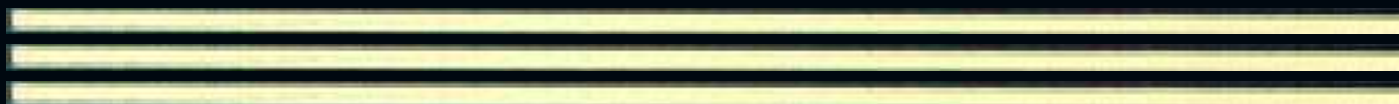


• НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ •

СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

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

ДСТУ ІЕС/TR 60909-4:2008





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 IEC/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)

Ступінь відповідності — ідентичний (IDT)

Переклад з англійської (en)

4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей стандарт є тотожний переклад IEC/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 IEC 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 IEC 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 виноску¹⁾ до рисунка 3;

- у 2.2 в останньому рядку розрахунків під рисунком 4 позначку S_{rTHVLv} замінено на S_{rTMVLv} ;

- 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_2 у кілоамперах замінено позначку на I_{kM1}^* ;

- у 5.1 в поясненні до рисунка 12 замінено позначку U_{TC} на u_{TC} ;

- у тексті 5.2.5 узгоджено позначку I_w з відповідною позначкою у формулі;

- у 5.3.4 у формулі на визначення 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 IEC 60050(131), IEC 60050(151), IEC 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.

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

Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання

**ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ 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 IEC 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 електро- устаткування в системах прямої, зворотної та нульової послідовності (розділ 2) і під час практичного виконувannya 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 IEC 60909 (1988), але виправлені згідно з IEC 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 IEC 60909-0, з одного боку, і результати, одержані методом накладання, з іншого боку, враховуючи різні умови потоко- розподілу навантаги до виникнення короткого замикання.

Розділ 6 цього стандарту описує графік і дані перевірконої мережі та результати обчислення, проведеного згідно з IEC 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

IEC 60038:1983 IEC standard voltages

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

IEC 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

IEC 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

IEC 60038:1983 Стандартні напруги IEC

IEC 60909-0:2000 Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму. Частина 0. Обчислювання сили струму

IEC 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 IEC 60909

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

IEC 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

IEC 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 IEC 60909-0.

2 ПОВНІ ОПОРИ ЕЛЕКТРОУСТАТКОВАННЯ ПРЯМОЇ, ЗВОРотноЇ ТА НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

Додатково до розділу 3 IEC 60909-0 подано моделювання й обчислювання повних опорів електроустановки 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 IEC 60909-0 і IEC 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.

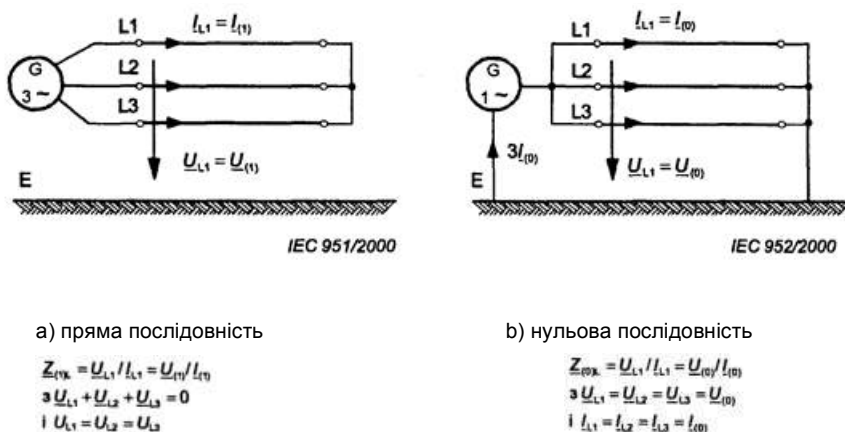


Рисунок 1 — Повні опори прямої та нульової послідовності повітряних ліній (однокілвна лінія електропередавання)

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 (двокілвна 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.

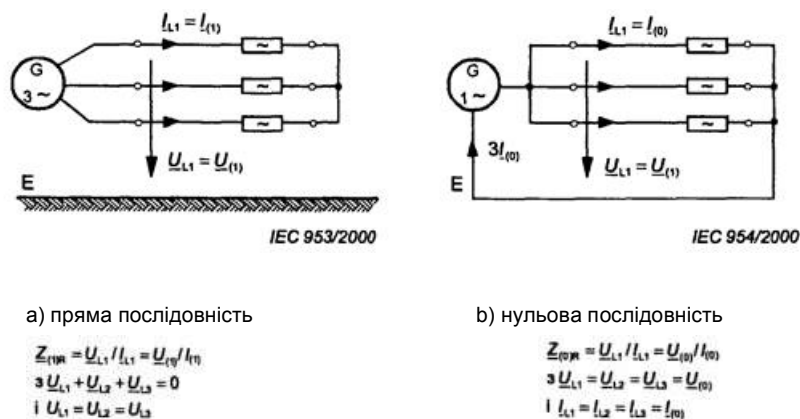


Рисунок 2 — Повний опір прямої та нульової послідовності реактора, що обмежує струм короткого замикання, зазвичай $R_R \ll X_R$

Якщо магнітне з'єднання між трьома котушками із залізним осердям або без нього невелике, то повний опір нульової послідовності $Z_{(1)R}$ 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.

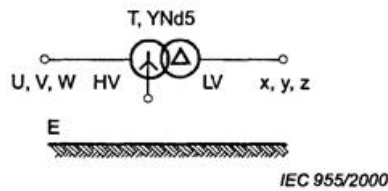
2.2 Трансформатори

Одиничні трансформатори енергоблоків станції також розглядають у 2.3.

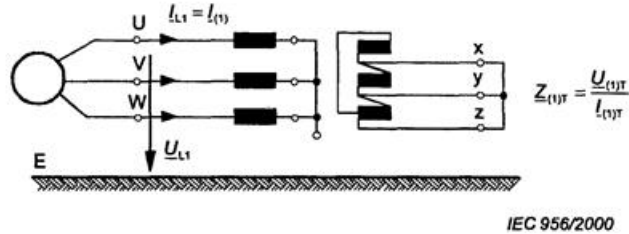
Мережні трансформатори мають дві, три або навіть більше трифазних обмоток. На рисунку 3 зображено приклад повних опорів системи прямої та нульової послідовності двообмоткового трансформатора з фупою з'єднань YNd5.

У разі триобмоткових трансформаторів (приклад подано в таблиці 3b 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).

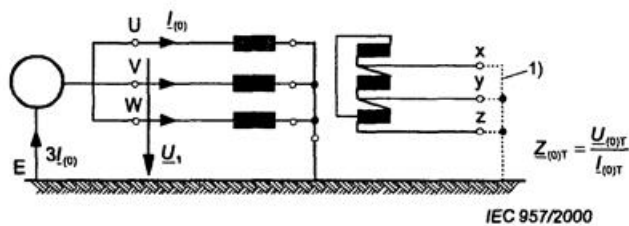
У таблиці 1 подано приклади еквівалентних контурів у системі прямої та нульової послідовності дво- і триобмоткових трансформаторів із різними умовами уземлення на стороні високої та середньої напруги. Повні опори в таблиці 1 пов'язані зі стороною А, яка може бути стороною трансформатора високої або середньої 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 $Z_{(0)}$

¹⁾ **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.

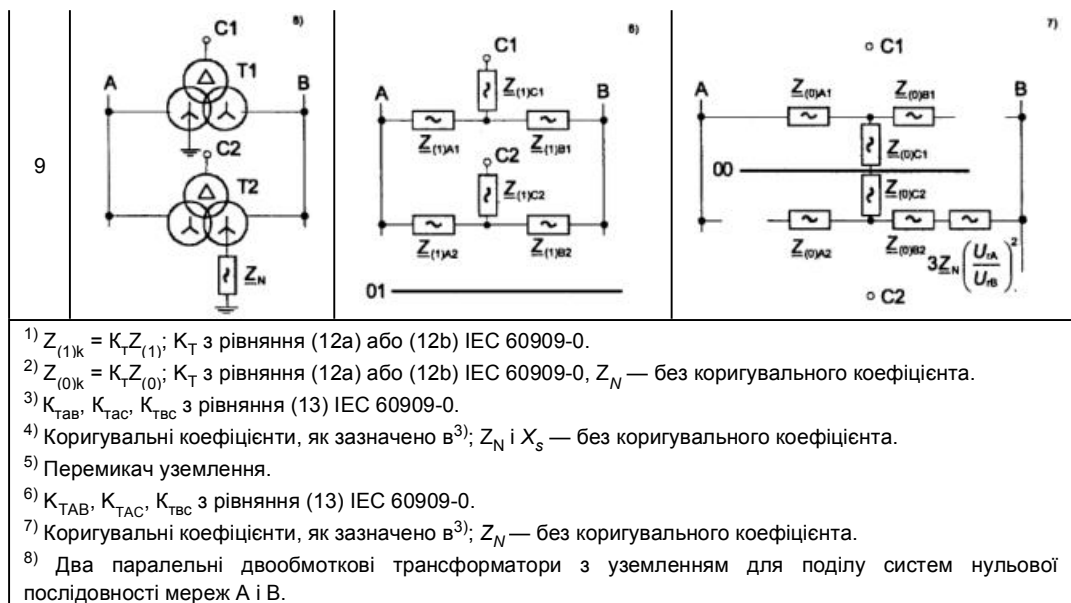
Трансформатори з групою з'єднань YNyn.d типові в мережах високої напруги зазвичай з уземленням нейтралі лише на одній стороні (A або B). Приклади 4b і 6 таблиці 1 показують, що система нульової послідовності обох мереж з'єднана, якщо уземлено обидві нейтральні точки A або B (що уземлює перемикач ES, 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_0 як функції $Z_N \neq \infty$, необхідно виконати спеціальні обчислювання, описані у випадку 6 таблиці 1.

Вольтодобудкові трансформатори (або регулювальні трансформатори для контролю напруги та/ чи кута зсуву фаз) подано як мережні трансформатори, зазвичай еквівалентні формі 6 таблиці 1. Конструкція і схема з'єднання трансформаторів напруги визначає, чи має Z_m 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'єднань трансформаторів у системі прямої та нульової послідовності

№	Трансформатор	Система прямої послідовності	Система нульової послідовності
1a			
1b			
2			
3			
4a			
4b			
5			
6			
7			
8	<p>Автотрансформатор з трьома окремими пристроями</p>		



У таблиці 2 подано наближені значення для відношень $X_{(0)T}/X_m$ трансформаторів, якщо уземлена одна нейтральна точка трансформатора. У разі триобмоткових трансформаторів (випадки А—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 ³⁾ або YNz
Три жили	Від 0,7 до 1,0 ¹⁾			Від 3 до 10
П'ять жил	1,0	Від 0,1 до 0,15	Від 1 до 3,5 ²⁾	Від 10 до 100
Три одножильні трансформатори	1,0			Від 10 до 100

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

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

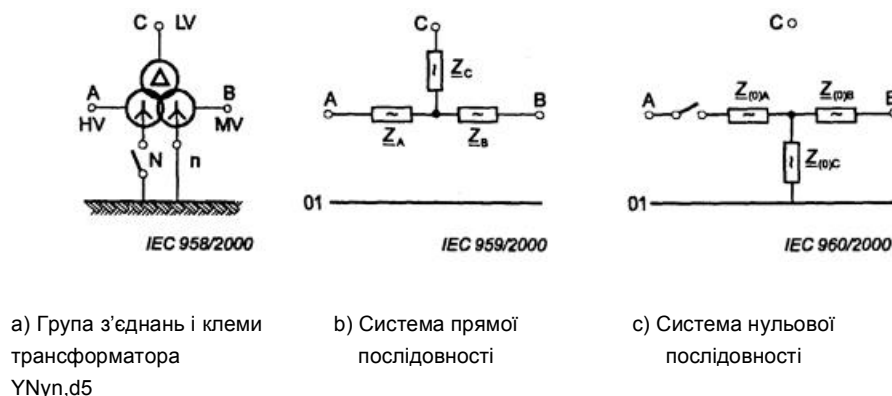


Рисунок 4 — Еквівалентні контури триобмоткового мережного трансформатора

Наведені нижче дані визначають розрахунковим способом:

$U_{rTHV} = 400$ кВ;
 $S_{rTHV} = 350$ МВА;
 $U_{krhvmv} = 21\%$; $U_{Rrhvmv} = 0,26\%$;
 $U_{krHVLV} = \%$; $U_{RrHVLV} = 0,16\%$;
 $U_{rMVLV} = 7\%$; $U_{RrMVLV} = 16\%$

$U_{rTMV} = 120$ кВ;
 $S_{rTMV} = 350$ МВА;
стосується $S_{rTHVMV} = 350$ МВА;
стосується $S_{rTNLV} = 50$ МВА;
стосується $S_{rTMVLV} = 50$ МВА;

$U_{rTLV} = 30$ кВ;
 $S_{rTLV} = 50$ МВА;
 $U_{rTHV} = 400$ кВ;
 $U_{rthv} = 400$ кВ;
 $U_{rTMV} = 120$ кВ.

