

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електротехнологій і електропостачання

**Електропостачання агропромислового комплексу:
методичні рекомендації до виконання самостійної
роботи для студентів спеціальностей
7.10010101, 8.10010101**

„Енергетика аграрного виробництва”

**Миколаїв
2015**

УДК 621.31
ББК 40.76
Е 50

Рекомендовано науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету МНАУ, протокол № 3 від “29” листопада 2015 р.

Укладач:

К. В. Дубовенко - д-р техн. наук., доцент, завідувач кафедри електротехнологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету

Рецензенти:

В. М. Рябенський – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електронних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

О. С. Кириченко – канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету.

Зміст

Вступ.....	4
1. Величини струму однофазного КЗ за умовами комутації захисного апарату.....	5
2. Визначення величини однофазного струму короткого замикання.....	5
3. Розрахункові опори трансформаторів.....	7
4. Розрахункові опори проводів і кабелів.....	9
5. Розрахункові опори шинопроводів.....	19
6. Розрахункові опори сталевих провідників.....	22
7. Активні опори перехідних контактів.....	32
8. Визначення меж дії захисту від однофазних коротких замикань в мережі асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором.....	36
9. Приклади розрахунку струмів однофазного КЗ.....	42
Список рекомендованої літератури.....	54

Вступ

Для створення умов безпеки обслуговування електроустановок [1], підвищення надійності роботи пристроїв захисту при замиканні однієї з фаз на корпус або землю Правила улаштування електроустановок ([2], 1.7.79, 7.3.139) висувають певні вимоги до кратності струму однофазного короткого замикання (КЗ) відносно уставок захисних апаратів.

При проектуванні електроустановок напругою до 1 кВ з глухозаземленою нейтраллю для визначення струму однофазного КЗ необхідно розрахувати опір електричного контуру фаза-нуль [3, 4].

Однак через різноманіття методів виконання електричних мереж напругою до 1 кВ, різних способів занулення, широкого діапазону потужностей електроустановок та ін. цей розрахунок для певного об'єкта є трудомістким, вимагає великої кількості довідкових матеріалів.

Мета цих методичних рекомендацій - надати студентам необхідні довідкові матеріали для розрахунку під час самостійної роботи, виконання курсового і дипломного проектування опору кола фаза-нуль в мережах напругою до 1 кВ з глухозаземленою нейтраллю з урахуванням накопиченого досвіду проектування, вимог ПУЕ, ДСТУ, матеріалів досліджень і нових розробок з урахуванням поновлення довідкових відомостей з електроустаткування.

В методичних рекомендаціях наведено відомості про характеристики різних типів апаратів, шинопроводів і т.д., які можуть бути використані під час проектування електричних систем агропромислового комплексу.

Користуючись таблицями граничних довжин ліній до електродвигунів різних потужностей, наведених в цих рекомендаціях, серед великої кількості електроприймачів проектованого об'єкта можна швидко визначити електроприймачі, для яких потрібна перевірка кратності струму однофазного КЗ по відношенню до уставки захисного апарату.

В рекомендаціях наведено приклади практичного розрахунку однофазного КЗ для різних способів занулення мереж.

«Керівні вказівки» [6] рекомендують для визначення струму однофазного КЗ використовувати методику, засновану на методі симетричних складових. Ця формула дозволяє з великим ступенем точності визначати струми КЗ при відомих опорах прямої, зворотної і нульової послідовності кола фаза-нуль. Однак використовувати точну формулу для розрахунку струмів однофазного КЗ при всій різноманітності варіантів електричних мереж неможливо, оскільки довідкові дані про опори прямої, зворотної і нульової послідовності відомі для обмеженої номенклатури кабельних виробів з алюмінієвими жилами і не охоплюють всіх можливих способів прокладки фазних і нульових захисних провідників в електроустановках. Тому в цих методичних рекомендаціях пропонується для практичних розрахунків застосовувати наближену формулу, яка наведена в [2].

За даними порівняння результатів розрахунків, отриманих за точною і наближеною формулами, при використанні наближеної формули похибка не виходить за межі похибки вихідних даних.

Використання цих рекомендацій при проектуванні дозволяє значно скоротити трудовитрати на виконання розрахунків кола фаза-нуль, спрощує завдання попередньої оцінки надійності захисту електроустановок від коротких замикань.

Методика розрахунків може бути використана для створення пакету прикладних програм автоматизованого проектування електричних систем із застосуванням ЕОМ.

1 Величини струму однофазного КЗ за умовами комутації захисного апарату

В табл. 1 наведено значення кратності струму однофазного КЗ по відношенню до номінального струму плавких вставок запобіжників і установкам автоматичних вимикачів (на підставі вимог 1.1.79, 7.3.139 ПУЕ).

Позначення, наведені в табл.1, є такими:

$I_{o\text{ КЗ}}$ – мінімальне значення струму однофазного КЗ, що нормується ПУЕ, А;

I_H – номінальний струм плавкої вставки запобіжника або номінальний струм розчеплювача автомата із зворотнозалежною від струму характеристикою, А;

I_M – уставка на струм миттєвої комутації розчеплювача, А.

Коефіцієнти 1,43 і 1,27 підраховані шляхом множення коефіцієнта запасу 1,1 на коефіцієнт, що враховує виробничий допуск (за заводськими даними 1,3 для автоматів з характеристиками подібними до А3110 і 1,15 для автоматів типу А3120, А3130, А3140). Завдання проектувальника - при виборі нульових захисних провідників виконати наступні вимоги:

а) повна провідність кола фаза-нуль має бути такою, щоб значення струму однофазного КЗ на аварійній ділянці було не менше зазначеного в табл. 1;

б) в будь-якій точці кола від нейтралі трансформатора до електроприймача повна провідність нульових захисних провідників повинна бути не менше 50% провідності фазних провідників (зовнішній індуктивний опір під час розрахунку струму однофазного КЗ не враховується; для сталевих провідників провідність враховується при токах КЗ, наведених в табл. 1).

Для автоматичних вимикачів з комбінованим розчеплювачем достатньо забезпечити нормоване згідно ПУЕ значення струмів однофазного КЗ для одного з розчеплювачів (будь-якого).

2 Визначення величини однофазного струму короткого замикання

В даний час існує два методи визначення струму однофазного КЗ:

1) визначення струму однофазного КЗ за наближеною формулою [2]:

$$I_k = \frac{U_\phi}{\frac{Z_T}{3} + Z_\Sigma}, \quad (1)$$

де I_k – струм однофазного КЗ, А; U_ϕ – фазна напруга мережі, В; Z_T – повний опір трансформатора струму однофазного замикання на корпус, Ом; Z_Σ – повний опір фазний провід-нульовий провід, Ом.

Таблиця 1

Мінімальні значення струму однофазного КЗ, що нормуються ПУЕ

Захисний апарат	Елемент, що Викликає струм КЗ	Тип апарату	Вимоги ПУЕ	
			1.7.79	7.3.139
Плавкий запобіжник	Плавка вставка	Всі типи запобіжників	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 3 I_H$	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 4 I_H$
Автомат	Розчеплювач із зворотнотозалежною від струму характеристикою	АП50В, АК63, АЕ2000, АЕ2000М, А3100, А3700, ВА, Електрон	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 3 I_H$	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 6 I_H$
		А3110	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 1,43 I_M$	
	А3120, 3130, 3140	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 1,27 I_M$		
	Електромагнітний розчеплювач	АП50В, АК63, АЕ2000, АЕ2000М, ВА12, ВА16, ВА51-ВА53	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 1,2 I_M$	
		АВМ, ВА51, ВА52, ВА53, АЕ2000М, А3700, А4100, ВА62	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 1,25 I_M$	

Повний опір Z_Σ є геометричною суммою активних і індуктивних опорів окремих ділянок кола фаза-нуль від трансформатора до точки КЗ.

У загальному випадку повний опір всього контуру фаза-нуль (або окремої ділянки) визначається за формулою

$$Z_\Sigma = \sqrt{(r_\phi + r_n + r_a)^2 + (x_\phi'' + x_n'' + x')^2}, \quad (2)$$

де r_ϕ , r_n – активні опори фазного і нульового проводів, Ом; r_a – сумарний активний опір контактів кола фаза-нуль (зажими на вводах і виводах апаратів, контакти рознімів апаратів, контакт в місці КЗ), Ом; x_ϕ'' , x_n'' – внутрішні індуктивні опори фазного і нульового проводів, Ом; x' – зовнішній індуктивний опір кола фаза-нуль, Ом.

Якщо для якої-небудь ділянки відсутні значення r і x , а є тільки значення повного опору ділянки Z , допускається для знаходження Z_Σ підсумовувати арифметично повний опір даної ділянки з повним опором решти ділянок, знайдених за формулою (2).

Помилка буде в бік збільшення загального опору, тобто дасть запас з погляду гарантованої комутації захисного апарату.

2) Визначення струму однофазного КЗ за формулою, наведеною в [3]:

$$I_{\text{к}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{(2 \cdot r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2 \cdot x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \quad (3)$$

де $U_{\text{ср.н}}$ – середня номінальна напруга ступеня, в якому знаходиться точка КЗ, В;
 $r_{1\Sigma}, x_{1\Sigma}$ - відповідно сумарний активний і індуктивний опір прямої послідовності кола до точки КЗ, Ом; $r_{0\Sigma}, x_{0\Sigma}$ - відповідно сумарний активний і індуктивний опір нульової послідовності кола до точки КЗ, Ом.

Формули (1) і (3) засновані на методі симетричних складових, відомому з курсу теоретичних основ електротехніки (ТОЕ).

В [2] і [15] зроблений докладний аналіз складових формули (1), визначено межі припустимого ступеня похибки при користуванні наближеною формулою.

З аналізу формули (3) стає ясно, що вона передбачає визначення максимальних значень струмів КЗ, які можуть бути необхідні для перевірки апаратів за однофазною комутаційною здатністю (див. 1.4.5.3 ПУЕ).

В методичних рекомендаціях вирішується завдання визначення мінімальних значень струмів однофазного КЗ в мережах з глухозаземленою нейтраллю для забезпечення нормованих коефіцієнтів чутливості захисту (надійності комутації захисної апаратури).

Таким чином, із урахуванням викладеного та з допуском похибки (в середньому 10%, беручи до уваги також неточність вихідних даних), в практичних розрахунках величини струму однофазного КЗ рекомендується користуватися наближеною формулою (1).

Зазначена в знаменнику (1) арифметична сума опорів дає збільшене значення загального опору кола фаза-нуль і, відповідно, менше значення струму однофазного КЗ.

Негативна (в бік запасу) похибка при користуванні наближеною формулою (1), коли переважає активне навантаження (для занулення використовується 4-я жила або алюмінієва оболонка кабелю) при схемі з'єднання трансформатора Y/Y0, може досягти 18...20%. Похибка в 10...12%, також в бік запасу, виходить при використанні для занулення сталевих труб електропроводки. Похибка істотно зменшується при схемі з'єднання трансформаторів Δ/Y , Y/Δ .

3 Розрахункові опори трансформаторів

Методика розрахунку повного опору трансформатора при однофазному замиканні вторинної обмотки на нульовий провід наводиться в [2].

В табл. 2, 3, 4 наведено розрахункові значення опорів трансформаторів при вторинній напрузі 400/230 В. Для зручності користування в таблицях дані значення $Z_T/3$.

Таблиця 2

Розрахункові опори масляних трансформаторів за ДСТ 11920-73 і ДСТ 12022-76 при вторинній напрузі 400/230 В

Потужність трансформатора, кВ·А	Первинна напруга, кВ	$Z_T/3$, Ом	
		Схема з'єднання трансформатора	
		Y/Y ₀	Δ/Y , Y/ Y*
25	6...10	1,036	0,302
40	6...10	0,649	0,187
69	6...10	0,412	0,12
	20...35	0,379	0,139
100	6...10	0,259	0,0754
	20...35	0,288	0,109
160	6...10	0,162	0,047
	20...35	0,159	0,068
250	6...10	0,104	0,03
	20...35	0,102	0,0433
400	6...10	0,065	0,019
	20...35	0,063	-
630	6...10	0,043	0,014
	20...35	0,04	-
1000	6...10	0,027	0,009
	20...35	0,0256	0,0107
1600	6...10	0,018	0,0056
	20...35	0,017	0,0065
2500	6...10	-	0,0036

Таблиця 3

Розрахункові опори трансформаторів з негорючим заповненням згідно ДСТ 16555-75 для вторинної напруги 0,4 кВ

Потужність трансформатора, кВ·А	Первинна напруга, кВ	$Z_T/3$, Ом
		Схема з'єднання трансформатора Δ/Y_0
250	6...10	0,028
400	6...10	0,018
630	6...10	0,014
1000	6...10	0,0088

1600	6...10	0,006
2500	6...10	0,0038

Таблиця 4

Розрахункові опори сухих трансформаторів згідно ДСТ 14074-76
для вторинної напруги 400/230 В

Потужність трансформатора, кВ·А	Схема з'єднання	$Z_T/3$, Ом
160	Δ/Y_0	0,055
180	Y/Y_0	0,150
250	Δ/Y_0	0,035
320	Y/Y_0	0,084
400	Δ/Y_0	0,022
560	Y/Y_0	0,048
630	Δ/Y_0	0,014
750	Y/Y_0	0,036
1000	Δ/Y_0	0,009
1000	Y/Y_0	0,027
1600	Δ/Y_0	0,0056

4 Розрахункові опори проводів і кабелів

4.1 Розрахунковий опір проводів

Активний опір проводів r , Ом, визначається співвідношенням

$$r = c_v \cdot c_c \cdot c_{n3} \cdot \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (4)$$

де $c_v = 1 + 0,004(t^\circ - 20)$ – коефіцієнт, що враховує збільшення опору з підвищенням температури. Значення c_v для різних температур наведено в табл. 5;

$c_c = 1,02$ – коефіцієнт, що враховує опір багатопровідникових жил проводів і кабелів внаслідок скручування. Для шин і однопровідникових проводів $c_c = 1$;

c_{n3} – коефіцієнт поверхневого ефекта на змінному струмі. Для мідних і алюмінієвих проводів і кабелів $c_{n3} = 1$. Для мідних і алюмінієвих шин прямокутного перерізу значення c_{n3} наведено в табл. 6. Значення c_{n3} надано за величинами струмів, наведеним в табл. 1.3.31 ПУЕ для частоти 50 Гц. Значення коефіцієнта c_{n3} для пакетів шин для наближених розрахунків допустимо приймати як для поодинокі розташованих шин;

ρ – питомий опір при $t = 20$ °С:

для міді $\rho = 0,0178$ Ом·мм²/м – провода і шини;

для алюмінію $\rho = 0,0294$ Ом·мм²/м – провода і кабелі;

$\rho = 0,0325$ Ом·мм²/м – шини зі сплаву АД31Т1;

S – переріз провідника, мм²;

l – довжина провідника, м.

