

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

В.М.Буряк Н.А.Дейнеко

ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ЗАХИСТУ В МЕРЕЖАХ ДО 1000 В

Навчально - методичний посібник до практичних занять та самостійної роботи
з дисципліни “Електричні апарати”
(для студентів 3 - 4 курсів денної та заочної форм навчання спеціальності
6.090603 "Електротехнічні системи електроспоживання")

Харків – 2007

ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ЗАХИСТУ В МЕРЕЖАХ ДО 1000 В
Навчально - методичний посібник до практичних занять та самостійної роботи
з дисципліни “Електричні апарати” (для студентів 3 - 4 курсів денної та заочної
форм навчання спеціальності 6.090603 "Електротехнічні системи
електроспоживання").

Укл.: В.М.Буряк, Н.А. Дейнеко. - Харків: ХНАМГ, 2007. – 62 с.

Автори : В.М.Буряк Н.А.Дейнеко

Рецензент О.Г.Гриб

Схвалено кафедрою Електропостачання електричного транспорту,
протокол № 4 від 15.11. 2007р.

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕДМОВА	4
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	5
1. ЗАХИСТ ПЛАВКИМИ ЗАПОБІЖНИКАМИ	7
1.1. Умови вибору плавких запобіжників	7
1.2. Вибір запобіжників за номінальною напругою	8
1.3. Вибір запобіжників за номінальним струмом плавкої вставки	9
1.4. Перевірка чутливості дії запобіжників	14
1.5. Перевірка селективності дії запобіжників	15
1.6. Вибір запобіжника за номінальним струмом патрона	16
1.7. Вибір запобіжника за граничним струмом відключення	16
2. ЗАХИСТ АВТОМАТИЧНИМИ ВИМИКАЧАМИ	17
2.1. Умови вибору автоматичних вимикачів	17
2.2. Вибір автоматичних вимикачів за номінальною напругою	18
2.3. Вибір автоматичних вимикачів за номінальним струмом	19
2.4. Вибір струму уставки електромагнітного розчіплювача	22
2.5. Вибір автоматичних вимикачів за умовами стійкості до струмів к.з.	26
3. Особливості розрахунку струмів короткого замикання у трифазних колах змінного струму з напругою нижче 1 кВ	28
3.1. Визначення опору окремих елементів схеми електропостачання	30
а) Опір живлячої енергосистеми	32
б) Опір силових трансформаторів	33
в) Опір ліній електропередачі	34
г) Опір реакторів	35
д) Опір трансформаторів струму	35
е) Опір комутаційної апаратури	36
ж) Перехідний опір у місці короткого замикання	36
3.2. Визначення початкової величини періодичної складової струму трифазного короткого замикання	36
3.3. Визначення величини аперіодичної складової струму трифазного короткого замикання	38
3.4. Визначення ударного струму короткого замикання	39
3.5. Визначення діючої величини повного струму короткого замикання в перший період	40
3.6. Визначення однофазного струму замикання на землю	40
3.7. Визначення двофазного струму короткого замикання	42
3.8. Визначення теплового імпульсу струму короткого замикання	43
3.9. Визначення температури нагрівання струмоведучих частин при коротких замиканнях	44
ДОДАТКИ	47
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	61

ПЕРЕДМОВА

Розвиток міських електричних мереж та зростання електроспоживання вимагають постійного удосконалення організації і засобів управління енергогосподарством, застосування сучасних апаратів захисту електричних установок. У зв'язку з цим значно підвищуються вимоги до міських електричних мереж, до обов'язків яких входить забезпечення безперервного електропостачання споживачів. Персонал міських електричних мереж повинен забезпечувати справний стан всього обладнання, забезпечення економічно доцільних режимів роботи. Окрім цього, він повинен вміти оперативно і правильно вирішувати задачі, що виникають у повсякденній практиці, керуючись одержаними знаннями і відповідною технічною літературою.

Запропонований посібник має за мету допомогти одержати студентами необхідний об'єм знань, засвоїти методику розрахунків і вибору електричних апаратів захисту електричних мереж і установок напругою до 1000 В, що відповідають умовам експлуатації.

У посібник включені данні по вибору площі перерізу проводів і кабелів з урахуванням характеристик запобіжників та вимикачів; по розрахунку струмів короткого замикання мереж і установок, що ними захищаються; по перевірці відповідності автоматів захисту в режимах перевантаження і коротких замикань.

Посібник може бути також корисним інженерно-технічним робітникам, що займаються питаннями проектування та експлуатації промислових і міських електричних мереж.

У посібнику враховані діючі керівні вказівки щодо розробки засобів захисту мереж напругою до 1 кВ, вимоги держстандарту та ПУЕ. Також в ньому містяться відомості, що необхідні для розрахунків (довідникові данні, таблиці, графіки).

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Відомо, що всі провідники мають активний опір, тому при проходженні по них електричного струму вони нагріваються. Якщо провідник ізольований, то нагрівається і ізоляція. При зрощенні сили струму і часу його дії при незмінних умовах охолодження температура провідника підвищується. При цьому підвищуються втрати енергії, більш інтенсивно старіє ізоляція погіршується її діелектричні властивості, що може викликати короткі замикання і навіть пожежі, виходять з ладу контактні з'єднання.

Виходячи з цього проводи, кабелі і шини вибирають таким чином, щоб температура їх нагрівання не перевищувала допустимих величин. В залежності від матеріалу провідника, класу ізоляції і робочої напруги встановлені такі гранично допустимі температури: 70°C для неізованих проводів і шин; 60°C для проводів і кабелів з паперовою просоченою ізоляцією при напрузі до 10 кВ. Цим температурам відповідають величини гранично допустимих тривалих струмів, які наводяться в таблиці 1.3 ПУЕ. Величини допустимого струмового навантаження для деяких проводів і кабелів також наведені в таблицях. По цим таблицям можна визначати величину довготривалого допустимого струму, якщо відомі площа перерізу, тип ізоляції, робоча напруга і умови прокладання лінії або навпаки можна визначити площу перерізу струмоведучої частини по необхідному допустимому довготривалому струму навантаження і спосіб прокладання.

Щоб визначити площу перерізу провідника по умовам нагрівання, величину розрахункового струму навантаження в лінії порівнюють з найближчим більшим значенням допустимого струму, наведеного в таблиці ПУЕ. По обраному табличному струму знаходять площу перерізу. При наближених розрахунках мереж до 1000В розрахунковий струм приймають рівним номінальному струму споживача.

Проводи і кабелі, являючись елементами мережі електропостачання, зв'язують джерела живлення з електроприймачами (електродвигунами, освітлювальними приладами, нагрівальними установками і т.ін.). Електроприймачі підключають до мережі через захисні апарати (запобіжники, автоматичні вимикачі, струмові реле). Таким чином, електричний струм проходить по колу: провідник – апарат захисту – електроприймач. Якщо струм викличе у колі недопустиме нагрівання провідника, то можлива аварійна ситуація. Наприклад, при струмах перевантаження або короткого замикання провід лінії може бути пошкодженим до згоряння плавкої вставки запобіжника або спрацювання автоматичного вимикача. Тому площа перерізу струмоведучих частин, що вибрана по допустимому струму, має бути перевіреною по часо-струмовій характеристиці захисного апарата. У свою чергу апарат захисту повинен відповідати електричним параметрам електроприймача і проводу лінії.

1. ЗАХИСТ ПЛАВКИМИ ЗАПОБІЖНИКАМИ

1.1. Умови вибору плавких запобіжників

Запобіжником називають комутаційний апарат, призначений для вимикання кола, яке він захищає, шляхом руйнування спеціально передбачених для цього струмоведучих частин під дією струму, що перевищує певне значення протягом визначеного часу.

Плавкі запобіжники призначені для захисту електроустановок від перевантажень і струмів короткого замикання за рахунок плавлення спеціальної вставки, при якому відбувається розрив кола зі струмом недопустимої величини. Таким чином, запобіжник є одночасно пристроєм захисту і комутації.

Для забезпечення надійного захисту електроустаткування за допомогою плавких запобіжників їхні параметри мають відповідати умовам, наведеним у табл.1.1.

