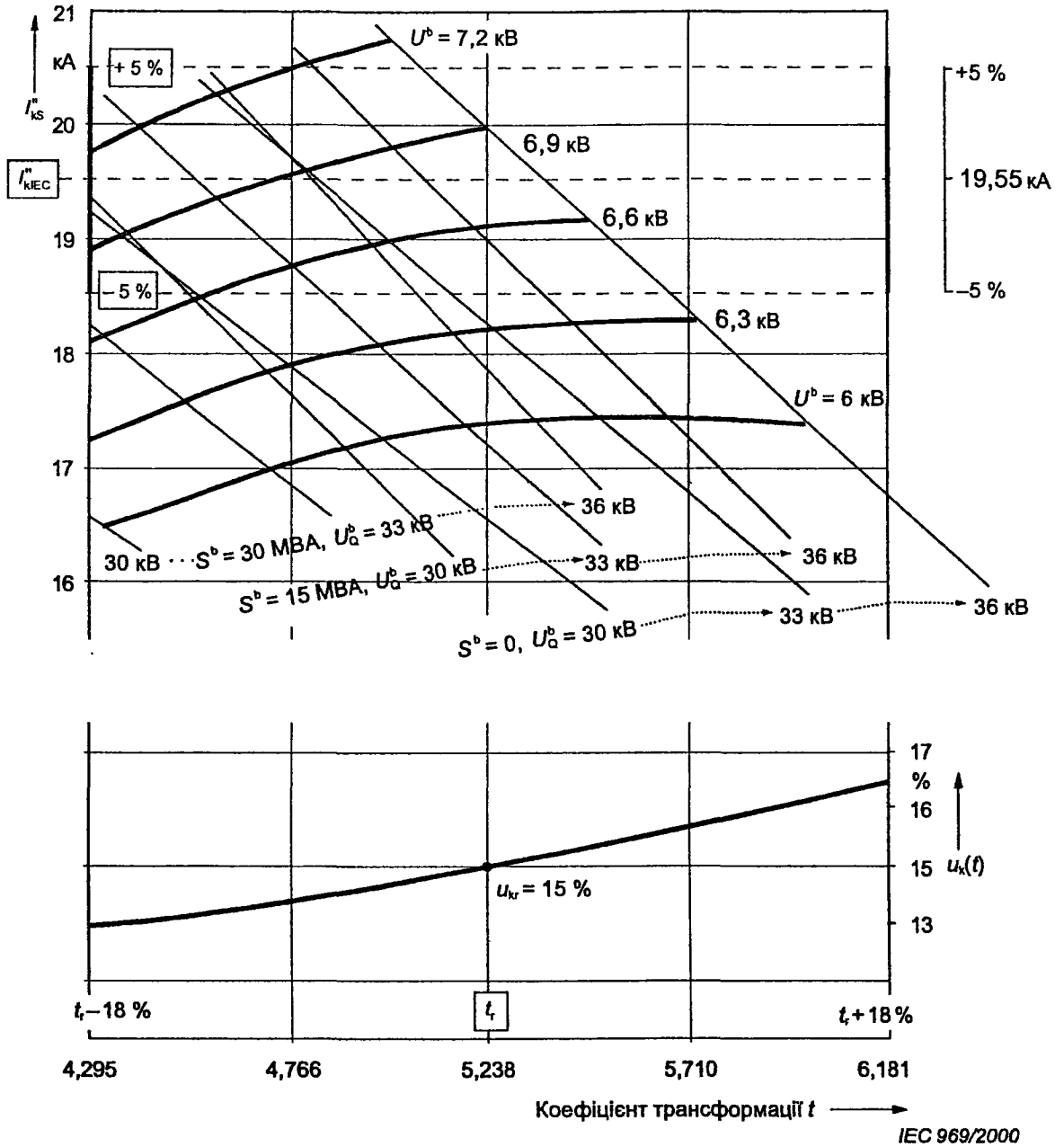
IEC 968/2000

**Рисунок 10** — Сила струму короткого замикання  $I''_{k(T1,T2)S}$ , розрахована методом накладання (S), порівнювана з  $I''_{k(T1,T2)IEC}$ , розрахованим методом еквівалентного джерела напруги ІЕС в точці короткого замикання, залежно від навантаги  $S^b$  і напруги  $U^b$

Як додаткову інформацію наводять робочу напругу. Перемикач відгалужень трансформаторів у нульовому положенні.

Як приклади в обчисленні використовують такі навантаги:  $S^b = 0$ ,  $S^b = 15$  МВА і  $S^b = 30$  МВА за  $\cos \varphi^b = 0,8$  в діапазоні напруги від  $U_{\Omega}^b = 30$  кВ до  $U_{\Omega}^b = 36$  кВ =  $U_{m\Omega}$ .

На рисунку 11 ділянка можливих струмів короткого замикання особливо обмежує максимальну напругу  $U_{\Omega}^b = U_{m\Omega}$ .



**Рисунок 11** — Сила струму короткого замикання  $I''_{ks}$ , розрахована методом накладання (S), порівнювана з  $I''_{IEC}$ , розрахованим методом еквівалентного джерела напруги ІЕС в точці короткого замикання, залежно від коефіцієнта трансформації  $t$ , до настання короткого замикання. Двигуни увімкнені. Положення перемикача відгалужень відрегульоване для напруги  $U^b$  і навантаги  $S^b$  ( $\cos \varphi^b = 0,8$ )

## 5 ОБЧИСЛЮВАННЯ ТРИФАЗНИХ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ДЛЯ ЕНЕРГОБЛОКА СТАНЦІЇ ТА ДОПОМІЖНОЇ МЕРЕЖІ

### 5.1 Поставлення задачі

Трифазні струми короткого замикання в точках короткого замикання F1—F5 на рисунку 12 розраховують згідно з ІЕС 60909-0.

Енергоблок станції (S) із  $S_{TG} = S_{TT} = 250$  МВА з'єднано з мережною лінією живлення із  $U_{пн} = 220$  кВ. Фактична сила струму короткого замикання дорівнює  $I''_{кз} = 21$  кА і дається енергопостачальною компанією в результаті обчислення відповідно до ІЕС 60909-0,  $c = c_{max} = 1,1$  ( $S''_{кз} \approx \sqrt{3} S''_{пн} I''_{кз} \approx 8000$  МВА). Одиничний трансформатор оснащений перемикачем відгалужень під навантагою на стороні високої напруги (див. 3.7.1 з ІЕС 60909-0). Допоміжний трансформатор АТ — триобмотковий трансформатор (див. 3.3.2 з ІЕС 60909-0) із двома вторинними обмотками, які живлять дві окремі допоміжні шини В і С із  $U_{пв} = U_{пс} = 10$  кВ.

Під час обчислювання сили струму короткого замикання в F2—F5 потрібно враховувати вплив асинхронних двигунів середньої та низької напруги (див. 3.8 з ІЕС 60909-0). Групи двигунів низької напруги, з'єднані з шинами D і E, розглядають як еквівалентні двигуни (див. 3.8.2 з ІЕС 60909-0).

Кінцеві струми короткого замикання двигунів середньої напруги M1—M14 і груп двигунів низької напруги M1—M26 розраховані в таблицях 8 і 9, використовуючи таблицю 3 з ІЕС 60909-0. Повними опорами сполучних кабелів між шинами і двигунами нехтують. Тому результати будуть приблизними.

Очікують, що всі асинхронні двигуни працюють за різної навантаги. Це також призводить до наближених результатів. Сума номінальної повної потужності асинхронних двигунів на шині В досягає  $\Sigma S_{пв} \approx 40$  МВА і на шині С приблизно  $\Sigma S_{пс} \approx 30$  МВА. На відміну від цих номінальних повних потужностей, максимальна допоміжна навантага під час роботи енергоблока станції приблизно досягає  $25 \text{ МВА} \leq S_{пв} = 0,1 \cdot S_{TG}$  в енергетичній станції, що працює на вугіллі.

У 5.3.4, що розглядає коротке замикання в F4, можна показати, що двигуни з живленням лише від шини С змінюють менше ніж на 1% початкову силу струму короткого замикання  $I''_{кз4}$ . Отже, результати струмів короткого замикання в F4 приблизно ідентичні, якщо двигуни M8—M14 і групи двигунів M21—M26 не працюють.



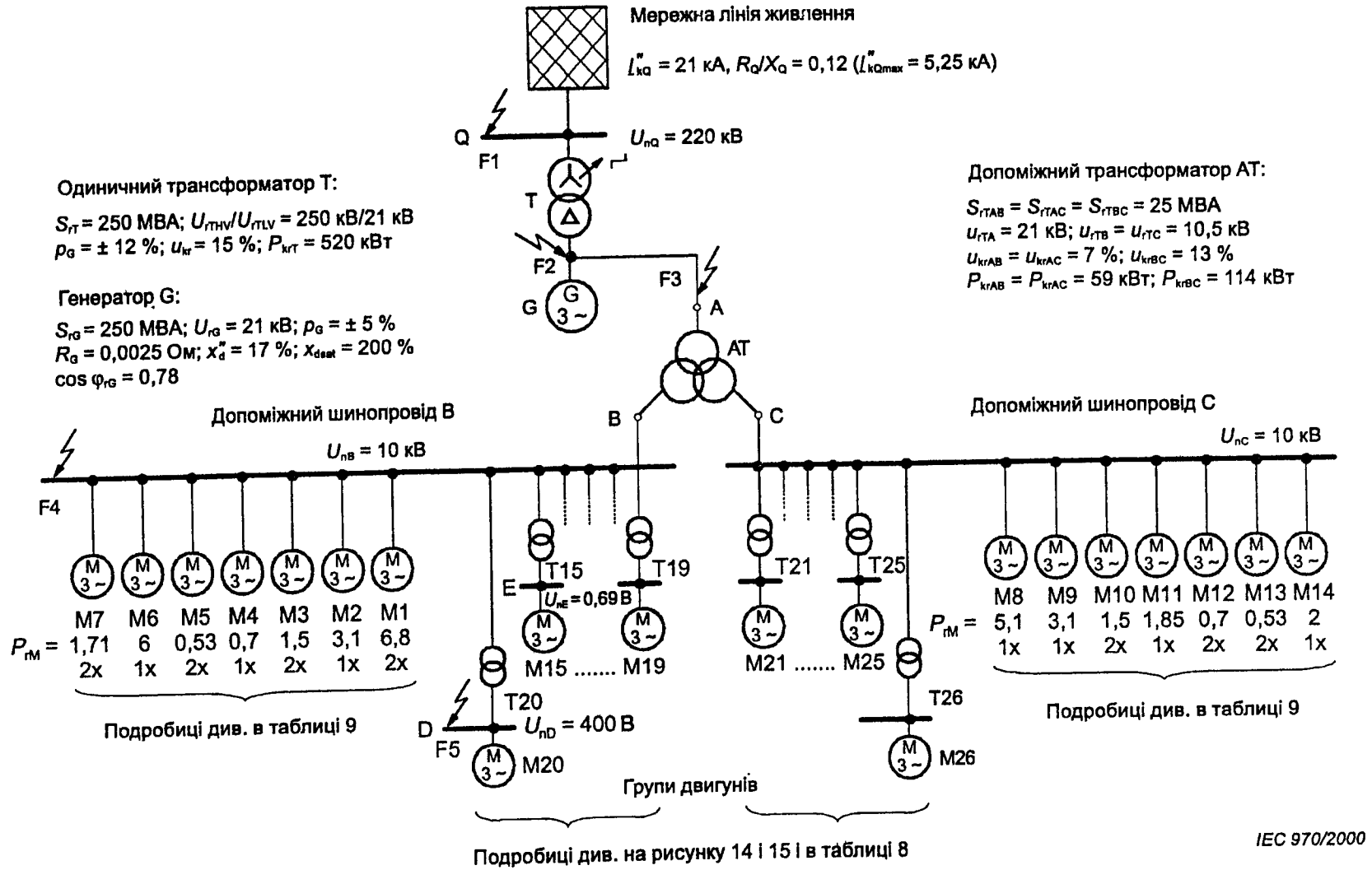


Рисунок 12 — Дані для енергоблока станції (генератор і одиничний трансформатор з перемикачем відгалужень під навантагою) і допоміжна мережа з асинхронними двигунами середньої і низької напруги