Опори підраховувалися для наступних температур:

- для проводів і кабелів з гумовою і пластмасовою ізоляцією +65 °С;

для шин +70 °С;

для кабелів з паперовою ізоляцією +80 °С.

Слід зазначити, що температура нульової жили може бути меншою, ніж фазної. Подібне припущення створює деякий запас при розрахунках.

Таблиця 5

Значення коефіцієнта c_v

Матеріал	Температура провідника, °С					
	30	40	50	60	70	80
Мідь і алюміній	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,24

Таблиця 6

Значення коефіцієнта $c_{nз}$ для окремо розташованих шин прямокутного перерізу в положенні «на ребро»

Розмір шин, мм	$c_{nз}$		Розмір шин, мм	$c_{nз}$	
	алюміній	мідь		алюміній	мідь
25x3	1,02	1,02	80x6	1,04	1,04
	1,03	1,00	80x8	1,05	1,03
	1,00	1,00	80x10	1,08	1,1
	1,02	1,014	100x6	1,04	1,07
	1,015	1,02	100x8	1,08	1,1
	1,014	1,01	100x10	1,1	1,14
	1,023	1,04	120x8	1,15	1,17
	1,03	1,04	120x10	1,23	1,24

В табл. 7, 8 наводяться значення активних опорів мідних, алюмінієвих і алюмомідних проводів. Внутрішній індуктивний опір X'' мідних і алюмінієвих проводів має незначну величину і в розрахунках ним зазвичай нехтують.

Зовнішній індуктивний опір X' проводів залежить від їх перетину і взаємного розташування.

Якщо фазний і нульовий провідники виконані з круглих проводів однакового перетину і прокладені паралельно, то зовнішній індуктивний опір контура фаза-нуль може бути підрахований за формулою:

$$X' = 0,29 \cdot \lg \frac{d}{r}, \quad (5)$$

де d – відстань між провідниками, м; r – радіус провідника, м.

Вираз (5) надає залежності індуктивного опору від відстані між відкрито прокладеними провідниками, що дозволяє визначити зовнішній індуктивний опір повітряних ліній і проводів, прокладених відкрито на ізоляторах.

В табл. 9 наведені значення зовнішнього індуктивного опору X' за межами кривих, при $d = 10$ і 20 м.

В тих випадках, коли нульовий і фазний провідники мають круглий перетин, теоретичний розрахунок зовнішнього індуктивного опору є складним завданням, оскільки на його величину впливають багато факторів (відстань між фазним і нульовим провідником, конфігурація, площа перетину провідників).

Для урахування зовнішнього опору як для круглих, так і для плоских нульових провідників, незалежно від їх матеріалу, рекомендується користуватися табл. 9. Причому, якщо нульовий провідник круглий, але відрізняється від фазного площею перетину, необхідно індуктивний опір приймати за значенням індуктивного опору провідника меншого перерізу.

Для плоскої форми нульового провідника опір визначається за перетином фазного провідника.

При близькому розташуванні фазного і нульового провідника (прокладання проводів у трубах) значенням X' можна знехтувати.

Таблиця 7

Активні опори мідних і алюмінієвих проводів
і кабелів з гумовою і полімерною ізоляцією, Ом/км

Переріз жили, мм ²	Алюміній	Мідь
1,0	-	21,8
1,2	-	18,9
1,5	-	14,5
2	18,4	10,94
2,5	14,75	8,73
3	12,3	7,23
4	9,2	5,47
5	7,38	4,37
6	6,15	3,64
8	4,6	2,74
10	3,68	2,17
16	2,3	1,37
25	1,47	0,873
35	1,05	0,625
50	0,74	0,436
70	0,527	0,313
95	0,338	0,23

120	0,308	0,181
150	0,246	0,146
185	0,2	0,122
240	0,153	0,09

Таблиця 8

Активні опори алюмомідних проводів з полімерною ізоляцією

Переріз жили, мм ²	Опір, Ом/км
1	32,5
1,5	21,7
2,5	13
4	8,13
6	5,42
10	3,25

Таблиця 9

Залежність індуктивного опору від відстані між провідниками

Переріз жили, мм ²	X' , Ом/км	
	$d = 10$ м	$d = 20$ м
4	1,16	1,24
6	1,12	1,21
10	1,06	1,15
16	1,03	1,12
25	1,05	1,1
35	0,975	1,06
50	0,95	1,05
70	0,94	1,02
95	0,92	1,1
120	0,9	1,0

4.2 Розрахунковий опір кабелів

Активний опір жил кабелів підраховується за формулою (4). В табл. 7 і 10 наведені значення активних опорів мідних і алюмінієвих жил кабелів для температур 65°C і 80°C.

Внутрішній індуктивний опір жил кабелів має незначну величину і в розрахунках зазвичай не враховується.

Зовнішній індуктивний опір. Якщо як нульовий провід захисного провідника використовується четверта жила або металева оболонка кабелю, то його зовнішній індуктивний опір є малим і при розрахунках не враховується. У цьому випадку враховується тільки активний опір.

В табл. 11 наведені значення опорів кола фаза-нуль 4-жильних кабелів у пластмасовій або гумовій оболонці з пластмасовою або гумовою ізоляцією, коли як нульовий провідник використовується четверта жила.

Активний опір кола є сумою активних опорів фазної і нульової жил кабелю при температурі 65°C.

В табл. 12 дані значення опорів 3-жильних кабелів з використанням як нульової жили алюмінієвої оболонки.

Повний опір кола є сумою активних опорів фази при температурі 80°C і алюмінієвої оболонки.

В табл. 13 наведені значення опорів 4-жильних кабелів (як нульовий провідник використовується як четверта жила, так і алюмінієва оболонка).

Активний опір кола є сумою активних опорів фазної і нульової жил кабелю. У вищезазначених таблицях значення опорів фазного і нульового провідників наведені окремо, що дає можливість визначити відповідність їх провідностей вимогам 1.7.79 ПУЕ (50% провідності нульового провідника по відношенню до фазного). Зовнішній активний опір кола не враховано через його мале значення. У випадках, коли як нульовий використовується окремо прокладений провідник, зовнішній індуктивний опір визначається згідно кривим рис. 2. Вимога 1.7.79 ПУЕ про 50% провідність нульового провідника задовольняється для всіх перетинів кабелів і розмірів смуг.

В табл. 14 наведені допустимі поєднання сталевих оболонок 3-жильних кабелів, при яких провідність сталевих смуг становить 50% провідності фазної жили. Відстань між кабелем і смугою складає 0,2...0,8 м.

В табл. 15 - 17 наведені значення повного розрахункового опору кола фаза-нуль при використанні як нульових провідників металокопункцій (обрамлення каналу 800x700 мм, двотаврової балки, кутової сталі) [7].

Під час виконання розрахунків струмів однофазних КЗ необхідно пам'ятати наступне:

- зовнішній індуктивний опір X слід враховувати, коли його величиною не можна знехтувати;

- у разі перевірки на 50% провідність нульового провідника по відношенню до фазного зовнішній індуктивний опір допустимо не враховувати, оскільки завдання розподілу окремо по фазному і нульовому провідникам для різних способів їх прокладання і з урахуванням різноманіття конструктивного виконання нульового провідника на різних ділянках кола фаза-нуль не підлягає загальному урахуванню.

Таблиця 10

Активні опори кабелів з паперовою ізоляцією

Переріз жили, мм ²	Активний опір жил, Ом/км	
	алюміній	мідь
1,0	-	23,8
1,5	-	15,3
2,5	15,5	9,13
4	9,6	5,75
6	6,46	3,83
10	3,87	2,25
16	2,42	1,44

25	1,55	0,913
35	1,11	0,657
50	0,775	0,487
70	0,555	0,322
95	0,408	0,242
120	0,324	0,131

Таблиця 11

Імпеданс (повний опір) кола фаза-нуль для 4-жильних кабелів
з полімерною оболонкою

Переріз жил кабе- ля, мм ²	Опір, Ом/км					
	Матеріал жили					
	Алюміній			Мідь		
	<i>r</i> фази	<i>r</i> нуля	<i>Z</i> кола	<i>r</i> фази	<i>r</i> нуля	<i>Z</i> кола
4x2,5	14,75	14,75	29,5	8,73	8,73	17,46
3x4+1x2,5	9,2	14,75	23,95	5,47	8,73	14,2
4x4	9,2	9,2	18,4	5,47	5,47	10,94
3x6+1x4	6,15	9,2	15,35	3,64	5,47	9,11
4x6	6,15	6,15	12,3	3,64	3,64	7,28
3x10+1x6	3,68	6,15	9,83	2,17	3,64	5,81
4x10	3,68	3,68	7,36	2,17	2,17	4,34
3x16+1x10	2,3	3,68	5,98	1,37	2,17	3,54
4x16	2,3	2,3	4,6	1,37	1,37	2,74
3x25+1x16	1,47	2,3	3,77	0,873	1,37	2,243
4x25	1,47	1,47	2,94	0,873	0,873	1,746
4x35+1x16	1,05	2,3	3,35	0,625	1,37	1,995
4x35	1,05	1,05	2,1	0,625	0,625	1,25
3x50+1x25	0,74	1,47	2,21	0,436	0,873	1,309
4x50	0,74	0,74	1,48	0,436	0,436	0,872
3x70+1x25	0,527	1,47	1,997	0,313	0,873	1,186
3x70+1x35	0,527	1,05	1,577	0,313	0,625	0,938
4x70	0,527	0,527	1,054	0,313	0,313	0,626
3x95+1x35	0,388	1,05	1,438	0,23	0,625	0,855
3x95+1x50	0,388	0,74	1,128	0,23	0,436	0,666
4x95	0,388	0,388	0,776	0,23	0,23	0,46
3x120+1x35	0,308	1,05	1,358	0,181	0,625	0,806
3x120+1x70	0,308	0,527	0,835	0,181	0,313	0,494

4x120	0,308	0,308	0,616	0,181	0,181	0,362
3x150+1x50	0,246	0,74	0,986	0,146	0,436	0,582
4x150	0,246	0,246	0,492	0,146	0,146	0,292
3x185+1x50	0,2	0,74	0,94	0,122	0,436	0,558
4x185	0,2	0,2	0,4	0,122	0,122	0,244
4x240	0,153	0,153	0,306	0,09	0,09	0,18

Таблиця 12

Розрахунковий імпеданс кола фаза-нуль для 3-жильних кабелів у разі використання алюмінієвої оболонки як нульового провідника

Переріз жил кабеля, мм ²	Опір, Ом/км					
	Матеріал жили					
	Алюміній			Мідь		
	<i>r</i> фази	<i>r</i> нуля	<i>Z</i> кола	<i>r</i> фази	<i>r</i> нуля	<i>Z</i> кола
3x6	6,46	1,045	7,505	3,83	0,985	4,815
3x10	3,87	1,038	4,708	2,28	0,876	3,156
3x16	2,42	0,775	3,195	1,44	0,748	2,188
3x25	1,55	0,691	2,241	0,918	0,679	1,597
3x35	1,11	0,616	1,727	0,697	0,610	1,287
3x50	0,775	0,498	1,273	0,458	0,492	0,950
3x70	0,555	0,410	0,965	0,325	0,405	0,734
3x95	0,408	0,321	0,729	0,242	0,357	0,699
3x120	0,324	0,328	0,652	0,919	0,325	0,516
3x150	0,258	0,268	0,526	0,164	0,264	0,413
3x185	0,210	0,241	0,451	0,124	0,239	0,363
3x240	0,160	0,215	0,375	0,095	0,212	0,307

Таблиця 13

Розрахунковий імпеданс кола фаза-нуль для 4-жильних кабелів з урахуванням провідності алюмінієвої оболонки

Переріз жил кабеля, мм ²	Опір, Ом/км					
	Матеріал жили					
	Алюміній			Мідь		
	<i>r</i> фази	<i>r</i> нуля + оболонки	<i>Z</i> кола	<i>r</i> фази	<i>r</i> нуля + оболонки	<i>Z</i> кола
3x6+1x4	6,46	0,867	7,327	3,83	0,762	4,592
3x10+1x6	3,87	0,738	4,608	2,28	0,665	2,945
3x16+1x10	2,42	0,564	2,984	1,44	0,489	1,929
3x25+1x16	1,55	0,477	2,027	0,918	0,412	1,33
3x35+1x16	1,11	0,405	1,515	0,657	0,357	1,014

3x50+1x25	0,775	0,320	1,095	0,458	0,275	0,733
3x70+1x25	0,555	0,282	0,837	0,329	0,247	0,576
3x95+1x35	0,408	0,253	0,661	0,242	0,217	0,459
3x120+1x35	0,324	0,237	0,561	0,191	0,202	0,393
3x150+1x35	0,258	0,193	0,451	0,154	0,166	0,320
3x185+1x50	0,210	0,18	0,39	0,124	0,155	0,279

Таблиця 14

Допустимі поєднання сталевих оболонки трижильних кабелів, при яких провідність сталевієї смуги становить 50% провідності фазної жили

Переріз фазної жили кабеля, мм ²	Струм однофазного КЗ, А							
	100	200	300	400	600	800	1500	3000
	Розмір смуги, мм							
6	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	-	-	-
10	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	-	-
16	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	-
25	40x4	40x4	40x4	40x4	40x4	40x4	25x3	-
35	60x4	40x4	40x4	40x4	40x4	40x4	40x4	-
50	80x4	80x4	60x4	60x4	60x4	60x4	40x4	40x4
70	-	-	-	80x4	60x4	60x4	60x4	60x4
95	-	-	-	-	80x4	80x4	80x4	80x4
120	-	-	-	-	80x4	80x4	80x4	80x4
150	-	-	-	-	-	80x4	80x4	80x4
185	-	-	-	-	-	80x4	80x4	80x4
240	-	-	-	-	-	-	-	80x4

Таблиця 15

Розрахунковий імпеданс контуру фаза трижильного кабеля з алюмінієвими жилами – обрамлення кабельного каналу з кутової сталі 50x50x5 мм

Переріз кабеля, мм ²	Опір, Ом/км							
	Струм однофазного КЗ, А							
	100	200	300	500	600	700	1000	2500
3x6	7,46	7,37	7,26	7,11	-	-	-	-
3x10	4,87	4,78	4,67	4,52	4,49	-	-	-
3x16	3,43	3,34	3,23	3,08	3,05	3,02	2,09	-
3x25	2,57	2,48	2,37	2,22	2,19	2,16	2,13	-
3x35	2,15	2,06	1,91	1,80	1,77	1,74	1,71	1,67
3x50	1,85	1,76	1,65	1,50	1,47	1,44	1,41	1,37

3x70	1,66	1,57	1,46	1,31	1,28	1,25	1,22	1,18
3x95	1,55	1,46	1,35	1,20	1,17	1,14	1,11	1,07
3x120	1,50	1,41	1,30	1,15	1,12	1,09	1,06	1,02
3x150	1,46	1,37	1,26	1,11	1,08	1,05	1,02	0,98
3x185	1,44	1,35	1,24	1,09	1,06	1,03	1,00	0,96
3x240	1,42	1,33	1,22	1,07	1,04	1,01	0,98	0,94