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

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{U_{RHVMV}}{100\%} + j \frac{U_{XHVMV}}{100\%} \right) \frac{U_{ITMV}^2}{S_{ITHVMV}} = (0,106971 + j8,639338) \text{ OM};$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{U_{RHHVLV}}{100\%} + j \frac{U_{XHHLV}}{100\%} \right) \frac{U_{ITMV}^2}{S_{ITHVLV}} = (0,460800 + j28,796313) \text{ OM};$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{U_{RHMLV}}{100\%} + j \frac{U_{XHMLV}}{100\%} \right) \frac{U_{ITMV}^2}{S_{ITHMLV}} = (0,460800 + j20,154733) \text{ OM}.$$

Цей приклад використовують також для випробувальної мережі в розділі 6 (трансформатори Т3 = Т4), тому обчислювання виконують з шістьма знаками після коми.

З використанням номінального відносного реактивного опору X_T , визначеного на основі реактивної напруги короткого замикання $U_{Xr} = \sqrt{U_{kr}^2 - U^2 R_R}$ згідно з рівнянням (1 Od) IEC 60909-0, можна визначити такі коригувальні коефіцієнти повного опору (рівняння (13) IEC 60909-0):

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

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

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

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

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

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

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

Скориговані еквівалентні повні опори прямої послідовності на рисунку 4_б, пов'язані зі стороною середньої напруги, розраховують за рівнянням (11) IEC 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 4с) відомі такі реактивні опори, пов'язані зі стороною середньої напруги В:

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

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 $X_{(0)mvk}$:

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

Це призводить до відношення $X_{(0)T}/X_T = (X_{(0)B} + X_{(0)C})/X_{AB} = 18,1426 \text{ Ом} / 8,639 \text{ 338 Ом} = 2,0999 = 2,1$ 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 Т4, Т5 і Т6 на рисунку 16).

У цьому прикладі (трансформатор Т4 на рисунку 16) обчислювання суттєво полегшується, особливо якщо не брати до уваги реактивні опори ($R_T/X_T = 0,012$):

$X_T = X_{AB} = 8,639338 \text{ Ом}$; $K_T = K_{TAB} = 0,928072$; $X_{TK} = K_T X_T = 8,017927 \text{ Ом}$; $X_{(0)T} = 2,1 X_T = 18,1426 \text{ Ом}$ і разом з $K_T = K_{TAB}$: $X_{(0)TK} = 16,838 \text{ Ом}$ на консервативній стороні порівняно з $X_{(0)TK} = K_{TBC} X_{(0)C} = 18,195 \text{ Ом}$, 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. IEC 60909-2). У перший момент короткого замикання надперехідний реактивний опір X' призводить до I''_k .

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

Реактивний опір нульової послідовності $X_{(0)}$ менше надперехідного реактивного опору, залежно від конфігурації обмотки синхронної машини (див. IEC 60909-2). Якщо нейтральна точка зірки генератора 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 ($I''_{k1} < I''_k$), 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 IEC 60909-0).

а) Схема з'єднань

У разі енергоблока станції (S) з перемикачем відгалужень під навантагою (див. 3.7.1 IEC 60909-0) або без нього (див. 3.7.2 IEC 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) IEC 60909-0 разом з коригувальним коефіцієнтом повного опору K_s з рівняння (22) або (24) IEC 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:

a) для повного опору прямої послідовності —

$$Z_s = [(R_G + jX_d'')I_t^2 + Z_{thv}]K_s,$$

b) для повного опору зворотної послідовності —

$$Z_{(2)S} = [(R_G + jX_{(2)}'')I_t^2 + Z_{thv}]K_s,$$

c) 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) IEC 60909-0 для енергоблоків станції з перемикачем відгалужень під навантагою, залежно від можливого робочого діапазону генератора (див. IEC 60909-0). У разі енергоблока станції без перемикача відгалужень під навантагою можна використовувати коригувальний коефіцієнт K_{s0} з рівняння (24) IEC 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; $1/k_z = 21$ кВ; $x_d = 0,14$ в.о.; $x_d' = 1,8$ в.о.; $\cos\phi^* = 0,85$; $R_G = 0,002$ Ом (неявно- полюсний генератор працює лише в ділянці перезбудження).

Національна примітка

Зазначені тут надперехідний поздовжній реактивний опір x_d'' і синхронний повздовжній 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:

$$S_{iT} = 150 \text{ МВА}; U_{iThv}/U_{iTLV} = 115 \text{ кВ}/21 \text{ кВ}; u_{\%} = 16 \%; u_{R\%} = 0,5 \%; p_T = \pm 12 \%; X_{(0)T}/X_T = 0,95;$$

$$R_{(0)T}/R_T = 1,0; Z_N = jX_{R1} = j22 \text{ Ом}.$$

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

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

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

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

$$Z_{G1} = Z_G I_t^2 = (0,05998 + j12,34333) \text{ Ом з } I_t = 115 \text{ кВ}/21 \text{ кВ};$$

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

$$3 U_{Xr} = \sqrt{U_{kr}^2 - U_{Rr}^2} = 15,99219\% \quad (X_T = 0,1599219 \text{ в.о.});$$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{THV}^2}{U_{THV}^2} \cdot \frac{C_{max}}{1 + |X_d^2 - X_T| \sin \varphi_{rG}} = 0,99597;$$

$$Z_S = (Z_{Gr}^2 + Z_{THV}) K_S = (0,49879 + j26,33668) \text{ Ом}.$$

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

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

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

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

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

Цей результат також наведено в таблиці 11 для перевірконої мережі.

Струм короткого замикання між фазою і землею I''_{k1} (див. рівняння (52) IEC 60909-0):

$$Z_{(1)} = \frac{Z_S \cdot Z_Q}{Z_S + Z_Q} = (0,73267 + j4,24215) \text{ Ом}; \quad Z_{(2)} = Z_{(1)};$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 IEC 60909-0).

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

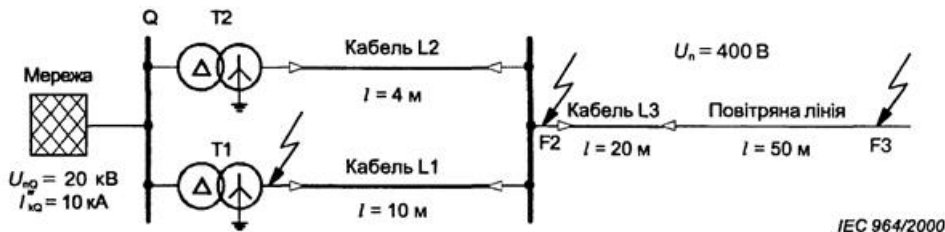


Рисунок 6 — Система низької напруги $U_n = 400$ В з точками короткого замикання F1, F2 і F3

3.2 Визначання повних опорів прямої послідовності

3.2.1 Мережна лінія живлення

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

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

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

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 (IEC 60909-0)	$Z_{(1)} = Z_{(2)}$	$Z_{(0)}$
			мОм	мОм
Мережна лінія живлення Q	$U_{nQ} = 20 \text{ кВ}; I_{nQ} = 10 \text{ кА};$ $c_Q = c_{Qmax} = 1,1$ (таблиця 1 IEC 60909-0); $R_{Q\alpha} = 0,1 X_{Q\alpha}; X_{Q\alpha} = 0,995 Z_{Q\alpha}.$	(6)	$Z_{Q\alpha} = 0,053 + j0,531$	—
Трансформатори T1 (Dyn 5) T2 (Dyn 5)	$S_{T1} = 630 \text{ кВА}; U_{T1HV} = 20 \text{ кВ};$ $U_{T1LV} = 410 \text{ В}; u_{kT} = 4 \text{ \%};$ $P_{kT1} = 6,5 \text{ кВт}; R_{T1}/R_T = 1,0;$ $X_{T1}/X_T = 0,95.$ $S_{T2} = 400 \text{ кВА}; U_{T2HV} = 20 \text{ кВ};$ $U_{T2LV} = 410 \text{ В}; u_{kT} = 4 \text{ \%};$ $P_{kT2} = 4,6 \text{ кВт}; R_{T2}/R_T = 1,0;$ $X_{T2}/X_T = 0,95.$	(7)—(9) K_T з (12a)	$Z_{T1K} = 2,68 + j10,054$ $Z_{T2K} = 4,712 + j15,698$	$Z_{(0)T1K} = 2,68 + j9,551$ $Z_{(0)T2K} = 4,712 + j14,913$
Лінії L1	Два паралельні 4-жильні кабелі: $l = 10 \text{ м}, 4 \cdot 240 \text{ мм}^2, \text{ мідь};$ $Z'_L = (0,077 + j0,079) \text{ Ом/км};$ $R_{(0)K} = 3,7 R_L; X_{(0)K} = 1,81 X_L.$	Дані та коефіцієнти $\frac{R_{(0)K}}{R_L}; \frac{X_{(0)K}}{X_L}$ надані виробником (14), (15)	$Z_{L1} = 0,385 + j0,395$	$Z_{(0)L1} = 1,425 + j0,715$
L2	Два паралельні 3-жильні кабелі: $l = 4 \text{ м}, 3 \cdot 185 \text{ мм}^2, \text{ алюміній};$ $Z'_L = (0,208 + j0,068) \text{ Ом/км};$ $R_{(0)K} = 4,23 R_L; X_{(0)K} = 1,21 X_L.$		$Z_{L2} = 0,416 + j0,136$	$Z_{(0)L2} = 1,760 + j0,165$
L3	4-жильний кабедь: $l = 20 \text{ м}, 4 \cdot 70 \text{ мм}^2, \text{ мідь};$ $Z'_L = (0,271 + j0,087) \text{ Ом/км};$ $R_{(0)K} = 3 R_L; X_{(0)K} = 4,46 X_L.$		$Z_{L3} = 5,420 + j1,740$	$Z_{(0)L3} = 16,260 + j7,760$
L4	Повітряна лінія: $l = 50 \text{ м}, q_n = 50 \text{ мм}^2, \text{ мідь};$ $d = 0,4 \text{ м};$ $Z'_L = (0,3704 + j0,297) \text{ Ом/км};$ $R_{(0)K} = 2 R_L; X_{(0)K} = 3 X_L.$		$Z_{L4} = 18,50 + j14,85$	$Z_{(0)L4} = 37,04 + j44,55$

3.2.2 Трансформатори

Згідно з рівняннями (7)—(9) і (12a) IEC 60909-0:

а) Трансформатор Т1:

$$Z_{T1} = \frac{U_{krT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{T1}} = \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{(410\text{ В})^2}{630\text{ кВА}} = 10,673\text{ мОм};$$

$$R_{T1} = \frac{P_{krT1}}{3I_{rT1LV}^2} = \frac{P_{krT1} \cdot U_{rT1LV}^2}{S_{T1}^2} = \frac{6,5\text{ кВт} \cdot (410\text{ В})^2}{(630\text{ кВА})^2} = 2,753\text{ мОм};$$

$$u_{Rr} = \frac{R_{krT1}}{S_{T1}} \cdot 100\% = 1,032\%; \quad u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 3,865\%;$$