## 5.2 Повні опори короткого замикання електроустановки

### 5.2.1 Мережна лінія живлення

Згідно з 3.2 і рівняннями (4) і (5) ІЕС 60909-0 повний опір  $Z_Q$  мережної лінії живлення визначають як  $I_{kQ}'' = 21$  кА,  $R_Q/X_Q = 0,12$  і  $c = c_{\max} = 1,1$  (таблиця 1 ІЕС 60909-0).

$$Z_Q = \frac{cU_{пQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''} = \frac{1,1 \cdot 220 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 21 \text{ кА}} = 6,653 \text{ Ом};$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1+(R_Q/X_Q)^2}} = \frac{6,653 \text{ Ом}}{\sqrt{1+(0,12)^2}} = 6,606 \text{ Ом}; R_Q = 0,12X_Q;$$

$$\underline{Z}_Q = (0,793 + j6,606) \text{ Ом}.$$

Для обчислення максимальної сили струму короткого замикання в точках короткого замикання F2—F5 потрібно використовувати значення  $Z_{Q\min}$ , відповідне  $I_{kQ\max}'' = 52,5$  кА (див. 4.2.1.3 ІЕС 60909-0).  $I_{kQ\max}''$  з  $R_Q/X_Q = 0,1$  оцінюють під час планування системи живлення, враховуючи ресурс енергоблока станції:

$$Z_{Q\min} = \frac{cU_{пQ}}{\sqrt{3} I_{kQ\max}''} = \frac{1,1 \cdot 220 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 52,5 \text{ кА}} = 2,661 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{Q\min} = (0,265 + j2,648) \text{ Ом}.$$

### 5.2.2 Енергоблок станції

#### 5.2.2.1 Генератор:

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_d'' = (0,0025 + j0,2999) \text{ Ом}; Z_G = 0,2999 \text{ Ом};$$

$$\text{з } X_d'' = \frac{x_d''}{100\%} \cdot \frac{U_{rG}''}{S_{rG}} = \frac{17\%}{100\%} \cdot \frac{(21 \text{ кВ})^2}{250 \text{ МВА}} = 0,2999 \text{ Ом}.$$

Під час обчислювання  $k$  та  $i_p$  використовують уявний опір  $R_{Gr}$  (див. 3.6.1 ІЕС 60909-0):

$$R_{Gr} = 0,05X_d'' \quad (S_{rG} \geq 100 \text{ МВА});$$

$$\underline{Z}_{Gr} = R_{Gr} + jX_d'' = (0,0150 + j0,2999) \text{ Ом}.$$

#### 5.2.2.2 Одиничний трансформатор

Згідно з 3.3.1 ІЕС 60909-0 повний опір одиничного трансформатора на стороні високої та низької напруги обчислюють так:

$$Z_{THV} = \frac{U_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{(240 \text{ кВ})^2}{250 \text{ МВА}} = 34,56 \text{ Ом};$$

$$R_{THV} = P_{крT} \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}^2} = 0,52 \text{ МВт} \cdot \frac{(240 \text{ кВ})^2}{(250 \text{ МВА})^2} = 0,479 \text{ Ом} = \frac{U_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}};$$

$$\text{з } U_{Rr} = \frac{P_{крT}}{S_{rT}} \cdot 100\% = 0,208\%;$$

$$X_{THV} = \sqrt{Z_{THV}^2 - R_{THV}^2} = 34,557 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{THV} = R_{THV} + jX_{THV} = (0,479 + j34,557) \text{ Ом}.$$

Повний опір короткого замикання одиничного трансформатора стосується сторони низької напруги з  $t_r = 240/21 \text{ кВ} = 11,429$ :

$$\underline{Z}_{TLV} = \underline{Z}_{THV} \cdot \frac{1}{t_r^2} = (0,0037 + j0,265) \text{ Ом}; Z_{TLV} = 0,265 \text{ Ом}.$$

5.2.2.3 Енергоблок станції (одиничний трансформатор із перемикачем відгалужень під навантагою)

$$\text{Згідно з 3.7.1 ІЕС 60909-0 і } U_G = \bar{U}_{rG}: K_s = \frac{U_{пQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{rG}};$$

$$K_s = \frac{(220 \text{ кВ})^2}{(21 \text{ кВ})^2} \cdot \frac{(21 \text{ кВ})^2}{(240 \text{ кВ})^2} \cdot \frac{1,1}{1 + |0,17 - 0,15| \cdot 0,6258} = 0,913;$$

$$\underline{Z}_s = K_s(t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{\text{THV}});$$

$$\underline{Z}_s = 0,913 \left[ \left( \frac{240 \text{ кВ}}{21 \text{ кВ}} \right)^2 (0,0025 + j0,2999) \text{ Ом} + (0,479 + j34,557) \text{ Ом} \right] = (0,735 + j67,313) \text{ Ом}.$$

Використовуючи уявне значення  $R_{Gf}$ , визначають наведений нижче повний опір:

$$\underline{Z}_{Sf} = (2,226 + j67,313) \text{ Ом}; (R_{Sf}/X_{Sf} = 0,033).$$

### 5.2.3 Допоміжні трансформатори

Повні опори системи прямої послідовності триобмоткового трансформатора АТ (рисунок 12) на стороні А визначають за рівнянням (10) ІЕС 60909-0:

$$\underline{Z}_{AB} = \left( \frac{U_{RrAB}}{100 \%} + j \frac{U_{XrAB}}{100 \%} \right) \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} = (0,0416 + j1,235) \text{ Ом}$$

$$\text{з } U_{RrAB} = \frac{P_{krTAB}}{S_{rTAB}} \cdot 100 \% \text{ і } U_{XrAB} = \sqrt{u_{krAB}^2 - u_{RrAB}^2} \text{ (рівняння (10d) ІЕС 60909-0);}$$

$$\underline{Z}_{AC} = \underline{Z}_{AB} = (0,0416 + j1,235) \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left( \frac{U_{RrBC}}{100 \%} + j \frac{U_{XrBC}}{100 \%} \right) \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} = (0,0804 + j2,292) \text{ Ом}.$$

Коригувальні коефіцієнти повного опору  $K_T$  можна визначити за рівнянням (13) ІЕС 60909-0

$$\text{з } X_{TAB} = X_{TAC} \approx 0,07 \text{ і } X_{TBC} \approx 0,1299:$$

$$K_{TAB} = K_{TAC} = 0,95 \frac{C_{\text{max}}}{1 + 0,6 \cdot X_{TAB}} = 1,003;$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{C_{\text{max}}}{1 + 0,6 \cdot X_{TBC}} = 0,969.$$

Скориговані  $\underline{Z}_{ABK}$  і  $\underline{Z}_{BCK}$  призводять до скоригованих повних опорів  $\underline{Z}_{AK}$ ,  $\underline{Z}_{BK}$  і  $\underline{Z}_{CK}$  (рівняння (11) ІЕС 60909-0) принципової еквівалентної схеми, поданої на рисунку 7b ІЕС 60909-0:

$$\underline{Z}_{AK} = \frac{1}{2}(K_{TAB} \underline{Z}_{AB} + K_{TAC} \underline{Z}_{AC} - K_{TBC} \underline{Z}_{BC}) = (0,0028 + j0,1275) \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{BK} = \underline{Z}_{CK} = \frac{1}{2}(K_{TBC} \underline{Z}_{BC} + K_{TAB} \underline{Z}_{AB} - K_{TAC} \underline{Z}_{AC}) = (0,0390 + j1,1105) \text{ Ом}.$$

### 5.2.4 Трансформатори низької напруги 2,5 МВА та 1,6 МВА

Згідно з рисунком 12 на допоміжній шині В є п'ять трансформаторів (від Т15 до Т19), а на допоміжній шині С є п'ять трансформаторів (від Т21 до Т25) з  $S_{rT} = 2,5 \text{ МВА}$ ,  $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10 \text{ кВ}/0,73 \text{ кВ}$  (таблиця 8). Також наявні трансформатори (Т20) і (Т26) з  $S_{rT} = 1,6 \text{ МВА}$ ,  $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10 \text{ кВ}/0,42 \text{ кВ}$  (таблиця 8), приєднані до шин В (Т20) і С (Т26). Кожний із цих трансформаторів живить групу асинхронних двигунів (таблиця 8). Повні опори трансформаторів розраховують згідно з 3.3.1 ІЕС 60909-0 і коригувальним коефіцієнтом  $K_T$  із рівняння (12a) ІЕС 60909-0, враховуючи дані, надані в таблиці 8.

#### 5.2.4.1 Трансформатори $S_{rT} = 2,5 \text{ МВА}$ (від Т15 до Т19, від Т21 до Т25)

$$\underline{Z}_{T15HV} = \frac{u_{krT15}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT15HV}^2}{S_{rT15}} = \frac{6 \%}{100 \%} \cdot \frac{(10 \text{ кВ})^2}{2,5 \text{ МВА}} = 2,4 \text{ Ом};$$

$$R_{T15HV} = P_{krT15} \frac{U_{rT15HV}^2}{S_{rT15}^2} = 0,0235 \text{ МВт} \cdot \frac{(10 \text{ кВ})^2}{(2,5 \text{ МВА})^2} = 0,376 \text{ Ом}; (u_{Rr} = 0,94 \%);$$

$$\underline{Z}_{T15HV} = (0,376 + j2,370) \text{ Ом};$$

$$K_{T15HV} = 0,95 \frac{C_{\text{max}}}{1 + 0,6 X_{T15}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0593} = 1,009;$$

$$\underline{Z}_{T15HVK} = (0,379 + j2,392) \text{ Ом};$$

$$(\underline{Z}_{T15HVK} = \underline{Z}_{T16HVK}, \dots, \underline{Z}_{T19HVK}, \underline{Z}_{T21HVK}, \dots, \underline{Z}_{T25HVK}).$$

5.2.4.2 Трансформатори  $S_{ТТ} = 1,6 \text{ МВА}$  (Т20, Т26)

$$Z_{Т20HV} = \frac{u_{кТ20}}{100\%} \cdot \frac{U_{Т20HV}^2}{S_{ТТ20}} = \frac{6\% \cdot (10 \text{ кВ})^2}{100\% \cdot 1,6 \text{ МВА}} = 3,75 \text{ Ом};$$

$$R_{Т20HV} = P_{кТ20} \frac{U_{Т20HV}^2}{S_{ТТ20}^2} = 0,0165 \text{ МВт} \cdot \frac{(10 \text{ кВ})^2}{(1,6 \text{ МВА})^2} = 0,645 \text{ Ом}; (u_{Rr} = 1,03\%);$$

$$\underline{Z}_{Т20HV} = (0,645 + j3,694) \text{ Ом};$$

$$K_{Т20HV} = 0,95 \frac{c_{\text{max}}}{1 + 0,6X_{Т20}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0591} = 1,009;$$

$$\underline{Z}_{Т20HVК} = (0,651 + j3,728) \text{ Ом}.$$

На стороні низької напруги:

$$\underline{Z}_{Т20LV} = \underline{Z}_{Т20HV} \cdot \frac{1}{t_r^2} = (1,138 + j6,516) \text{ мОм}; (t_r = 10 \text{ кВ}/0,42 \text{ кВ});$$

$$K_{Т20LV} = 0,95 \frac{c_{\text{max}}}{1 + 0,6X_{Т20}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0591} = 0,963;$$

$$\underline{Z}_{Т20LVК} = (1,096 + j6,277) \text{ Ом}.$$

Таблиця 8 — Дані щодо трансформаторів 10 кВ/0,73 кВ і 10 кВ/0,42 кВ, дані щодо груп двигунів низької напруги і часткових струмів короткого замикання цих груп двигунів в F4