Таблиця 1.1. Умови вибору плавких запобіжників

№ п/п	Найменування параметра	Умова вибору
1	Номінальна напруга запобіжника	$U_{zn\ nom} = U_{роб\ max}$
2	Номінальний струм плавкої вставки	$I_{вс\ nom} \geq k_n I_{роб\ max}$ $I_{вс\ nom} \geq \frac{I_{пер}}{k_{пер}}$
3	Номінальний струм запобіжника	$I_{zn\ nom} \geq I_{вс\ nom}$
4	Граничний струм, що відключається запобіжником	$I_{гр\ відкл} \geq I_{кз\ max}$

У таблиці прийняті такі позначення:

$U_{zn\ nom}$ – номінальна напруга запобіжника, В;

$U_{роб\ max}$ – робоча напруга мережі, В;

- $I_{вс ном}$ – номінальний струм плавкої вставки, А;
- k_n – коефіцієнт надійності;
- $I_{роб тах}$ – максимальний робочий струм установки, яку захищають, А;
- $I_{пер}$ – розрахункова величина можливого струму перевантаження, А;
- $k_{пер}$ – коефіцієнт короточасного перевантаження;
- $I_{зп ном}$ – номінальний струм запобіжника, А;
- $I_{гр відкл}$ – граничний струм відключення, кА;
- $I_{кз тах}$ – надперехідний струм к.з. у місці встановлення запобіжника, кА.

Технічні характеристики плавких запобіжників подані у табл. Д 1.1., а їх захисні характеристики - на рис. Д 1.1 і Д 1.2.

1.2. Вибір запобіжників за номінальною напругою

Номінальною напругою запобіжників називають вказану на патроні напругу, що відповідає найбільшій напрузі мережі, в якій їх можна застосовувати.

При виборі запобіжника за номінальною напругою треба мати на увазі необхідність дотримання відповідності його номінальної напруги робочій напрузі мережі. Це пов'язано з тим, що оскільки номінальна напруга визначає довжину патрона запобіжника, то при дотриманні цієї умови створюються оптимальні умови для гасіння дуги при спрацьовуванні запобіжника та забезпечення ізоляційного проміжку після перегорання плавкої вставки.

Робоча напруга мережі не повинна перевищувати номінальну напругу запобіжника більше ніж на 10%.

1.3. Вибір запобіжників за номінальним струмом плавкої вставки

Номінальним струмом плавкої вставки називають нанесений на ній максимальний струм, який при визначеній температурі навколишнього середовища вставка витримує нескінченно довгий час. Номінальний струм плавкої вставки слід вибрати по можливості найменшим при дотриманні двох умов:

$$1. I_{вс\ ном} \geq k_n I_{роб\ max};$$

$$2. I_{вс\ ном} \geq \frac{I_{пер}}{k_{пер}}.$$

Перша умова виключає можливість перегорання плавкої вставки при тривалому протіканні через неї максимального робочого струму. Коефіцієнт надійності k_n у цій умові вибирають, виходячи з характеру навантаження. Так, при захисті лінії, що живить лампи розжарювання і нагрівальні прилади (при постійному навантаженні) $k_n = 1$; при освітленні люмінесцентними лампами $k_n = 1,25$; при освітленні лампами типу ДРЛ $k_n = 1,1$.

При захисті провідників і кабелів правилами експлуатації електроустановок передбачено виконання умови

$$I_{вс\ ном} \leq k \cdot I_{дов\ прип},$$

де $I_{дов\ прип}$ – довгостроково допустимий струм для визначеної площі перерізу провідника (табл. Д 1.2);

k – коефіцієнт, що враховує вид ізоляції.

Для провідників з гумовою, поліхлорвініловою і аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією, які прокладають в середині приміщення $k = 0,8$, для всіх провідників, що прокладають у

вибухонебезпечних виробничих приміщеннях, а також для кабелів з паперовою ізоляцією в будь-яких приміщеннях $k = 1$.

При захисті трансформаторів номінальний струм плавкої вставки за першою умовою вибирають згідно з формулою

$$I_{вс\ ном} \geq k_n \cdot I_{тр\ ном},$$

де $I_{вс\ ном}$ – номінальний струм плавкої вставки запобіжника, що захищає трансформатор, А;

k_n – коефіцієнт надійності. Для трансформаторів потужністю менше 160 кВА $k = 2 \div 3$; при потужності трансформаторів більше 160 кВА $k = 1.5 \div 2$.

Для запобіжників, що встановлені на низькій стороні знижуючого трансформатора, номінальний струм вставки вибирають за номінальним струмом трансформатора $I_{вс\ ном} \approx I_{тр\ ном}$. При цьому вибирають найближче більше по шкалі номінальних струмів значення номінального струму плавкої вставки.

Друга умова забезпечує неспрацьовування запобіжників при короткочасних перевантаженнях, при яких у мережі, яку захищають може протікати струм $I_{пер}$, який перевищує максимальний робочий струм $I_{роб\ max}$.

Такий струм може виникнути при запусках одиночних асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором, при їх самозапуску після відключення короткого замикання, при технологічних перевантаженнях механізмів, що ними обертаються. У цьому випадку час перегорання плавкої вставки буде більше часу протікання струму перевантаження.

Умовою є співвідношення

$$I_{вс\ ном} \geq \frac{I_{пер}}{k_{пер}}.$$

Урахування коефіцієнта перевантаження $k_{пер}$ дозволяє відстроїти запобіжник від спрацювання при короткочасних струмах перевантаження $I_{пер}$.

Існує встановлене тривалою практикою правило, відповідно до якого друга умова виконується, якщо струм перевантаження $I_{пер}$ не перевищує пограничного струму плавкої вставки $I_{ногр}$:

$$I_{пер} = 0.5 \cdot I_{ногр}.$$

Під пограничним струмом розуміють струм, при якому плавка вставка плавиться через проміжок часу, достатній, щоб її температура досягла встановленого значення.

Значення $k_{пер}$ залежить від характеру і тривалості перевантаження. Наприклад, при захисті електричних двигунів із короткозамкнутим ротором і легким пуском ($t_{пер} \approx 2 \div 5 \text{ с}$) $k_{пер} \approx 2.5$; при важкому пуску ($t_{пер} \approx 10 \text{ с}$) $k_{пер} \approx 1.5 \div 2$; при частих пусках ($n > 5$ за годину) $k_{пер} = 1.5 \div 2$; при пуску особливо відповідальних двигунів $k_{пер} = 1.5 \div 2$; при захисті електричних двигунів з фазним ротором $k_{пер} = 0.8 \div 1$.

Слід враховувати, що номінальний струм плавкої вставки, обраної з урахуванням $k_{пер}$, виявляється дещо завищеним, внаслідок чого запобіжник у цьому випадку не захищає устаткування від перевантаження, а тільки від к.з.

При захисті зборок, від яких живляться декілька двигунів, додатково до першої умови треба забезпечити неспрацювання запобіжника при повному навантаженні зборки і пуску найбільш потужного двигуна:

$$I_{вс ном} \geq \frac{1}{k_{пер}} \cdot \left(m \sum_1^{n-1} I_{роб тах} + I_{пуск тах} \right),$$

де $\sum_1^{n-1} I_{роб тах}$ – сума максимальних робочих струмів усіх двигунів за винятком двигуна з максимальним пусковим струмом, А;

$I_{пуск тах}$ – пусковий струм двигуна з найбільшим пусковим струмом, А;

m – коефіцієнт одночасності роботи двигунів;

а також при самозапуску електродвигунів

$$I_{вс ном} \geq \frac{I_{сз}}{k_{пер}},$$

де $I_{сз}$ – струм самозапуску, величину якого можна визначити за формулою

$$I_{сз} = \frac{I_{пуск} \cdot Z_{дв екв} \cdot n}{\sqrt{(r_{вн} + r_{дв})^2 + (x_{вн} + x_{дв})^2}},$$

де n – кількість двигунів, підключених до зборки;

$$Z_{дв екв} = \frac{U_{дв ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{пуск}},$$

$r_{\text{вн}}$; $x_{\text{вн}}$ – сумарні активні й реактивні опори зовнішньої мережі (енергосистеми, понижуючого трансформатора, кабелів) до затисків електродвигуна.