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

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

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

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

б) Трансформатор Т2:

$$Z_{T2} = \frac{U_{krT2}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT2LV}^2}{S_{T2}} = \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{(410\text{ В})^2}{400\text{ кВА}} = 16,810\text{ мОм};$$

$$R_{T2} = \frac{P_{krT2} \cdot U_{rT2LV}^2}{S_{T2}^2} = \frac{4,6\text{ кВт} \cdot (410\text{ В})^2}{(400\text{ кВА})^2} = 4,833\text{ мОм};$$

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

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

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

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):

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

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

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

3.3 Визначання повних опорів нульової послідовності

3.3.1 Трансформатори

Для трансформаторів Т1 і Т2 з групою з'єднань Дун5 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:

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

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

3.3.2 Лінії (кабельні та повітряні)

а) Лінія L1:

$$R_{(0)L} = 3,7R_L; \quad X_{(0)L} = 1,81X_L; \quad \text{зі зворотнім контуром по четвертому провіднику} \quad \underline{Z}_{(0)L1} = (3,7R_{L1} + j1,81X_{L1}) = (1,425 + j0,715)\text{ мОм}.$$

б) Лінія L2:

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

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

в) Лінія L3:

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

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

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'' 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:

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

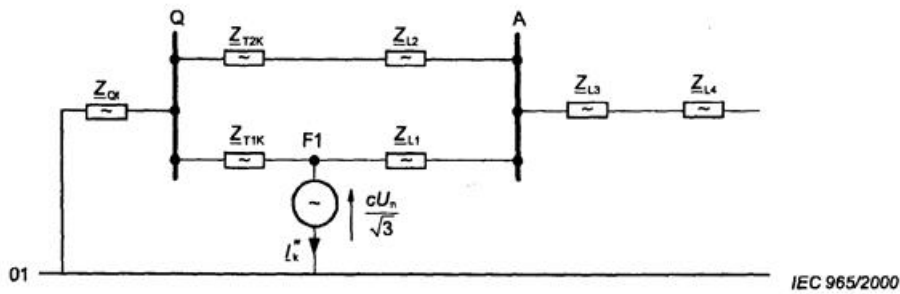


Рисунок 7 — Система прямої послідовності (згідно з рисунком 6) для обчислювання її у точці короткого замикання F1

Максимальна початкова сила струму трифазного короткого замикання (рівняння (29) IEC 60909-0), якщо $c = C_{\max} = 1,05$ (таблиця 1 IEC 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 IEC 60909 головним чином спричинена номінальною напругою 400 В (IEC 60038). Різниця через використання K_g 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 IEC 60909-0)

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

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

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) IEC 60909-0).

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

3.4.1.3 Метод (c): Еквівалентна частота з R/X з рівняння (59) IEC 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_n , але використовує такі величини 20 Гц:

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

$$Z_{T1Kc} = (2,684 + j4,0212) \text{ МОм}; Z_{T2Kc} = (4,712 + j6,279) \text{ МОм};$$

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

$$Z_c = Z_{QKc} + \frac{Z_{T1Kc}(Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c})}{Z_{T1Kc} + Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c}} = (1,8738 + j2,7076) \text{ МОм};$$

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

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

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

Примітка. Метод (a) в цьому разі не зовсім адекватний (див. 4.3.1.2 IEC 60909-0). Цей метод потрібно використовувати лише як перше наближення, якщо обчислюють силу струму короткого замикання лише з реактивними опорами. Метод (a) призводить до $k = 1,46$ на основі найменших відношень R/X з Z_{T1k} і $Z_{T2k} + Z_{L2} + Z_{L1}$. Якщо мережну лінію живлення з $R_q/X_q = 0,1$ також розглядають як відгалуження мережі, то визначають коефіцієнт $\kappa(a) = 1,751$ максимальну силу струму короткого замикання $I_p(a) = 85,5 \text{ кА} > I_{wc}$ (див. 2.3 IEC 60909-1).

3.4.2 Точка короткого замикання F2

$$Z_k = Z_{QK} + \frac{(Z_{T1K} + Z_{L1})(Z_{T2K} + Z_{L2})}{Z_{T1K} + Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2}} = (1,977 + j6,827) \text{ МОм};$$

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

Обчислювання за методом (c) (див. 4.3.1.2 IEC 60909-0) призводить до такого:

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

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

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

Примітка. Остаточне відношення R/X більшою мірою визначається двома відгалуженнями $Z_{T1K} + Z_{L1}$ і $Z_{T2K} + Z_{L2}$ з $R/X = 0,294$ та $R/X = 0,324$. Ці два відношення аналогічні $R/X \sim 0,29$, що призводить до $\kappa_{(b)} = 1,431$. 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

$$Z_k = Z_{Qk} + \frac{(Z_{T1K} + Z_{L1})(Z_{T2K} + Z_{L2})}{Z_{T1K} + Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2}} + Z_{L3} + Z_{L4} = (25,897 + j23,417) \text{ МОм};$$

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

$$Z_c = Z_{F2c} + Z_{L3c} + Z_{L4c} = (1,976 + j2,733) \text{ МОм} + (23,90 + j6,636) \text{ МОм};$$

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

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

3.5 Обчислювання I_k 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.

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = Z_k = (1,881 + j6,764) \text{ МОм (див. 3.4.1)};$$

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

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

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

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

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 $Z_{(c)}$ і Z_{to}^* в докладнішому обчисленні $\kappa_{(c)}$ та $I_{p1(c)}$ можна визначити так:

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

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

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

У цьому разі відмінність становить всього 1,7 %.

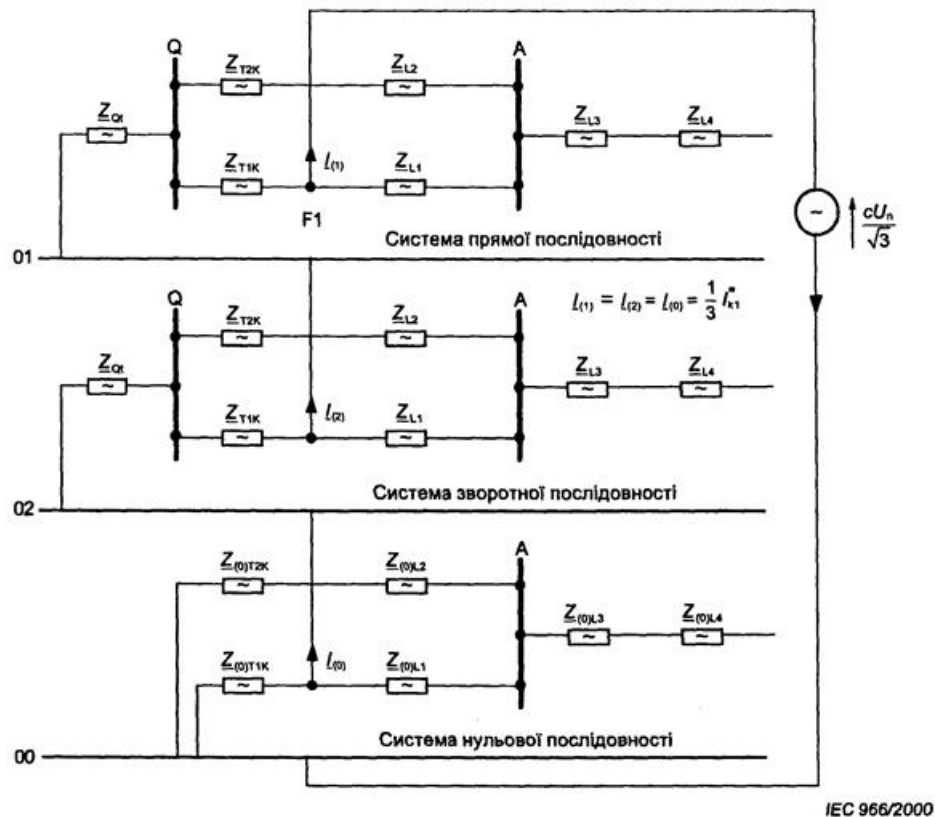


Рисунок 8 — Система прямої, зворотної та нульової послідовності із з'єднаннями в точці короткого замикання F1 для обчислювання I_{k1}

3.5.2 Точка короткого замикання F2

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1,977 + j6,827) \text{ МОм (див. 3.4.2);}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)J1})(\underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)J2})}{\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)J1} + \underline{Z}_{(0)J2}} = (2,516 + j6,109) \text{ МОм;}$$

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

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

3.5.3 Точка короткого замикання F3

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (25,897 + j23,417) \text{ МОм (див. 3.4.3);}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)F2} + \underline{Z}_{(0)J3} + \underline{Z}_{(0)J4} = (55,816 + j58,419) \text{ МОм;}$$

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

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

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) IEC 60909-0).

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

Точка короткого замикання							
	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 t і p на рисунках 21 і 22 IEC 60909-0. Коефіцієнт t розраховують за рівнянням t у додатку А IEC 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	k	$m^{1)}$	$n^{2)}$	Джоулевий інтеграл (рівняння (102) IEC 60909-0)
	кА	—	С	—	—		(кА) ² 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	$I_k'' = 4,83$		0,06	1,06	0,059	1	1,48
F2	$I_k'' = 34,12$	Запобіжник 250 А	<0,005	—	—	—	<0,56 ³⁾
F3	$I_k'' = 6,95$		0,02	1,06	0,178	1	1,19
F3	$I_k'' = 4,83$		0,07	1,06	0,051	1	1,72

1) Розраховують за рівнянням t (див. додаток А IEC 60909-0).
2) Віддалене від генератора коротке замикання: $I_k = I_k''$, $p = 1$.
3) 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 прямо протилежної характеристики 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 КОРОТКОГО 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 $S_{rT} = 15$ МВА живиться через два трижильні кабелі 30 кВ від мережної лінії живлення з $U_{nQ} = 33$ кВ і $I_{kQ} = 13,12$ кА ($S_Q = \sqrt{3} U_{kQ} I_{kQ} = 750$ МВА (див. 1.3.6 IEC 60909-0)). Цю інформацію про мережну пінію живлення, обчислену відповідно до IEC 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 електроустаткування лише під час обчислювання трифазних струмів короткого замикання. Крім того, обчислювання проводять 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 IEC 60909-0.

Силу струму короткого замикання I'' у точці короткого замикання F визначають із комплексного складання часткових струмів короткого замикання на рисунку 9 (див. 4.2.1.2 IEC 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 $P_{\text{М}} = 1$ МВт кожен (рисунок 9), які розглядають як один еквівалентний двигун M2.