Групи двигунів трансформаторів		15 16 17 18 19	Σ 15—19	20	Σ 15—20	Примітки
$S_{ТТ}$	МВА	2,5	12,5	1,6	14,1	Дані надає виробник
$U_{ТТHV}$	кВ	10		10		
$U_{ТТLV}$	кВ	0,73		0,42		
$u_{кТ}$	%	6		6		
$P_{кТТ}$	кВт	23,5		16,5		
$P_{гМ}$	МВт	0,9	4,5	1,0	5,5	Дані про групи двигунів
$U_{гМ}$	кВ	0,69		0,40		
$\cos \varphi_{гМ} \eta_{гМ}$	—	0,72		0,72		
$I_{LR}/I_{гМ}$	—	5		5	Див. 3.8.2 ІЕС 60909-0	
$R_M/X_M$	—	0,42		0,42	Див. 3.8.2 ІЕС 60909-0	
$K_M$	—	1,3		1,3	Див. 3.8.2 ІЕС 60909-0	
$S_{гМ}$	МВА	1,25	6,25	1,39	7,64	
$R_{ТНВК}$	Ом	0,379		0,651		Див. 5.2.4
$X_{ТНВК}$	Ом	2,392		3,728		
$R_M$	Ом	0,0295		0,0089		$R_M = 0,42 X_M$ $X_M = 0,922 Z_M^{(1)}$
$X_M$	Ом	0,0702		0,0212		
$I_{гМ}''$	кА	5,491		10,53 <sup>(2)</sup>		$c = 1,05$ $U_{гЕ} = 0,69 \text{ кВ}$ $U_{гD} = 0,4 \text{ кВ}$

Кінець таблиці 8

Групи двигунів трансформаторів		15 16 17 18 19	Σ 15—19	20	Σ 15—20	Примітки
$R_{M1} = R_M t_r^2$	Ом	5,536		5,045		$t_r = 10 \text{ кВ}/0,73 \text{ кВ}$ або $t_r = 10 \text{ кВ}/0,42 \text{ кВ}$
$X_{M1} = X_M t_r^2$	Ом	13,179		12,018		
$R_{ТНУК} + R_{M1}$	Ом	5,915	1,183	5,696	0,980	На стороні 10 кВ
$X_{ТНУК} + X_{M1}$	Ом	15,571	3,114	15,746	2,600	
$ Z_{ТНУК} + Z_{M1} $	Ом	16,657	3,331	16,745	2,779	
$I_{КТФ4}, \Sigma I_{КТФ4}$	кА	0,381	1,906	0,379	2,285 <sup>3)</sup>	$U_{нв} = 10 \text{ кВ}$ $c = 1,1$

<sup>1)</sup>  $Z_M$  із рівняння (26) ІЕС 60909-0.  
<sup>2)</sup> Частковий струм короткого замикання в F5.  
<sup>3)</sup> Частковий струм короткого замикання в F4.

### 5.2.5 Асинхронні двигуни

Дані щодо повних опорів короткого замикання двигунів середньої напруги М1—М7, з'єднаних із шиною В, і двигунів М8—М14, з'єднаних із шиною С, показані на рисунку 12, подано в таблиці 9. Використовуючи рівняння (26) і (91) ІЕС 60909-0 і враховуючи, що в цьому разі  $U_{FM} = U_n$ , використовують наведене нижче рівняння з таблиці 9 для обчислення  $I_{KM}''$ :

$$I_{KM}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_M} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_{LR}}{I_M} \cdot \frac{I_{FM}}{U_{FM} \sqrt{3}} = c \frac{I_{LR}}{I_M} \cdot I_{FM}$$

Дані щодо повних опорів короткого замикання груп двигунів низької напруги подано в таблиці 8. У цій таблиці також описано часткові струми короткого замикання груп двигунів (М15—М20) на стороні високої напруги трансформаторів Т15—Т20 у разі короткого замикання в F4 (шина В на рисунку 12).

## 5.3 Обчислювання сили струму короткого замикання

### 5.3.1 Точка короткого замикання F1

Силу струму короткого замикання  $I_k''$  у F1 можна обчислити як суму  $I_{kQ}''$  і  $I_{kS}''$ . Силу струму  $I_{kS}''$  визначають на основі  $Z_S$  згідно з рівнянням (21) ІЕС 60909-0 для енергоблока станції з перемикачем відгалужень під навантагою. Враховувати асинхронні двигуни допоміжної мережі не варто, тому що їх загальний вплив в цьому разі менше ніж 1 % від  $I_k''$  (див. 5.3.3).

#### 5.3.1.1 Початкова сила струму короткого замикання $I_k''$

$$I_{kQ}'' = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}Z_Q} = \frac{1,1 \cdot 220 \text{ кВ}}{\sqrt{3}(0,793 + j6,606) \text{ Ом}} = (2,502 - j20,850) \text{ кА};$$

$$I_{kS}'' = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}Z_S} = \frac{1,1 \cdot 220 \text{ кВ}}{\sqrt{3}(0,735 + j67,313) \text{ Ом}} = (0,023 - j2,075) \text{ кА};$$

$$I_k'' = I_{kQ}'' + I_{kS}'' = (2,525 - j22,925) \text{ кА}; I_k'' = 23,064 \text{ кА}.$$

#### 5.3.1.2 Максимальна сила струму короткого замикання $i_p$

З обчислення повного опору  $Z_Q$  виходить, що  $R_Q/X_Q = 0,12$  і  $\kappa_Q = 1,704$ . На основі обчислення повного опору  $Z_S$  (див. 5.2.2) визначають відношення  $R_S/X_S = 0,033$  і  $\kappa_S = 1,908$ .

$$i_p = i_{pQ} + i_{pS} = \kappa_Q \sqrt{2} I_{kQ}'' + \kappa_S \sqrt{2} I_{kS}'' = 1,704 \cdot \sqrt{2} \cdot 21 \text{ кА} + 1,908 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,075 \text{ кА} = 56,21 \text{ кА}.$$

#### 5.3.1.3 Сила струму вимкнення симетричного короткого замикання $I_b$

$I_b = I_{bQ} + I_{bS} = I_{kQ}'' + \mu I_{kS}'' = 21 \text{ кА} + 0,859 \cdot 2,075 \text{ кА} = 22,78 \text{ кА}$   
з  $\mu_{0,1} = 0,62 + 0,72e^{-0,32/t_{\min}} // \kappa_Q$  (рівняння (70) ІЕС 60909-0 для  $t_{\min} = 0,1 \text{ с}$ ).

Таблиця 9 — Дані щодо асинхронних двигунів середньої напруги та їх часткові струми короткого замикання в точці короткого замикання на шинах В (F4) і С, відповідно

Допоміжна шина		В (точка короткого замикання F4)								С									
Двигун номер		1	2	3	4	5	6	7	$\Sigma$ (1—7)	8	9	10	11	12	13	14	$\Sigma$ (8—14)		
$P_M$	кВт	6,8	3,1	1,5	0,7	0,53	2	1,71	—	5,1	3,1	1,5	1,85	0,7	0,53	2	—		
Кількість	—	2	1	2	1	2	1	2	—	1	1	2	1	2	2	1	—		
$U_M$	кВ	10								10	10								10
$\cos\varphi_M$	—	0,89	0,85	0,88	0,85	0,75	0,85	0,85	—	0,87	0,85	0,88	0,85	0,85	0,75	0,85	—		
$\eta_M$	—	0,976	0,959	0,962	0,952	0,948	0,96	0,96	—	0,973	0,959	0,962	0,959	0,952	0,948	0,96	—		
$I_{LR}/I_M^{(1)}$	—	4								—	4								—
Кількість пар полюсів $p$	—	2	2	1	3	5	3	3	—	3	2	1	3	3	5	3	—		
$S_M, \Sigma S_M$	МВА	15,66	3,80	3,54	0,87	1,49	2,45	4,19	32,0	6,02	3,80	3,54	2,27	1,73	1,49	2,45	21,3		
$I_M, \Sigma I_M$	кА	0,904	0,220	0,205	0,05	0,086	0,142	0,242	1,85	0,348	0,22	0,205	0,131	0,10	0,086	0,141	1,23		
$P_M/p$	—	3,4	1,55	1,5	0,23	0,11	0,67	0,57	—	1,7	1,55	1,50	0,62	0,23	0,11	0,67	—		
$R_M/X_M$	—	0,1			0,15				—	0,1			0,15				—		
$k_M$	—	1,75			1,65				—	1,75			1,65				—		
$\mu(t_{\text{мін}} = 0,1 \text{ с})^{(2)}$	—	0,796			—				—	0,796			—				—		
$q(t_{\text{мін}} = 0,1 \text{ с})^{(3)}$	—	0,72	0,62	0,62	0,39	0,31	0,52	0,50	—	0,63	0,62	0,62	0,51	0,39	0,31	0,52	—		
$I_{KM}^*, \Sigma I_{KM}^*$	кА	3,98	0,97	0,90	0,22	0,38	0,62	1,06	8,13	1,53	0,97	0,90	0,58	0,44	0,38	0,62	5,41		
$I_{PM}$	кА	9,85	2,40	2,23	0,51	0,89	1,45	2,47	19,80	3,79	2,39	2,23	1,35	1,03	0,88	1,45	13,12		
$I_{KM}$	кА	2,28	0,48	0,44	0,07	0,09	0,26	0,42	4,04	0,77	0,48	0,44	0,24	0,14	0,09	0,26	2,42		
$Z_M$	Ом	1,60	6,58	7,06	28,74	16,78	10,20	5,97	0,782	4,15	6,58	7,06	11,01	14,45	16,78	10,20	1,173		
$X_M$	Ом	0,995 $Z_M$			0,989 $Z_M$				0,777	0,995 $Z_M$			0,989 $Z_M$				1,165		
$R_M$	Ом	0,1 $X_M$			0,15 $X_M$				0,089	0,1 $X_M$			0,15 $X_M$				0,138		

<sup>1)</sup>  $I_{KM}^*/I_M = 4,4$  (див. 5.2.5);  $I_{KM}^* = c(I_{LR}/I_M)I_M$ .

<sup>2)</sup>  $\mu(0,1 \text{ с}) = 0,62 + 0,72e^{-0,32I_{KM}^*/I_M}$  (рівняння (70) ІЕС 60909-0).

<sup>3)</sup>  $q(0,1 \text{ с}) = 0,57 + 0,12 \ln P_M/p$  (рівняння (73) ІЕС 60909-0).

Відношення  $I''_{кГ}/I_{гГ}$  визначають так:

$$\frac{I''_{кГ}}{I_{гГ}} = \frac{I''_{кСт}}{I_{гГ}} = \frac{2,075 \text{ кА} (240 \text{ кВ} / 21 \text{ кВ})}{6,873 \text{ кА}} = 3,45.$$

#### 5.3.1.4 Сила струму сталого короткого замикання $I_{к\max}$

$$I_k = I_{кQ} + I_{кS} = I''_{кQ} + \lambda_{\max} I_{гГ} = 21 \text{ кА} + 1,65 \cdot 0,601 \text{ кА} \approx 22 \text{ кА}.$$

Коефіцієнт  $\lambda_{\max} = 1,65$  визначають з рисунка 18а) ІЕС 60909-0 для  $x_{\text{дбат}} = 2,0$ , якщо найбільша можлива напруга збудження в 1,3 разу більша, ніж номінальне збудження за номінальної навантаги, і більша за коефіцієнт потужності для неявнополюсного генератора  $S_{гГ} = 250 \text{ МВА}$  (також див. 2.5.2.2 ІЕС 60909-1).