$r_{\text{дв}}$; $x_{\text{дв}}$ – відповідно активний і реактивний опори електродвигуна.

Активний опір двигуна орієнтовно знаходять за формулою

$$r_{\text{дв}} \approx (0.2 \div 0.3) \cdot Z_{\text{дв экв}}.$$

Реактивний опір

$$x_{\text{дв}} = \sqrt{Z_{\text{дв}}^2 - r_{\text{дв}}^2}.$$

При виборі плавких вставок для захисту двигунів, керованих контакторами і магнітними пускатчами, до плавких вставок ставлять додаткову вимогу:

$$I_{\text{вс ном}} \leq \frac{I_{\text{кз}}}{10 - 15}.$$

Це пов'язано з необхідністю забезпечити перегорання плавкої вставки під дією струму к.з. за час від 0.15 до 2 с, тобто до того часу, коли контакти керуючого апарата почнуть розходитися.

При виборі плавкої вставки запобіжників, які захищають вимірювальні трансформатори напруги, керуються умовою

$$I_{\text{вс ном}} \geq \frac{I_{\text{нав тах}}}{2.5}.$$

Слід враховувати, що при з'єднанні вторинних обмоток трансформатора у зірку, прилади підключають на фазну U_{ϕ} і лінійну $U_{\text{л}}$ напругу.

У цьому випадку

$$I_{\text{нав max}} = \frac{S_{\text{ср}} + 0.58 \cdot S_{\text{л max}} + 0.48 \cdot S_{\text{л min}}}{U_{\phi}},$$

де S_{ϕ} – найбільше значення потужності, що споживає навантаження, включене на фазну напругу, ВА;

$S_{\text{л max}}$ – найбільше значення потужності, що споживає навантаження, включене на лінійну напругу; ВА;

$S_{\text{л min}}$ – найменше значення потужності, що споживає навантаження, включене на лінійну напругу; ВА;

Номінальний струм плавкої вставки запобіжників для захисту електромагнітів вмикання вибирають відповідно до умови

$$I_{\text{вс ном}} = 0.3 \cdot I_{\text{нав max}},$$

де $I_{\text{нав max}}$ – максимальний струм у колі електромагніта, А.

1.4. Перевірка чутливості дії запобіжників

Перевірку чутливості проводять з метою контролю надійності захисту плавкою вставкою тієї ділянки мережі, на якій встановлено запобіжник.

До коефіцієнта чутливості $k_{\text{ч}}$, що являє собою кратність мінімального струму к.з. $I_{\text{кз min}}$ у найбільш віддаленій точці ділянки, яку захищають, до номінального струму плавкої вставки, ставлять такі вимоги:

- для захисту електроустановок у вибухонебезпечному середовищі

$$k_u = \frac{I_{кз min}}{I_{вс ном}} \geq 3 ,$$

- у вибухобезпечному середовищі

$$k_u = \frac{I_{кз min}}{I_{вс ном}} \geq 4 .$$

1.5. Перевірка селективності дії запобіжників

При застосуванні однотипних запобіжників селективними вважаються ті, що розрізняються на два ступеня номінальних струмів плавких вставок.

При використанні різнотипних запобіжників селективність перевіряють зіставленням їхніх захисних характеристик з урахуванням 25% розкиду часу їх спрацьовування .

Зони можливих характеристик, побудовані з урахуванням розкиду, не повинні накладатися або перетинатися у межах від номінального струму плавкої вставки до найбільш імовірного струму к.з. за попереднім запобіжником.

На практиці зіставляють час плавлення плавкої вставки з найбільшим номінальним струмом t_{σ} із часом плавлення плавкої вставки з меншим номінальним струмом t_m при однакових струмах у колі. При 25% розкиді характеристик селективність забезпечується, якщо виконується умова

$$t_{\sigma} > 1.7 t_m .$$

1.6. Вибір запобіжника за номінальним струмом патрона

Номінальний струм запобіжника $I_{n\text{ ном}}$ – це найбільший з усіх номінальних струмів плавких вставок $I_{вс\text{ ном}}$, що можуть бути застосовані у патроні розглядуваного типу запобіжника.

Дотримання умови

$$I_{n\text{ ном}} \geq I_{вс\text{ ном}}$$

забезпечує нормальний температурний режим у всьому діапазоні номінальних струмів плавких вставок необмежено довгий час.

1.7. Вибір запобіжника за граничним струмом відключення

Граничним струмом відключення $I_{гр\text{ відкл}}$ називають найбільший струм короткого замикання, який запобіжник здатний розірвати (відключити).

Дотримання умови

$$I_{гр\text{ відкл}} \geq I_{кз\text{ max}}$$

забезпечує гасіння дуги при перегорянні плавкої вставки без пошкодження самого запобіжника. Струм $I_{кз\text{ max}}$ відповідає розрахунковому значенню періодичної складової трифазного струму короткого замикання у місці установки запобіжника:

$$I_{кз\text{ max}} = I''.$$

2. ЗАХИСТ АВТОМАТИЧНИМИ ВИМИКАЧАМИ

2.1. Умови вибору автоматичних вимикачів

Автоматичним називають вимикач, призначений для вмикання, проведення струму і вимикання струму в нормальних умовах в колі, а також для вмикання, проведення певний час та автоматичного вимикання струму в ненормальних умовах, таких як струми короткого замикання і струми перевантаження. Такі вимикачі призначені для нечастих комутацій кіл.

Автоматичні вимикачі призначені для захисту електроустановок напругою до 1000 В від коротких замикань і перевантажень.

Для забезпечення надійного захисту електроустановок за допомогою автоматичних вимикачів їхні параметри мають відповідати умовам, наведеним у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Умови вибору автоматичних вимикачів

№ п/п	Найменування параметра	Умова вибору
1	Номінальна напруга	$U_{a\text{ ном}} \geq U_{\text{роб тах}}$
2	Номінальний струм автомата	$I_{a\text{ ном}} \geq I_{y\text{ ном}}$
3	Номінальний струм теплового розчіплювача	$I_{p\text{ ном}} \geq k_{np} \cdot I_{\text{роб тах}}$
4	Граничний відключаємий автоматом струм	$I_{\text{гр відкл}} \geq I_{\text{кз тах}}$
5	Електродинамічна стійкість	$i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд розр}}$

У таблиці прийняті такі позначення:

$U_{a\text{ ном}}$ – номінальна напруга автоматичного вимикача, В;

$U_{\text{роб м}}$ – робоча напруга мережі, В;

$I_{aном}$ – номінальний струм автоматичного вимикача, А;

$I_{уном}$ – номінальний струм установки, А;

$I_{рном}$ – номінальний струм розчіплювача із залежною характеристикою, А;

$k_{нр}$ – коефіцієнт надійності, що враховує розкид по струму спрацьовування розчіплювача із залежною характеристикою;

$I_{роб max}$ – максимальний робочий струм захищаємої електроустановки, А;

$I_{кз max}$ – максимальний струм короткого замикання в місці встановлення автоматичного вимикача, кА;

$i_{дин}$ – струм електродинамічної стійкості автоматичного вимикача, кА;

$i_{уд розр}$ – ударне розрахункове значення струму короткого замикання в місці встановлення автоматичного вимикача, кА.

Технічні характеристики автоматичних вимикачів наведені в таблиці Д 2.1, захисні характеристики – на рис. Д 2.1, Д 2.2.

2.2. Вибір автоматичних вимикачів за номінальною напругою

Номінальною напругою автоматичного вимикача називають наведене в паспорті значення напруги, чисельно рівне напрузі електричної мережі, для роботи в якій цей вимикач призначений.

При виборі вимикачів за номінальною напругою слід виконувати умову

$$U_{aном} \geq U_{уном} \approx U_{роб max} ,$$

де $U_{уном}$ – номінальна напруга установки, для якої вибирають вимикач, В.