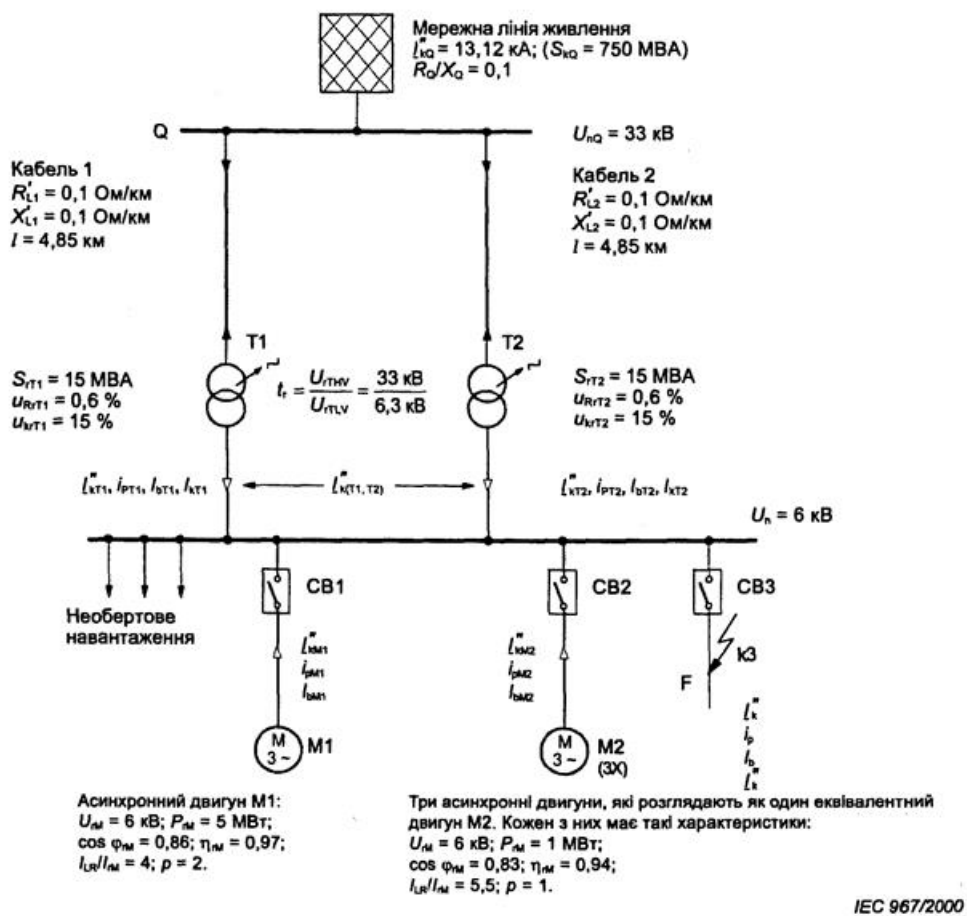


Рисунок 9 — Дані для мережі середньої напруги 33 кВ/6 кВ

Таблиця 5 — Обчислення повних опорів короткого замикання електроустановки і $Z_{k(T1,T2)}$ в точці короткого замикання F без двигунів (автоматичні вимикачі CB1 і CB2 розімкнені)

№	Устатований	Рівняння (IEC 60909-0) і обчислення	Повний опір, Ом
1	Мережна лінія живлення	$(6) \quad Z_{Gk} = \frac{c_0 U_{n0}}{\sqrt{3} I_{n0}''} \cdot \frac{1}{t_f^2} = \frac{1,1 \cdot 33 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 13,12 \text{ кА}} \cdot \left(\frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$ $X_{Gk} = 0,995 Z_{Gk}; \quad R_{Gk} = 0,1 X_{Gk}$ $Z_{Gk} = R_{Gk} + j X_{Gk}$	$(0,0582)$ $0,0058 + j0,0579$
2	Кабель L1 (= кабель L2)	$R_{L1} = R'_{L1} \cdot \frac{1}{t_f^2} = 0,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4,85 \text{ км} \cdot \left(\frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$ $X_{L1} = X'_{L1} \cdot \frac{1}{t_f^2} = 0,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4,85 \text{ км} \cdot \left(\frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$ $Z_{L1} = R_{L1} + j X_{L1}$	$0,0177 + j0,0177$
3	Трансформатор Т1 (= трансформатор Т2)	$(7) \quad Z_{T1} = \frac{U_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{TLV}^2}{S_{rT}} = \frac{15 \%}{100 \%} \cdot \frac{(6,3 \text{ кВ})^2}{15 \text{ МВА}}$ $(8) \quad R_{T1} = \frac{U_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{TLV}^2}{S_{rT}} = \frac{0,6 \%}{100 \%} \cdot \frac{(6,3 \text{ кВ})^2}{15 \text{ МВА}}$ $(9) \quad X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2}$ $(12a) \quad K_T = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6 \cdot 0,1499} = 0,9588$ $Z_{T1K} = (R_{T1} + j X_{T1}) K_T$	$(0,3969)$ $(0,0159)$ $(0,3966)$ $0,0152 + j0,3803$
4	$L1 + T1 = L2 + T2$	$Z_{L1K} + Z_{T1K} = Z_{L2} + Z_{T2K}$	$0,0329 + j0,3980$
5	$(L1 + T1) \parallel (L2 + T2)$ у паралелі	$\frac{1}{2} (Z_{L1} + Z_{T1K})$	$0,0165 + j0,1990$
6	Повний опір короткого замикання без двигунів	$Z_{k(T1,T2)} = Z_{Gk} + \frac{1}{2} (Z_{L1} + Z_{T1K})$	$0,0223 + j0,2569$
7	Двигун М1 Двигун М2 (три пристрої 1 МВт)	$(26) \quad Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR} / I_{LM}} \cdot \frac{U_{LM}^2}{S_{LM}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(6 \text{ кВ})^2}{6 \text{ МВА}}$ $\text{з } S_{LM} = P_{LM} / (\cos \varphi_{LM}) = 6 \text{ МВА}$ $(26) \quad Z_{M2} = \frac{1}{3} \frac{1}{I_{LR} / I_{LM}} \cdot \frac{U_{LM}^2}{S_{LM}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5,5} \cdot \frac{(6 \text{ кВ})^2}{1,28 \text{ МВА}}$ $\text{з } S_{LM} = P_{LM} / (\cos \varphi_{LM}) = 1,28 \text{ МВА}$	$1,500$ $1,705$

Суму $I''_{kT1} + I''_{kT1}$ на вторинній стороні трансформаторів визначають з використанням $Z_{k(T1,T2)}$ з таблиці 5.

$$I''_{kT1} + I''_{kT2} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} (0,0223 + j0,2569) \text{ Ом}} = (1,28 - j14,72) \text{ кА};$$

$$I''_{k(T1,T2)} = |I''_{kT1} + I''_{kT2}| = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 0,2579 \text{ Ом}} = 14,78 \text{ кА}.$$

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 IEC 60909-0) для асинхронних двигунів з $P_{M/p} > 1 \text{ МВт}$.

$$I''_{kM1} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} (0,149 + j1,493) \text{ Ом}} = (0,25 - j2,53) \text{ кА};$$

$$I''_{kM2} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} (0,170 + j1,696) \text{ Ом}} = (0,22 - j2,22) \text{ кА}.$$

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

$$I_k'' = 19,55 \text{ кА}.$$

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);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

4.3 Обчислювання із реактивним опором короткого замикання електроустановки

Обчислювання із реактивним опором електроустановки дійсне, лише коли $R_k < 0,3X_k$ (див. 4.2.1.11 ІЕС 60909-0). Якщо ця умова задоволена, то це відображається на рисунку 9.

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

Таблиця 6 — Обчислення реактивних опорів короткого замикання електроустановки і $X_{k(T1,T2)}$ в точці короткого замикання F

№	Усталювання	Рівняння (ІЕС 60909-0) і обчислення	Повний опір, Ом
1	Мережна лінія живлення ($X_Q = Z_Q$)	(6) $X_Q = \frac{c_d U_n}{\sqrt{3} I_{nQ}} \cdot \frac{1}{t_f^2} = \frac{1,1 \cdot 33 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 13,12 \text{ кА}} \cdot \left(\frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$	(0,0582)
2	Кабель L1	$X_{L1} = X'_{L1} l \frac{1}{t_f^2} = 0,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4,85 \text{ км} \cdot \left(\frac{6,3 \text{ кВ}}{33 \text{ кВ}} \right)^2$	0,0177
3	Трансформатор T1 ($X_T = Z_T$)	(7) $X_{T1} = \frac{U_{nT1}}{100 \%} \cdot \frac{U_{T1LV}^2}{S_{T1}} = \frac{15 \%}{100 \%} \cdot \frac{(6,3 \text{ кВ})^2}{15 \text{ МВА}}$ (12a) $K_T = 0,95 \cdot \frac{C_{max}}{1 + 0,6 \cdot X_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,15}$ $K_T = 0,959$ $X_{T1K} = X_{T1} K_T$	(0,3969) 0,3805
4	$L1 + T1 = L2 + T2$	$X_{L11} + X_{T1K} = X_{L21} + X_{T2K}$	0,3982
5	$(L1 + T1) \parallel (L2 + T2)$	$\frac{1}{2} (X_{L11} + X_{T1K})$	0,1991
6	Повний опір короткого замикання без двигунів	$X_{k(T1,T2)} = X_Q + \frac{1}{2} (X_{L11} + X_{T1K})$	0,2573

Сила струму короткого замикання $I''_{k(T1,T2)}$ без двигунів:

$$I''_{k(T1,T2)} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} X_{k(T1,T2)}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \cdot 0,2573 \text{ Ом}} = 14,81 \text{ кА}.$$

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:

$$X_{M1} = \frac{1}{I_{LR} / I_{LM}} \cdot \frac{U_{FM}^2}{S_{FM}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(6 \text{ кВ})^2}{6 \text{ МВА}} = 1,5 \text{ Ом}; I''_{kM1} = 2,54 \text{ кА};$$

$$X_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR} / I_{LM}} \cdot \frac{U_{FM}^2}{S_{FM}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5,5} \cdot \frac{(6 \text{ кВ})^2}{1,28 \text{ МВА}} = 1,705 \text{ Ом}; I''_{kM2} = 2,23 \text{ кА}.$$

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:

$$I''_k = I''_{k(T1,T2)} + I''_{km1} + I''_{km2} = (14,81 + 2,54 + 2,23) \text{ кА} = 19,58 \text{ кА}.$$

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: $R_T/X_T \approx u_R/u_{kr} = 0,6\%/15\% = 0,04$ (на консервативній стороні) і $R_m/X_m = 0,1$.

$$I_p = I_{p(T1,T2)} + I_{pm1} + I_{pm2} = (39,57 + 6,29 + 5,52) \text{ кА} = 51,38 \text{ кА};$$

$$3 I_{p(T1,T2)} = K_{(T1,T2)} \sqrt{2} I''_{k(T1,T2)} = 1,89 \cdot \sqrt{2} \cdot 14,81 \text{ кА} = 39,57 \text{ кА};$$

$$I_{pm1} = K_{(M1)} \sqrt{2} I''_{km1} = 1,75 \sqrt{2} \cdot 2,54 \text{ кА} = 6,29 \text{ кА};$$

$$I_{pm2} = K_{(M2)} \sqrt{2} I''_{km2} = 1,75 \sqrt{2} \cdot 2,23 \text{ кА} = 5,52 \text{ кА}.$$

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:

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

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

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

Процедуру обчислювання реактивного опору короткого замикання $^*X_{k(T1T2)}$ без впливу двигунів описано в таблиці 7 (аналогічно таблиці 6).