#### 5.3.2 Точка короткого замикання F2

Згідно з рисунком 13 і 4.2.1.3 ІЕС 60909-0 потрібно обчислювати обидві часткові сили струму короткого замикання  $I''_{кГ}$  (рівняння (35) ІЕС 60909-0) і  $I''_{кТ}$  (рівняння (37) ІЕС 60909-0), оскільки найбільше значення цих двох струмів використовують, щоб розрахувати шину між генератором і одиничним трансформатором і щоб визначити автоматичний вимикач, якщо є, між генератором і одиничним трансформатором.

##### 5.3.2.1 Початкові сили струму короткого замикання $I''_{кГ}$ і $I''_{кТ}$

$$I''_{кГ} = \frac{cU_{гГ}}{\sqrt{3} K_{G,S} Z_G} = \frac{1,1 \cdot 21 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 0,994 \cdot 0,2999 \text{ Ом}} = 44,74 \text{ кА}$$

з рівнянням (36) ІЕС 60909-0:

$$K_{G,S} = \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \phi_{гГ}} = \frac{1,1}{1 + 0,17 \cdot 0,626} = 0,994$$

і  $Z_G$  згідно з 5.2.2

$$I''_{кТ} = \frac{cU_{гГ}}{\sqrt{3} \left| Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2 Z_{Q\min}} \right|} = \frac{1,1 \cdot 21 \text{ кВ}}{\sqrt{3} |0,0057 + j0,285| \text{ Ом}} = 46,79 \text{ кА}$$

з  $Z_{Q\min} = (0,265 + j2,648) \text{ Ом}$  з 5.2.1,  $Z_{TLV} = (0,0037 + j0,265) \text{ Ом}$  з 5.2.2 і  $t_r = 240 \text{ кВ} / 21 \text{ кВ}$ .

Загальний струм для вибору шин між генератором і одиничним трансформатором визначають додаванням  $I''_{кТ}$  і  $I''_{кМ,АТ}$ , розрахованих у 5.3.3.

$$I''_{кТ} + I''_{кМ,АТ} = (46,79 + 6,35) \text{ кА} = 53,14 \text{ кА};$$

$$|I''_{кТ} + I''_{кМ,АТ}| = |1,76 - j53,08| \text{ кА} = 53,11 \text{ кА}.$$

##### 5.3.2.2 Максимальні сили струму короткого замикання $i_{гГ}$ та $i_{рТ}$

$$i_{гГ} = K_G \sqrt{2} I''_{кГ} = 1,86 \cdot \sqrt{2} \cdot 44,74 \text{ кА} = 117,69 \text{ кА}$$

з  $R/X = R_{гГ}/X_d'' = 0,05$  і  $K_G = 1,86$  (рівняння (55) ІЕС 60909-0);

$$i_{рТ} = K_T \sqrt{2} I''_{кТ} = 1,94 \cdot \sqrt{2} \cdot 46,79 \text{ кА} = 128,37 \text{ кА}$$

з  $R/X = 0,0057 \text{ Ом} / 0,285 \text{ Ом} = 0,02$  і  $K_T = 1,94$ .

##### 5.3.2.3 Сили струму вимкнення симетричного короткого замикання $I_{бГ}$ та $I_{бТ}$

$$I_{бГ} = \mu I''_{кГ} = 0,71 \cdot 44,74 \text{ кА} = 31,77 \text{ кА}$$

з  $\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,32t_{\min}/t_{\text{с}}} = 0,71$ ;  $t_{\min} = 0,1 \text{ с}$

за  $I''_{кГ}/I_{гГ} = 44,74 \text{ кА} / 6,87 \text{ кА} = 6,51$ ;

$I_{бТ} = I''_{кТ}$  (віддалене від генератора коротке замикання (рівняння (65) ІЕС 60909-0)).

##### 5.3.2.4 Сили струму сталого короткого замикання $I_{кГ\max}$ та $I_{кТ\max}$

$$I_{кГ\max} = \lambda_{\max} I_{гГ} = 1,75 \cdot 6,87 \text{ кА} = 12,0 \text{ кА}$$

з  $\lambda_{\max} = 1,75$  з рисунка 18а ІЕС 60909-0 за  $I''_{кГ}/I_{гГ} = 6,51$ ;

$I_{кТ\max} = I''_{кТ}$  (віддалене від генератора коротке замикання (рівняння (84) ІЕС 60909-0)).

Враховуючи вплив двигунів, які живляться через допоміжний трансформатор АТ (див. 5.3.3), розраховують наведені нижче струми, щоб визначити шини між генератором і одиничним трансформатором:

$$i_{pT} + i_{pM,AT} = (128,37 + 15,09) \text{ кА} = 143,46 \text{ кА};$$

$$I_{bT} + I_{bM,AT} \approx I_{kT}'' + I_{kM,AT}'' = 53,14 \text{ кА на консервативній стороні.}$$

### 5.3.3 Точка короткого замикання F3

#### 5.3.3.1 Початкові сили струму короткого замикання $I_{krs1}''$ і $I_{kM,AT}''$

На рисунку 13 зображено систему прямої послідовності для обчислювання сили струму короткого замикання в F3 і часткових сил струму короткого замикання  $I_{krs1}''$  з  $Z_{rs1}$  (рівняння (38) ІЕС 60909-0) і  $I_{kM,AT}''$  на стороні високої напруги допоміжного трансформатора.

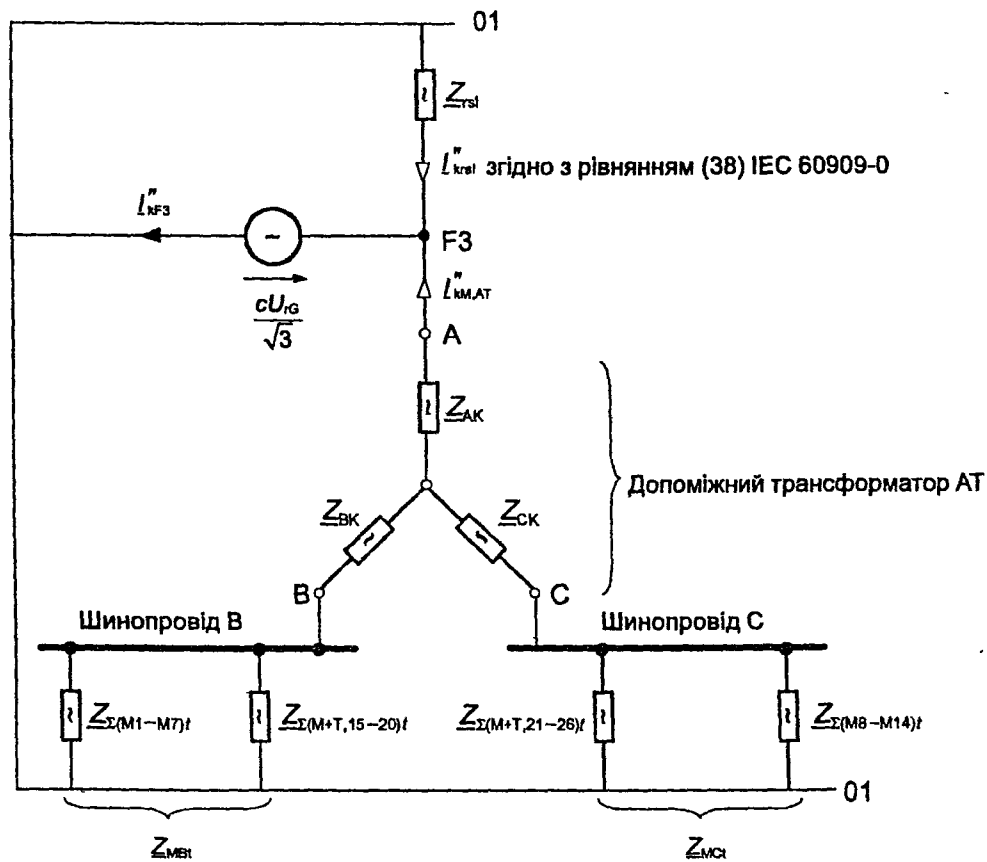
$$I_{krs1}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{K_{G,S}Z_G} + \frac{1}{K_{T,S}Z_{TLV} + \frac{1}{t_f^2}Z_{Qmin}} \right) = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_{rs}}$$

з  $K_{G,S} = 0,994$  з 5.3.2,  $Z_G = (0,0025 + j0,2999) \text{ Ом}$  із 5.2.2,  $Z_{TLV} = (0,0037 + j0,265) \text{ Ом}$  із 5.2.2,  $Z_{Qmin} = (0,265 + j2,648) \text{ Ом}$  і

$$K_{T,S} = \frac{c_{max}}{1 - x_T \sin \phi_{rG}} = \frac{1,1}{1 - 0,15 \cdot 0,626} = 1,214,$$

з рівняння (39) ІЕС 60909-0 визначають наведену нижче часткову силу струму короткого замикання:

$$I_{krs1}'' = \frac{1,1 \cdot 21 \text{ кВ}}{\sqrt{3}} = \left( \frac{1}{(0,0025 + j0,298) \text{ Ом}} + \frac{1}{(0,0045 + j0,322) \text{ Ом} + (0,0020 + j0,020) \text{ Ом}} \right)$$



ІЕС 971/2000

Рисунок 13 — Система прямої послідовності для обчислювання сили струму короткого замикання в точці F3 (див. рисунок 12)



Повні опори з індексом  $t$  враховуються на стороні високої напруги А допоміжного трансформатора з  $t_{r,AT} = 21 \text{ кВ}/10,5 \text{ кВ} = 2,0$ .

$$I_{krsl}'' = \frac{1,1 \cdot 21 \text{ кВ}}{\sqrt{3}(0,0021 + j0,1592) \text{ Ом}} = (1,13 - j83,73) \text{ кА}; \quad I_{krsl}' = 83,74 \text{ кА};$$

$$Z_{rsl} = (0,0021 + j0,1592) \text{ Ом}.$$

Сума  $I_{kG}''$  і  $I_{kT}''$  з 5.3.2 призводить до  $I_{kG}'' + I_{kT}'' = 44,74 \text{ кА} + 46,79 \text{ кА} = 91,53 \text{ кА}$ , результат приблизно на 9,3 % вищий, ніж  $I_{krsl}'$ , визначений на основі рівняння (38) ІЕС 60909-0).

*Примітка.* Це порівняння подає одну з причин, чому результати методу накладання або перехідного обчислювання можуть бути менші за результат простого складання  $I_{kG}$  і  $I_{kT}$ .