Таблиця 16

Розрахунковий імпеданс кола "фазна жила кабеля з алюмінієвими жилами
– металоконструкція зі спареної кутової сталі"

Переріз кабеля, мм ²	Відстань між кабелем і фермою, м	Опір, Ом/км					
		Розмір кутової сталі, мм					
		2(75x75x8)			2(100x100x3) 2(100x100x10)		
		Струм однофазного КЗ, А					
		100	500	1000, 2500	200	500	1000, 2500
3x6	0,2	7,06	6,9	-	6,9	6,81	-
	2	7,09	6,93	-	6,93	6,84	-
3x10	0,2	4,49	4,32	-	4,32	4,23	-
	2	4,54	4,37	-	4,37	4,28	-
3x16	0,2	2,95	2,89	-	2,88	2,79	-
	2	3,04	2,97	-	2,95	2,86	-
3x25	0,2	2,2	2,03	1,92	2,02	1,93	1,84
	2	2,31	2,13	2,03	2,12	2,03	1,94
3x35	0,2	1,78	1,6	1,5	1,6	1,51	1,42
	2	1,91	1,73	1,63	1,72	1,63	1,54
3x50	0,2	1,48	1,30	1,19	1,29	1,2	1,1
	2	1,63	1,45	1,35	1,44	1,35	1,26
3x70	0,2	1,28	1,1	0,99	1,09	1,00	0,9
	2	1,45	1,27	1,17	1,26	1,17	1,08
3x95	0,2	1,15	0,97	0,87	0,95	0,87	0,78
	2	1,34	1,17	1,06	1,15	1,06	0,98
3x120	0,2	1,07	0,9	0,79	0,89	0,79	0,7
	2	1,27	1,1	1,0	1,09	1,0	0,91
3x150	0,2	1,02	0,84	0,74	0,82	0,74	0,65
	2	1,22	1,05	0,96	1,04	0,95	0,87
3x185	0,2	0,98	0,8	0,7	0,79	0,7	0,61

	2	1,19	1,02	0,92	1,01	0,92	0,84
3x240	0,2	0,93	0,76	0,66	0,75	0,65	0,57
	2	1,15	0,98	0,89	0,97	0,89	0,81

Таблиця 17

Розрахунковий імпеданс кола фаза трижильного кабеля
з алюмінієвими жилами – двотаврова балка

Переріз кабеля, мм ²	Відстань між кабелем і фермою, м	Опір, Ом/км								
		Розмір балки, мм								
		120x75x5, 120x64x4,8			450x160x8,6			600x190x11,1		
		Струм однофазного КЗ, А								
		100	200, 300	600, 800	1200, 1500	300	400, 500	1000, 3000	400	700, 3000
3x6	1	6,91	7,17	-	-	6,7	-	-	6,62	-
	5	6,93	7,20	-	-	3,76	-	-	6,64	-
3x10	1	4,34	4,61	4,48	-	4,13	4,19	-	4,04	-
	5	4,39	4,66	4,52	-	4,16	4,22	-	4,07	-
3x16	1	2,92	3,20	3,06	-	2,69	2,75	-	2,59	2,67
	5	2,98	3,26	3,12	-	2,75	2,81	-	2,64	2,72
3x25	1	2,09	2,37	2,23	-	1,85	1,91	1,87	1,74	1,82
	5	2,17	2,46	2,32	-	1,93	1,99	1,95	1,81	1,89
3x35	1	1,68	1,97	1,82	-	1,43	1,49	1,45	1,32	1,41
	5	1,79	2,07	1,93	-	1,53	1,59	1,55	1,41	1,50
3x50	1	1,39	1,68	1,53	-	1,14	1,20	1,16	1,01	1,11
	5	1,52	1,80	1,66	-	1,26	1,32	1,28	1,12	1,23
3x70	1	1,21	1,49	1,35	1,21	0,95	1,01	0,97	0,82	0,92
	5	1,35	1,62	1,49	1,35	1,09	1,15	1,11	0,95	1,06
3x95	1	1,1	1,38	1,24	1,1	0,84	0,90	0,86	0,7	0,81
	5	1,25	1,52	1,38	1,25	0,99	1,05	1,01	0,85	0,95
3x120	1	1,03	1,31	1,17	1,03	0,77	0,83	0,79	0,64	0,74
	5	1,19	1,45	1,32	1,19	0,93	1,00	0,96	0,8	0,9
3x150	1	0,98	1,26	1,12	0,98	0,72	0,79	0,75	0,58	0,69
	5	1,14	1,41	1,28	1,14	0,89	0,96	0,92	0,75	0,86
3x185	1	0,94	1,22	1,08	0,94	0,69	0,75	0,71	0,55	0,66
	5	1,11	1,37	1,24	1,11	0,86	0,93	0,89	0,73	0,83
3x240	1	0,91	1,18	1,04	0,91	0,65	0,72	0,68	0,52	0,62
	5	1,08	1,32	1,21	1,08	0,83	0,89	0,85	0,7	0,8

5 Розрахункові опори шинопроводів

Активний опір шин підраховується за формулою (4). В табл. 20 наведено значення активного опору плоских шин при 70°C.

Внутрішній індуктивний опір шин з алюмінію і міді в розрахунках зазвичай не враховується через його невелику величину.

Для підрахунку опорів відкритих 4-провідних шинопроводів активний опір контуру фаза - нульова шина приймається з табл. 20, а зовнішній індуктивний опір підраховується за формулою [5]

$$X' = 0,29 \cdot \lg \frac{d}{g_0}, \quad (6)$$

де d – відстань між шинами, м; g_0 – середня геометрична відстань площі перерізу фази по відношенню до себе для окремо розташованої шини, м.

Середня геометрична відстань g_0 для шини з прямокутним перерізом зі сторонами b і h , м дорівнює:

$$g_0 = 0,2235(b + h); \quad (7)$$

- для шини з квадратною формою перерізу зі стороною $b = h$, м:

$$g_0 = 0,44705 \cdot b; \quad (8)$$

- для трубчастой шини з квадратним перерізом:

$$g_0 = 0,68 \cdot C \cdot e_n, \quad (9)$$

де e_n – зовнішня сторона квадратного перерізу, м; C – коефіцієнт, який визначається з табл. 18.

Таблиця 18

Залежність значення коефіцієнта C від відношення внутрішньої і зовнішньої сторони труби квадратного перерізу

Відношення внутрішньої і зовнішньої сторони труби квадратного перерізу	Значення коефіцієнта C
0,0	0,7788
0,1	0,7825
0,2	0,7930
0,3	0,8087
0,4	0,8286
0,5	0,8519
0,6	0,8778
0,7	0,9058
0,8	0,9358
0,9	0,9672
1,0	1,00

Значення середніх геометричних відстаней для пакетів шин, що найчастіше застосовуються, з відстанями між шинами, однаковими з товщиною шини, наведені в табл. 18

Таблиця 19

Значення середніх геометричних відстаней для пакетів шин, що найчастіше застосовуються, з відстанями між шинами, однаковими з товщиною шини

Переріз пакета, мм ²	Середня геометрична відстань площі перерізу пакета по відношенню до себе, см
2(80x10)	1,53
2(100x10)	3,0
2(120x10)	3,45
3(80x10)	2,99
3(100x10)	3,50
3(120x10)	3,95

Таблиця 20

Активні опори плоских шин, Ом/км

Розмір, мм	Алюмінієві		Мідні	
	Струм			
	постійний	змінний	постійний	змінний
25x3	0,476	0,485	0,288	0,305
30x4	0,297	0,312	0,181	0,203
40x4	0,222	0,245	0,136	0,18
40x5	0,178	0,2	0,108	0,13
50x5	0,143	0,162	0,087	0,106
50x6	0,118	0,138	0,0725	0,0905
60x6	0,099	0,118	0,0603	0,078
60x8	0,0742	0,0895	0,0454	0,0588
80x6	0,0742	0,0895	0,0454	0,0588
80x8	0,0558	0,069	0,034	0,0457
80x10	0,0446	0,0574	0,0271	0,0374
100x6	0,0592	0,0735	0,0362	0,0476
100x8	0,0446	0,0566	0,0271	0,0372
100x10	0,0357	0,0462	0,0194	0,0302
120x8	0,037	0,0476	0,0226	0,0314
120x10	0,0296	0,0384	0,0181	0,0253

При застосуванні 3-провідного відкритого шинопровода як нульовий провідник, зазвичай, використовуються металоконструкції будівлі або спеціально прокладені сталеві смуги.

Точний підрахунок зовнішнього індуктивного опору в цьому випадку дуже утруднений, особливо коли як «нуль» використовуються металоконструкції будівлі. Для наближеного визначення зовнішнього індуктивного опору рекомендується користуватися кривими рис. 1 і табл. 9. Опір визначається за максимальним перерізом провідника, наведеним в кривих, незалежно від перерізу шини відкритого шинопровода, а також конструкції і перерізу нульового провідника.

Для полегшення визначення повного розрахункового опору опори кола фаза-нуль відкритих 3- і 4-провідних алюмінієвих шинопроводів наведено в табл. 21 - 23 (на підставі [7]).

Методика розрахунку активного і внутрішнього опорів нульових провідників, виконаних зі сталі, наводиться в розділі 7.

Таблиця 21

Повний розрахунковий опір кола фаза-нуль відкритих 4-провідних шинопроводів, виконаних алюмінієвими шинами

Розмір фазних и нульових шин, мм	Опір, Ом/км	
	Відстань між нульовою шиною и крайньою фазною шиною, мм	
	200	750
30x4	0,79	0,90
30x5	0,69	0,81
40x4	0,66	0,78
40x5	0,59	0,72
50x4	0,57	0,7
50x5	0,52	0,66
60x5	0,47	0,61
60x6	0,44	0,59
80x6	0,39	0,54
80x8	0,36	0,52
100x6	0,34	0,50
100x8	0,33	0,48
100x10	0,32	0,43

Таблиця 22

Повний розрахунковий опір кола 3-провідна відкрита магістраль - металоконструкція зі спареної кутової сталі

Переріз магістралі, мм	Відстань між фермою і найбільш віддаленою шиною, м	Опір, Ом/км			
		Розмір ферми, мм			
		2(75x75x8)		2(100x100x8)	
		Струм однофазного КЗ, А			
		1000	1250-2500	1000	1250-2500
3(40x4)	0,2	0,72	0,69	0,63	0,80
	2	0,93	0,91	0,85	0,82

3(50x5)	0,2	0,65	0,62	0,56	0,53
	2	0,88	0,85	0,80	0,77
3(60x6)	0,2	0,6	0,57	0,51	0,49
	2	0,84	0,81	0,76	0,74
3(80x6)	0,2	0,57	0,54	0,48	0,46
	2	0,81	0,79	0,73	0,71
3(100x6)	0,2	0,55	0,52	0,46	0,45
	2	0,79	0,77	0,71	0,69
3(100x8)	0,2	0,54	0,51	0,45	0,43
	2	0,78	0,76	0,70	0,68
3(100x10)	0,2	0,53	0,50	0,44	0,42
	2	0,78	0,75	0,70	0,68

Таблиця 23

Повний опір кола трипровідна відкрита магістраль - підкранова балка з двотаврової стали

Переріз магістралі, мм	Відстань між балкою і найбільш віддаленою фазною шиною, м	Опір, Ом/км			
		Розмір сталевого профілю, мм			
		450x160x8,6		600x190x11,1	
		Струм однофазного КЗ, А			
		1000	1500-3000	1000	2000-3000
3(40x4)	1	0,71	0,68	0,66	0,63
	5	0,87	0,85	0,83	0,80
3(50x5)	1	0,64	0,62	0,60	0,57
	5	0,82	0,80	0,78	0,75
3(60x6)	1	0,61	0,58	0,57	0,54
	5	0,79	0,76	0,75	0,72
3(80x6)	1	0,58	0,55	0,54	0,51
	5	0,76	0,74	0,73	0,70
3(100x6)	1	0,56	0,53	0,52	0,49
	5	0,74	0,72	0,71	0,68
3(100x8)	1	0,55	0,53	0,51	0,48
	5	0,73	0,71	0,70	0,67
3(100x10)	1	0,54	0,52	0,50	0,48
	5	0,73	0,71	0,69	0,67

6 Розрахункові опори сталевих провідників

Особливістю сталевих провідників є відносно низька питома електропровідність і нелінійна залежність провідності на змінному струмі, на яку впливає густина струму і відношення значень периметра до перерізу. Електропровідність

зростає із збільшенням густини струму (A/mm^2) і має відносно великі значення із збільшенням відношення периметра до перерізу. Чим більшим є це останнє відношення, тим меншим виявляється вплив поверхневого ефекту.

Незважаючи на низьку електропровідність, сталеві провідники використовуються як провідники заземлення на коротких відстанях. В основному, для цілей заземлення використовується смугова сталь, що має в порівнянні з круглою більші значення відношення периметра до перетину, тобто більшу електропровідність при тому ж перерізі, а також сталеві труби для прокладання в них проводів.

Таблиця 24

Опір шинопроводів

Тип шинопровода	Ном. струм, А	Конструкція нульового струмопровода	Опір фазна шина – нуль, Ом/км					
			активний r		індуктивний x		Z_ϕ	Z_π
			фаза r_ϕ	нуль r_0	фаза x_ϕ	нуль x_0		
ШМА59-НУЗ	2500	Два утримних алюмінієвих кутка	0,032	0,07	0,084	0,046	-	0,165
ШМА59-НУЗ	4000		0,017	0,07	0,084	0,046	-	0,16
ШМА68-НУЗ	1600		0,034	0,111	0,023	0,212	-	0,276
ШМА68-НУЗ	2500		0,02	0,07	0,02	0,046	-	0,111
ШМА68-НУЗ	4000		0,013	0,07	0,015	0,046	-	0,12
ШМА16УЗ	1000	Бокові профілі	0,059	-	0,009	-	0,059	0,125
ШМА16УЗ	1600		0,03	0,037	0,014	0,041	0,033	0,087
ШМА73УЗ	1600		0,031	0,041	0,017	0,081	-	0,123
ШМА73ПУЗ	1600		0,037	0,049	0,02	0,1	-	0,148
ШМА73Уз	1000		0,058	0,037	0,05	0,091	-	0,096
ШРА73УЗ ШРА73-ВУЗ	250	Нульова шина всередині кожуха	0,21	0,12	0,21	0,207	-	0,55
ШРА73УЗ	400		0,15	0,162	0,17	0,164	-	0,49
ШРА73УЗ	600		0,1	0,162	0,13	0,164	-	0,29
ШРП УЗ	250		0,21	-	0,21	-	0,3	0,4
ШРП УЗ	400		0,15	-	0,17	-	0,23	0,35
ШРП УЗ	630		0,08	-	0,11	-	0,14	0,162
ШРМ-75УЗ	100		0,52	-	0,07	-	0,525	1,07
ШТМ-76УЗ	100		0,4	-	0,42	-	0,58	-
ШОС-73УЗ	100		0,52	-	0,07	-	0,525	1,07
ШОС-80УЗ	160		5,4	5,4	0,05	0,05	5,4	5,4
ШТА-75УЗ	250		0,474	-	0,15	-	0,498	-
ШТА-75УЗ	400		0,217	-	0,17	-	0,254	-
ШТМ-73УЗ	250		0,315	-	0,18	-	0,36	-
ШТМ-72УЗ	400	0,197	-	0,12	-	0,23	-	
ШТ-АУ2	250	-	0,2	-	0,21	-	0,29	-

ШТ-АОУ2								
---------	--	--	--	--	--	--	--	--

Активний опір. В даний час в залежності від умов прокладання і класу приміщень за вибухопожежонебезпекою для електропроводок застосовуються водогазопровідні труби згідно ДСТ 3262-75 і тонкостінні зварні труби згідно ДСТ 10704-76.