У довідниках на електричні апарати наведена найбільша робоча напруга

$$U_{aном} + \Delta U_{aном} \geq U_{уном} + \Delta U_{уроб} = U_{роб max},$$

де $\Delta U_{уроб}$ – можливе відхилення робочої напруги від номінальної в умовах експлуатації, В;

$\Delta U_{aном}$ – допустиме підвищення напруги понад номінальну, при якому завод-виготовник гарантує нормальну роботу вимикача. Ця величина досягає 15% від номінальної, В;

$U_{уном}$ – номінальна напруга установки, В.

2.3. Вибір автоматичних вимикачів за номінальним струмом

Номінальним струмом автоматичного вимикача називають найбільший струм (діюче значення), який апарат здатний довгостроково проводити при заданих значеннях номінальної напруги і нормованої температури навколишнього середовища. При цьому температура частин апарата не повинна перевищувати допустиму, встановлену для тривалої роботи.

Відповідно до ДСТ номінальний струм вимикачів нормований при температурі навколишнього повітря

$$\theta^{\circ} = +35^{\circ}C .$$

Номінальним струмом розчіплювача $I_{рном}$ називають зазначений у паспорті автоматичного вимикача струм, тривале протікання якого не викликає спрацювання розчіплювача.

Номінальний струм розчіплювача може відрізнитися від номінального струму вимикача, оскільки у вимикач можуть бути вмонтовані розчіплювачі з меншим номінальним струмом. Однак його величина має перевищувати

найбільше значення робочого струму, що довгостроково протікає по елементу мережі, що захищають з урахуванням можливих перевантажень $I_{роб\ max}$, а також розкиду характеристик розчіплювача:

$$I_{р\ ном} \geq k_{н\ р} \cdot I_{роб\ max},$$

де $k_{н\ р}$ – коефіцієнт надійності розчіплювача.

Коефіцієнт надійності, що враховує розкид характеристик розчіплювача, приймають у межі від 1.1 до 1.3.

Для захисту від перевантаження кабелів усіх марок номінальний струм розчіплювачів з обмежено залежною характеристикою вибирають за умовою

$$I_{р\ ном} \leq I_{дов\ прип},$$

де $I_{дов\ доп}$ – довгостроково допустимий струм для провідників визначеною площею перерізу.

Для захисту від перевантаження двигунів

$$I_{р\ ном} \geq I_{дв\ ном},$$

де $I_{дв\ ном}$ – номінальний струм електродвигуна.

Кожний з типів автоматичних вимикачів має струмові розчіплювачі, номінальний струм яких визначений установленою шкалою.

Якщо розрахункове значення $I_{роб\ max}$ не збігається зі шкалою номінальних струмів розчіплювача, то при його виборі необхідно приймати найближче більше значення $I_{р\ ном}$.

Теплові розчіплювачі автоматичних вимикачів типу А3700 калібрують при температурі навколишнього середовища $\theta^0 = 40^0 C$ при протіканні струму по трьох фазах. При цьому вони не спрацьовують при протіканні номінального струму $I_{p\text{ном}}$; спрацьовують при струмі $1,05 I_{p\text{ном}}$ не менше, ніж за 2 години при відліку з холодного стану і при струмі $1,25 I_{p\text{ном}}$ не менше ніж за 2 години з нагрітого стану.

Теплові розчіплювачі автоматичних вимикачів типу АЕ20 спрацьовують при струмі $1,25 I_{p\text{ном}}$ протягом 20 хвилин.

Теплові розчіплювачі автоматичних вимикачів типу ВА50 із нагрітого стану спрацьовують при струмі $1,35 I_{p\text{ном}}$ протягом 1 години і при струмі $1,25 I_{p\text{ном}}$ менше ніж за 2 години.

Для визначення часу спрацьовування теплових розчіплювачів залежно від струму в елементі, що захищають, мережі використовують захисні характеристики вимикачів $t = f\left(\frac{I}{I_{p\text{ном}}}\right)$ (рис. Д 2.1, Д 2.2).

Номінальний струм теплових розчіплювачів і струм спрацьовування захисту від перевантаження при температурі навколишнього середовища, відмінної від нормованої, визначають за формулою

$$I_{p\text{ном}\theta} = I_{p\text{ном}} \cdot [1 + k_{\theta} \cdot (\theta_H - \theta)],$$

де k_{θ} – температурний коефіцієнт (при розрахунках $k_{\theta} = 0.005 \div 0.0065$);

θ_H – нормована температура (наприклад, для А3700 $40^0 C$ для А3100 $25^0 C$);

θ – дійсна температура навколишнього середовища, $^0 C$.

Час спрацьовування захисту від перевантаження вибирають з умови неспрацьовування захисту при пуску або самозапуску електродвигуна

$$t_{спр\ пуск} \geq (1,5 \div 2)t_{пуск} ,$$

де $t_{спр\ пуск}$ – час спрацьовування захисту при струмі, який дорівнює пусковому;

$t_{пуск}$ – тривалість пуску або самозапуску.

Час спрацьовування захисту від перевантаження у вимикачів із комбінованими розчеплювачами не регулюється і складає від 8 до 20 с залежно від номінального струму розчіплювачів $I_{р\ ном}$. Тривалість пуску електродвигунів при легких умовах пуску складає від 0.5 до 2 с, а при важких – від 5 до 10 с. Таким чином, неспрацьовування захисту при перевантаженнях, зв'язаних з пуском, забезпечується для більшості вимикачів. Для уточнення ступеня відстройки від пускових струмів за часом використовують захисні характеристики вимикачів.

2.4. Вибір струму уставки електромагнітного розчіплювача

Струмом уставки електромагнітного розчіплювача (струмом відсічки) називають мінімальний струм, при протіканні якого через захищувану ділянку кола, розчіплювач спрацьовує.

Для захисту провідників і кабелів усіх марок від струмів к.з. струм спрацьовування відсічки $I_{с\ в}$ вибирають відповідно до таких умов:

- для провідників з полівінілхлорідною, гумовою та іншою аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією всередині приміщень

$$I_{с\ в} \leq 0,8 \cdot I_{дов\ доп} ;$$

- для вибухобезпечних виробничих приміщень, а також для кабелів із паперовою ізоляцією

$$I_{св} \leq I_{довдон} .$$

При захисті автоматичними вимикачами електричних двигунів струм відсічки відстроюють від пускового струму електродвигуна за умовою

$$I_{св} \geq k_n \cdot I_{пуск},$$

де $I_{пуск} = k_i \cdot I_{двном}$ – пусковий струм двигуна, А. Пусковий струм двигуна можна визначити за величиною номінального струму двигуна $I_{двном}$ з урахуванням коефіцієнта кратності пускового струму k_i ;

$k_n = 1,05 \cdot k_з \cdot k_a \cdot k_p$ – коефіцієнт надійності відстройки від пускового струму електродвигуна; 1,05 – коефіцієнт, що враховує можливість підвищення напруги в режимі, який на 5% вище номінальної напруги двигуна, $k_з$ – коефіцієнт запасу; k_a – коефіцієнт, що враховує наявність аперіодичної складової у пусковому струмі електродвигуна; k_p – коефіцієнт, що враховує можливий розкид струму спрацьовування відсічки щодо уставки.

Для наближених розрахунків значення пускового струму електродвигуна приймають рівним каталожному, а значення коефіцієнтів вибирають з табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Значення коефіцієнтів для розрахунків струму спрацьовування відсічки електромагнітних розчіплювачів

Тип вимикача	k_z	k_a	k_p	k_n
A3100, АП-50, А3700, ВА, АЕ-20	1.1	1.4	1.3	2.1
A3120, А3130, А3140	1.1	1.4	1.15	1.9

Для більш точних розрахунків слід знаходити значення $I_{\text{пуск}}$ з урахуванням впливу опору зовнішньої мережі, що дозволяє знизити значення $I_{\text{св}}$

$$I_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск кат}} \cdot \frac{Z_{\text{дв}}}{\sqrt{(r_{\text{зовн}} + r_{\text{дв}})^2 + (x_{\text{зовн}} + x_{\text{дв}})^2}},$$

де $I_{\text{пуск кат}}$ – значення пускового струму двигуна, взятє з каталога, А;

$$Z_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{дв ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{пуск}}},$$

$r_{\text{зовн}}, x_{\text{зовн}}$ – активний і реактивний опори зовнішньої мережі (енергосистеми понижуючого трансформатора, кабелів) до затисків електродвигуна.