Часткову силу струму короткого замикання  $I_{km,AT}''$  на рисунку 13 можна визначити на основі результатів таблиць 8 і 9 для двигунів низької і середньої напруги. Повні опори на рисунку 13:

$$Z_{\Sigma(M1-M7)} = (0,089 + j0,777) \text{ Ом} \left( \frac{21 \text{ кВ}}{10,5 \text{ кВ}} \right)^2 = (0,356 + j3,108) \text{ Ом};$$

$$Z_{\Sigma(M+T,15-20)} = (0,980 + j2,600) \text{ Ом} \left( \frac{21 \text{ кВ}}{10,5 \text{ кВ}} \right)^2 = (3,92 + j10,40) \text{ Ом};$$

$$Z_{MBt} = (0,410 + j2,420) \text{ Ом (див. рисунок 13)}.$$

$$Z_{\Sigma(M8-M14)} = (0,138 + j1,165) \text{ Ом} \left( \frac{21 \text{ кВ}}{10,5 \text{ кВ}} \right)^2 = (0,552 + j4,660) \text{ Ом};$$

$$Z_{\Sigma(M+T,21-26)} = Z_{\Sigma(M+T,15-20)} = (3,92 + j10,40) \text{ Ом};$$

$$Z_{Mct} = (0,626 + j3,260) \text{ Ом (див. рисунок 13)}.$$

Повні опори  $Z_{AK}$ ,  $Z_{BK}$  і  $Z_{CK}$  стосуються сторони А, і їх розрахунок подано в 5.2.3. Для обчислення  $I_{km,AT}''$  необхідний повний опір  $Z_{M,AT}$ :

$$Z_{M,AT}'' = Z_{AK} + \frac{(Z_{BK} + Z_{MBt})(Z_{CK} + Z_{Mct})}{Z_{BK} + Z_{CK} + Z_{MBt} + Z_{Mct}} = (0,273 + j2,081) \text{ Ом};$$

$$I_{km,AT}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}Z_{M,AT}''} = \frac{1,1 \cdot 21 \text{ кВ}}{\sqrt{3}(0,273 + j2,081) \text{ Ом}} = (0,827 - j6,300) \text{ кА};$$

$$I_{km,AT}'' = 6,35 \text{ кА}.$$

Ця часткова сила струму короткого замикання  $I_{km,AT}'' = 6,35 \text{ кА}$  необхідна, тому що її значення досягає 7,5 % від сили струму  $I_{krsl}' = 83,74 \text{ кА}$ .

Тому загальна сила струму короткого замикання в F3 (див. рисунок 13) дорівнює:

$$I_{kF3}'' = I_{krsl}' + I_{km,AT}'' = (1,96 - j90,03) \text{ кА}; \quad I_{kF3}'' = 90,05 \text{ кА}.$$

*Примітка.* У разі короткого замикання в F3 (рисунок 13) залишкова міжфазна напруга на шині В приблизно дорівнює 4,1 кВ, тобто приблизно 40 % від міжфазної напруги до короткого замикання.

### 5.3.3.2 Максимальні сили струмів короткого замикання $i_{prsl}$ та $i_{pm,AT}$

Максимальну силу струму короткого замикання  $i_{prsl}$  можна визначити з використанням двох частин рівняння (38) ІЕС 60909-0:

$$i_{prsl} = K_{G,S} \sqrt{2} \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}K_{G,S}Z_G} + K_{T,S} \sqrt{2} \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}|K_{T,S}Z_{TLV} + Z_{Qmin}|};$$

$$i_{prsl} = 1,86 \cdot \sqrt{2} \cdot 44,74 \text{ кА} + 1,94 \cdot \sqrt{2} \cdot 39,0 \text{ кА} = 224,7 \text{ кА}$$

$$3 \frac{R_{Gf}}{X_d''} = \frac{0,0150 \text{ Ом}}{0,2995 \text{ Ом}} = 0,05 \rightarrow K_{G,S} = 1,86; \quad (Z_{Gf} \text{ з 5.2.2})$$

$$i \frac{\text{Re}\{K_{T,S}Z_{TLV} + Z_{Qmin}\}}{\text{Im}\{K_{T,S}Z_{TLV} + Z_{Qmin}\}} = \frac{0,0066 \text{ Ом}}{0,342 \text{ Ом}} = 0,019 \rightarrow K_{rst} = 1,94.$$

**Примітка.** Обчислення за методом 20 Гц (4.3.1.2 с) ІЕС 60909-0), використовуючи  $Z_{Gr}$  із 2.5.5 і повний опір  $Z_{rsl(c)}$  згідно з рівнянням (38) ІЕС 60909-0 дає такий результат:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{rsl(c)} \cdot f_c}{X_{rsl(c)} \cdot f} = \frac{0,00565 \text{ Ом} \cdot 20 \text{ Гц}}{0,06376 \text{ Ом} \cdot 50 \text{ Гц}} = 0,0334 \rightarrow \kappa_{rsl} = 1,91;$$

$$I_{rsl} = \kappa_{rsl} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{krs}'' = 1,91 \cdot \sqrt{2} \cdot 83,73 \text{ кА} = 226,2 \text{ кА}.$$

Максимальну силу струму короткого замикання  $i_{рм, АТ}$  можна визначити за методом (b) (4.3.1.2b) ІЕС 60909-0), але без коефіцієнта 1,15, тому що відповідні повні опори двигунів середньої напруги мають відношення  $R/X < 0,3$  (4.3.1.2 ІЕС 60909-0):

$$i_{рм, АТ} = \kappa_{(b)} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{км, АТ}'' = 1,68 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,35 \text{ кА} = 15,09 \text{ кА}$$

$$з \frac{R_{м, АТ}}{X_{м, АТ}} = \frac{0,273 \text{ Ом}}{2,081 \text{ Ом}} = 0,131 \rightarrow \kappa_{(b)} = 1,68.$$

**Примітка.** Обчислення за методом 20 Гц призводить майже до того самого результату, що й у цьому разі (відхил менший за 0,4 %).

**5.3.3.3 Сила струму вимкнення та сила струму сталого короткого замикання**

Силу струму вимкнення  $I_b$  не враховують у точці короткого замикання F3.

Сила струму сталого короткого замикання  $I_k$  залежить від  $I_{кТ} = I_{кТ}''$ :

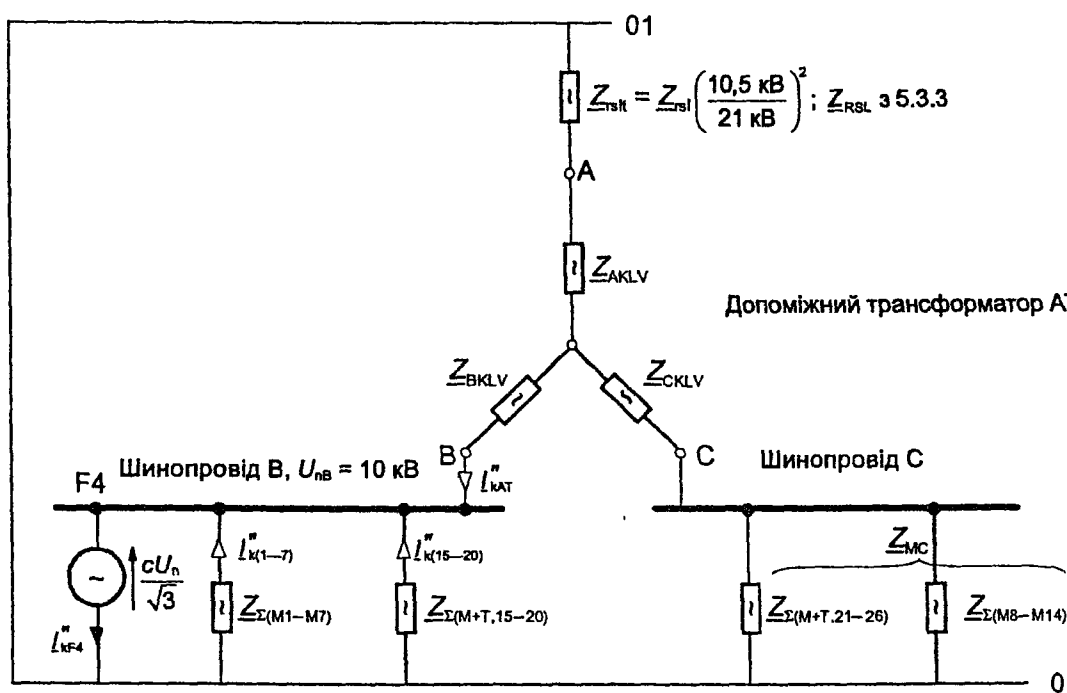
$$I_{кF3} = I_{кG} + I_{кТ} + I_{км, АТ} \approx \lambda_{max} I_{rG} + I_{кТ}'' = 12 \text{ кА} + 46,79 \text{ кА} = 58,8 \text{ кА}$$

з  $I_{кG}$  і  $I_{кТ}''$  з 5.3.2 і  $I_{км, АТ} \rightarrow 0$ .

**5.3.4 Точка короткого замикання F4**

Початкову силу струму трифазного короткого замикання в точці F4 (рисунок 12) можна визначити на основі часткових сил струму короткого замикання, як показано на рисунку 14 (4.2.1.2 ІЕС 60909-0):

$$I_{кF4}'' = I_{кАТ}'' + I_{к(1-7)}'' + I_{к(15-20)}''.$$



ІЕС 972/2000

**Рисунок 14** — Система прямої послідовності для обчислювання сили струму короткого замикання в точці F4 (див. рисунок 12)

Повні опори стосуються вторинної сторони В допоміжного трансформатора АТ.

$$Z_{кАТ} = Z_{BKLV} + \frac{(Z_{AKLV} + Z_{rsl})(Z_{CKLV} + Z_{MC})}{Z_{AKLV} + Z_{rsl} + Z_{CKLV} + Z_{MC}}$$

$$Z_{кАТ} = (0,0098 + j0,2776) \text{ Ом} + (0,0017 + j0,0673) \text{ Ом} = (0,0115 + j0,3449) \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{КАТ}} = 0,3451 \text{ Ом}$$

з  $Z_{\text{АКЛВ}} = Z_{\text{АК}}/t_r^2$ ;  $Z_{\text{БКЛВ}} = Z_{\text{СКЛВ}} = Z_{\text{БК}}/t_r^2$ ;  $Z_{\text{АК}}Z_{\text{БК}}$  з 5.2.3,  $Z_{\text{МС}} = Z_{\text{МС1}}/t_r^2$ ;  $Z_{\text{МС1}}$  з 5.3.3,  $Z_{\text{ГЛ}}$  з 5.3.3 (див. рисунок 13);

$$I_{\text{КАТ}}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{\text{КАТ}}} = \frac{1,1 \cdot 10 \text{ кВ}}{\sqrt{3}(0,0115 + j0,3449) \text{ Ом}} = (0,613 - j18,393) \text{ кА.}$$

з таблиці 8 і 9:

$$I_{\text{К(1-7)}}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{\Sigma(M1-M7)}} = \frac{1,1 \cdot 10 \text{ кВ}}{\sqrt{3}(0,089 + j0,777) \text{ Ом}} = (0,924 - j18,068) \text{ кА};$$

$$I_{\text{К(15-20)}}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_{\Sigma(M+T, 15-20)}} = \frac{1,1 \cdot 10 \text{ кВ}}{\sqrt{3}(0,980 + j2,600) \text{ Ом}} = (0,806 - j2,139) \text{ кА};$$

$$I_{\text{KF4}}'' = (2,346 - j28,60) \text{ кА}; I_{\text{KF4}}'' = 28,70 \text{ кА.}$$

**Примітка.** Якщо немає впливу двигунів, що живляться від шини С, на струми короткого замикання в F4, то це призводить до такого:

$$Z_{\text{КАТ}} = Z_{\text{БКЛВ}} + Z_{\text{АКЛВ}} + Z_{\text{ГЛ}} = (0,011 + j0,349) \text{ Ом};$$

$$I_{\text{КАТ}}'' = (0,573 - j18,179) \text{ кА};$$

$$I_{\text{KF4}}'' = (2,303 - j28,386) \text{ кА}; I_{\text{KF4}}'' = 28,48 \text{ кА.}$$

Вплив двигунів, що живляться від шини С, на струм  $I_{\text{KF4}}''$  дуже незначний, менше ніж 1 %. У цьому разі ними можна знехтувати.