Таблиця 7 — Обчислення реактивних опорів короткого замикання електроустановки у відносних одиницях і $^*X_{kfn,T2}$ у точці короткого замикання F

№	Устаткування	Рівняння (IEC 60909-0) і обчислення	Реактивний опір, в.о.
1	Мережна лінія живлення ¹⁾	(6) $^*X_{\alpha} = \frac{c_{\alpha} \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{\alpha}} \cdot \frac{1}{I''_T} = \frac{1,1 \cdot \text{в.о.}}{\sqrt{3} \cdot 4,33 \text{ в.о.}} \cdot \frac{1}{0,9524^2}$	0,1617
2	Кабель L1 ²⁾	$^*X_{L1} = X'_{L1} \cdot \frac{S_R}{U_R^2} \cdot \frac{1}{I''_T} = 0,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}} \cdot 4,85 \text{ км} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{(33 \text{ кВ})^2} \cdot \frac{1}{0,9524^2}$	0,0491
3	Трансформатор T1 ³⁾	(7) $^*X_{T1} = \frac{U_{nT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{T1}} \cdot \frac{S_R}{U_R^2} = \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{(6,3 \text{ кВ})^2}{15 \text{ МВА}} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{(6 \text{ кВ})^2}$ (12a) $K_T = 0,95 \frac{c_{\text{max}}}{1 + 0,6 \cdot X_T} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,15}$ $K_T = 0,959$ (див. таблицю 6) $^*X_{T1K} = ^*X_{T1} K_T$	(1,1025) 1,0573
4	L1 + T1 = L2 + T2	$^*X_{L1} + ^*X_{T1K} = ^*X_{L2} + ^*X_{T2K}$	1,1064
5	(L1 + T1) (L2 + T2)	$\frac{1}{2} (^*X_{L1} + ^*X_{T1K})$	0,5532
6	Реактивний опір короткого замикання (в.о.) без двигунів	$^*X_{k(T1,T2)} = ^*X_{\alpha} + \frac{1}{2} (^*X_{L1} + ^*X_{T1K})$	0,7149

¹⁾ $I''_{kQ} \cdot U_R/S_R = 13,12 \text{ кА} \cdot 33 \text{ кВ}/100 \text{ МВА} = 4,33 \text{ в.о.}$

²⁾ $U_R = 33 \text{ кВ}.$

³⁾ $U_R = 6 \text{ кВ}.$

Сила струму короткого замикання $I''_{k(T1,T2)}$ без двигунів:

$$^*I''_{k(T1,T2)} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot ^*X_{k(T1,T2)}} = \frac{1,1 \cdot \text{в.о.}}{\sqrt{3} \cdot 0,7149 \text{ в.о.}} = 0,8884 \text{ в.о.};$$

$$I''_{k(T1,T2)} = ^*I''_{k(T1,T2)} \cdot \frac{S_R}{U_R} = 0,8884 \text{ в.о.} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{6 \text{ кВ}} = 14,81 \text{ кА}.$$

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

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

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

$$^*I_{\text{гм1}} = \frac{c \cdot U_{\text{R}}}{\sqrt{3} \cdot ^*X_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ в.о.}}{\sqrt{3} \cdot 4,167 \text{ в.о.}} = 0,1524 \text{ в.о.}; \quad I_{\text{гм1}} = ^*I_{\text{гм1}} \cdot \frac{S_{\text{R}}}{U_{\text{R}}} = 2,54 \text{ кА};$$

$$^*I_{\text{гм2}} = \frac{c \cdot U_{\text{R}}}{\sqrt{3} \cdot ^*X_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ в.о.}}{\sqrt{3} \cdot 4,735 \text{ в.о.}} = 0,134 \text{ в.о.}; \quad I_{\text{гм2}} = ^*I_{\text{гм2}} \cdot \frac{S_{\text{R}}}{U_{\text{R}}} = 2,23 \text{ кА}.$$

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

$$^*I_{\text{к}} = ^*I_{\text{к(T1,T2)}} + ^*I_{\text{гм1}} + ^*I_{\text{гм2}} = (0,8884 + 0,1524 + 0,134) \text{ в.о.} = 1,1748 \text{ в.о.};$$

$$I_{\text{к}} = ^*I_{\text{к}} \cdot \frac{S_{\text{R}}}{U_{\text{R}}} = 1,1748 \text{ в.о.} \cdot \frac{100 \text{ МВА}}{6 \text{ кВ}} = 19,58 \text{ кА}.$$

Результати цього обчислення у відносних одиницях дорівнюють результатам в 4.2.

Примітка. Якщо в цьому випадку не враховується коригувальний коефіцієнт $K_{\text{т}}$ ($K_{\text{т}} = 1,0$), то результат буде таким, що дорівнює $I_{\text{к}}(T1, T2) = 14,35 \text{ кА} = 0,97 \cdot 14,81 \text{ кА}$.

Якщо обчислюють без $^*t_{\text{r}}$ ($^*t_{\text{r}} = 1,0$), але з $K_{\text{т}} = 0,959$, то результат дорівнює $I_{\text{к}}(T1, T2) = 16,33 \text{ кА} = 1,10 \cdot 14,81 \text{ кА}$. Якщо не використовують ні $K_{\text{т}}$, ні X то результат дорівнює $I_{\text{к}}(T1, T2) = 15,83 \text{ кА} = 1,07 \cdot 14,81 \text{ кА}$.

4.5 Обчислювання методом накладання

Головну процедуру визначання струмів короткого замикання і часткових струмів короткого замикання методом накладання описано в IEC 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 $r_{\text{т}} = \pm 18 \%$; $u_{\text{к+}} = 16,5 \%$ для $+r_{\text{т}}$ і $u_{\text{к-}} = 14,0 \%$ для $-r_{\text{т}}$.

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

$I^{\text{b}} = (0—2,75) \text{ кА}$ з $\cos \varphi^{\text{b}} = 0,8$ або $\cos \varphi^{\text{b}} = 0,9$, визначений на основі рівняння $S^{\text{b}} = 73 \text{ МВА}$.

в) Робочі напруги до короткого замикання:

$U^{\text{b}} = (6—6,6) \text{ кВ}$; $U_{\text{н}} = 6 \text{ кВ}$; $U_{\text{м}} = 7,2 \text{ кВ}$ (IEC 60038);

$U^{\text{b}} = (30—36) \text{ кВ}$; $U_{\text{н}} = 33 \text{ кВ}$; $U_{\text{м}} = 36 \text{ кВ}$ (IEC 60038).

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

$$I_{\text{к(T1,T2)S}}^{\text{b}} = I_{\text{к(T1,T2)}}^{\text{b}} + I_{\text{к(T1,T2)U}}^{\text{b}} = I_{\text{к(T1,T2)}}^{\text{b}} + \frac{U^{\text{b}}}{\sqrt{3} \left[0,5 Z_{\text{T}}(t) + \frac{1}{t^2} (Z_{\text{Q}} + 0,5 Z_{\text{L}}) \right]}. \quad (1)$$

Повний опір $Z_{\text{T}}(f) = Z_{\text{T}}(f) = Z_{\text{н}}(f)$ трансформаторів (без коригувального коефіцієнта) залежить від фактичного коефіцієнта трансформації $t(u_{\text{к+}} > u_{\text{к-}}(t) > u_{\text{к-}})$.

Відношення між напругами і U_{bQ} і U_{b} в останній точці короткого замикання визначають рівнянням:

$$U_{\text{Q}}^{\text{b}} = t \left[U^{\text{b}} + \sqrt{3} I^{\text{b}} (0,5 Z_{\text{T}}(t) + \frac{1}{t^2} 0,5 Z_{\text{L}}) \right]. \quad (2)$$

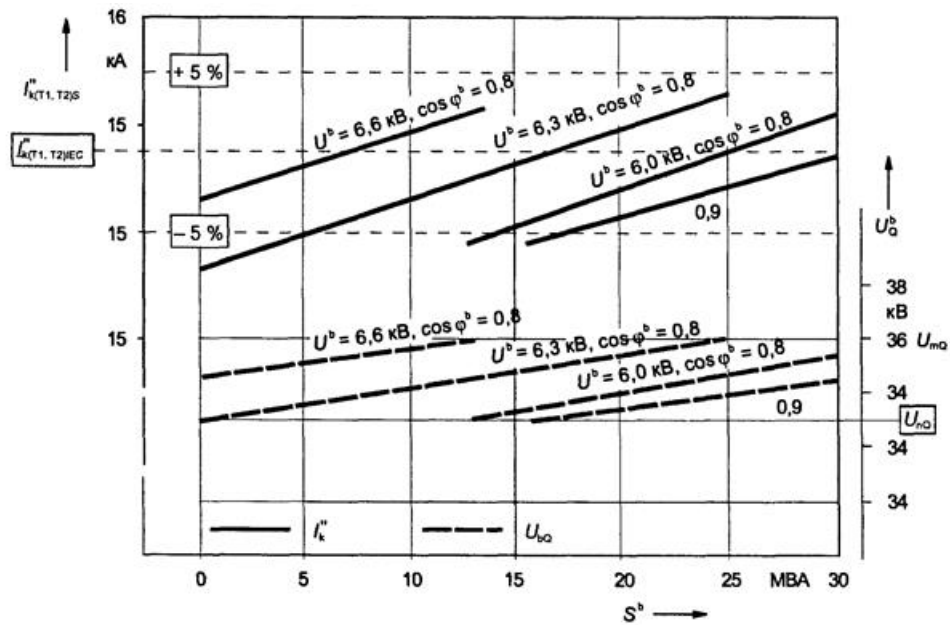
На рисунку 10 в першому випадку зображені результати рівнянь (1) і (2), якщо перемикач відгалужень перебуває в нульовому положенні ($t=t_{\text{r}} = 33 \text{ кВ}/6,3 \text{ кВ} = 5,238$ і $u_{\text{к}}(f) = u_{\text{кр}} = 15 \%$; $u_{\text{Р}} = 0,6 \%$), залежно від параметрів S^{b} ($\cos \varphi^{\text{b}} = 0,8$) і напруги U^{b} . Крім того, вплив $\cos \varphi^{\text{b}}$ зазначений для прикладу $U^{\text{b}} = 6,0 \text{ кВ}$. Очікується, що напруга U_{Q} має значення в межах 33 кВ (U_{nQ}) і 36 кВ (U_{mQ}).

На рисунку 11 зображено результати сили струму короткого замикання $I_{\text{кS}}$, визначені методом накладання в точці короткого замикання F (рисунок 9), якщо увімкнені двигуни (M1 і M2) і перемикачі відгалужень під навантагою мають різні положення. Крім того, в нижній частині рисунка графічно представлено $u_{\text{к}}(t)$. У короткому замиканні сила струму до короткого замикання дорівнює нулю, тому сумарну силу струму короткого замикання в точці короткого замикання визначають таким чином:

$$I_{\text{кS}}^{\text{b}} = I_{\text{к(T1,T2)U}}^{\text{b}} + I_{\text{к(M1,M2)U}}^{\text{b}} \quad (3)$$

$$I_{\text{к(M1,M2)U}}^{\text{b}} = \frac{U^{\text{b}}}{\sqrt{3} \frac{Z_{\text{M1}} Z_{\text{M2}}}{Z_{\text{M1}} + Z_{\text{M2}}}} \quad (4)$$

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



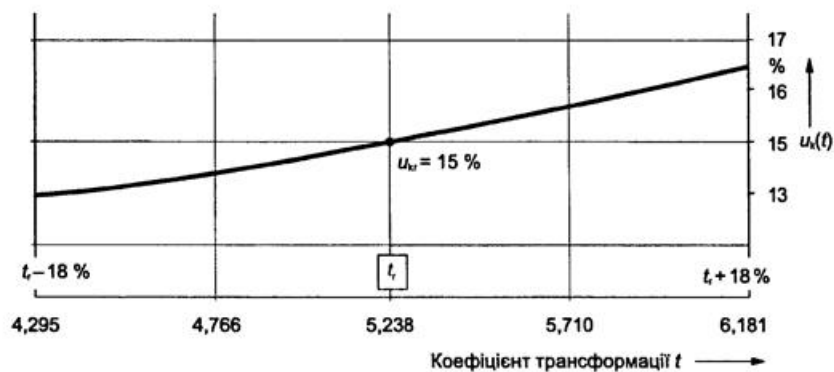
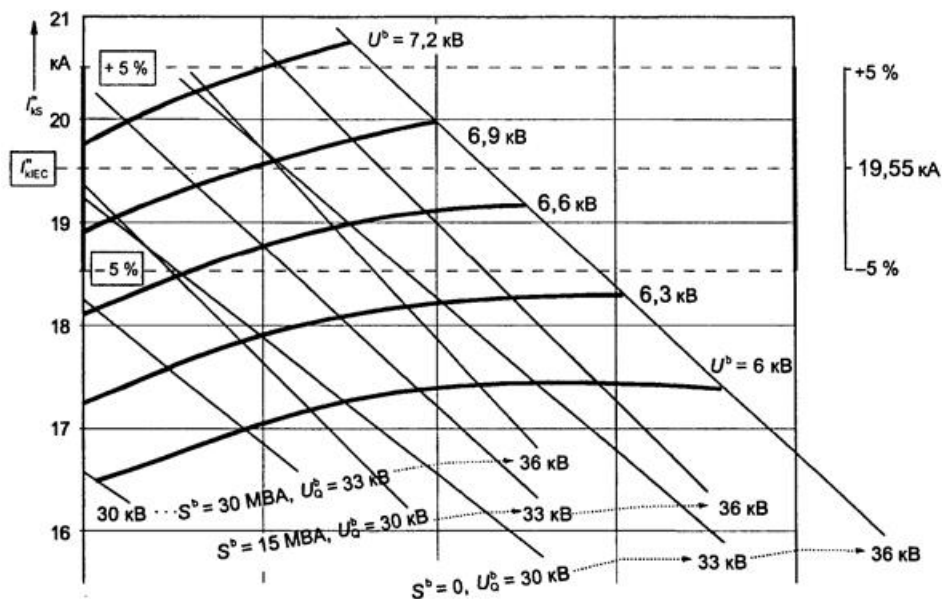
IEC 968/2000

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 IEC 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: $S^b = 0$, $S^b = 15$ MBA і $S^b = 30$ MBA за $\cos \phi^b = 0.8$ в діапазоні напруги від $U^b = 30$ кВ до $U^b = 36$ кВ U^b_{mQ} .