Активний опір двигуна знаходять за формулою

$$r_{\text{дв}} \approx (0,2 \div 0,3) \cdot Z_{\text{дв}}.$$

Реактивний опір

$$x_{\text{дв}} = \sqrt{Z_{\text{дв}}^2 - r_{\text{дв}}^2}.$$

Вибір струму спрацьовування електромагнітного елемента автоматичного вимикача (струму відсічки) у колі живлення зборок і щитів проводять відповідно до двох умов:

- 1) неспрацьовування при максимальному робочому струмі з урахуванням його збільшення при самозапуску електродвигунів;

$$I_{св} \geq k_n \cdot I_{сзн},$$

де $k_n = 1,05 \cdot k_z \cdot k_a \cdot k_p$ – коефіцієнт надійності (прийнятий з табл. 2.2);

$I_{сзн} = k_{сзн} \cdot I_{роб\ max}$ – струм самозапуску, визначений при розрахунках.

Для окремих складань $I_{сзн}$ приймають рівним сумі пускових струмів електродвигунів та іншого навантаження зборки, яке бере участь у самозапуску.

При відсутності самозапуску двигунів і для навантаження без пускових струмів струм відсічки визначають за формулою

$$I_{св} \geq k_n \cdot I_{роб\ max}.$$

Коефіцієнт надійності для вимикачів типу ВА, АЗ700, АЗ110, АП50, АЕ-20 приймають рівним 1.5; для АЗ120, АЗ130, АЗ140 - 1.35;

- 2) неспрацьовування при повному навантаженні щита (зборки) і пуску найбільш потужного електродвигуна

$$I_{св} \geq k_n \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} I_{роб\ max\ i} + I_{пуск\ max} \right),$$

де $\sum_{i=1}^{n-1} I_{роб\ max\ i}$ – сума максимальних робочих струмів струмоприймачів, що

живляться від щита або зборки, крім двигуна з найбільшим пусковим струмом, А;

$I_{пуск\ max}$ – пусковий струм двигуна з найбільшим пусковим струмом, А.

2.5. Вибір автоматичних вимикачів за умовами стійкості до струмів к.з.

Вимикачі вибирають так, щоб значення граничного струму відключення, електродинамічної і термічної стійкості вимикачів були не менше відповідних параметрів к.з. у місці його встановлення.

Граничним струмом відключення $I_{гр\ відкл}$ вимикача називають максимальне значення струму к.з., який вимикач здатний включити і відключити декілька разів, залишаючись у справному стані

$$I_{гр\ відкл} \geq I_{кз\ max}.$$

У той же час вимикач у включеному положенні має забезпечити пропускання по ньому струму к.з., залишаючись у справному стані, тобто бути стійким до струмів наскрізного к.з. Цю властивість вимикача характеризують електродинамічною і термічною стійкістю.

Електродинамічну стійкість характеризують амплітудою ударного струму к.з. $i_{дин}$, що здатний пропустити вимикач без залишкових деформацій деталей або недопустимого відкиду контактів, які можуть призвести до їхнього приварювання або вигорання. Умовою вибору вимикача за електродинамічною стійкістю є

$$i_{\text{дин}} \geq i_{\text{розр}},$$

де $i_{\text{розр}}$ – розрахункове амплітудне значення ударного струму к.з.

Якщо значення електродинамічної стійкості в технічних характеристиках вимикача не наведено, то це означає, що стійкість вимикача визначається його комутаційною спроможністю.

На термічну стійкість автоматичні вимикачі не перевіряють, оскільки більшість з них є термічно стійкими при всіх термінах спрацьовування, обумовлених їх захисними характеристиками.

3. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ У ТРИФАЗНИХ КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ З НАПРУГОЮ ДО 1000В

Розрахунок струмів короткого замикання в мережах змінного струму напругою до 1 кВ із глухозаземленою нейтраллю проводять при необхідності вибору і перевірки електроустаткування за умовами КЗ.

При виборі уставок пристроїв захисту та автоматичних комутаційних апаратів, а також при виборі заземлюючих пристроїв розрахунок ведуть у такій послідовності:

1. Складають розрахункову схему кола короткого замикання;
2. Складають еквівалентну схему заміщення;
3. Розраховують опори усіх елементів, зазначених у схемі заміщення;
4. Послідовно перетворюючи схему, приводять її до найбільш простого вигляду, при якому джерело живлення було б зв'язане з точкою КЗ одним результуючим опором;
5. Розраховують струми КЗ для вибраних характерних точок схеми електропостачання.

Розрахункова схема (рис. ДЗ.1(а)) являє собою спрощену електричну схему з позначенням всіх її основних елементів (силові трансформатори, лінії електропередачі, реактори, компенсуючі прилади і т.ін.), кожний з цих елементів нумерують і наносять на розрахункову схему з усіма відомими параметрами:

- середня напруга;
- індуктивний та активний опори та довжина ліній електропередачі;
- номінальні величини напруги, струму й потужності елемента.

Схему заміщення (рис. ДЗ.1(б)) складають для кожної розрахункової точки КЗ, а кожний елемент такої схеми подають у вигляді символу опору і позначають його дробом. У чисельнику дробу вказують порядковий номер опору, а в знаменнику — його числове значення. При складанні схем заміщення

для електроустановок з напругою більше 1000 В, як правило, враховують індуктивний опір силових трансформаторів, реакторів, ліній електропередачі.

Активний опір враховують тільки для повітряних ліній з невеликою площиною поперечного перерізу та ліній із сталевими проводами, а також для кабельних ліній відносно великої довжини.

Активний опір силових трансформаторів враховують при середній номінальній напрузі ступеня, де знаходиться точка КЗ, меншій за 500 В і при потужності трансформаторів $S_{тр.ном} \leq 1000$ кВА. При розгляді еквівалентних схемах заміщення електроустановок напругою до 1000 В враховують як індуктивний, так і активний опір всіх елементів короткозамкнутого кола.

Розрахункові точки КЗ у схемах намічають, виходячи з призначення розрахунків. Так, при розрахунках струму КЗ, для вибору обладнання і ліній електропередачі точки КЗ намічають таким чином, щоб по обладнанню, що вибирається, протікав максимальний струм.

При розрахунках струмів КЗ для визначення чутливості приладів релейного захисту розрахункові точки вибирають у кінці зони, що захищається, де струми КЗ мають мінімальне значення.

Перетворення схеми заміщення при визначенні струмів КЗ у намічених точках виконують у напрямку від джерела живлення до місця КЗ. Схему приводять до найпростішого вигляду послідовно з'єднаних опорів, користуючись відомими правилами складання паралельного й послідовного їх включення. Індуктивні й активні опори до точки КЗ складають окремо і вже по них знаходять результуючий (повний) опір $Z_{рез}$.

Для вибору і перевірки електроустаткування за умовами КЗ розрахунку підлягають:

- 1) початкове значення періодичної складової струму КЗ;
- 2) аперіодична складова струму КЗ;
- 3) ударний струм КЗ;
- 4) діюче значення періодичної складової струму КЗ у будь-який момент часу аж до розрахункового часу розмикання пошкодженого кола.

Для вибору уставок захисту розраховують максимальне і мінімальне значення періодичної складової струму КЗ у початковий і будь-який момент часу аж до часу розмикання пошкодженого кола.

Для вибору заземлюючих пристроїв розраховують струм однофазного КЗ. При складанні еквівалентних схем заміщення параметри елементів вихідної розрахункової схеми приводять до ступеня напруги, на якій знаходиться точка КЗ, а опори всіх елементів схеми заміщення виражають у міліомах.