Максимальні сили струму короткого замикання визначають за методом 6 (4.3.1.2 b) ІЕС 60909-0) без коефіцієнта 1,15, бо  $R/X < 0,3$  на відгалуженнях відносно  $I_{\text{КАТ}}''$  і для асинхронних двигунів середньої напруги:

$$I_{\text{PF4}} = K_{\text{КАТ}} \sqrt{2} I_{\text{КАТ}}'' + K_{(1-7)} \sqrt{2} I_{\text{К(1-7)}}'' + K_{(15-20)} \sqrt{2} I_{\text{К(15-20)}}'';$$

$$I_{\text{PF4}} = 1,91 \cdot \sqrt{2} \cdot 18,40 \text{ кА} + 1,72 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,12 \text{ кА} + 1,34 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,29 \text{ кА} = 73,79 \text{ кА.}$$

Якщо часткова сила струму короткого замикання  $I_{\text{КАТ}}''$  переноситься на сторону високої напруги допоміжного трансформатора, то можна відмітити, що  $I_{\text{КАТ1}}'' = 9,2 \text{ кА}$  менше ніж  $2I_{\text{ГЛ}} = 2 \cdot 6,87 \text{ кА}$ , тому коротке замикання в F4 є віддаленим від генератора коротким замиканням.

$$I_{\text{bF4}} = I_{\text{bAT}} + I_{\text{b(1-7)}} + I_{\text{b(15-20)}} = 22,8 \text{ кА};$$

$$\text{з } I_{\text{bAT}} = I_{\text{КАТ}}'' = 18,40 \text{ кА};$$

$$I_{\text{b(1-7)}} = \sum_{k=1}^7 \mu_k q_k I_{\text{KM}}'' = 4,04 \text{ кА (див. таблицю 9);}$$

$$I_{\text{b(15-20)}} = \mu \cdot q \cdot I_{\text{К(15-20)}}'' = 0,74 \cdot 0,21 \cdot 2,29 \text{ кА} = 0,36 \text{ кА}$$

( $\mu = 0,74$  за  $t_{\text{min}} = 0,1 \text{ с}$  і  $I_{\text{KM}}''/I_{\text{ГЛ}} = 5,5$ , а  $q = 0,21$  за  $t_{\text{min}} = 0,1 \text{ с}$  і  $P_{\text{ГЛ}}/p = 0,05 \text{ МВт}$ ;  $I_{\text{К(15-20)}}'' = 2,29 \text{ кА}$  з таблиці 8).

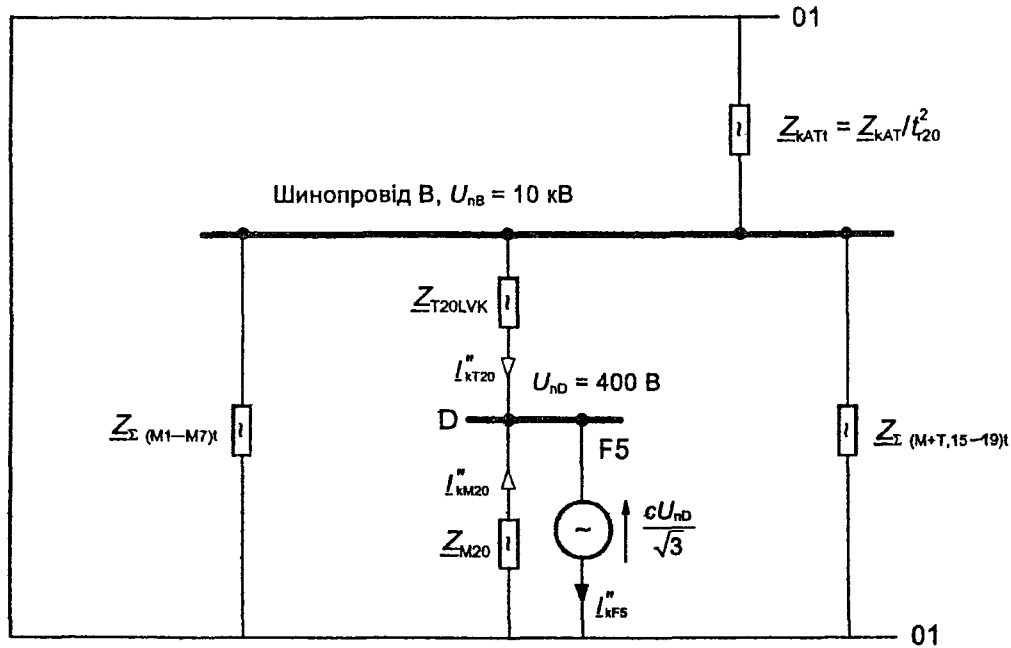
### 5.3.5 Точка короткого замикання F5

Початкову силу струму короткого замикання в точці F5 можна підрахувати на основі системи прямої послідовності, описаної на рисунку 15.

$$I_{\text{KF5}}'' = I_{\text{КТ20}}'' + I_{\text{KM20}}''.$$

Для обчислення часткової сили струму короткого замикання  $I_{\text{КТ20}}''$  використовують наведені нижче повні опори (див. рисунок 15):

$$Z_{\text{КАТ}} = Z_{\text{КАТ}} \frac{1}{t_{\text{Г20}}^2} = (0,0115 + j0,3449) \text{ Ом} \left( \frac{0,42 \text{ кВ}}{10 \text{ кВ}} \right)^2 = (0,0203 + j0,6084) \text{ мОм.}$$



IEC 973/2000

Рисунок 15 — Система прямої послідовності для обчислювання сили струму короткого замикання в точці F5 (див. рисунок 12). Повні опори стосуються сторони низької напруги трансформатора T20 ( $t_{r20} = 10 \text{ кВ}/0,42 \text{ кВ}$ )

$$Z_{\Sigma(M1-M7)} = Z_{\Sigma(M1-M7)} \frac{1}{t_{r20}^2} = (0,089 + j0,777) \text{ Ом} \left( \frac{0,42 \text{ кВ}}{10 \text{ кВ}} \right)^2 = (0,157 + j1,3706) \text{ МОм};$$

$$Z_{\Sigma(M+T,15-19)} = Z_{\Sigma(M+T,15-19)} \frac{1}{t_{r20}^2} = (1,183 + j3,114) \text{ Ом} \left( \frac{0,42 \text{ кВ}}{10 \text{ кВ}} \right)^2 = (2,087 + j5,493) \text{ МОм}.$$

Повний опір  $Z_{\text{кат}}$  вже розрахований у 5.3.4. Повні опори  $Z_{\Sigma(M,1-7)}$  і  $Z_{\Sigma(M+T,15-19)}$  зазначені в таблицях 9 і 8, відповідно.

Повний опір трансформатора низької напруги T20 наведено в 5.2.4 щодо сторони низької напруги:

$$Z_{T20LVK} = (1,096 + j6,277) \text{ МОм з } K_T = 0,963 \text{ (} c_{\text{max}} = 1,05\text{)};$$

$$I''_{KT20} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{KT20}} = \frac{1,05 \cdot 400 \text{ В}}{\sqrt{3} (1,127 + j6,671) \text{ МОм}} = (5,97 - j35,33) \text{ кА}; I''_{KT20} = 35,83 \text{ кА}.$$

Повний опір  $Z_{KT20}$  визначають на основі  $Z_{T20LVK}$ , враховуючи три паралельні повні опори  $Z_{\text{кат}}$ ,  $Z_{\Sigma(M1-M7)}$  і  $Z_{\Sigma(M+T,15-19)}$ .

Повний опір  $Z_{M20}$  наведено в таблиці 8.

$$I''_{KM20} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M20}} = \frac{1,05 \cdot 400 \text{ В}}{\sqrt{3} (8,9 + j21,2) \text{ МОм}} = (4,07 - j9,72) \text{ кА}; I''_{KM20} = 10,54 \text{ кА};$$

$$I''_{KF5} = I''_{KT20} + I''_{KM20} = (10,04 - j45,05) \text{ кА}.$$

Максимальну силу струму короткого замикання визначають таким чином:

$$i_{pF5} = i_{pT20} + i_{pM20} = K_{T20} \sqrt{2} I''_{KT20} + K_{M20} \sqrt{2} I''_{KM20},$$

де  $K_{T20} = 1,60$  на основі  $R_{T20LVK}/X_{T20LVK} = 0,175$ , тому що повний опір трансформаторів є основною частиною  $Z_{KT20}$  (більше ніж 90 %) і  $K_{M20} = 1,3$  для еквівалентного двигуна з групи двигунів (3.8.2 ІЕС 60909-0).

$$i_{pF5} = 1,60 \cdot \sqrt{2} \cdot 35,83 \text{ кА} + 1,30 \cdot \sqrt{2} \cdot 10,54 \text{ кА} = 100,5 \text{ кА}.$$

На основі конфігурації і значень повних опорів на рисунку 15 можна визначити, що залишкова напруга під час короткого замикання в F5 на шині В приблизно дорівнює 95 % від напруги до короткого замикання. Це показує, що двигуни M1—M7 і M15—M19 не впливають на струм вимкнення в F5 ( $\mu_M = 1$  згідно з рівнянням (75) ІЕС 60909-0 у всіх випадках).

$$I_{bF5} = I''_{kT20M} + \mu_{M20} q_{M20} I''_{kM20}$$

з  $I''_{kT20M}$  як часткова сила струму короткого замикання без впливу двигунів M1—M7 і M15—M19.

$$I_{bF5} = 34,77 \text{ кА} + 0,902 \cdot 0,67 \cdot 10,54 \text{ кА} = 41,1 \text{ кА}$$

за  $t_{\min} = 0,02 \text{ с}$  з  $\mu_{M20} = 0,84 + 0,26e^{-0,26 \cdot 5,5}$  і  $q_{M20} = 0,67$  за  $p_{\text{тн}}/p = 0,05 \text{ МВт}$  для еквівалентного двигуна M20 (див. 3.8.2 ІЕС 60909-0).

Сила струму сталого короткого замикання:

$$I_{kF5} = I_{kT20} + I_{kM20} \approx I''_{kT20M} = 34,77 \text{ кА},$$

тому що  $I_{kM20} = 0$  (див. таблицю 3 ІЕС 60909-0).

## 6 ПЕРЕВІРОЧНА МЕРЕЖА ДЛЯ ОБЧИСЛЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ З ЦИФРОВИМИ ПРОГРАМАМИ ЗГІДНО З ІЕС 60909-0

### 6.1 Загальні положення

Наведена нижче перевірочна мережа з інформацією про електроустаткування та результатами струмів короткого замикання відповідно до ІЕС 60909-0 пропонує проєктувальникам і користувачам цифрових програм можливість перевіряти результати, одержані від їх програми, порівнюючи з цими результатами.

Щоб отримати відповідність розрахункових і одержаних результатів, необхідно отримати результати, наведені в таблицях 12 і 13. Це необхідна, але не єдина умова програми, тому що навіть під час проходження цього перевірення інші процедури в межах програми можуть призвести до отримання неправильних результатів. Якщо допустити відхилення, то вони мають бути менше ніж  $\pm 0,02 \%$ .

Щоб уникнути труднощів під час інтерпретування одержаних даних щодо електроустаткування (інформація з таблиць з технічними даними та додаткові дані) згідно з рівнянням ІЕС 60909-0, використовують додаткову таблицю 11 з інформацією про повні опори між шинами електроживлення перевірочної мережі на рисунку 16 системи прямої та нульової послідовності на стороні 110 кВ.

Максимальні трифазні сили струму короткого замикання обчислюють на шинах від ① до ⑧ із  $c = c_{\max} = 1,1$  згідно з таблицею 1 ІЕС 60909-0. Також обчислюють лише максимальні сили струму короткого замикання між фазою і землею на шинах від ② до ⑤. У будь-якому разі повний опір короткого замикання залежить від рівня напруги в точці короткого замикання.