Порівнюючи опори сталевих труб при однаковій густині струму, можна бачити, що вони мають велике розходження (див. табл. 26, 27). Однак, при визначенні їх опору при однаковому струмі це розходження є незначним і не перевищує 7%.

Ця похибка, враховуючи наближеність вихідних даних, лежить в межах 10% точності, прийнятих як задовільне значення в аналогічних розрахунках.

Після обробки наявних в літературі даних стосовно опору сталевих труб (як розрахункових, так і експериментальних) на рис. 2 наведено універсальні криві для визначення активного опору сталевих труб з однаковими умовними проходами для всіх сортаментів, які застосовуються в даний час для електропроводок.

В табл. 25 наведені дані про опір електропроводок в сталевих трубах. В цій таблиці для визначення опору сталевих труб використовувалися криві рис. 2, а їх опір визначався для струму однофазного КЗ, що забезпечує надійну комутацію захисного апарата (автомата з комбінованим розчеплювачем), встановленого на початку лінії. Уставка автомата приймалася приблизно рівною допустимому навантаженню на провід даного перетину.

Якщо дані табл. 25 для конкретних умов не підходять (наприклад, за перетином провідника), цей контур потрібно перерахувати для конкретних умов згідно табл. 7 і рис. 1.

Можуть зустрітися випадки, коли за кривими рис. 1 не можна визначити опір труби для великих струмів. В цьому випадку допустимо приймати значення за останньою точкою кривої. Похибка буде невеликою і допустимою в розрахунках такого роду.

Криві активних опорів сталевих провідників з круглої і профільної сталі (рис. 2, 3, 4) побудовані за даними [15].

Криві для близьких за перерізом сталевих смуг (наприклад, 100x6 і 100x8) є загальними, хоча їх опори трохи різняться при однаковій густині струму, але є майже однаковими при одному і тому ж розрахунковому струмі.

На всіх кривих рис. 1-4 для сталевих провідників наведено тільки активні опори. Внутрішній індуктивний опір (X'' , Ом/км) знаходиться зі співвідношення

$$X'' = 0,6 \cdot R_{\omega}, \quad (10)$$

тоді

$$Z = \sqrt{X''^2 + R_{\omega}^2} = \sqrt{(0,6 \cdot R_{\omega})^2 + R_{\omega}^2} = 1,165 \cdot R_{\omega}. \quad (11)$$

У разі використання як нульових провідників будівельних металокопструкцій будь-якої конфігурації (підкранові шляхи, ферми, колони) їх опір визначається з кривих рис. 6 або з табл. 27. 28. 29.

Криві на рис. 6 наведені для $t = 20^{\circ}\text{C}$. За необхідності перерахунку на інші температури величина активного опору (Ом/км) визначається за формулою

$$R_{ож} = R_{он} [1 + 0,003(t^{\circ} - 20)], \quad (12)$$

де $R_{он}$ – опір провідника за кривими рис. 6, Ом/км.

Аналогічно виконується перерахунок значення внутрішнього індуктивного опору X'' .

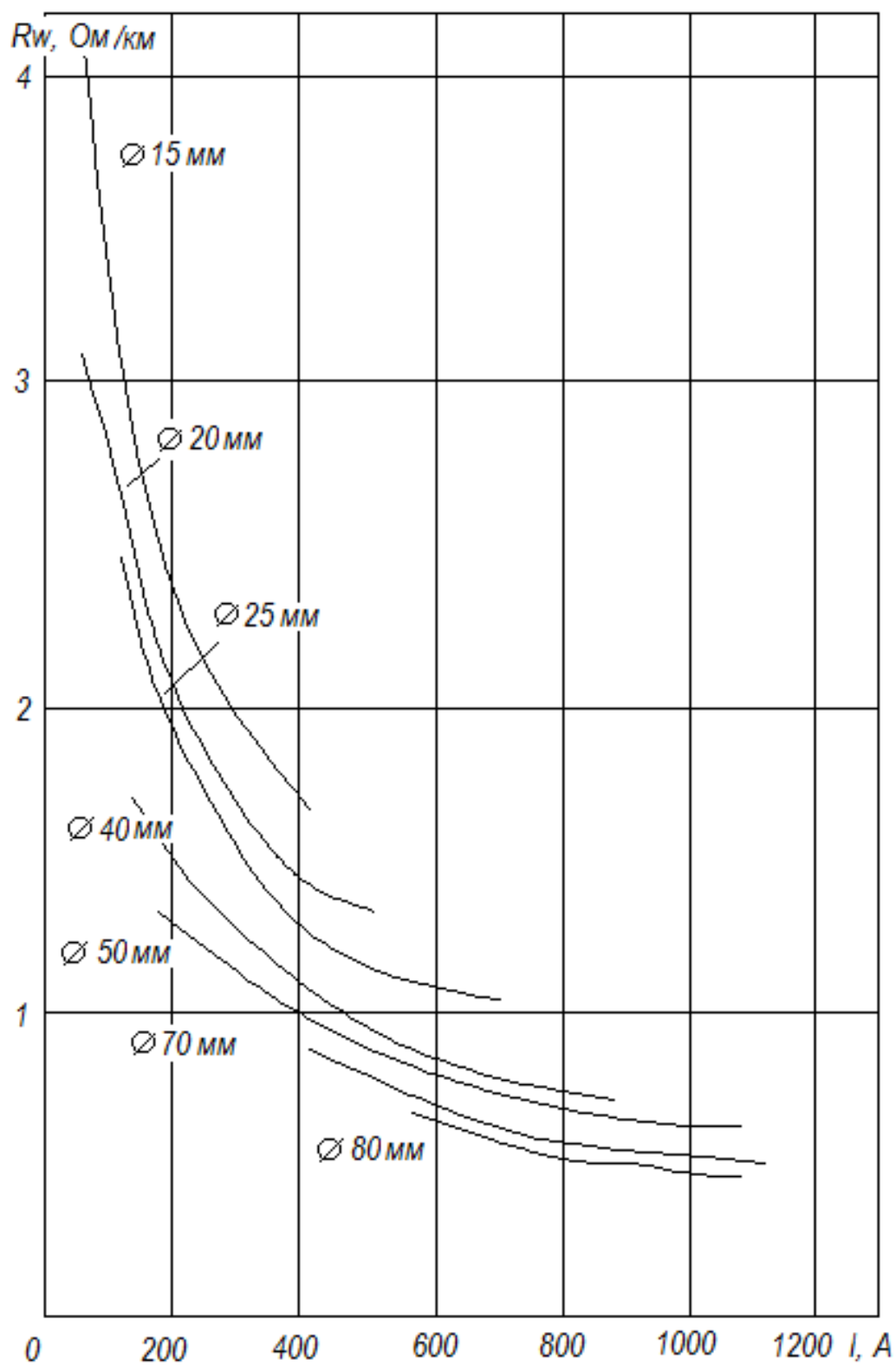


Рис. 1. Універсальні криві для визначення активного опору сталевих труб R_w

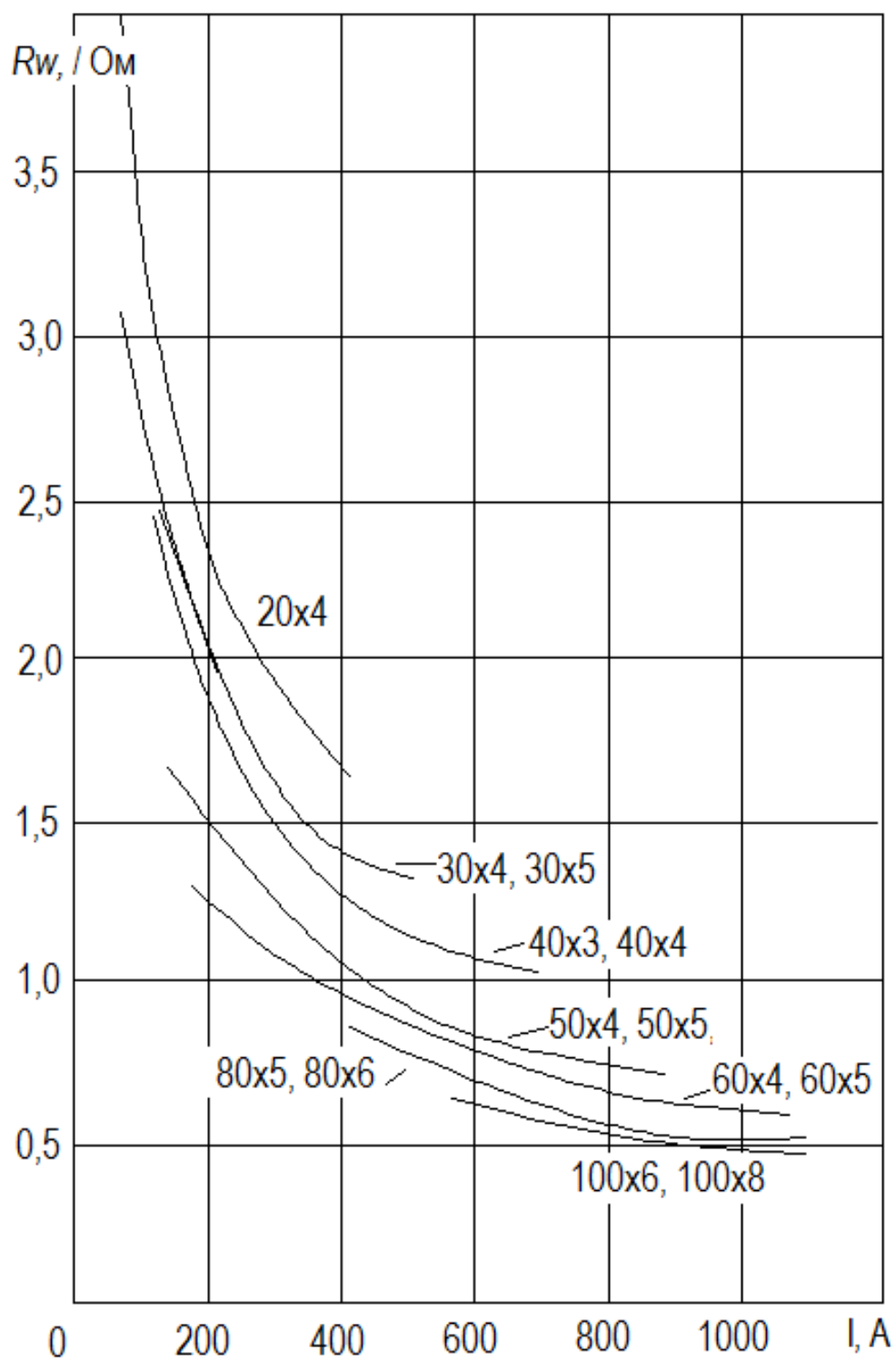


Рис. 2. Активний опір (R_w) сталевих смуг ($X'' = 0,6R_w$, $Z = 1,165 R_w$)