3.1. Визначення опору окремих елементів схеми електропостачання

При розрахунках струмів КЗ в електроустановках, що одержують живлення безпосередньо від мережі енергосистеми, допустимо вважати, що понижуючі трансформатори включені до джерела незмінної напруги через еквівалентний опір системи. Величину цього опору (x_c) в міліомах, приведену до ступеню низької напруги, розраховують за формулою

$$x_c = \frac{U_{cpHH}^2}{\sqrt{3} I_{kBH} U_{cpBH}} = \frac{U_{cpHH}^2}{S_K} \cdot 10^{-3},$$

де U_{cpHH} - середня напруга мережі, підключеної до обмотки нижчої напруги трансформатора, В;

U_{cpBH} - середня напруга мережі, до якої підключена обмотки вищої напруги трансформатора, В;

I_{kBH} - діюче значення періодичної складової струму при КЗ на виводах обмотки вищої напруги трансформатора, кА;

S_K - потужність КЗ на виводах обмотки вищої напруги трансформатора, МВА;

При відсутності вказаних даних опір (x_c) в міліомах допускається розраховувати за формулою

$$x_c = \frac{U_{cpHH}^2}{\sqrt{3} I_{вимк.ном} U_{cpBH}},$$

де $I_{вимк.ном}$ - номінальний струм вимикання вимикачів, встановлених в електричній мережі, до якої підключено понижуючий трансформатор, кА.

У тих випадках, коли понижуючий трансформатор підключено до мережі електросистеми через реактор, повітряну або кабельну лінію, довжиною більше 1 км, необхідно враховувати не тільки індуктивні а і активні опори цих елементів.

Розрахунки опорів елементів схеми електропостачання виконують в міліомах. При цьому враховують опір живлячої системи, індуктивні, активні опори обмоток понижуючого трансформатора, опір відповідних елементів кіл, приєднаних до його вторинної обмотки (кабелі, проводи, шини, обмотки трансформаторів струму та катушки автоматичних вимикачів), перехідні опори контактів комутаційної апаратури (рубильники, автоматичні вимикачі, контактори), контакти в місцях приєднання шин та кабелів. Величини опорів перелічених елементів приймають відповідно до даних, наведених у табл. Д1.1, Д3.2.

При визначенні опору апаратури слід враховувати, що він має відповідати максимальному робочому струму вторинної обмотки понижуючого трансформатора $I_{p.max}$:

$$I_{p.max} = \frac{k_{пер} \cdot S_{T ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{T ном HH}},$$

де $S_{T ном}$ – номінальна потужність понижуючого трансформатора, кВ;

$U_{T ном HH}$ – номінальна напруга вторинної обмотки трансформатора, кВ;

$k_{пер}$ – коефіцієнт допустимого перевантаження трансформатора, рівний 1,5.

Повний результуючий опір до точки КЗ розраховують за формулою

$$Z_{pez} = \sqrt{\left(\sum_1^n r_i\right)^2 + \left(\sum_1^n x_i\right)^2},$$

де r_i, x_i – активні й реактивні опори відповідних елементів кола короткого замикання, мОм.

а) Опір живлячої енергосистеми

При визначенні струмів КЗ на шинах понижуючих підстанцій енергопостачаюча організація задає параметри режиму КЗ — потужність КЗ (S_K) або стале значення струму КЗ (I_K), що зв'язані між собою рівнянням

$$S_K = \sqrt{3} \cdot I_K \cdot U,$$

де I_K - стале значення струму КЗ, кА;

S_K - потужність КЗ, МВА;

U - напруга мережі, де визначається струм КЗ, кВ.

Величину активного й реактивного опору живлячої енергосистеми до виводів вищої напруги (ВН) понижуючого трансформатора знаходять за методикою розрахунку струму КЗ у мережах вище 1000 В. Одержані значення опору системи приводять до сторони нижчої напруги згідно з формулами

$$x_c = x_{cBH} \cdot \left(\frac{U_{Tном.НН}}{U_{Tном ВН}}\right)^2; \quad r_c = r_{cBH} \cdot \left(\frac{U_{Tном.НН}}{U_{Tном ВН}}\right)^2,$$

де x_c, r_c – відповідно індуктивний і активний опори електросистеми, приведені до сторони нижчої напруги, Ом;

x_{cBH}, r_{cBH} – відповідно індуктивний і активний опори електросистеми на стороні високої напруги, Ом;

$U_{T_{ном.НН}}, U_{T_{ном.ВН}}$ – відповідно номінальні напруги обмоток низької і високої напруги понижуючого трансформатора, В.

Величину реактивної складової опору системи можна визначити згідно з формулами

$$x_c = \frac{1.05 \cdot U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_K^{(3)}} \quad \text{або} \quad x_c = \frac{1.05 \cdot U_{ном}^2}{S_K},$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга, кВ;

1.05 – коефіцієнт, що враховує підвищення значення номінальної напруги до середньої напруги на початку лінії;

I_K – стале діюче значення струму КЗ на шинах центру живлення або розподільного пункту, кА;

S_K – потужність короткого замикання на шинах центру живлення або розподільного пункту, МВА.

Величина активної складової опору системи відносно її реактивної складової зневажливо мала, тому при розрахунках повного опору системи її, як правило, не враховують

Якщо понижуючий трансформатор підключено до мережі енергосистеми через реактор, повітряну або кабельну мережу, необхідно враховувати не тільки індуктивні, а й активні опори цих елементів.

б) Опір силових трансформаторів

Активний і реактивний опори понижуючих трансформаторів у мОм приводять до сторони низької напруги за формулами

$$Z_T = 10^4 \cdot \frac{u_{\%} \cdot U_{T_{ном.НН}}^2}{S_{T_{ном}}^2};$$

$$r_T = 10^6 \cdot \frac{P_{K\text{НОМ}} \cdot U_{T\text{НОМ.НН}}^2}{S_{T\text{НОМ}}^2} ;$$

$$x_T = \sqrt{u_{\%}^2 - \left(\frac{100 P_{K\text{НОМ}}}{S_{T\text{НОМ}}}\right)^2} \cdot \frac{U_{T\text{НОМ.НН}}^2}{S_{T\text{НОМ}}} \cdot 10^4 ,$$

де $S_{T\text{НОМ}}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА;

$U_{T\text{НОМ.НН}}$ – номінальна лінійна напруга обмотки нижчої напруги, кВ;

$P_{K\text{НОМ}}$ – потужність втрат КЗ у трансформаторі, кВт;

$u_{\%}$ – напруга КЗ трансформатора, %.

Величини опору стандартних понижуючих трансформаторів, приведені до вторинної напруги 0.4 кВ, наведені у табл. Д3.3.

в) Опір ліній електропередачі

Активний і індуктивний опори кабельних ліній визначають за формулами

$$x_{\cdot} = x_{\text{нит}} \cdot l ; \quad r = r_{\text{нит}} \cdot l$$

де l – довжина лінії, км;

$r_{\text{нит}}, x_{\text{нит}}$ – відповідно питомі активні й реактивні опори ліній Ом/км.

Питомі опори прямої послідовності кабелів з алюмінієвими жилами наведені у табл. Д3.4. Величину $x_{\text{нит}}$ для кабелів до 1 кВ з достатньою для практичних розрахунків точністю можна прийняти 0,07 Ом/км.

Ці ж формули використовують і для визначення активного і реактивного опорів повітряних ліній електропередачі.

Для повітряних ліній 0.4 кВ з кольорових металів приймають $x_{\text{нит}} = 0.3$ мОм/м. Величину питомого активного опору вибирають, виходячи з величини площі перерізу проводів (табл. Д3.5).

Опір шин розподільних пристроїв і щитів шин довжиною менше 5 м можна не враховувати.

г) Опір реакторів

Активний опір струмобмежуючого реактора r_p у міліомах розраховують за формулою

$$r_p = \frac{\Delta P_{p.ном}}{I_{p.ном}^2} \cdot 10^3 ,$$

де $\Delta P_{p.ном}$ - втрати активної потужності у фазі ректора при номінальному струмі, Вт;

$I_{p.ном}$ - номінальний струм реактора, А.

У мережах 0.4 кВ використовують реактори типу РТТ-0.38-50-0.14 з такими характеристиками:

$$U_{ном} = 0.38 \text{ кВ};$$

$$I_{ном} = 50 \text{ А};$$

$$x_p = 140 \text{ мОм};$$

$$r_p = 16 \text{ мОм для реакторів з мідною обмоткою};$$

$$r_p = 17 \text{ мОм для реакторів з алюмінієвою обмоткою}.$$

д) Опір трансформаторів струму

При розрахунках струмів КЗ в електроустановках напругою до 1 кВ слід враховувати як індуктивний, так і активний опори первинних обмоток цих багатовиткових вимірювальних трансформаторів струму, що включені в коло КЗ. Опір первинних обмоток вимірювальних трансформаторів на струм більше 500 А з метою спрощення розрахунків можна не враховувати. Параметри деяких трансформаторів струму наведені у табл. ДЗ.2.