На рисунку 11 ділянка можливих струмів короткого замикання особливо обмежує максимальну напругу $U^b_Q = U^b_{mQ}$.



IEC 969/2000

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 IEC 60909-0.

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

Під час обчислювання сили струму короткого замикання в F2—F5 потрібно враховувати вплив асинхронних двигунів середньої та низької напруги (див. 3.8 з IEC 60909-0). Групи двигунів низької напруги, з'єднані з шинами D і E, розглядають як еквівалентні двигуни (див. 3.8.2 з IEC 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 IEC 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 $\Sigma S_{rMB} = 40$ МВА і на шині С приблизно $\Sigma S_{rMC} = 30$ МВА. На відміну від цих номінальних повних потужностей, максимальна допоміжна навантага під час роботи енергоблока станції приблизно досягає 25 МВА — $S_{ГАТА} = 0,1 \cdot S_{TG}$ в енергетичній станції, ідо 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''_{kF4} . Отже, результати струмів короткого замикання в F4 приблизно ідентичні, якщо двигуни M8—M14 і групи двигунів M21—M26 не працюють.

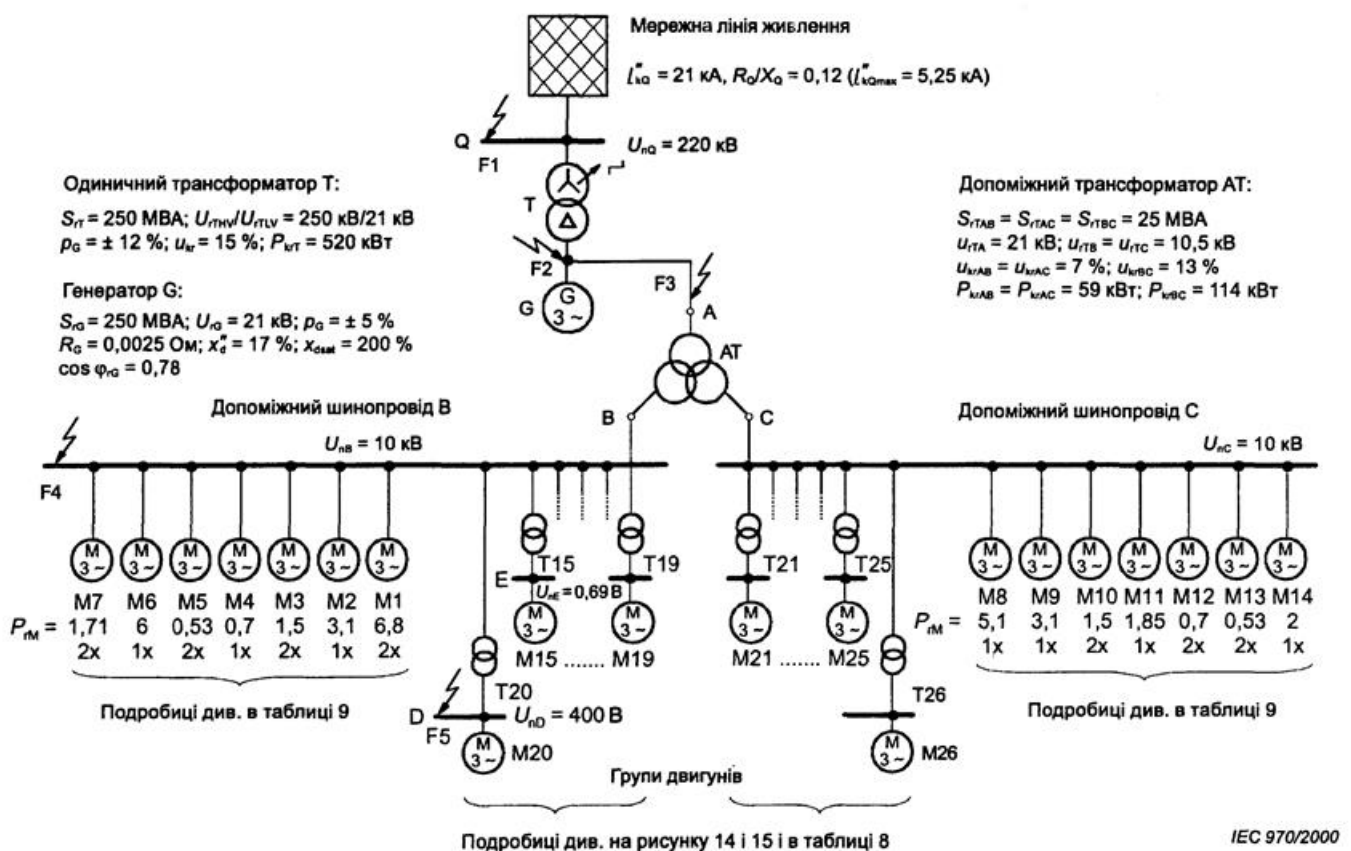


Рисунок 12 — Дані для енергоблока станції (генератор і одиначний трансформатор з перемикачем відгалужень під навантагою) і допоміжна мережа з асинхронними двигунами середньої і низької напруги

5.2 Повні опори короткого замикання електроустановки

5.2.1 Мережна лінія живлення

Згідно з 3.2 і рівняннями (4) і (5) IEC 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 IEC 60909-0).

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

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

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

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

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

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

5.2.2 Енергоблок станції

5.2.2.1 Генератор:

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

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

Під час обчислювання k та i_g використовують уявний опір R_{Gf} (3.6.1 IEC 60909-0):

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

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

5.2.2.2 Одиначний трансформатор

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{Згідно з 3.7.1 IEC 60909-0 і } U_G = U_{rG}; K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_G^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \phi_{rG}};$$

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

$$\underline{Z}_S = K_S (f_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV});$$

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

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) IEC 60909-0:

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

$$\text{з } U_{RAB} = \frac{P_{kTAB}}{S_{rTAB}} \cdot 100 \% \text{ і } U_{XAB} = \sqrt{U_{kTAB}^2 - U_{RAB}^2} \quad (\text{рівняння (10d) IEC 60909-0});$$

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

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

Коригувальні коефіцієнти повного опору K_T можна визначити за рівнянням (13) IEC 60909-0 з $X_{TAB} = X_{TAC} = 0,07$ і $x_{TBC} = 0,1299$:

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

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

Скориговані Z_{ABK} і Z_{BCK} призводять до скоригованих повних опорів Z_{AK} . Z_{BK} і Z_{CK} (рівняння (11) IEC 60909-0) принципової

еквівалентної схеми, поданої на рисунку 7Ь IEC 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 $S_{rT} = 2,5 \text{ МВА}$, $U_{rTHW}/U_{rTLV} = 10 \text{ кВ}/0,73 \text{ кВ}$ (таблиця 8). Також наявні трансформатори (Т20) і (Т26) з $S_{rT} = 1,6 \text{ МВА}$, $U_{nm}/U_{rTLV} = 10 \text{ кВ}/0,42 \text{ кВ}$ (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 IEC 60909-0 і коригувальним коефіцієнтом K_r із рівняння (12а) IEC 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)

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

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

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

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

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

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

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

$$\underline{Z}_{T20HV} = \frac{u_{krT20}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT20HV}^2}{S_{rT20}} = \frac{6 \%}{100 \%} \cdot \frac{(10 \text{ кВ})^2}{1,6 \text{ МВА}} = 3,75 \text{ Ом};$$

$$R_{T20HV} = P_{krT20} \frac{U_{rT20HV}^2}{S_{rT20}^2} = 0,0165 \text{ МВт} \cdot \frac{(10 \text{ кВ})^2}{(1,6 \text{ МВА})^2} = 0,645 \text{ Ом}; (u_{Rr} = 1,03 \%);$$

$$\underline{Z}_{T20HV} = (0,645 + j3,694) \text{ Ом};$$

$$K_{T20HV} = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6X_{T20}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0591} = 1,009;$$

$$\underline{Z}_{T20HVK} = (0,651 + j3,728) \text{ Ом}.$$

На стороні низької напруги:

$$\underline{Z}_{T20LV} = \underline{Z}_{T20HV} \cdot \frac{1}{t_r^2} = (1,138 + j6,516) \text{ мОм}; (t_r = 10 \text{ кВ}/0,42 \text{ кВ});$$

$$K_{T20LV} = 0,95 \frac{C_{max}}{1 + 0,6X_{T20}} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0591} = 0,963;$$

$$\underline{Z}_{T20LVK} = (1,096 + j6,277) \text{ Ом}.$$

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, Т	МВА	2,5	12,5	1,6	14,1	Дані надає виробник
U_{rTHV}	кВ	10		10		
U_{rTLV}	кВ	0,73		0,42		
U_{kr}	%	6		6		
P_{krT}	кВт	23,5		16,5		
P_{rM}	МВт	0,9	4,5	1,0	5,5	Дані про групи двигунів
U_M	кВ	0,69		0,40		
$\cos\varphi_{rM}\eta_{rM}$	—	0,72		0,72		
I_{LR}/I_{rM}	—	5		5		
R_m/X_m	—	0,42		0,42		
k_{rM}	—	1,3		1,3		
S_{rM}	МВА	1,25	6,25	1,39	7,64	
R_{thvk}	Ом	0,379		0,651		Див. 5.2.4
X_{thvk}	Ом	2,392		3,728		
R_m	Ом	0,0295		0,0089		$R_m = 0,42X_m$
X_m	Ом	0,0702		0,0212		$X_M = 0,922 Z_M^{1)}$

	MBA	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
$I_{rM}, \Sigma I_{rM}$	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
PrM/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	—
Rm/Xm	—		0,1			0	15		—		0,1				0,15		—
K_M	—		1,75			-1,65			—		1,75				1,65		—
μ ($t_{min}=0,1c$) 2)	—					0,796			—					0,796			—
q ($t_{min}=0,1c$) 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_{pM}	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

1) $I''_{km}/I_{rM} = 4,4$ (див. 5.2.5); $I''_{km} = c(I_{LR}/I_{rM})I_m$
2) $\mu(0,1c) = 0,62 + 0,72e^{-0,0001L^*}$ (рівняння (70) IEC 60909-0).
3) $q(0,1c) = 0,57 + 0,12 \ln P_{rM}/p$ (рівняння (73) IEC 60909-0).

Відношення О/кз визначають так:

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

5.3.1.4 Сила струму сталого короткого замикання I_{kmax}

$$I_k = I_{kQ} + I_{kS} = I''_{kQ} + \lambda_{max} I_{rGt} = 21 \text{ кА} + 1,65 \cdot 0,601 \text{ кА} = 22 \text{ кА}.$$

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

5.3.2 Точка короткого замикання F2

Згідно з рисунком 13 і 4.2.1.3 IEC 60909-0 потрібно обчислювати обидві часткові сили струму короткого замикання I^{\wedge} (рівняння (35) IEC 60909-0) і I_{kT} (рівняння (37) IEC 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''_G і I''_{kT}

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

з рівнянням (36) IEC 60909-0:

$$K_{G,S} = \frac{c_{max}}{1 + X_d'' \sin \varphi_{rG}} = \frac{1,1}{1 + 0,17 \cdot 0,626} = 0,994$$

і Z_G згідно з 5.2.2

$$I''_{kT} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \left| Z_{TLV} + \frac{1}{t_T^2 Z_{Qmin}} \right|} = \frac{1,1 \cdot 21 \text{ кВ}}{\sqrt{3} |0,0057 + j0,285| \text{ Ом}} = 46,79 \text{ кА}$$

Загальний струм для вибору шин між генератором і одиничним трансформатором визначають додаванням I_{kT} і $I_{kMAГ}$, розрахованих у 5.3.3.