Комплексний повний опір мережних ліній живлення в точці з'єднання обчислюють за формулою:

$$X_q = \frac{1}{\sqrt{1 + (R_q/X_q)^2}} Z_q,$$

якщо визначено коефіцієнт  $R_q/X_q$  (див. рівняння (5) ІЕС 60909-0), тому що наближення  $X_q \approx 0,995 Z_q$  використовують лише в особливому випадку, коли  $R_q/X_q = 0,1$  (3.2 ІЕС 60909-0). Подібну процедуру використовують для асинхронних двигунів, якщо наведено відношення  $R_M/X_M$  (3.8.1 ІЕС 60909-0).

Опори ємностей мережі не враховують, тому що коефіцієнт короткого замикання на землю менше ніж 1,4 (2.3.2 ІЕС 60909-0).

$K_T$  обчислюють за рівнянням (12а) ІЕС 60909-0, тому що умови розподілу навантаги для перевірочної мережі невідомі.

Для обчислення коригувального коефіцієнта повного опору  $K_{S1}$  для енергоблока станції S1 пускають, що генератор працює лише в ділянці перезбудження (рисунок 7 ІЕС 60909-1).

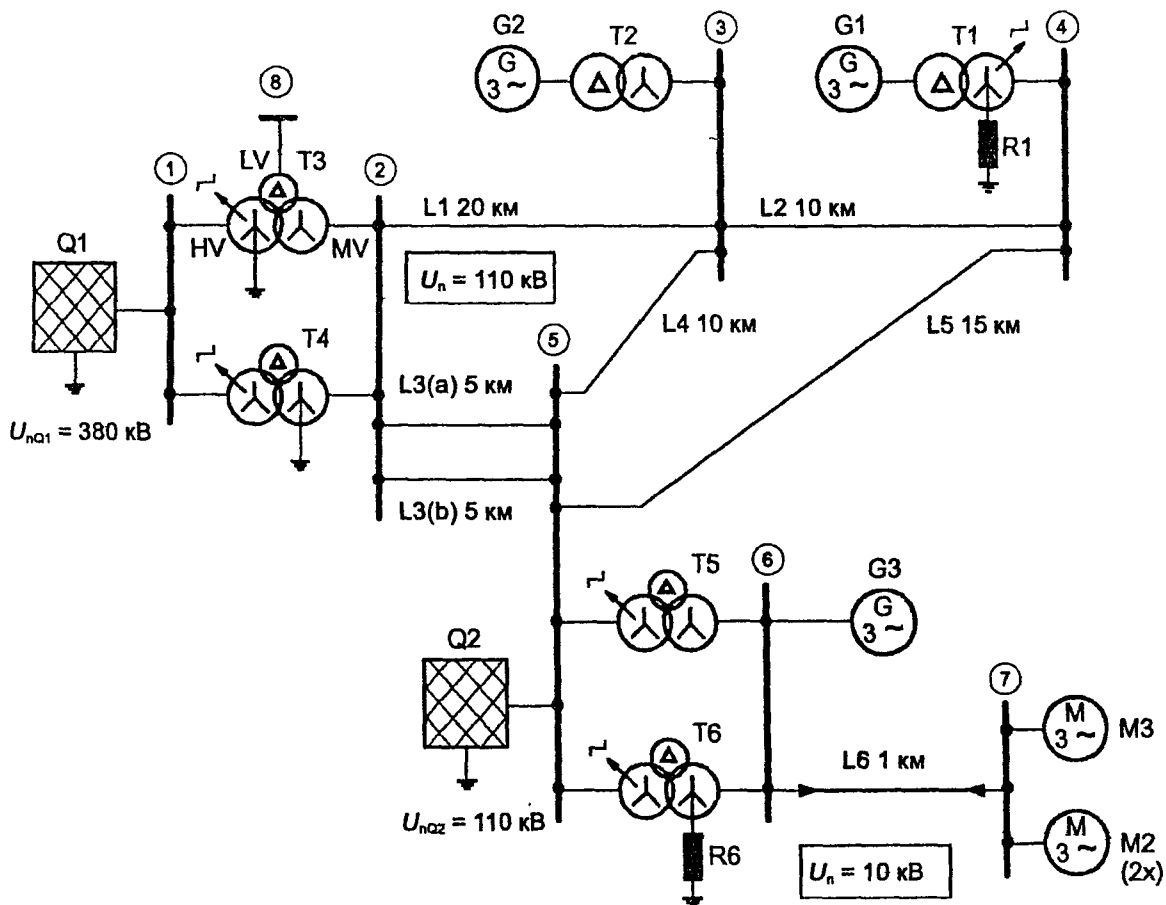
У разі отримання від'ємних значень реактивних опорів триобмоткових трансформаторів у системі прямої чи зворотної послідовності ці значення не повинні вважатися опорами ємностей, особливо у разі обчислення за методом еквівалентної частоти (4.3.1.2 с) ІЕС 60909-0). Знак мінус може з'явитися для еквівалентного реактивного опору (див. рисунок 7b ІЕС 60909-0) обмотки, розташованої між двома іншими обмотками у разі триобмоткового трансформатора (див. таблицю 3B ІЕС 60909-2, наприклад № 6).

За використання методу розраховування частоти 20 Гц або 24 Гц, відповідно, щоб визначити коефіцієнт  $k$  в замкненій електромережі застосовують коригувальні коефіцієнти повного опору  $K_G$ ,  $K_S$  і  $K_T$  у цій формі (ІЕС 60909-0).

## 6.2 Перевірочна мережа високої напруги 380 кВ/110 кВ/30 кВ/10 кВ

### 6.2.1 Топологія й опис мережі

На рисунку 16 зображено топологію трифазної перевірочної мережі змінного струму 50 Гц із шини від ① до ⑧ і електроустановкам. Шини від ① до ⑧ мають бути точками короткого замикання для трифазних коротких замикань, а шини від ② до ⑤ — для коротких замикань між фазою і землею. Є три точки уземлення в частині мережі 110 кВ: трансформатор Т4, енергоблок станції S1 (G1 + T1) і лінія живлення Q2.



ІЕС 974/2000

G1 + T1 = S1 — енергоблок станції з перемикачем відгалужень під навантагою.  
 G2 + T2 = S2 — енергоблок електростанції без перемикача відгалужень під навантагою.  
 Мережа 10 кВ з резонансним уземленням, R6 — дугогасильна котушка.  
 Шини від ① до ⑧ і точки короткого замикання.

Рисунок 16 — Перевірочна мережа високої напруги змінного струму 380 кВ/110 кВ/30 кВ/10 кВ

### Опис електроустановки

#### Мережні лінії живлення

Q1:  $U_{nQ} = 380$  кВ;  $I''_{kQmax} = 38$  кА ( $c_{max} = 1,1$ );  $R_Q/X_Q = 0,1$ ;  $X_{(0)Q}/X_Q = 3$ ;  
 $R_{(0)Q}/X_{(0)Q} = 0,15$ .

Q2:  $U_{nQ} = 110$  кВ;  $I''_{kQmax} = 16$  кА ( $c_{max} = 1,1$ );  $R_Q/X_Q = 0,1$ ;  $X_{(0)Q}/X_Q = 3,3$ ;  
 $R_{(0)Q}/X_{(0)Q} = 0,2$ .

### Енергоблоки станції

S1:  $U_{rG} = 21$  кВ;  $S_{rG} = 150$  МВА;  $x_d'' = 0,14$  в.о.;  $x_{dsat} = 1,8$  в.о.;  $\cos \varphi_{rG} = 0,85$ ;

$R_G = 0,002$  Ом (працює лише в ділянці перезбудження).

$U_{rTHV}/U_{rTLV} = 115$  кВ/21 кВ;  $S_{rT} = 150$  МВА;  $u_{kr} = 16$  %;  $u_{Rr} = 0,5$  %; YNd5 з перемикачем відгалужень під навантагою  $p_T = \pm 12$  %;  $X_{(0)T}/X_T = 0,95$ ;  $R_{(0)T}/R_T = 1,0$ .

S2:  $U_{rG} = 10,5$  кВ;  $S_{rG} = 100$  МВА;  $p_G = \pm 7,5$  %;  $x_d'' = 0,16$  в.о.;  $x_{dsat} = 2,0$  в.о.;  $\cos \varphi_{rG} = 0,9$ ;

$R_G = 0,005$  Ом.  
 $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 120$  кВ/10,5 кВ;  $S_{rT} = 100$  МВА;  $u_{kr} = 12$  %;  $u_{Rr} = 0,5$  %; YNd5 без перемикача відгалужень або з перемикачем відгалужень без навантаги.

$X_{(0)T/X_T} = 1,0$ ;  $R_{(0)T/R_T} = 1,0$ .

### Генератор

G3:  $U_G = 10,5$  кВ;  $S_{rG} = 10$  МВА;  $p_G = \pm 5$  % (для обчислення використовують стале значення  $U_G = U_{rG}$ );  $x_d'' = 0,1$  в.о.;  $x_{dsat} = 1,8$  в.о.;  $\cos \varphi_{rG} = 0,8$ ;  $R_G = 0,018$  Ом.

### Мережні трансформатори

T3 = T4: Триобмоткові мережні трансформатори YNyn,d5 із перемикачем відгалужень під навантагою на стороні високої напруги,  $p_T = \pm 16$  %. Уземлення в нейтральній точці зірки: T3 на стороні високої напруги, T4 на стороні середньої напруги.

$U_{rTHV} = 400$  кВ;  $U_{rTMV} = 120$  кВ;  $U_{rTLV} = 30$  кВ;

$S_{rTHV} = 350$  МВА;  $S_{rTMV} = 350$  МВА;  $S_{rTLV} = 50$  МВА;

$u_{krTHMV} = 21$  %;  $u_{krTHVLV} = 10$  %;  $u_{krTMVLV} = 7$  %;

$u_{RrTHMV} = 0,26$  %;  $u_{RrTHVLV} = 0,16$  %;  $u_{RrTMVLV} = 0,16$  %;

$X_{(0)TMV}/X_{TMVHV} = 2,1$ ;  $R_{(0)TMV}/R_{TMVHV} = 1,0$  (див. 2.2).

T5 = T6: Триобмоткові мережні трансформатори YNyn,d5 у цьому разі розглядають як двообмоткові трансформатори, тобто  $u_{kr} = u_{krTHMV}$  (див. рисунок 16 і 2.2).

$U_{rTHV}/U_{rTMV} = 115$  кВ/10,5 кВ;  $S_{rT} = 31,5$  МВА;  $u_{kr} = 12$  %;  $u_{Rr} = 0,5$  %.

### Асинхронні двигуни

M1:  $U_{rM} = 10$  кВ;  $P_{rM} = 5$  МВт;  $\cos \varphi_{rM} = 0,88$ ;  $\eta_{rM} = 97,5$  %;  $I_{LR}/I_{rM} = 5$ ;  $p = 1$  (пара полюсів).

M2: Два паралельні двигуни, кожен з  $P_{rM} = 2$  МВт:

$U_{rM} = 10$  кВ;  $P_{rM} = 5$  МВт;  $\cos \varphi_{rM} = 0,89$ ;  $\eta_{rM} = 96,8$  %;  $I_{LR}/I_{rM} = 5,2$ ;  $p = 2$ .

### Реактори

R1:  $X_{R1} = 22$  Ом;  $R_{R1} \ll X_{R1}$  (реактор, що обмежує струм короткого замикання).

R6: Дугогасильна котушка для мережі 10 кВ із уземленням через дугогасний реактор.

### Мінімальний час затримки

$t_{min} = 0,1$  с, для обчислення  $\mu$  і  $q$ .