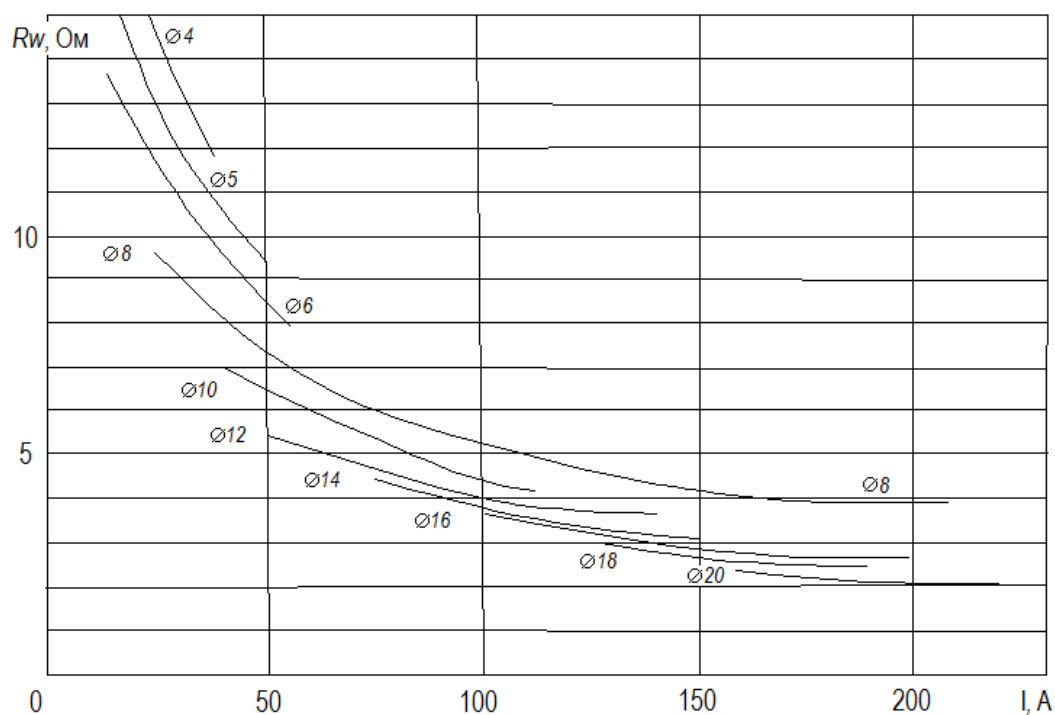


Рис. 3. Активний опір круглих сталевих провідників

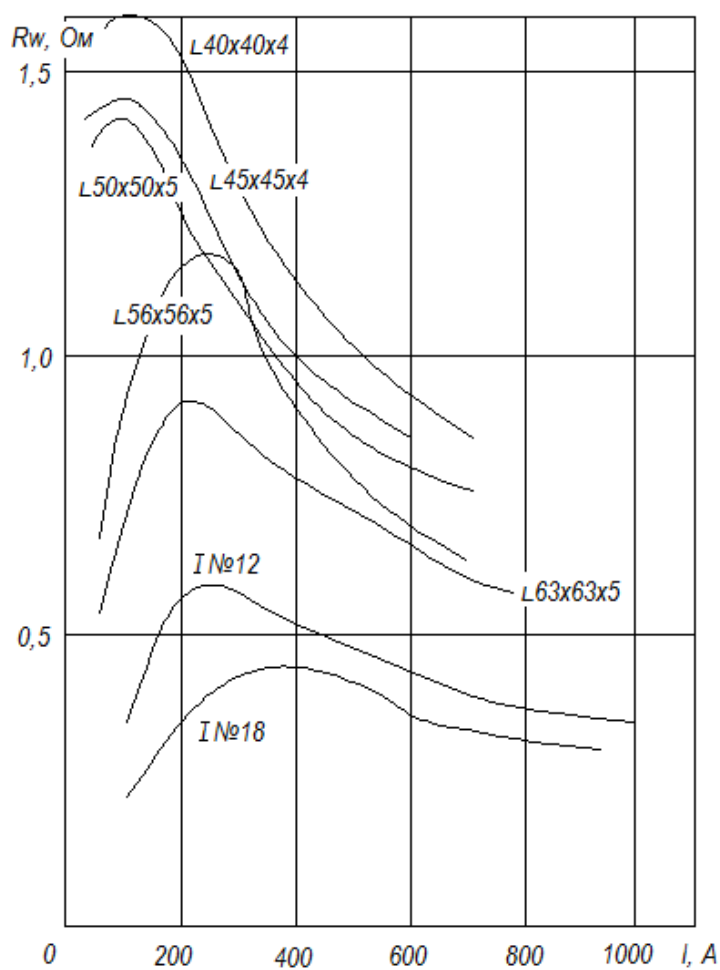


Рис. 4. Активний опір профільної сталі

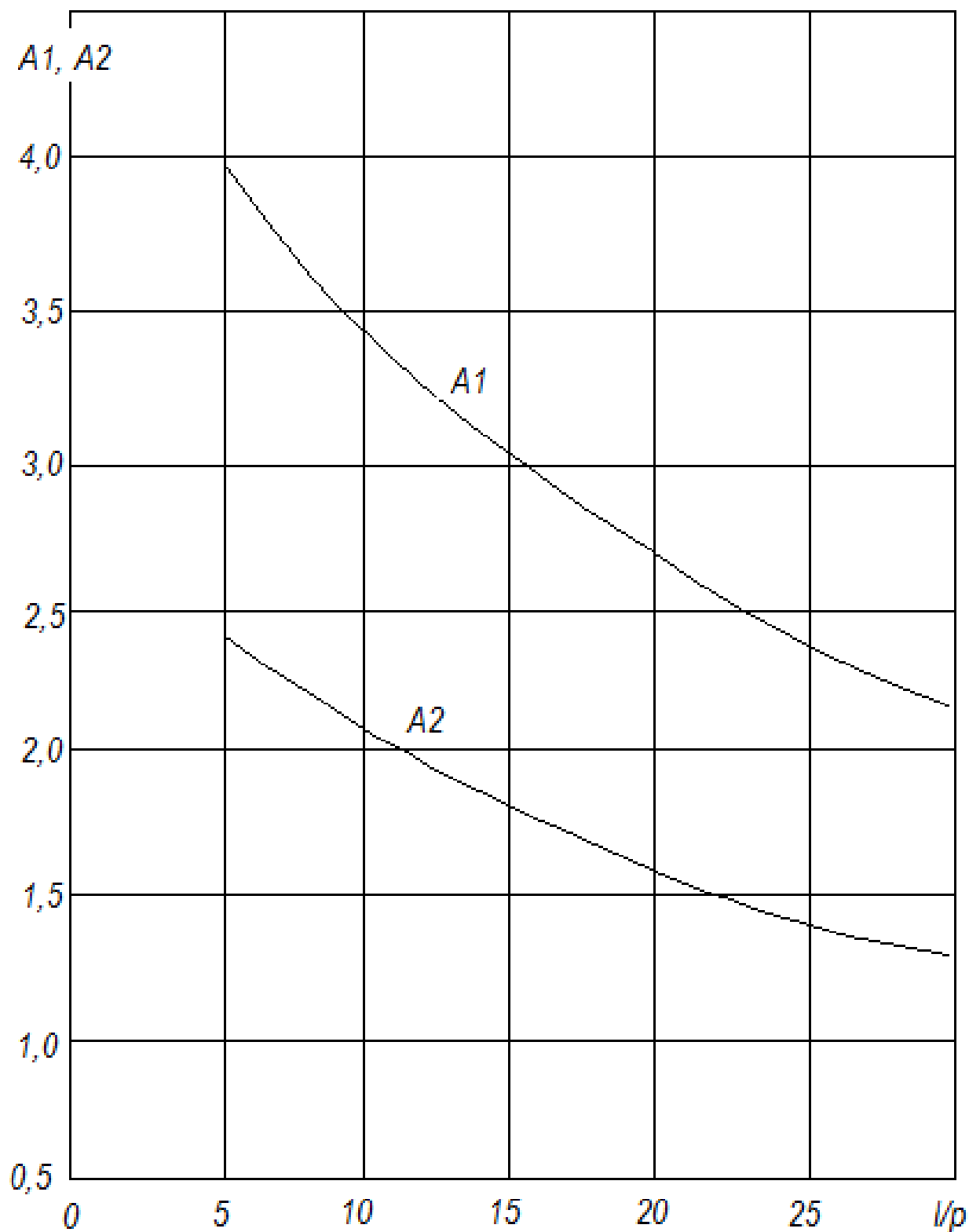


Рис. 5. Універсальні криві для визначення активного R_w та внутрішнього індуктивного X'' опорів сталевих провідників будь-якої конфігурації: $R_w = A_1 I^{0.5} p^{-1}$, $X'' = A_2 I^{0.5} p^{-1}$, p - периметр (см); f - частота, Гц; I - струм, А; A_1 , A_2 - коефіцієнти

Таблиця 25

Розрахунковий опір кола фазний алюмінієвий провід – сталева труба

Три одножилевих провідних перерізом, мм ²	Внутрішній діаметр труби		Опір, Ом/км					Розрахунковий струм однофазного КЗ, А
	мм	дюйм	фазного провода r_{ϕ}	труби R_{ω}	$r_{\phi} + R_{\omega}$	$X'' = 0,6 \cdot R_{\omega}$	$Z_{ц}$	
2,5	15	1/2	15	4,04	19,04	2,42	19,2	50
	20	3/4	15	3,1	18,1	1,86	18,25	
4	15	1/2	9,36	3,1	12,46	1,86	12,6	100
	20	3/4	9,36	2,68	12,04	1,6	12,15	
6	15	1/2	6,25	2,6	8,85	1,56	8,9	150
	20	3/4	6,25	2,3	8,55	1,38	8,64	
10	20	3/4	3,74	2,3	6,04	1,38	6,15	150
16	25	1	2,34	1,5	3,84	0,9	3,94	300
25	25	1	1,5	1,15	2,65	0,69	2,74	400
35	40	1 1/2	1,07	1,05	2,12	0,63	2,2	400
50	40	1 1/2	0,75	1,05	1,8	0,63	1,9	400
70	50	2	0,536	0,85	1,386	0,51	1,48	500
95	70	2 1/2	0,395	0,54	0,935	0,32	0,986	800
120	70	2 1/2	0,313	0,54	0,853	0,32	0,915	800
150	70	2 1/2	0,25	0,50	0,75	0,30	0,81	1000
	80	3	0,25	0,45	0,70	0,27	0,75	
180	80	3	0,203	0,45	0,653	0,27	0,7	1000

Таблиця 26

Опір водогазопровідних труб згідно ДСТ 3562-75

Внутрішній діаметр, мм	Площа перерізу, мм ²	Опір, Ом/км								
		Густина струму, А/мм ²								
		0,5			1,0			1,5		
		R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$
15	160	3,41	2,05	3,98	2,55	1,53	2,97	2,06	1,24	2,40
20	207	2,67	1,60	3,11	2,02	1,21	2,35	1,59	0,95	1,85
25	309	2,02	1,21	2,36	1,45	0,87	1,69	1,14	0,68	1,33
32	399	1,58	0,95	1,84	1,12	0,67	1,31	-	-	-
40	489	1,32	0,78	1,54	0,93	0,56	1,08	-	-	-
50	625	1,07	0,64	1,25	0,76	0,45	0,89	-	-	-
70	845	0,84	0,50	0,98	0,59	0,35	0,69	-	-	-
80	1120	0,67	0,40	0,78	0,48	0,29	0,56	-	-	-

Таблиця 27

Опір сталевих зварених електрично труб згідно ДСТ 10704-76

Розмір, мм	Площа перерізу, мм ²	Опір, Ом/км												
		Густина струму, А/мм ²												
		1,0			1,5			2,0			3,0			
		R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	
20x1,6	92,5	3,38	2,03	3,94	2,84	1,71	3,31	2,42	1,45	2,82	2,14	1,29	2,52	
26x1,8	136,8	2,47	1,48	2,88	2,05	1,23	2,39	1,73	1,04	2,01	1,64	0,98	1,91	
32x2	170,5	1,99	1,19	2,32	1,65	0,99	1,92	1,40	0,84	1,63	-	-	-	
47x2	282,6	1,30	0,78	1,51	1,05	0,63	1,23	0,95	0,57	1,10	-	-	-	
59x2	358	1,02	0,62	1,19	0,83	0,50	0,97	0,75	0,45	0,87	-	-	-	

Таблиця 28

Опір сталевих смуг

Розмір, мм	Опір, Ом/км											
	Густина струму, А/мм ²											
	0,5			1,0			1,5			2,0		
	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$
20x4	5,24	3,14	6,10	4,20	2,52	4,90	3,48	2,09	4,05	2,97	1,78	3,46
30x4	3,66	2,20	4,25	2,91	1,75	3,39	2,38	1,43	2,78	2,04	1,22	2,33
30x5	3,38	2,03	3,94	2,56	1,54	2,99	2,08	1,25	2,42	-	-	-
40x3	3,05	1,83	3,56	2,54	1,52	2,96	2,12	1,27	2,48	1,81	1,08	2,11
40x4	2,80	1,68	3,26	2,24	1,34	2,61	1,81	1,09	2,11	1,54	0,92	1,80
50x4	2,28	1,37	2,66	1,79	1,07	2,09	1,45	0,87	1,69	1,24	0,74	1,45
50x5	2,10	1,26	2,45	1,60	0,96	1,87	1,28	0,77	1,49	-	-	-
60x4	1,91	1,15	2,22	1,50	0,90	1,75	1,22	0,73	1,42	1,04	0,62	1,22
60x5	1,77	1,06	2,06	1,34	0,80	1,56	1,08	0,65	1,26	-	-	-
80x5	1,34	0,81	1,56	1,04	0,62	1,22	0,82	0,49	0,96	-	-	-
80x6	1,26	0,76	1,47	0,91	0,55	1,06	0,75	0,45	0,87	-	-	-
100x6	1,02	0,61	1,19	0,73	0,44	0,85	0,60	0,36	0,70	-	-	-
100x8	0,90	0,54	1,05	0,62	0,37	0,72	-	-	-	-	-	-

Опір сталевих провідників кругового перерізу

Діаметр, мм	Площа перерізу, мм ²	Опір, Ом/км											
		Густина струму, А/мм ²											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
		R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}
5	20	17,0	10,2	19,8	14,4	8,65	16,75	12,4	7,45	14,4	10,7	6,4	12,5
6	28	13,7	8,2	16,0	11,2	6,7	13,1	9,4	5,65	10,9	8,0	4,8	9,3
8	50	9,6	5,75	11,2	7,5	4,5	8,74	6,4	3,84	7,45	5,3	3,2	6,2
10	79	7,2	4,32	8,4	5,4	3,24	6,3	4,2	2,52	4,9	-	-	-
12	113	5,6	3,36	6,54	4,0	2,4	4,66	-	-	-	-	-	-
14	154	4,55	2,73	5,3	3,2	1,92	3,74	-	-	-	-	-	-
16	201	3,72	2,23	4,34	2,7	1,6	3,1	-	-	-	-	-	-
18	255	3,18	1,91	3,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	314	2,68	1,61	3,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблиця 30

Опір сталевих провідників різного поперечного перерізу

Розмір, мм	Опір, Ом/км														
	100 А			200 А			400 А			600 А			800 А		
	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}
Кутова сталь															
40x40x4	1,6	1,04	1,91	1,5	0,92	1,76	1,12	0,7	1,32	0,92	0,59	1,09	-	-	-
45x45x4	1,46	0,86	1,69	1,32	0,78	1,53	1,0	0,56	1,15	0,86	0,47	0,98	-	-	-
50x50x5	1,42	0,68	1,57	1,27	0,68	1,43	0,98	0,54	1,12	0,78	0,44	0,89	-	-	-
63x63x5	0,68	0,38	0,78	0,92	0,56	1,07	0,8	0,46	0,92	0,66	0,36	0,75	0,58	0,32	0,66
Двотаврова сталь															
№ 12	0,34	0,16	0,38	0,57	0,32	0,65	0,53	0,28	0,58	0,44	0,24	0,5	0,37	0,22	0,43
№ 18	0,21	0,09	0,25	0,35	0,18	0,39	0,45	0,29	0,54	0,33	0,24	0,45	0,31	0,2	0,37

7 Активні опори перехідних контактів

При визначенні повного опору кола фаза-нуль за формулою (2) необхідно враховувати не тільки активний але й індуктивний опір всіх елементів короткозамкненого кола, в тому числі й активні опори всіх перехідних контактів в цьому контурі (на шинах, на вводах і виводах апаратів, рознімні контакти апаратів, опір дуги в місці КЗ, а також опори котушок розчеплювачів автоматів і первинних обмоток трансформаторів струму).

На жаль, до теперішнього часу немає єдиної розрахункової методики обліку перехідних опорів в мережах 0,4 кВ. Більше того, державними стандартами і технічними умовами на вимикачі, роз'єднувачі й перемикачі (наприклад, ДСТ

2327-76) значення активних опорів головних контактів не нормуються і при виробництві виробів не контролюються.

Для практичних розрахунків рекомендується користуватися табл. 32-36, в яких наведено опори елементів апаратів за даними компаній-виробників.

За відсутності таких даних допустимо користуватися табл. 31, де наведені осереднені опори котушок розчеплювачів і головних контактів автоматів та рубильників згідно даним [11], [12].

Таблиця 31

Опори котушок розчеплювачів і головних контактів автоматів і рубильників, мОм

Номинальний струм, А	Котушки розчеплювачів автоматів		Контакти, r	
	r при 65°C	x при 65°C	Автомати	Рубильники
50	5,5	27	1,3	-
70	2,35	1,3	1,0	-
100	1,3	0,85	0,75	0,5
140	0,74	0,55	0,65	-
200	0,36	0,28	0,6	0,4
400	0,15	0,1	0,4	0,2
600	0,12	0,084	0,25	0,15
1000	0,1	0,08	0,12	0,08
1500-2500	0,06	0,05	0,05	0,04

Для автоматів типу «Електрон» опір одного полюсу (разом з втичним контактом) можна приймати за даними табл. 32.