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

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

5.3.2.2 Максимальні сили струму короткого замикання I_{pG} та I_{pT}

$$I_{pG} = \kappa_G \sqrt{2} I''_{kG} = 1,86 \cdot \sqrt{2} \cdot 44,74 \text{ кА} = 117,69 \text{ кА}$$

з $R/X = R_G/X_d'' = 0,05$ і $\kappa_G = 1,86$ (рівняння (55) IEC 60909-0);

$$I_{pT} = \kappa_T \sqrt{2} I''_{kT} = 1,94 \cdot \sqrt{2} \cdot 46,79 \text{ кА} = 128,37 \text{ кА}$$

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

5.3.2.3 Сили струму вимкнення симетричного короткого замикання I_{bG} та I_{bT}

$$I_{bG} = \mu / I_{KG} = 0,71 \cdot 44,74 \text{ кА} = 31,77 \text{ кА}$$

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

$$\text{за } I_{KG}/I_{G} = 44,74 \text{ кА}/6,87 \text{ кА} = 6,51;$$

$$I_{bT} = I_{KT} \text{ (віддалене від генератора коротке замикання (рівняння (65) IEC 60909-0))}.$$

5.3.2.4 Сили струму сталого короткого замикання $I_{KG\max}$ та $I_{KT\max}$

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

$$\text{з } \lambda_{\max} = 1,75 \text{ з рисунка 18а IEC 60909-0 за } I_{KG}/I_{G} = 6,51;$$

$$I_{KT\max} = I_{KT} \text{ (віддалене від генератора коротке замикання (рівняння (84) IEC 60909-0))}.$$

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:

$$I_{pT} + I_{pMAT} = (128,37 + 15,09) \text{ кА} = 143,46 \text{ кА};$$

$$I_{bT} + I_{bMAT} = I_{KT} + I_{KM,AT} = 53,14 \text{ кА на консервативній стороні}.$$

5.3.3 Точка короткого замикання F3

5.3.3.1 Початкові сили струму короткого замикання I''_{krsi} 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 з I''_{krsi} з Z_{rsi} (рівняння (38) IEC 60909-0) і I''_{MAT} на стороні високої напруги допоміжного трансформатора.

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

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

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

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

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

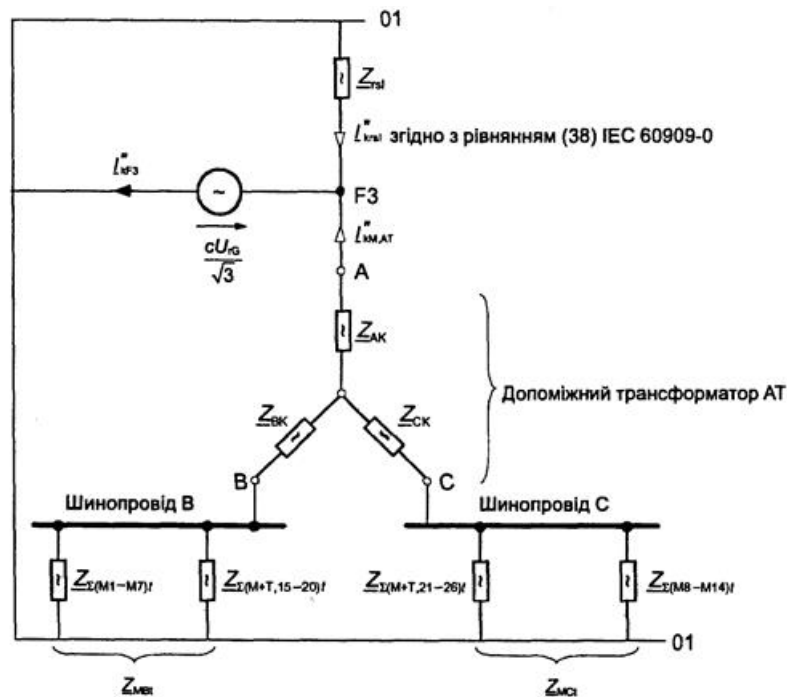


Рисунок 13 — Система прямої послідовності для обчислювання сили струму короткого замикання в точці F3 (див. рисунок 12)

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

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

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

Сума I''_{KG} і I''_{KT} з 5.3.2 призводить до I''_{KG} і $I''_{KT} = 44,74 \text{ кА} + 46,79 \text{ кА} = 91,53 \text{ кА}$, результат приблизно на 9,3 % вищий, ніж I''_{krsi} , визначений на основі рівняння (38) IEC 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''_{MAT} на рисунку 13 можна визначити на основі результатів таблиць 8 і 9 для двигунів низької і середньої напруги. Повні опори на рисунку 13:

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

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

$$\underline{Z}_{MB1} = (0,410 + j2,420) \text{ Ом (див. рисунок 13)}.$$

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

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

$$\underline{Z}_{MC1} = (0,626 + j3,260) \text{ Ом (див. рисунок 13)}.$$

Повні опори Z_{ak} , Z_{bk} і Z_{ck} стосуються сторони А, і їх розрахунок подано в 5.2.3. Для обчислення ІШ.АТ необхідний повний опір $Z_{m.at}$:

$$\underline{Z}_{M,AT}^* = \underline{Z}_{AK} + \frac{(\underline{Z}_{BK} + \underline{Z}_{MB1})(\underline{Z}_{CK} + \underline{Z}_{MC1})}{\underline{Z}_{BK} + \underline{Z}_{CK} + \underline{Z}_{MB1} + \underline{Z}_{MC1}} = (0,273 + j2,081) \text{ Ом};$$

$$I_{KM,AT}^* = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}\underline{Z}_{M,AT}} = \frac{1,1 \cdot 21 \text{ кВ}}{\sqrt{3}(0,273 + j2,081) \text{ Ом}} = (0,827 - j6,300) \text{ кА};$$

$$I_{KM,AT}^* = 6,35 \text{ кА}.$$

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

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

$$I_{KF3}^* = I_{KFI}^* + I_{KM,AT}^* = (1,96 - j90,03) \text{ кА}; \quad I_{KF3}^* = 90,05 \text{ кА}.$$

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_{pre} та $I_{pM,AT}$

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

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

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

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

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

Примітка. Обчислення за методом 20 Гц (4.3.1.2 с) IEC 60909-0), використовуючи Z_G і Z_{Σ} із 2.5.5 і повний опір $Z^{\prime\prime}$ згідно з рівнянням (38) IEC 60909-0 дає такий результат:

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

$$I_{\text{нл}} = K_{\text{нл}} \sqrt{2} I_{\text{нл}}^{\prime\prime} = 1,91 \cdot \sqrt{2} \cdot 83,73 \text{ кА} = 226,2 \text{ кА}.$$

Максимальну силу струму короткого замикання $I_{\text{рм, АТ}}$ можна визначити за методом (b) (4.3.1.2b) IEC 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 IEC 60909-0):

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

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

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_{∞} залежить від $I_{\text{КТ}} = I^{\prime\prime}$:

$$I_{\text{KF3}} = I_{\text{KG}} + I_{\text{КТ}} + I_{\text{км, АТ}} = \lambda_{\text{max}} I_{\text{rG}} + I_{\text{КТ}}^{\prime\prime} = 12 \text{ кА} + 46,79 \text{ кА} = 58,8 \text{ кА}$$

з I_{KG} і $I_{\text{КТ}}^{\prime\prime}$ з 5.3.2 і $I_{\text{км, АТ}} \rightarrow 0$.

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 IEC 60909-0):

$$I_{\text{KF4}}^{\prime\prime} = I_{\text{кАТ}}^{\prime\prime} + I_{\text{к(1-7)}}^{\prime\prime} + I_{\text{к(15-20)}}^{\prime\prime}.$$

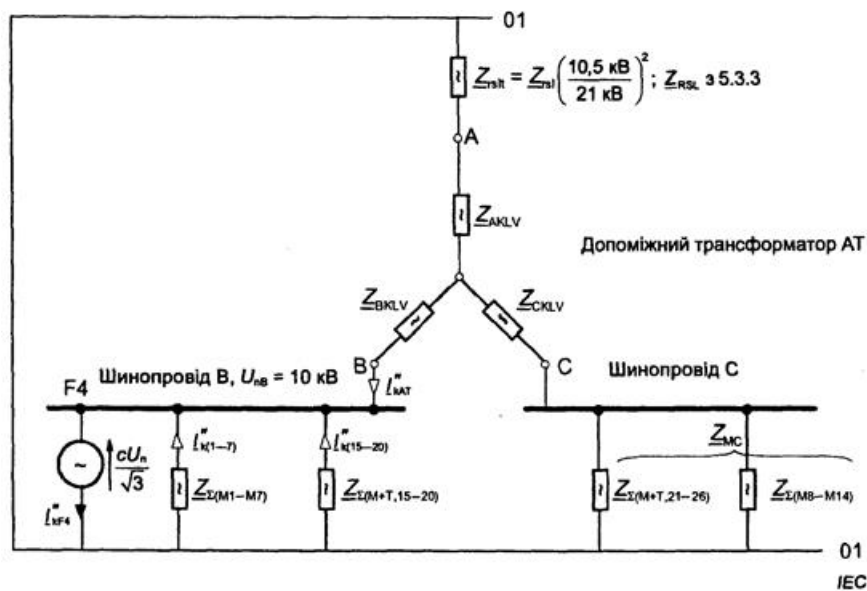


Рисунок 14 — Система проєкції послідовності для обчислення сили струму короткого замикання в точці F4 (див. рисунок 12)

Повні опори стосуються вторинної сторони В допоміжного трансформатора АТ.

$$Z_{\text{кАТ}} = Z_{\text{BKLV}} + \frac{(Z_{\text{AKLV}} + Z_{\text{RH}})(Z_{\text{CKLV}} + Z_{\text{MC}})}{Z_{\text{AKLV}} + Z_{\text{RH}} + Z_{\text{CKLV}} + Z_{\text{MC}}};$$

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

$$Z_{KAT} = 0,3451 \text{ Ом}$$

з $Z_{AKLV} = Z_{AK}/t_r^2$; $Z_{BKLV} = Z_{CKLV} = Z_{BK}/t_r^2$; $Z_{AK}Z_{BK}$ з 5.2.3, $Z_{MC} = Z_{MC}/t_r^2$; Z_{MCI} з 5.3.3, Z_{LBI} з 5.3.3 (див. рисунок 13);

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

з таблиці 8 і 9:

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

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

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

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

$$Z_{KAT} = Z_{BKLV} + Z_{AKLV} + Z_{LBI} = (0,011 + j0,349) \text{ Ом};$$

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

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

Вплив двигунів, що живляться від шини С, на струм I_{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 Б) IEC 60909-0) без коефіцієнта 1,15, бо $R/X < 0,3$ на відгалуженнях відносно I_{KAT}'' і для асинхронних двигунів середньої напруги:

$$I_{pF4} = K_{AT} \sqrt{2} I_{KAT}'' + K_{(1-7)} \sqrt{2} I_{K(1-7)}'' + K_{(15-20)} \sqrt{2} I_{K(15-20)}'';$$

$$I_{pF4} = 1,91 \cdot \sqrt{2} \cdot 18,40 \text{ кА} + 1,72 \cdot \sqrt{2} \cdot 8,12 \text{ кА} + 1,34 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,29 \text{ кА} = 73,79 \text{ кА.}$$