Таблиця 10 — Повітряні лінії передавання та кабелі

№	$l$	$Z_{(1)}' = Z'$	$Z_{(0)}'$	Примітки
	км	Ом/км	Ом/км	
L1	20	$0,12 + j0,39$	$0,32 + j1,26$	На одну схему подвійної лінії
L2	10	$0,12 + j0,39$	$0,32 + j1,26$	
L3(a)	5	$0,12 + j0,39$	$0,52 + j1,86$	
L3(b)	5	$0,12 + j0,39$	$0,52 + j1,86$	
L4	10	$0,096 + j0,388$	$0,22 + j1,10$	
L5	15	$0,12 + j0,386$	$0,22 + j1,10$	
L6	1	$0,082 + j0,086$	—	Кабель 10 кВ

**6.2.2 Повні опори короткого замикання електроустановки**

У таблиці 11 зображено повні опори короткого замикання електроустановки систем прямої та нульової послідовності, розрахованих згідно з даними в 6.2.1 відповідно до ІЕС 60909-0, разом з коригувальними коефіцієнтами повного опору  $K_G$ ,  $K_S$  і  $K_T$ . Додатковий індекс  $t$  використовують для значень, які стосуються сторони 110 кВ (див. рисунок 16). Коригувальні коефіцієнти повного опору для триобмоткових трансформаторів T3 = T4 обчислюють згідно з прикладом 2.2.

Таблиця 11 — Повні опори електроустановки (за необхідності скориговані) (див. рисунок 16), які стосуються сторони 110 кВ.  $Z_{(2)} = Z_{(1)} = Z$

Установки	Система прямої послідовності $Z$ , Ом	Система нульової послідовності $Z_{(0)}$ , Ом	Примітки
Q1	$Z_{Q1} = 0,631933 + j6,319335$	—	
Q1t	$Z_{Q1t} = 0,056874 + j0,568740$	—	
Q2	$Z_{Q2} = 0,434454 + j4,344543$	$Z_{(0)Q2} = 2,867398 + j14,336991$	
T3 = T4	$Z_{T3AMV} = 0,045714 + j8,096989^{1)}$ $Z_{T3BMV} = 0,053563 - j0,079062^{1)}$ $Z_{T3CMV} = 0,408568 + j20,292035^{1)}$	$Z_{(0)T4MV} = 0,107281 + j18,195035^{3)}$	$K_{TAV} = 0,928072^{2)}$ $K_{TAS} = 0,985856^{2)}$ $K_{TBS} = 1,002890^{2)}$
T5 = T6	$Z_{T5MV} = 2,046454 + j49,072241$	—	$K_T = 0,974870$
S1	$Z_{S1} = 0,498795 + j26,336676$	$Z_{(0)T1} = 0,439059 + j13,340874^{4)}$	$K_S = 0,995975$
S2	$Z_{S2} = 1,203944 + j35,340713$	—	$K_S = 0,876832$
G3	$Z_{G3} = 0,017790 + j1,089623$	—	$K_G = 0,988320$
G3t	$Z_{G3t} = 2,133964 + j130,705301$	—	
M1	$Z_{M1} = 0,341497 + j3,414968$	—	Два паралельні двигуни 2 МВт
M1t	$Z_{M1t} = 40,964124 + j409,641243^{5)}$	—	
M2 (2 I)	$Z_{M2} = 0,412134 + j4,121368$	—	
M2t (2 I)	$Z_{M2t} = 49,437719 + j494,377190^{5)}$	—	
L1	$Z_{L1} = 2,4 + j7,8$	$Z_{(0)L1} = 6,4 + j25,2$	Подвійна лінія
L2	$Z_{L2} = 1,2 + j3,9$	$Z_{(0)L2} = 3,2 + j12,6$	
L3 (DL)	$Z_{L3} = 0,3 + j0,975$	$Z_{(0)L3} = 1,3 + j4,65$	
L4	$Z_{L4} = 0,96 + j3,88$	$Z_{(0)L4} = 2,2 + j11,0$	
L5	$Z_{L5} = 1,8 + j5,79$	$Z_{(0)L5} = 3,3 + j16,5$	



Кінець таблиці 11

Устаткування	Система прямої послідовності $Z_1$ , Ом	Система нульової послідовності $Z_{(0)}$ , Ом	Примітки
L6	$Z_{L6} = 0,082 + j0,086$	—	Кабель
L6t	$Z_{L6t} = 9,836281 + 10,316100$	—	
R1	—	$Z_{(0)R1} = 0,0 + j66,0$	$Z_{(0)R1} = 3Z_{R1}$

<sup>1)</sup> Еквівалентні повні опори стосуються сторони середньої напруги (індекс MV) і скориговані (рисунок 7 ІЕС 60909-0).  
<sup>2)</sup> Обчислення коригувальних коефіцієнтів, див. 2.2 (3.3.3 ІЕС 60909-0).  
<sup>3)</sup> Скориговано, використовуючи  $K_{TBC}$ , див. 2.2 (3.3.3 ІЕС 60909-0).  
<sup>4)</sup> Скориговано, використовуючи  $K_S = 0,995975$ .  
<sup>5)</sup>  $Z_{M1}$  паралельно  $Z_{M2}$ :  $(22,401898 + j224,018979)$  Ом.

Результати подано з шістьма знаками після коми. Останню цифру заокруглено.

### 6.3 Результати

Результати, зазначені в таблицях 12 і 13 для струмів коротких замикань, розрахованих згідно з ІЕС 60909-0, основані на даних 2.2. Їх вказано числами з чотирма знаками після коми, окрім  $I_b$  і  $I_k$ , у яких лише три знаки після коми. Останню цифру заокруглено.

Під час тестування цифрової програми з використанням цієї перевірконої мережі результати мають бути аналогічними результатам у таблицях 12 і 13; для  $I_p$  результати залежать від методу, використуваного для визначення коефіцієнта  $k$ . Якщо є відхилення, то вони мають бути менше ніж  $\pm 0,02\%$ , як вказано в 6.1.

#### 6.3.1 Трифазні струми короткого замикання

У таблиці 12 вказано сили струму короткого замикання  $I_k^m$ ,  $I_p$ ,  $I_b$  і  $I_k$  для трифазних струмів короткого замикання на шинах від ① до ⑧ (точка короткого замикання F).

Таблиця 12 — Результати обчислень  $I_k^m$ ,  $I_p$ ,  $I_b$  та  $I_k$

F	$U_n$ , кВ	$I_{k1}^{m1}$ , кА	$I_p(50)^{2)}$ , кА	$I_p(20)^{3)}$ , кА	$I_b^4)$ , кА	$I_k^5)$ , кА
①	380	40,6447	100,5766	100,5677	40,645 <sup>6)</sup>	40,635
②	110	31,7831	80,8249	80,6079	31,570	31,663
③	110	19,6730	45,8249	45,8111	19,388	19,623
④	110	16,2277	36,8041	36,8427	16,017	16,196
⑤	110	33,1894	83,6266	83,4033	32,795	32,997
⑥	10	37,5629	99,1910	98,1434	34,028	34,356
⑦	10	25,5895	51,3864	51,6899	23,212	22,276
⑧	30	13,5778	36,9201	36,9227	13,578 <sup>6)</sup>	13,573

<sup>1)</sup>  $c = c_{max} = 1,1$ .

<sup>2)</sup>  $k = f(R_k/X_k)$  без коефіцієнта 1,15 (див. 4.3.1.2 b) і таблицю 11 ІЕС 60909-0), враховуючи те, що кабель L6 послідовно з'єднаний з асинхронними двигунами і становить спільне відгалуження, і враховуючи те, що повітряні лінії електропередавання мають відношення  $R/X = 0,3$ . У разі короткого замикання в точці 7 L6 є відгалуженням, тому потрібно використовувати коефіцієнт 1,15. Прийняти  $I_p(50)$  і помножити на 1,15.

<sup>3)</sup>  $k$  розраховують за методом 20 Гц (4.3.1.2 c) ІЕС 60909-0).

<sup>4)</sup>  $I_b$  розраховують за рівнянням (75) ІЕС 60909-0,  $t_{min} = 0,1$  с.

<sup>5)</sup>  $I_k = I_{km}^m$  (4.6.3 ІЕС 60909-0).

<sup>6)</sup> Віддалене від генератора і двигуна коротке замикання  $I_b = I_k^m$  (4.5.1 ІЕС 60909-0).

<sup>7)</sup> Віддалене від двигуна коротке замикання  $\mu_{M1} = 1 \rightarrow 1 - \mu_{M1}Q_{M1} = 0$  (4.5.2.3 ІЕС 60909-0).

#### 6.3.2 Струми короткого замикання фаза—земля

У таблиці 13 вказано сили струму короткого замикання  $I_{k1}^m$  та  $I_{p1}$  для струмів короткого замикання фаза—земля на шинах від ② до ⑤. Максимальна сила струму короткого замикання  $I_b$  з  $k_{(1)}$  розраховують з використанням  $k_{(1)}$ , знайденого на основі повних опорів прямої послідовності в точках

короткого замикання F за використання методу розрахування частоти 20 Гц. Максимальну силу струму короткого замикання  $i_p$  з  $\kappa_{(012)}$  визначають з використанням  $\kappa_{(012)} = (R_{(0)} + R_{(1)} + R_{(2)}) / (X_{(0)} + X_{(1)} + X_{(2)})$  у точках короткого замикання, використовуючи частоту 20 Гц.

Таблиця 13 — Результати обчислень  $I_k''$  та  $i_{p1}$

F	$U_n$ , кВ	$I_{k1}''$ , кА	$i_p$ з $\kappa_{(1)}^{(2)}$ , кА	$i_p$ з $\kappa_{(012)}^{(3)}$ , кА	$X_{(0)}/X_{(1)}^{(4)}$
②	110	15,9722	40,5086	39,9641	3,961
③	110	10,4106	24,2424	24,2635	3,666
④	110	9,0498	20,5463	21,0415	3,394
⑤	110	17,0452	42,8337	41,4303	3,823

<sup>1)</sup>  $I_{k1}'' = I_{b1} = I_{k1}$  (див. 4.5.2.4 і 4.6.4 ІЕС 60909-0),  $c = c_{\max} = 1,1$ .  
<sup>2)</sup>  $i_{p1} = \kappa_{(1)} \sqrt{2} I_{k1}''$  з  $\kappa_{(1)}$ , визначеним за методом розрахування 20 Гц для повних опорів системи прямої послідовності в точці короткого замикання (див. 4.3.1.2 с) метод (с) ІЕС 60909-0).  
<sup>3)</sup>  $\kappa_{(012)}$  розраховують за методом розрахування 20 Гц, враховуючи послідовні повні опори прямої та зворотної послідовності в точці короткого замикання.  
<sup>4)</sup> Лише для інформації:  $X_{(0)}/X_{(1)} \approx (3,4—4,0) \rightarrow I_{k1}''/I_k'' \approx (0,56—0,5)$ , коефіцієнт короткого замикання на землю  $\leq 1,4$ .

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 (ІЕС 60050(151):1978, ІЕС 60050(841):1983, NEQ)

ДСТУ 2815–94 Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення (ІЕС 60050(131):1978, IDT, ІЕС 60050(151):1978, NEQ)

ДСТУ ІЕС 60909-0:2007 Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 0. Обчислення сили струму (ІЕС 60909-0:2001, IDT).

---

Код УКНД 17.220.01; 29.240.01

**Ключові слова:** допоміжна мережа, енергоблок станції, коротке замикання, мережна лінія живлення, обчислювання, перевірна мережа, повний опір короткого замикання, струм, трансформатор.

---

Редактор **Г. Халімон**  
Технічний редактор **О. Марченко**  
Коректор **Т. Нагорна**  
Верстальник **В. Перекрест**

---

Підписано до друку 21.07.2009. Формат 60×84 1/8.  
Ум. друк. арк. 5,58. Зам. **1639** Ціна договірна.

---

Виконавець

Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр  
проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»)  
вул. Святошинська, 2, м. Київ, 03115

Свідоцтво про внесення видавця видавничої продукції до Державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції від 14.01.2006, серія ДК, № 1647