Таблиця 32

Опори полюса автоматичного вимикача

Тип вимикача	Номинальний струм, А	Опір полюса, мОм	
		r активний	x індуктивний
Е-06	630	0,25	0,15
Е-10	1000	0,15	0,076
Е-16	1600	0,16	0,061
Е-25	2500	0,12	0,05
Е-40	4000	0,08	0,04

Таблиця 33

Опори котушек розчіплювачів автоматів АЕ2040М, мОм

Номинальний струм, А	Активний опір, r	Індуктивний опір, x
0,6	3,96	17,75
0,8	2,34	9,49
1,0	1,71	3,55
1,25	0,942	2,12
1,6	0,73	1,33
2,0	0,411	0,94
2,5	0,305	0,53
3,2	0,173	0,33
4,0	0,121	0,23
5,0	0,065	0,14
6,0	0,051	0,08
8,0	0,036	0,06
10,0	0,025	0,04
12,5	0,014	0,02
16,0	0,0085	0,018
20,0	0,007	0,017
25,0	0,005	0,01

Таблиця 34

Опори розчеплювачів і головних контактів автоматів різних типів, мОм

Тип автомату	Тип розчеплювача	Номинальний струм, А	Опір полюса, мОм	
			r активний	x індуктивний
А3793, А3794	напівпровідниковий	250	0,12	0,073
		400	0,12	0,077
		630	0,12	0,030
А3795, А3796	тепловий	250	0,34	0,27
		320	0,335	0,275
		400	0,25	0,235
		500	0,21	0,18
		630	0,155	0,10
ВА51-35, ВА52-37, ВА52-39	тепловий	250	0,35	0,11
		400	0,172	0,104
		630	0,099	0,078
ВА52-35, ВА53-37, ВА53-39, ВА53-41	напівпровідниковий	250	0,38	0,13
		400	0,10	0,102
		630	0,068	0,12
		1000	0,077	0,115

Опори головних контактів рубильників і перемикачів

Тип апарату	Номинальний струм, А	Активний опір полюса, мОм
P11	100	0,154
П11, РПЦ11, Р21, П21, Р31	100	0,186
P16, P19	250	0,132
П12, П22, Р22, П32, РПЦ32	250	0,161
РБ, ПБ, РПБ, ППБ, РПЦ, ППЦ	400	0,037
	630	0,027
PE19	1000	0,035
	1600	0,03
	2500	0,014
	4000	0,007
	6300	0,006

Таблиця 36

Опори первинних обмоток трансформаторів струму типу ТК, мОм

Номинальний струм, А	ТК-20		ТК-40	
	<i>r</i> активний	<i>x</i> індуктивний	<i>r</i> активний	<i>x</i> індуктивний
5	260	386	660	780
10	60,5	97	165	195
15	26,8	43	73	87
20	15,1	24,2	41	49
30	6,7	10,9	18,3	22
40	3,44	7,5	10,3	12
50	2,5	3,88	6,6	7,8
75	1,1	1,74	2,94	3,5
100	0,625	0,97	1,65	1,95
150	0,275	0,426	0,73	0,86
200	0,136	0,304	0,41	0,49
300	-	-	0,18	0,22
400	-	-	0,131	0,18
600	-	-	0,059	0,082

В трансформаторах ТК-20 зі струмом від 300 А і вище і ТК-40 зі струмом від 600 А і вище первинною обмоткою слугує невеликий відрізок шини, в цьому випадку індуктивний і активний опори мають дуже малі значення.

Під час підрахунку опору контактів необхідно враховувати опір дуги в місці короткого замикання, величина якого за різними літературними джерелами приймається 0,01 Ом [19, 20].

За відсутності достовірних даних про контакти та їх перехідні опори в [3] рекомендується в розрахунках струмів КЗ в мережах, що живляться трансформаторами потужністю до 1600 кВА включно, враховувати їх сумарний опір введенням в розрахунок активного опору:

- 1) для розподільних пристроїв на станціях і підстанціях 0,015 Ом;
- 2) для первинних цехових розподільних пунктів, як і на затискачах апаратів, що живляться радіальними лініями від щитів підстанцій або від головних магістралей 0,02 м;
- 3) для вторинних цехових розподільних пунктів, як і на затискачах апаратів, що живляться від первинних розподільних пунктів - 0,025 Ом;
- 4) для апаратури, встановленої безпосередньо біля електроприймачів, які отримують живлення від вторинних розподільних пунктів - 0,03 Ом.

Однак, як свідчать результати розрахунків для конкретних прикладів і висновки в [16], вищенаведені значення перехідних опорів контактів є завищеними, особливо для мереж, що живляться від трансформаторів потужністю понад 1000 кВА.

8 Визначення меж дії захисту від однофазних коротких замикань в мережі асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором

ПУЕ, ДСТ, ТУ та інші нормативні документи наказують ряд заходів для підвищення електро- і вибухобезпеки електроустановок напругою до 1 кВ.

Відповідно до 7.3.140 ПУЕ потрібно є перевірка повного опору кола фаза-нуль для всіх електроприймачів, розташованих у вибухонебезпечних зонах В-I і В-II та вибірково (але не менше 10% загальної кількості) для електроприймачів, розташованих у вибухонебезпечних зонах класів В -Iа, В-Iб, В-Iг і В-IIа і мають найбільший опір контуру фаза-нуль.

В даний час в літературі відсутні відомості про межі дії захисту від однофазних КЗ в залежності від потужності електродвигуна (або іншого електроприймача), а наводяться лише таблиці, лінійки і т.п. для визначення меж дії захисту в залежності від перерізу проводів та кабелів [14].

Табл. 37, 38 дають можливість визначити межі дії захисту для всієї шкали потужностей асинхронних електродвигунів серії 4А, В, ВА02, Вр при захисті ліній до електродвигунів автоматичними вимикачами з комбінованим розчеплювачем.

Табл. 39 дає можливість визначити межі дії захисту для асинхронних двигунів серії 4А, 4АН у разі захисту ліній до електродвигунів автоматичними вимикачами з електромагнітним розчеплювачем.

Табл. 38 розрахована для трансформатора потужністю 1000 кВА зі схемою з'єднання «зірка-зірка 12».

Решта умов є аналогічними до наведених для табл. 37.

Табл. 39 розрахована для трансформаторів потужністю 1000 кВА зі схемами з'єднань «трикутник-зірка» і «зірка-зірка».

Характеристики кабелів обиралися згідно табл. 37.

Як захисні апарати для двигунів потужністю до 55 кВт приймалися автоматичні вимикачі АЕ 2043М, АЕ 2053М, АЕ 2063М з $I_m (I_{отс}) = 5I_{н.р.}; 12I_{н.р.}$ або автомати виробництва закордонних компаній з характеристиками, близькими до них.

Для двигунів потужністю понад 55 кВт приймалися автомати АЗ700 з $I_m (I_{отс}) = 2500A, 4000A$. Уставки розчеплювачів автоматів прийнято аналогічно табл. 37.

Окремою графою наведено граничні відстані для захисту ліній автоматами АП50Б з $I_m (I_{отс}) = 10 I_{н.р.}$ При користуванні табл. 39 необхідно пам'ятати, що уставка електромагнітного розчеплювача при захисті ліній до електричних двигунів з КЗ ротором не може бути менше пускового струму, що звичайно дорівнює 6...7-разовому значенню номінального струму двигуна.

Табл. 37, 38 доцільно застосовувати для проектування агропромислових виробництв, де найбільшого поширення набули радіальні схеми розподілу електроенергії з мережами, що мають по всій довжині незмінний переріз і четверту жилу кабелю як нульового провідника, але можуть бути поширені й на виробництва машинобудування та інших галузей промисловості.

Порядок користування таблицями є таким.

1. Визначається сумарна відстань від джерела живлення 380/220 В до електродвигуна уздовж траси підведення струму незалежно від того, чи підключений електродвигун безпосередньо до розподільного щита джерела живлення або живиться через проміжні силові пункти, розподільні або магістральні шинопроводи.

2. Залежно від зони, в якій встановлено електродвигун, і його номінальної потужності згідно таблиці знаходять критичну відстань, в межах якої виконуються вимоги ПУЕ щодо збільшення струму однофазного КЗ. Ця відстань порівнюється з сумарною відстанню від джерела живлення до електродвигуна.

Якщо довжина траси струмопроводу є меншою або дорівнює критичній відстані, то перевірочний розрахунок струму однофазного КЗ для даного електродвигуна виконувати не слід, а якщо більшою, то необхідно виконати перевірочний розрахунок з урахуванням конкретних параметрів живильної мережі.

3. Якщо перевірочний розрахунок показав, що величина струму однофазного КЗ виявляється недостатньою, необхідно застосувати спеціальні заходи. До цих заходів відносять:

- 1) збільшення перетину кабелю живлення;
- 2) проектування спеціального захисту від однофазних замикань.

Таблиці розраховані за формулою [2], [7]:

$$l \geq \frac{1000}{Z_{\text{цу}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ф}}}{I_{\text{к.мин.}}} - \frac{Z_{\text{т}}}{3} \right), \quad (13)$$

де l – гранична довжина лінії, м; $Z_{\text{цу}}$ – повний питомий опір кола фаза-нуль, Ом/км; $I_{\text{к.мин.}}$ – мінімальний струм однофазного КЗ, А.

Розрахунок табл. 37 виконано для наступних умов:

1) джерелом живлення є трансформатор потужністю 1600 кВА зі схемою з'єднань «трикутник-зірка»;

2) уставки автоматів приймалися згідно [10] відповідно каталожним даним електродвигунів серії 4А, В, Вр, ВА02 і технічним даними блоків БОУ5030;

3) кабелі обрано 4-жильні з полімерною або гумовою ізоляцією. Перетини кабелів відповідають номінальному струму двигунів при ПВ 100% для окремого прокладання кабелів згідно табл. 1.3.6, 1.3.7 ПУЕ. Згідно номенклатурі на кабельну продукцію 2005-2006 рр. кабелі з площею перерізу фазної жили 70 мм² і більше мають переріз нульової жили менше 50% перерізу фазної жили. Це дає деякий запас під час визначення меж дії захисту у разі застосування кабелів з жилами рівного перетину:

- 4) опори кабелів приймалися згідно табл. 11;
- 5) перехідний опір контактів складав 0,02 Ом.

Умовні позначення:

$I_{\text{окз}}$ - струм однофазного замикання на землю;

$I_{\text{н.р.}}$ - номінальний струм комбінованого розчеплювача автомата;

$I_{\text{м}}$ - уставка на ток миттєвого спрацювання електромагнітного розчеплювача.

На рис. 7 як приклад наведена однолінійна схема мережі 0,38 кВ. За допомогою табл. 38 і описаною вище методикою можна швидко визначити ділянки мережі, для яких необхідно провести повні розрахунки струму однофазного КЗ.

З порівняння критичних довжин згідно табл. 38 з довжинами ліній за однолінійною схемою рис. 7 видно, що сумарна довжина струмопідводу до електродвигунів 2М, 3М, 9М, 10М, 19М, 20М перевищує значення критичної довжини. Саме для цих ділянок мережі необхідно виконати розрахунки струму однофазного замикання на землю.

Табл. 37-39 можуть бути поширені і на випадки, коли трансформатори живлення мають потужність більше 1000 кВА з будь-якою схемою з'єднання обмоток,

а також коли трансформатори потужністю до 250 кВА включно мають схему з'єднання обмоток «трикутник-зірка» і «зірка-зірка».

Таблиця 37

Граничні довжини ліній до електродвигунів з КЗ ротором для перевірки кратності струму однофазного КЗ по відношенню до номінального струму розчеплювача автомата

Номінальна потужність електродвигуна, кВт	Критична довжина лінії, м			
	алюмінієвий кабель			мідний кабель
	Вибухобезпечна зона $I_{окз} = 3I_{н.р.}$	Вибухонебезпечна зона В-Іб, В-Іг $I_{окз} = 6I_{н.р.}$	Вибухонебезпечна зона В-ІІ, В-ІІа $I_{окз} = 6I_{н.р.}$	Вибухонебезпечна зона В-І, В-Іа $I_{окз} = 6I_{н.р.}$
0,37	1220	610	509	1030
075	761	380	380	643
1,1	487	243	244	411
1,5	487	243	244	411
2,2	304	152	152	257
3,0	244	122	122	206
4,0	195	97	122	206
5,5	152	76	76	128
7,5	122	61	75	103
11	120	60	93	101
15	117	58	91	98
18,5	146	73	119	123
22	146	73	119	123
30	149	74	118	125
37	237	118	106	158
45	213	106	160	177
55	258	128	141	216
75	177	87	128	147
90	246	121	177	204
110	205	102	138	172
132	220	107	148	184
160	220	107	157	248
200	256	124	172	211
250	222	105	-	-
315	242	115	-	-

Таблиця 38

Гранична довжина ліній до електродвигунів з КЗ ротором для перевірки величини струму короткого замикання по відношенню до номінального струму розчеплювача автомата

Номінальна потужність електродвигу- на, кВт	Критична довжина лінії, м			
	алюмінієвий кабель			мідний кабель
	Вибухо- безпечна зона $I_{окз} = 3I_{н.р.}$	Вибухо- небезпечна зо- на В-Іб, В-Іг $I_{окз} = 6I_{н.р.}$	Вибухо- небезпечна зо- на В-ІІ, В-Іа $I_{окз} = 6I_{н.р.}$	Вибухо- небезпечна зона В-І, В-Іа $I_{окз} = 6I_{н.р.}$
0,37	1218	609	608	1028
0,75	760	375	380	642
1,1	487	243	243	410
1,5	487	243	243	410
2,2	304	152	152	256
3,0	243	121	122	204
4,0	194	97	122	204
5,5	151	76	75	127
7,5	121	61	74	101
11	119	60	92	99
15	115	57	88	96
18,5	144	72	116	119
22	144	72	116	119
30	146	71	112	120
37	231	112	99	149
45	207	99	150	167
55	248	118	111	200
75	167	77	113	110
90	231	106	155	179
110	192	86	117	146
132	198	86	119	147
160	198	86	126	200
200	225	93	129	158
250	179	62	-	-
315	195	68	-	-

Таблиця 39

Гранична довжина ліній до електродвигунів з КЗ ротором для перевірки коефіцієнта збільшення струму однофазного КЗ по відношенню до струму електромагнітного розчеплювача автомата

Номінальна потужність електродвигу- на, кВт	Критична довжина лінії, м		
	алюмінієвий кабель		
	вибухобезпечна зона		
	$I_M=12I_{н.р.}$	$I_M=5I_{н.р.}$	$I_M=10I_{н.р.}$
	$I_{окз}=1,4I_M$		
0,37	222 / 222	532 / 532	266 / 266
0,75	138 / 138	333 / 333	167 / 167
1,1	88 / 88	213 / 213	107 / 107
1,5	88 / 88	213 / 213	107 / 107
2,2	55 / 55	133 / 133	67 / 67
3,0	44 / 44	106 / 106	53 / 53
4,0	35 / 35	85 / 85	43 / 43
5,5	27 / 27	66 / 66	33 / 33
7,5	22 / 22	53 / 53	27 / 27
11	21 / 21	52 / 51	26 / 25
15	21 / 20	51 / 49	25 / 24
18,5	26 / 24	63 / 61	32 / 30
22	26 / 24	63 / 61	32 / 30
30	26 / 23	64 / 61	-
37	41 / 36	102 / 97	-
45	36 / 31	91 / 86	-
	$I_{окз}=1,25I_M$		
55	43 / 35	110 / 102	-
75	31 / 22	31 / 22	-
90	43 / 30	43 / 30	-
110	45 / 32	45 / 32	-
132	35 / 18	35 / 18	-
160	35 / 18	35 / 18	-

В чисельнику наведено значення граничних довжин за умови використання трансформатора зі схемою Δ/Y_0 , в знаменнику – зі схемою Y/Y_0 .