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

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

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

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

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

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

$$I_{KF5}'' = I_{KT20}'' + I_{KM20}''.$$

Для обчислення часткової сили струму короткого замикання I_{KT20}'' використовують наведені нижче повні опори (див. рисунок 15):

$$Z_{KAT1} = Z_{KAT} \frac{1}{t_{T20}^2} = (0,0115 + j0,3449) \text{ Ом} \left(\frac{0,42 \text{ кВ}}{10 \text{ кВ}} \right)^2 = (0,0203 + j0,6084) \text{ мОм.}$$

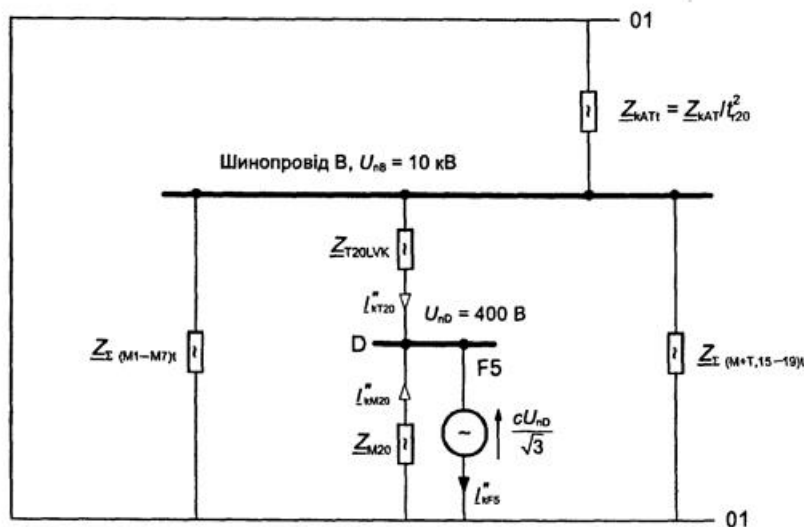


Рисунок 15 — Система прямої послідовності для обчислювання сили струму короткого замикання в точці F5 (див. рисунок 12). Повні опори стосуються сторони низької напруги трансформатора T20 ($t_{T20} = 10 \text{ кВ}/0,42 \text{ кВ}$)

$$\underline{Z}_{\Sigma(M1-M7)t} = \underline{Z}_{\Sigma(M1-M7)} \frac{1}{t_{T20}^2} = (0,089 + j0,777) \text{ Ом} \left(\frac{0,42 \text{ кВ}}{10 \text{ кВ}} \right)^2 = (0,157 + j1,3706) \text{ мОм};$$

$$\underline{Z}_{\Sigma(M+T,15-19)t} = \underline{Z}_{\Sigma(M+T,15-19)} \frac{1}{t_{T20}^2} = (1,183 + j3,114) \text{ Ом} \left(\frac{0,42 \text{ кВ}}{10 \text{ кВ}} \right)^2 = (2,087 + j5,493) \text{ мОм}.$$

Повний опір Z_{kat} 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 Т20 наведено в 5.2.4 щодо сторони низької напруги:

$$\underline{Z}_{T20LVK} = (1,096 + j6,277) \text{ мОм з } K_T = 0,963 (c_{max} = 1,05);$$

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

Повний опір Z_{KT20} визначають на основі Z_{T20LVK} враховуючи три паралельні повні опори Z_{kat1} .

$$\underline{Z}_{\Sigma(M1-M7)t} \text{ і } \underline{Z}_{\Sigma(M+T,15-19)t}$$

Повний опір Z_{m20} наведено в таблиці 8.

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

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

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 IEC 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 (d_M) = 1 згідно з рівнянням (75) IEC 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 $f_{m'n} = 0,02 \text{ с}$ з $D_{mгo} = 0,84 + 0,26e^{-0,26 \cdot 5,5}$ і $q_{M20} = 0,67$ за $pJp = 0,05 \text{ МВТ}$ для еквівалентного двигуна M20 (див. 3.8.2 IEC 60909-0).

Сила струму сталого короткого замикання:

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

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

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

6.1 Загальні положення

Наведена нижче перевірочна мережа з інформацією про електроустаткування та результатами струмів короткого замикання відповідно до IEC 60909-0 пропонує проектувальникам і користувачам цифрових програм можливість перевіряти результати, одержані від їх програм, 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 відхили, 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 IEC 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 5 із $c = c_{\max} = 1,1$ згідно з таблицею 1 IEC 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) IEC 60909-0), тому що наближення $X_Q = 0,995Z_Q$ використовують лише в особливому випадку, коли $R_Q/X_Q = 0,1$ (3.2 IEC 60909-0). Подібну процедуру використовують для асинхронних двигунів, якщо наведено відношення R_Q/X_Q (3.8.1 IEC 60909-0).

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

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

Для обчислення коригувального коефіцієнта повного опору K_S для енергоблока станції S1 припускають, що генератор працює лише в ділянці перезбудження (рисунок 7 IEC 60909-1).

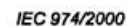
У разі отримання від'ємних значень реактивних опорів триобмоткових трансформаторів у системі прямої чи зворотної послідовності ці значення не повинні вважатися опорами ємностей, особливо у разі обчислення за методом еквівалентної частоти (4.3.1.2 с) IEC 60909-0). Знак мінус може з'явитися для еквівалентного реактивного опору (див. рисунок 7б IEC 60909-0) обмотки, розташованої між двома іншими обмотками у разі триобмоткового трансформатора (див. таблицю 3В IEC 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_m у цій формі (IEC 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 шинами від 1 до 8 і електроустаткуванням. 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 T4, енергоблок станції S1 (G1 + T1) і лінія живлення Q2.



Реактори

R1: $X_{R1} = 22 \text{ Ом}; P_{R1} \ll X_{R1}$ (реактор, що обмежує струм короткого замикання).
R6: Дугогасильна котушка для мережі 10 кВ із уземленням через дугогасний реактор.
Мінімальний час затримки
 $f_{\min} = 0,1 \text{ с}$, для обчислення α і q .

Таблиця 10 — Повітряні лінії передавання та кабелі

№	/	$Z_{(1)}=Z'$	$Z'_{(0)}$	Примітки
	км	Ом/км	Ом/км	
L1	20	0,12 + j 0,39	0,32+j 1,26	На одну схему подвійної лінії
L2	10	0,12 + j 0,39	0,32 + j 1,26	
L3(a)	5	0,12 + j0,39	0,52+j 1,86	
L3(b)	5	0,12 + j 0,39	0,52+j 1,86	
L4	10	0,096+j 0,388	0,22 + j 1,10	
L5	15	0,12+j0,386	0,22 + j 1,10	
L6	1	0,082+j 0,086	—	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 IEC 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 три- обмоткових трансформаторів Т3 = Т4 обчислюють згідно з прикладом 2.2.

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

Усталювання	Система прямої послідовності Z . Ом	Система нульової послідовності $Z_{(0)}$. Ом	Примітки
Q1 Q1t Q2	$Z_{Q1}=0,631933+ j 6,319335$ $Z_{Q1t}=0,056874 + j0,568740$ $Z_{Q2}=0,434454 + j 4,344543$	— — $Z_{(0)Q2}=2,867398 + i 14,336991$	
T3 = Т4 T5 = Т6	$Z_{T3AMV}=0,045714 + j8,096989^1)$ $Z_{T38MV}=0,053563 -j0,079062^1)$ $Z_{T3CMV}=0,408568 + j20.292035^1)$ $Z_{T5MV}=2,046454 + j49,072241$	$Z_{(0)T4MV}=0,107281 + j18,195035^3)$ —	$K_{TAB}=0.928072^2)$ $K_{TAC}=0.985856^2)$ $K_{TBC}=1,002890^2)$ $K_T=0,974870$
S1 S2	$Z_{S1}=0,498795 + j26,336676$ $Z_{S2}=1,203944 + j35,340713$	$Z_{(0)T1}=0,439059 + i 13.340874^4)$ —	$K_S=0,995975$ $K_S=0,876832$
G3 G3t	$Z_{G3}=0,017790+j1,089623$ $Z_{G3t}=2,133964 + j130,705301$	— —	$K_G=0,988320$
M1 M1t M2(2) M2t(2)	$Z_{M1}=0,341497+i 3,414968$ $Z_{M1t}=40,964124 + i409,641243^5)$ $Z_{M2}=0,412134+i4,121368$ $Z_{M2t}=49,437719 + i 494,377190^5)$	— — — —	Два паралельні двигуни 2 МВт
L1 L2 L3 (DL) L4 L5 L6 L6t	$Z_{L1}=2,4 + j7,8$ $Z_{L2}=1,2 + j3,9$ $Z_{L3}=0,3 + j0,975$ $Z_{L4}=0,96+i 3,88$ $Z_{L5}=1.8 + i 5,79$ $Z_{L5}=0,082 + j 0,086$ $Z_{L6t}=9,836281 + 10,316100$	$Z_{(0)L1}=6,4 + j25,2$ $Z_{(0)L2}=3,2+ j12,6$ $Z_{(0)L3}=1,3 + j14,65$ $Z_{(0)L4}=2,2 + j11,0$ $Z_{(0)L5}=3,3 + j16,5$ — —	Подвійна лінія Кабель
R1	—	$Z_{(0)R1}=0,0 + j 66,0$	$Z_{(0)R1}=3Z_{R1}$
¹⁾ Еквівалентні повні опори стосуються сторони середньої напруги (індекс MV) і скориговані (рисунок 7 IEC 60909-0). ²⁾ Обчислення коригувальних коефіцієнтів, див. 2.2 (3.3.3 IEC 60909-0). ³⁾ Скориговано, використовуючи K_{TBC} , див. 2.2 (3.3.3 IEC 60909-0). ⁴⁾ Скориговано, використовуючи $K_S = 0,995975$. ⁵⁾ Z_{M1} паралельно Z_{M2} (22,401898 + j 224,018979) Ом. Результати подано з шістьма знаками після коми. Останню цифру заокруглено.			

6.3 Результат

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 аналогічні результатам у таблицях 12 і 13; для I_p результати залежать від методу, використовуваного для визначення коефіцієнта k . Якщо є відхили, 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 $I''_{k'}$, 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 $I''_{k'}$, I_p , I_b і I_k

F	U _n , кВ	I''_{k1} , кА	$I_p(50)^2$, кА	$I_p(20)^3$, кА	$I_b^{(4)}$, кА	$I_k^{(6)}$, кА
①	380	40,6447	100,5766	100,5677	40,645 ^{в>}	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 ^{в)}	13,573

1) $C = C_{\max} = 1,1$.
2) $k = f(R/X_k)$ без коефіцієнта 1,15 (див. 4.3.1.2 б) 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 $R/X \approx 0,3$. 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.
3) k розраховують за методом 20 Гц (4.3.1.2 с) ІЕС 60909-0).
4) I_b розраховують за рівнянням (75) ІЕС 60909-0, $t_{\min} = 0,1$ с.
5) $I_k = I_w$ (4.6.3 ІЕС 60909-0).
6) Віддалене від генератора і двигуна коротке замикання $I_b = I''_b$ (4.5.1 ІЕС 60909-0).
7) Віддалене від двигуна коротке замикання $\mu_{Mj} = 1 + 1 - \mu_{Mj}q_{Mj} = 0$ (4.5.2.3 ГЕС 60909-0).

6.3.2 Струми короткого змикання фаза—земля

У таблиці 13 вказано сили струму короткого замикання I''_{k1} та I_{p1} для струмів короткого замикання фаза—земля на шинах від 2 до 5. Максимальна сила струму короткого замикання I_p з $k_{(1)}$ розраховують з використанням $k_{(1)}$, знайденого на основі повних опорів прямої послідовності в точках короткого замикання F за використання методу розраховування частоти 20 Гц. Максимальну силу струму короткого замикання I_p з $\%$ («) визначають з використанням $K(012) = (R(0) + R(1) + R(2))/(X(0) + X(1) + X(2))$ у точках короткого замикання, використовуючи частоту 20 Гц.

Таблиця 13 — Результати обчислень I''_{k1} та I_{p1}

F	a, кВ	I''_{k1} , кА	I_{p1} , кА	I''_{k1} , кА	I_{p1} , кА
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

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

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

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

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