е) Опір комутаційної апаратури

Опір автоматичних вимикачів, рубильників, і т.ін. вибирають за паспортними даними цих апаратів. На практиці їх часто взагалі не враховують, оскільки їхній вплив на величину струму КЗ не перевищує 5% поблизу трансформатора і знижується в міру віддалення від нього. Для більш точних розрахунків використовують дані табл. ДЗ.1.

Для приблизного урахування опору контактів приймають $r_k = 0,1$ мОм - для кабелів, $r_k = 0,01$ мОм - для шинопроводів, $r_k = 1,0$ мОм - для комутаційних апаратів.

ж) Перехідний опір у місці короткого замикання

При визначенні максимального струму трифазного металевого короткого замикання перехідний опір у місці пошкодження, як правило, не враховують. Однак при визначенні мінімального струму трифазного і двофазного КЗ струмообмежуючу дію дуги у місці пошкодження слід враховувати. У цьому випадку в розрахункову схему вводять додатковий опір $R_{II} = 15$ мОм, що враховує всю сукупність перехідних опорів комутаційної апаратури і опір електричної дуги у місці КЗ.

Таким чином, підсумковий опір від джерела живлення до точки КЗ у мережах 0.4 кВ знаходять за формулою

$$Z_{pez} = \sqrt{\left(\sum_1^n r_i + R_{II}\right)^2 + \left(\sum_1^n x_i\right)^2}.$$

3.2. Визначення початкової величини періодичної складової струму трифазного короткого замикання

При електропостачанні електроустановки від енергосистеми через понижуючий трансформатор початкове діюче значення періодичної

складової трифазного струму КЗ у кА (без урахування підживлення від електродвигунів) розраховують згідно з формулою

$$I_{n0} = I_{K\max}^{(3)} = \frac{1.05 \cdot U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}},$$

де $U_{ном}$ – лінійна номінальна напруга в мережі, де мало місце КЗ, В;

1.05 – коефіцієнт, що враховує можливість перевищення допустимої напруги на 5%;

r_{Σ} та x_{Σ} – відповідно сумарний активний та сумарний індуктивний опори прямої послідовності кола КЗ, мОм. Ці опори дорівнюють

$$r_{1\Sigma} = r_m + r_{TA} + r_{кв} + r_{ш} + r_k + r_{1кб} + r_{\partial},$$

$$x_{1\Sigma} = x_c + x_m + x_{TA} + x_{кв} + x_{ш} + x_{1кб},$$

де r_m та x_m – активний та індуктивний опори прямої послідовності понижуючого трансформатора, мОм;

r_{TA} та x_{TA} – активний та індуктивний опори первинних обмоток трансформаторів струму, мОм;

x_c – еквівалентний індуктивний опір системи до понижуючого трансформатора, мОм, приведений до ступеню нижчої напруги;

$r_{кв}$ та $r_{кв}$ – активний та індуктивний опори струмових обмоток автоматичних вимикачів, мОм;

$r_{ш}$ та $x_{ш}$ – активний та індуктивний опори шинопроводів, мОм;

r_k – сумарний опір контактів, мОм;

$r_{1кб}$ та $x_{1кб}$ – активний та індуктивний опори прямої послідовності кабелів, мОм;

r_{∂} – активний опір дуги в місті КЗ, мОм.

Сумарний струм у місці КЗ з урахуванням струму підживлення від працюючих у мережі електродвигунів, підключених поблизу місця КЗ

$$I_{n0} = I_{K\max}^{(3)} + I_{\partial\vartheta}^{//} ,$$

де $I_{\partial\vartheta}^{//}$ – періодична складова струму підживлення від електродвигунів, яку при спрощених розрахунках визначають за формулою

$$I_{\partial\vartheta}^{//} = 2.29 \cdot I_{T\text{ ном}} ,$$

де $I_{T\text{ ном}}$ - номінальний струм обмотки трансформатора, від якої живиться електродвигун, А.

3.3. Визначення величини аперіодичної складової струму трифазного короткого замикання

Найбільше початкове значення аперіодичної складової струму КЗ (i_{a0}) у загальному випадку вважають рівним амплітуді періодичної складової у початковий момент і розраховують за формулою

$$i_{a0} = \sqrt{2} I_{n0} .$$

де I_{n0} - початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ.

У радіальних схемах i_{a0} у довільний момент часу величину аперіодичної складової струму КЗ розраховують за формулою

$$i_{at} = i_{a0} e^{\frac{1}{\tau_a} t} ,$$

де t – час, с;

τ_a – постійна часу затухання аперіодичної складової, с, яку визначають за формулою

$$\tau_a = \frac{x_\Sigma}{\omega \cdot r_\Sigma},$$

де x_Σ і r_Σ – результуючий індуктивний і активний опори мережі КЗ, мОм.

3.4. Визначення величини ударного струму

Ударний струм трифазного КЗ (i_y) в електроустановках при живленні від мережі розраховують за формулою

$$i_y = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K3},$$

де k_y – ударний коефіцієнт, приблизне значення якого беруть рівним 1,2 для трансформаторів з потужністю $S_{тр.ном} = 100 \div 400$ кВА, і 1,3 — з потужністю $S_{тр.ном} = 630 \div 1000$ кВА. Для віддалених точок розподільчої мережі k_y приймають рівним 1,0

При розрахунках ударного струму слід враховувати збільшення ударного струму за рахунок підживлення від включених асинхронних електродвигунів. При цьому вважають, що ударний струм поступає через 0,01с після початку КЗ, а амплітуда періодичної складової струму КЗ в момент часу $t=0,01с$ дорівнює амплітуді цієї складової в початковий момент КЗ.

Для спрощених розрахунків збільшення ударного струму за рахунок підживлення асинхронним двигуном враховують, використовуючи співвідношення

$$i_{y\Sigma} = i_y + 3.22 \cdot I_{T ном},$$

де $I_{Tном}$ – номінальний струм обмотки трансформатора;

$i_{y\Sigma}$ – сумарне значення ударного струму з урахуванням підживлення від електродвигунів.

3.5. Визначення діючого значення повного струму короткого замикання в перший період

Діюче значення повного струму в перший період трифазного КЗ розраховують за формулою

$$I_K = I_{Kmax}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}.$$

3.6. Визначення однофазного струму замикання на землю

Якщо електропостачання електроустановки напругою до 1 кВ здійснюється від енергосистеми через понижуючий трансформатор, то значення періодичної складової однофазного замикання від системи ($I_{n0}^{(1)}$) в кілоамперах розраховують за формулою

$$I_{n0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{nn}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}},$$

де $r_{1\Sigma}$ і $x_{1\Sigma}$ – сумарний активний і сумарний індуктивний опір прямої послідовності мережі КЗ, мОм;

U_{nn} – середня фазна напруга вторинної обмотки трансформатора, що живить мережу, в якій виникло КЗ;

$r_{0\Sigma}$ і $x_{0\Sigma}$ – сумарний активний і сумарний індуктивний опір нульової послідовності розрахункової схеми відносно точки КЗ, мОм.

Ці опори розраховують за формулами

$$r_{0\Sigma} = r_{0T} + r_{Ta} + r_{\kappa\delta} + r_k + r_{0ш} + r_{0\kappa\delta} + r_\partial + 3r_{nn} ;$$

$$x_{0\Sigma} = x_{0T} + x_{Ta} + x_{\kappa\delta} + x_{0ш} + x_{0\kappa\delta} + 3x_{nn} ,$$

де r_{0T} і x_{0T} – активний і індуктивний опір нульової послідовності понижуючого трансформатора, мОм;

$r_{0ш}$ і $x_{0ш}$ – активний і індуктивний опір нульової послідовності шинопроводу, мОм;

$r_{0\kappa\delta}$ і $x_{0\kappa\delta}$ – активний і індуктивний опір нульової послідовності кабелю, мОм;

r_{nn} і x_{nn} – активний і індуктивний опір нульової послідовності проводу, мОм;

$r_{\kappa\delta}$ і $x_{\kappa\delta}$ – активний і індуктивний опір струмових котушок автоматичних вимикачів, мОм;

r_k – активний опір контактів (беруть $r_k = 0.22$ Ом).