9 Приклади розрахунку струмів однофазного КЗ

Приклад 1

На рис. 7 наведена розрахункова схема і формула розрахунку мережі електродвигуна типу 2М.

Трансформатор. Розрахунковий опір трансформатора

$$Z_T/3 = 0,027 \text{ Ом (табл. 2)}$$

Ділянка №2.

Кабель ААШВУ 3х95 длиной 120 м.

Питомий опір фазної жили складає 0,408 Ом/км (табл. 12).

Питомий опір алюмінієвої оболонки 0,321 Ом/км (табл. 12).

Розрахунок опору фази лінії довжиною 120 м:

$$r_\phi = 0,408 \cdot 0,12 = 0,049 \text{ Ом}; \quad r_n = 0,321 \cdot 0,12 = 0,039 \text{ Ом.}$$

Ділянка №3.

Кабель ААШВУ 3х95+1х35 длиной 150 м.

Питомий опір фазної жили має те ж значення, що й для ділянки №1.

Питомий опір нульової жили і алюмінієвої оболонки 0,253 Ом/км (табл. 13).

Опір в розрахунку на 150 м:

$$r_\phi = 0,408 \cdot 0,15 = 0,061 \text{ Ом}; \quad r_n = 0,253 \cdot 0,15 = 0,038 \text{ Ом.}$$

Перехідний опір контактів – 0,02 Ом.

Індуктивний опір кабелів не враховується.

Далі визначаються сумарний опір кола і струм КЗ $I_k = 940 \text{ А}$, що менше допустимого.

Для виконання вимог ПУЕ має бути збільшено переріз кабелю або передбачена спеціальний захист від однофазного КЗ [17], [22].

У даному прикладі повна електропровідність нульового провідника задовольняє вимогам параграфа 1.7.79 ПУЕ.

Приклад 2.

На рис. 8 наведена розрахункова схема і формула розрахунку мережі електродвигуна 3М.

Трансформатор. Розрахунковий опір трансформатора - див. Приклад 1.

Ділянка №2. Два кабелі ААШВ-3х95 + 1х35 довжиною 30 м.

Питомий опір фазної жили 0,408 Ом / км (табл. 13).

Питомий опір нульової жили 0,253 Ом / км (табл. 13).

Опір в розрахунку на 30 м (з урахуванням прокладання двох кабелів в паралель).

$$r_{\phi} = (0,408 \cdot 0,03)/2 = 0,0061 \text{ Ом}; r_n = (0,253 \cdot 0,03)/2 = 0,0038 \text{ Ом}$$

Дільниця №3.

Кабель ВБШВ-4х4 довжиною 70 м.

Питомий опір фазної і нульової жили 5,47 Ом / км (табл. 11).

Опір в розрахунку на 70 м.

$$r_{\phi} = r_n = 5,47 \cdot 0,07 = 0,383 \text{ Ом.}$$

Перехідний опір контактів 0,02 Ом.

Індуктивний опір кабелів не враховуємо. Далі розраховуються значення сумарного опору кола і струму КЗ.

$$I_k = 267 \text{ А, що більше необхідного } I_{окз} = 240 \text{ А.}$$

Отже, мережа задовольняє вимогам ПУЕ.

В даному прикладі повна електропровідність нульового провідника також задовольняє вимогам параграфа 1.7.79 ПУЕ.

Приклад 3

На схемі 3 наведена розрахункова схема і формула розрахунку мережі для електродвигуна 9М.

Трансформатор - див. Приклад 1.

Ділянка №2 - див. Приклад 2.

Ділянка №3. Кабель АВВГ 3х25 довжиною 130 м.

Як нульовий провідник використовується обрамлення кабельного каналу - сталевий куток 50х50х5 мм.

За табл. 15 визначаємо повний опір кола фазна алюмінієва жила - обрамлення кабельного каналу в розрахунку на 130 м з урахуванням інтерполяції на струм 240 А.

$$Z = 2,41 \cdot 0,13 = 0,313 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір кабелів не враховуємо.

Перехідний опір контактів 0,02 Ом.

Далі визначаються значення сумарного опору кола і струму КЗ.

$$I_k = 594 \text{ А, що більше необхідного } I_{окз} = 240 \text{ А.}$$

Отже, мережа задовольняє вимогам ПУЕ.

В даному прикладі повна електропровідність нульового провідника задовольняє вимогам параграфа 1.7.79 ПУЕ (на ділянці 2 опір нульової жили є меншим, ніж опір фазної жили: на ділянці 3 вимога також виконується - див. табл. 15).

Приклад 4

На схемі 4 наведена розрахункова схема і форма розрахунку мережі для електродвигуна 10М.

Трансформатор - див. Приклад 1.

Ділянка №2 - див. Приклад 2.

Ділянка №3. Кабель АБВГ 3х25 довжиною 150 м.

Питомий опір фазної жили 1,47 Ом/км (табл. 11).

$$r_{\phi} = 1,47 \cdot 0,15 = 0,22 \text{ Ом}$$

Питомий опір нульового провідника (сталевий смуги) для струму 300 А дорівнює 1,6 Ом/км (рис. 3).

$$r_n = 1,6 \cdot 0,15 = 0,24 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір сталевий смуги

$$X'' = 0,6 \cdot 1,6 \cdot 0,15 = 0,144 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір для випадку відстані між кабелем і смугою 1 м:

$$X' = 0,725 \cdot 0,15 = 0,109 \text{ Ом (рис. 1)}$$

Перехідний опір контактів 0,02 Ом.

Далі обчислюються значення сумарного опору кола і струму КЗ.

$I_k = 381 \text{ А}$, що більше необхідного. Отже, мережа задовольняє вимогам ПУЕ.

В даному прикладі повна електропровідність нульового провідника також задовольняє вимогам параграфа 1.7.79 ПУЕ.

Приклад 5

На схемі 5 наведена розрахункова схема і форма розрахункової мережі для електродвигуна 19М.

Трансформатор - див. Приклад 1.

Ділянка №2 див. Приклад 2.

Ділянка №3. Провід ПВ1 3 (1х4) + 1х2,5 довжиною 70 м, в трубі 3/4".

Питомий опір фазного дроту 5,47 Ом/км (табл. 7).

Питомий опір нульового проводу 8,73 Ом/км (табл. 7).

Опір в розрахунку на 70 м:

$$r_{\phi} = 5,47 \cdot 0,07 = 0,383 \text{ Ом}; r_n = 8,73 \cdot 0,07 = 0,61 \text{ Ом.}$$

Питомий опір труби 3/4" у випадку розрахункового струму 240 А дорівнює 1,88 Ом/км (рис. 2).

Опір труби в перерахунку на 70 м:

$$r_{нт} = 0,07 \cdot 1,88 = 0,132 \text{ Ом}; r_{н\Sigma} = 0,61 \cdot 0,132 / (0,61 + 0,132) = 0,109 \text{ Ом.}$$

Внутрішній індуктивний опір труби:

$$X'' = 0,6 \cdot 1,88 \cdot 0,07 = 0,079 \text{ Ом}$$

Зовнішній індуктивний опір не враховуємо.

Перехідний опір контактів 0,02 Ом.

Далі розраховується значення сумарного опору кола і струму КЗ.

$I_k = 396$ А, що більше необхідного $I_{окз} = 240$ А.

Отже, мережа задовольняє вимогам ПУЕ.

В даному прикладі електропровідність нульового провідника задовольняє вимогам параграфа 1.7.79 ПУЕ.

Приклад 6

На схемі 6 наведена розрахункова схема і формула розрахунку мережі електродвигуна 26М.

Трансформатор - див. Приклад 1.

Ділянка №2. Шинопровід ШМА-16 довжиною 100 м.

За табл. 24 питомий опір фазної шини

$r = 0,03$ Ом/км

$X' = 0,014$ Ом/км

Питомий опір нульовий шини (бічний профіль)

$r_n = 0,037$ Ом/км

$X''_n = 0,041$ Ом/км

Опір в розрахунку на 100 м:

$r_\phi = 0,03 \cdot 0,1 = 0,003$ Ом; $r_n = 0,037 \cdot 0,1 = 0,0037$ Ом;

$X''_\phi = 0,014 \cdot 0,1 = 0,0014$ Ом; $X''_n = 0,041 \cdot 0,1 = 0,0041$ Ом

Ділянка №3. Кабель АВВГ 3x185+1x50 довжиною 10 м.

Питомий опір фазної жили 0,20 Ом/км (табл. 11).

Питомий опір нульової жили 0,74 Ом/км (табл. 11).

Опір в розрахунку на 10 м:

$r_\phi = 0,20 \cdot 0,01 = 0,002$ Ом; $r_n = 0,74 \cdot 0,01 = 0,0074$ Ом.

Ділянка №4. Шинопровід ШРА-73-400 довжиною 20 м (табл. 24).

Питомий опір фазної шини

$r_\phi = 0,15$ Ом/км; $X''_\phi = 0,17$ Ом/км.

Питомий опір нульової шини

$r_n = 0,162$ Ом/км; $X''_n = 0,164$ Ом/км.

Опори в розрахунку на 20 м:

$r_\phi = 0,15 \cdot 0,02 = 0,0030$ Ом; $r_n = 0,162 \cdot 0,02 = 0,0032$ Ом;

$X''_\phi = 0,17 \cdot 0,02 = 0,0034$ Ом; $X''_n = 0,164 \cdot 0,02 = 0,0033$ Ом.

Ділянка №5. Провід АПВ 3(1x4)+1x2,5 довжиною 6 м.

Питомий опір фазного провoda 9,2 Ом/км (табл. 7).

Питомий опір нульового провoda 14,75 Ом/км (табл. 7).

Опори в перерахунку на 6 м:

$$r_{\phi} = 9,2 \cdot 0,006 = 0,055 \text{ Ом}; r_{\text{н}} = 14,75 \cdot 0,006 = 0,088 \text{ Ом}$$

Перехідний опір контактів 0,02 Ом.

Далі розраховується значення сумарного опору кола і струму КЗ.

$I_{\text{к}} = 1014 \text{ А}$, що більше допустимого, тобто, мережа задовольняє вимогам ПУЕ.

В даному прикладі електропровідність нульового провідника задовольняє вимогам параграфу 1.7.79 ПУЕ.


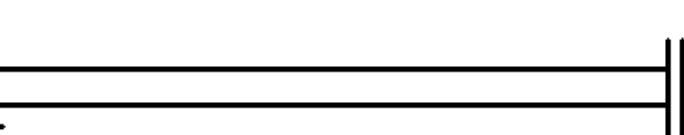

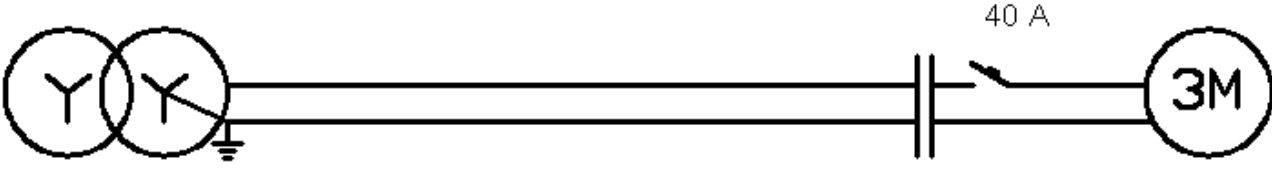
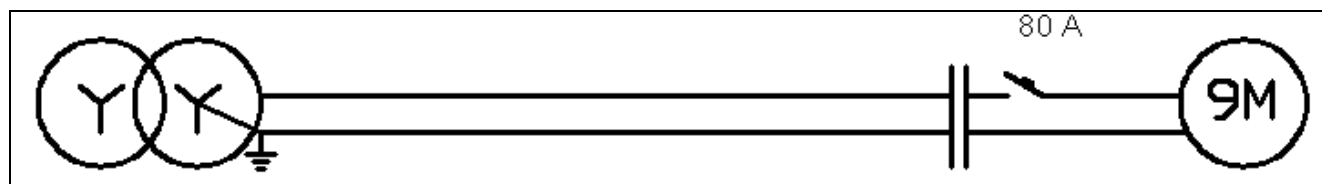
		№ 1		№ 2		№ 3		250 А	
									
Номер ділянки, елемента		Найменування і стисла характеристика ділянки лінії, елемента	Довжина ділянки лінії, км	Опір ділянки лінії, Ом			Опір тр-ра $Z_{\text{т}}/3$, Ом		
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z			
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ перехідний опір контактів		0,02	-		0,027		
2	фаза	алюмінієва жила кабелю 95 мм ²	0,12	0,049	-				
	нуль	алюмінієва оболонка кабелю		0,039	-				
3	фаза	алюмінієва жила кабелю 95 мм ²	0,15	0,061	-				
	нуль	алюмінієва оболонка кабелю 35 мм ² + оболонка		0,038	-				
Разом				0,207	-	0,207	0,027		
Струм КЗ за умовами комутації захисного апарата		$I_{\text{к}} \geq 6 \cdot I_{\text{н}} = 6 \cdot 250 = 1500 \text{ А}$							
Розрахунок дійсних значень $Z_{\text{ц}}$ и $I_{\text{к}}$		$Z_{\text{ц}} = 0,207 \text{ Ом}$ $I_{\text{к}} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{\text{т}}}{3} + Z_{\text{ц}}} = \frac{220}{0,027 + 0,207} = \frac{220}{0,234} = 940 \text{ А} < 1500 \text{ А}$							
Розрахунок опорів окремо фазного і нульового провода (без урахування X') для визначення відносної провідності нульового провода		$r_{\phi} = 0,049 + 0,061 = 0,11 \text{ Ом}$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_{\text{н}} = 0,039 + 0,038 = 0,077 \text{ Ом}$ $X''_{\text{н}} =$ $Z_{\text{н}} =$ $0,11 / 0,077 = 1,43 < 2$							

Рис. 7. Розрахунок опору кола фаза-нуль згідно схеми 1



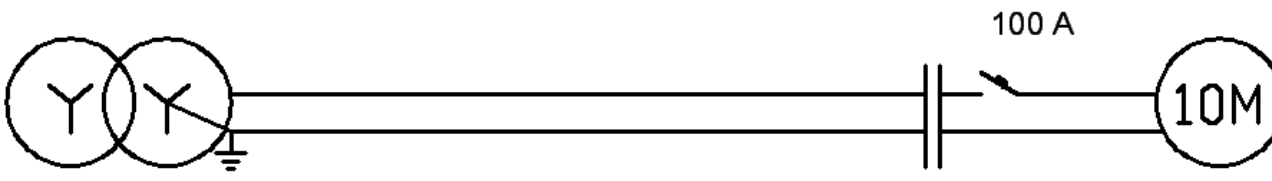
Номер ділянки, елемента	Найменування і стисла характеристика ділянки лінії, елемента	Довжина ділянки лінії, км	Опір ділянки лінії, Ом			Опір тр-ра $Z_T/3$, Ом
			r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1	тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
	перехідний опір контактів		0,02	-		
2	фаза алюмінієва жила кабелю 2·95 мм ²	0,03	0,0061	-		
	нуль алюмінієва жила кабелю 35 мм ² + оболонка кабелю		0,0038	-		
3	фаза мідна жила кабелю 4 мм ²	0,07	0,383	-		
	нуль мідна нульова жила 4 мм ²		0,383	-		
Разом			0,796	-	0,796	0,027
Струм КЗ за умовами комутації захисного апарата	$I_k \geq 6 \cdot I_n = 6 \cdot 40 = 240 \text{ A}$					
Розрахунок дійсних значень Z_{Σ} и I_k	$Z_{\Sigma} = 0,796 \text{ Ом}$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Sigma}} = \frac{220}{0,027 + 0,796} = \frac{220}{0,823} = 267 \text{ A} > 240 \text{ A}$					
Розрахунок опорів окремо фазного і нульового провада (без урахування X') для визначення відносної провідності нульового провада	$r_{\phi} = 0,0061 + 0,383 = 0,389 \text{ Ом}$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n = 0,0038 + 0,383 = 0,387 \text{ Ом}$ $X''_n =$ $Z_n =$ $0,387 / 0,389 = 1 < 2$					

Рис. 8. Розрахунок опору кола фаза-нуль згідно схеми 2



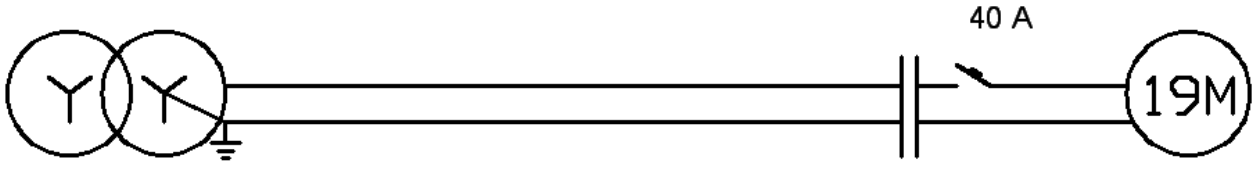
Номер ділянки, елемента		Найменування і стисла характеристика ділянки лінії, елемента	Довжина ділянки лінії, км	Опір ділянки лінії, Ом			Опір тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		перехідний опір контактів		0,02	-		
2	фаза	алюмінієва жила кабелю $2 \cdot 95 \text{ мм}^2$	0,03	0,0061	-		
	нуль	алюмінієва жила кабелю 35 мм^2 + оболонка кабеля		0,0038	-		
3	фаза	алюмінієва жила кабелю 25 мм^2	0,13		-	0,313	
	нуль	обрамлення кабельного каналу $50 \times 50 \times 5$			-		
Разом				0,03	-	0,343	0,027
Струм КЗ за умовами комутації захисного апарата		$I_k \geq 3 \cdot I_H = 3 \cdot 80 = 240 \text{ А}$					
Розрахунок дійсних значень Z_{Σ} и I_k		$Z_{\Sigma} = 0,343 \text{ Ом}$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T + Z_{\Sigma}}{3}} = \frac{220}{0,027 + 0,343} = \frac{220}{0,823} = 594 \text{ А} > 240 \text{ А}$					
Розрахунок опорів окремо фазного і нульового провада (без урахування X') для визначення відносної провідності нульового провада		$r_{\phi} =$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_H =$ $X''_H =$ $Z_H =$					

Рис. 9. Розрахунок опору кола фаза-нуль згідно схеми 3



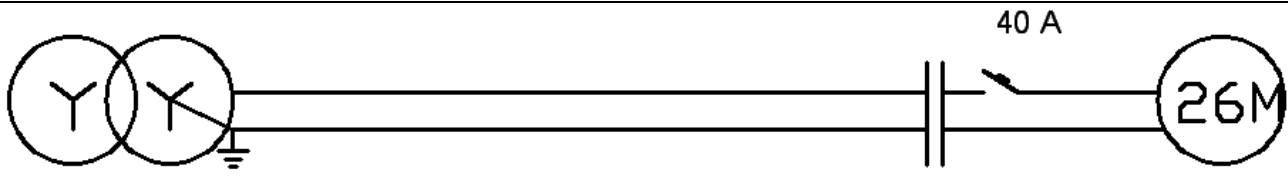
№1		№2		№3			
Номер ділянки, елемента		Найменування і стисла характеристика ділянки лінії, елемента	Довжина ділянки лінії, км	Опір ділянки лінії, Ом			Опір тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		перехідний опір контактів		0,02	-		
2	фаза	алюмінієва жила кабелю $2 \cdot 95 \text{ мм}^2$	0,03	0,0061	-		
	нуль	алюмінієва жила кабелю 35 мм^2 + оболочка кабеля		0,0038	-		
3	фаза	алюмінієва жила кабелю 25 мм^2	0,15	0,22	-		
	нуль	Сталева смуга 40x4		0,24	$\frac{0,144}{0,109}$		
Разом				0,49	0,253	0,551	0,027
Струм КЗ за умовами комутації захисного апарата		$I_k \geq 3 \cdot I_n = 3 \cdot 100 = 300 \text{ А}$					
Розрахунок дійсних значень Z_{Σ} и I_k		$Z_{\Sigma} = 0,551 \text{ Ом}$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Sigma}} = \frac{220}{0,027 + 0,551} = 381 \text{ А} > 300 \text{ А}$					
Розрахунок опорів окремо фазного і нульового провoda (без урахування X'') для визначення відносної провідності нульового провoda		$r_{\phi} = 0,0061 + 0,22 = 0,226 \text{ Ом}$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n = 0,0038 + 0,24 = 0,244 \text{ Ом}$ $X''_n = 0,144 \text{ Ом}$ $Z_n = 0,283 \text{ Ом}$ $0,283 / 0,226 = 1,25 < 2$					

Рис. 10. Розрахунок опору кола фаза-нуль згідно схеми 4



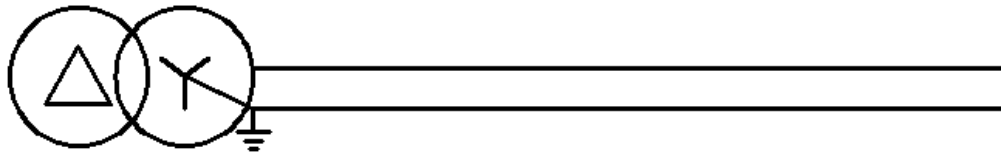
№1		№2		№3			
Номер ділянки, елемента		Найменування і стисла характеристика ділянки лінії, елемента	Довжина ділянки лінії, км	Опір ділянки лінії, Ом			Опір тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		перехідний опір контактів		0,02	-		
2	фаза	алюмінієва жила кабелю 2·95 мм ²	0,03	0,0061	-		
	нуль	алюмінієва жила кабелю 35 мм ² + оболонка кабеля		0,0038	-		
3	фаза	мідна жила проводу 4 мм ²	0,07	0,383	-		
	нуль	мідна жила 2,5 мм ² + труба 3/4"		0,109	$\frac{0,079}{-}$		
Разом				0,522	0,079	0,528	0,027
Струм КЗ за умовами комутації захисного апарата		$I_k \geq 6 \cdot I_n = 6 \cdot 40 = 240 \text{ A}$					
Розрахунок дійсних значень Z_{Σ} и I_k		$Z_{\Sigma} = 0,528 \text{ Ом}$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T + Z_{\Sigma}}{3}} = \frac{220}{0,027 + 0,528} = 396 \text{ A} > 240 \text{ A}$					
Розрахунок опорів окремо фазного і нульового проводу (без урахування X'') для визначення відносної провідності нульового проводу		$r_{\phi} = 0,0061 + 0,383 = 0,389 \text{ Ом}$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n = 0,0038 + 0,109 = 0,113 \text{ Ом}$ $X''_n = 0,079 \text{ Ом}$ $Z_n = 0,138 \text{ Ом}$ $0,138 / 0,389 = 0,35 < 2$					

Рис. 11. Розрахунок опору кола фаза-нуль згідно схеми 5



Номер ділянки, елемента		Найменування і стисла характеристика ділянки лінії, елемента	Довжина ділянки лінії, км	Опір ділянки лінії, Ом			Опір тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ перехідний опір контактів		0,02	-		0,027
2	фаза	алюмінієва шина ШМА-16	0,1	0,003	$\frac{-}{0,0014}$		
	нуль	бічний профіль		0,0037	$\frac{-}{0,0041}$		
3	фаза	алюмінієва жила кабелю 185 мм ²	0,01	0,0020	-		
	нуль	алюмінієва жила кабелю 50 мм ²		0,0074	-		
4	фаза	алюмінієва шина ШРА 73	0,02	0,003	$\frac{-}{0,0034}$		
	нуль	нульова шина		0,0032	$\frac{-}{0,0033}$		
5	фаза	алюмінієва жила проводу 4 мм ²	0,006	0,055			
	нуль	алюмінієва жила проводу 2,5 мм ²		0,088			
Разом				0,185	0,0132	0,19	0,027
Струм КЗ за умовами комутації захисного апарата		$I_k \geq 3 \cdot I_n = 3 \cdot 40 = 120 \text{ A}$					
Розрахунок дійсних значень Z_{Σ} и I_k		$Z_{\Sigma} = 0,19 \text{ Ом}$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Sigma}} = \frac{220}{0,027 + 0,19} = 1014 \text{ A} > 120 \text{ A}$					
Розрахунок опорів окремо фазного і нульового проводу (без урахування X'') для визначення відносної провідності нульового проводу		$r_{\phi} = 0,003 + 0,002 + 0,003 + 0,055 = 0,063 \text{ Ом}$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n = 0,004 + 0,0074 + 0,0032 + 0,088 = 0,092 \text{ Ом}$ $X''_n =$ $Z_n =$ $0,092 / 0,063 = 1,46 < 2$					

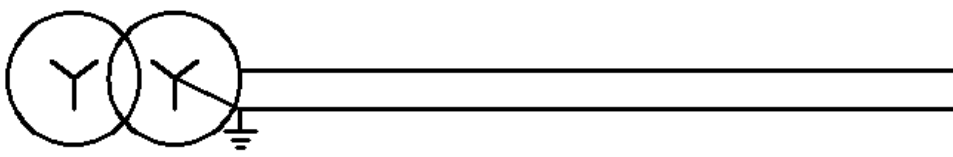
Рис. 12. Розрахунок опору кола фаза-нуль згідно схеми 6



№ 1

Номер ділянки, елемента		Найменування і стисла характеристика ділянки лінії, елемента	Довжина ділянки лінії, км	Опір ділянки лінії, Ом			Опір тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1							
2	фаза						
	нуль						
3	фаза						
	нуль						
4	фаза						
	нуль						
5	фаза						
	нуль						
Разом							
Струм КЗ за умовами комутації захисного апарата		$I_k \geq$					
Розрахунок дійсних значень Z_{Σ} и I_k		$Z_{\Sigma} =$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Sigma}}$					
Розрахунок опорів окремо фазного і нульового провoda (без урахування X') для визначення відносної провідності нульового провoda		$r_{\phi} =$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n =$ $X''_n =$ $Z_n =$					

Рис. 13. Розрахунок опору кола фаза-нуль згідно схеми 7



№ 1

Номер ділянки, елемента		Найменування і стисла характеристика ділянки лінії, елемента	Довжина ділянки лінії, км	Опір ділянки лінії, Ом			Опір тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1							
2	фаза						
	нуль						
3	фаза						
	нуль						
4	фаза						
	нуль						
5	фаза						
	нуль						
Разом							
Струм КЗ за умовами комутації захисного апарата		$I_k \geq$					
Розрахунок дійсних значень Z_{Σ} и I_k		$Z_{\Sigma} =$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Sigma}}$					
Розрахунок опорів окремо фазного і нульового провода (без урахування X') для визначення відносної провідності нульового провода		$r_{\phi} =$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n =$ $X''_n =$ $Z_n =$					

Рис. 14. Робочий бланк розрахунку опору кола фаза-нуль

Список рекомендованої літератури

1. Романюк Ю. Ф. Электричні системи та мережі / Ю. Ф Романюк. – К.: Знання, 2007. – 293 с.
2. Правила улаштування електроустановок : нормативно-технічний матеріал / під ред. Г. Є. Лискова. – Х. : Індустрія, 2008. – 424 с.
3. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://introkub.ru/6/pro_inf_013.php /](http://introkub.ru/6/pro_inf_013.php/). – Название с экрана.
4. Найфельд М. Р. Заземление, защитные меры безопасности / М. Р. Найфельд. – М.: Энергия, 1991. – 278 с.
5. Семчинов А. М. Токопроводы промышленных предприятий / А. М. Семчинов. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 264 с.
6. Спеваков П. И. Проверка на автоматическое выключение линий в сетях до 1000 В / П. И. Спеваков – М. : Энергия, 1991. – 246 с.
7. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы / С. А. Ульянов. – М. : Энергия, 1990. – 313 с.
8. Бойченко В. И. Контактные соединения токоведущих шин / В. И. Бойченко, Н. Н. Дзекцер – Л. : Энергия, 1988. – 264 с.
9. Карпов Ф. Ф. Справочник по расчету проводов и кабелей / Ф. Ф. Карпов, В. Н. Козлов. – М. : Энергия, 1989. – 356 с.
10. Дацен С. А. Схемы защитного отключения электродвигателей в сетях 380/220 В с глухозаземленной нейтралью во взрывоопасных установках / С. А. Дацен // Промышленная энергетика. – 1997. - №5. - С. 32 – 39.
11. Беляев А. В. Учет переходных сопротивлений при выборе защит и аппаратуры в сетях 0,4 кВ / А. В. Беляев, М. А. Шабад // Электрические станции. – 1981. - № 3. – С. 41-49.

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Методичні рекомендації

Укладач: **Дубовенко** Костянтин Вікторович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. ____

Тираж ____ прим. Зам. № ____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54020, м. Миколаїв, вул.. Паризької Комуни,9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.