Струм однофазного замикання на землю, по якому перевіряють чутливість захисту відповідно до вимог ПУЕ, визначають за формулою

$$I_K^{(1)} = \frac{U_{2\phi}}{\frac{1}{3}Z_T^{(1)} + Z_n},$$

де $U_{2\phi}$ – фазова напруга вторинної обмотки понижуючого трансформатора, В;

$Z_T^{(1)}$ – повний опір трансформатора при однофазному КЗ, Ом;

Z_n – повний опір петлі “фаза-нуль” до точки КЗ, Ом.

Величину повного опору петлі “фаза-нуль” знаходять за формулою

$$Z_n = \sqrt{(r_\phi + r_0 + r_k)^2 + x_n^2} ,$$

де r_ϕ, r_0 – активні опори фазного і нульового проводів від шин трансформаторної підстанції до точки КЗ, Ом;

r_k – активний опір контактів (беруть $r_k = 0.22$ Ом);

$x_n = x_0 \cdot l$ – індуктивний опір 1 км петлі “фаза-нуль”, що згідно з ПУЕ беруть рівним 0.6 Ом/км;

l – довжина лінії від ТП до точки КЗ, км.

Величину повного опору трансформатора струмам однофазного КЗ знаходять за таблицею або розраховують, користуючись виразом

$$Z_T^{(1)} = \sqrt{(x_{1T} + x_{2T} + x_{0T})^2 + (r_{1T} + r_{2T} + r_{0T})^2} ,$$

де x_{1T}, r_{1T} – індуктивний і активний опори трансформатора струмам прямій послідовності, мОм;

x_{2T}, r_{2T} – те ж у зворотній послідовності, мОм;

x_{0T}, r_{0T} – те ж у нульовій послідовності, мОм.

При перевірці чутливості релейного захисту струм однофазного КЗ визначають у самій віддаленій точці мережі, де $Z_n = \max$.

3.7. Визначення двофазного струму короткого замикання

При електропостачанні електроустановки напругою до 1 кВ від енергосистеми через понижуючий трансформатор початкове значення періодичної складової струму двофазного КЗ ($I_{n0}^{(2)}$) в кілоамперах можна розрахувати за формулою

$$I_{n0}^{(2)} = \frac{U_{nn}}{2\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}},$$

де U_{nn} – середня номінальна напруга мережі, в якій виникло КЗ, В;

$r_{1\Sigma}$ і $x_{1\Sigma}$ – сумарний активний і сумарний індуктивний опори прямого послідовного кола КЗ, мОм. Ці опори дорівнюють

$$r_{1\Sigma} = r_T + r_{Ta} + r_{кв} + r_{ш} + r_{лб} + r_{\partial} / 2,$$

$$x_{1\Sigma} = x_c + x_T + x_{Ta} + x_{кв} + x_{ш} + x_{кб}.$$

3.8. Визначення теплового імпульсу струму короткого замикання

Тепловий імпульс струму КЗ ($\text{кА}^2 \cdot \text{с}$) визначають за формулою

$$A_k = \left(I_{\text{Кмак}}^{(3)} \right)^2 \cdot (t_{\text{відкл}} + T_{a.c.p}) + 1.5 \cdot I_{\partial\partial}^{//2} \cdot T_{a.c.p} + 4 \cdot I_{\partial\partial}^{//2} \cdot I_{\text{Кмак}}^{(3)} \cdot T_{a.c.p},$$

де $I_{\partial\partial}''$ – періодична складова струму підживлення від працюючих електродвигунів, кА, яку визначають за формулою

$$I_{\partial\partial}^{//} = 2.29 \cdot I_{T \text{ ном}},$$

$t_{\text{відкл}} = (t_{0a} + t_{\partial})$ – час відключення КЗ, с;

t_{0a} – витримка часу спрацювання селективного автомата, с;

t_{∂} – час гасіння дуги, с (для автомата АВМ “Електрон” $t_a = 0.06$ с, для – А 3700 $t_a = 0.01$ с);

$T_{a.c.p}$ – середнє значення часу гасіння вільних струмів КЗ (при розрахунках його беруть рівним 0.03 с);

$I_{T\text{ ном}}$ - номінальний струм обмотки трансформатора, від якого живляться двигуни.

3.9. Визначення температури нагрівання струмоведучих частин при коротких замиканнях

Визначення температури нагріву струмоведучих частин електрообладнання і ліній електропередачі проводять з метою перевірки їх на термічну стійкість при короткочасному впливі струмів КЗ.

Струми КЗ протікають по струмоведучих частинах електрообладнання упродовж невеликого часу, що визначається часом спрацювання приладів захисту від цих струмів.

Дійсний час протікання струму КЗ (у секундах) визначається сумарним часом дії захисту t_z та часом дії вимикаючих апаратів t_g :

$$t = t_z + t_g.$$

У розрахунках використовують так званий приведений час t_n . За приведений час приймають такий сталий струм КЗ I_K , який може виділити у струмоведучих частинах таку ж кількість тепла, що й дійсний (змінний у часі) струм КЗ i_K , під час його дії.

Приведений час складається з аперіодичної (t_{na}) і періодичної (t_{nn}) складових:

$$t_n = t_{na} + t_{nn},$$

де t_{na} , t_{nn} – відповідно аперіодична і періодична складові приведенного часу, с.

Приведений час аперіодичної складової знаходять за формулою

$$t_{na} = 0.05(\beta'')^2.$$

При дійсному часі $t > 1\text{с}$. Величину t_{na} взагалі не враховують.

Приведений час періодичної складової знаходять за кривими $t_{nn} = f(\beta'')$ ² (рис. Д3.3). При заданому реальному часі роботи захисту t_3 .

Температуру струмоведучих частин у режимі КЗ розраховують за кривими $\Theta^0 = f(A)$, наведеними на рис. Д4. Тепловий імпульс A_K , що відповідає кінцевій температурі провідника у момент відключення струму КЗ, знаходять за формулою

$$A_K = A_{\Pi} + t_{\Pi} \left(\frac{I_K}{q} \right)^2,$$

де A_{Π} – початковий тепловий імпульс, що відповідає температурі провідника до КЗ;

q – площа перерізу струмоведучої частини, мм².

Порядок користування кривими такий:

1. З точки Θ_{Π} на осі ординат, що відповідає початковій температурі провідника до моменту КЗ, проводять горизонталь до перетину її з кривою, яка відповідає матеріалу провідника.
2. З точки перетину на кривій опускають перпендикуляр, який відсікає на осі абсцис відрізок A_{Π} .
3. Після підрахунку теплового імпульсу A_K на осі абсцис відкладають його сумарне значення.

Проводячи побудову в зворотному порядку, тобто встановлюючи перпендикуляр з точки A_K до перетину з кривою і проводячи горизонталь до перетину з віссю ординат, знаходять кінцеву температуру Θ_K .

Якщо дійсна температура до моменту КЗ невідома, то за початкову приймають допустиму температуру струмоведучої частини в нормальному режимі.

Струмоведуча частина електрообладнання вважається термостійкою до струмів КЗ при заданому часі відключення, якщо виконується умова

$$\Theta_K \leq \Theta_{K, \text{доп}} ,$$

де $\Theta_{K, \text{доп}}$ – допустима температура в режимі КЗ.

Використовуючи значення приведенного часу, можна визначити мінімально допустиму площу перерізу струмоведучої частини для режиму КЗ:

$$q_{\min} = I_K \frac{\sqrt{t_{\Pi}}}{C} ,$$

де C – коефіцієнт, що враховує матеріал струмоведучої частини (див. табл.3.3)

Таблиця 3.3. Значення коефіцієнта C при визначенні термічної стійкості провідників

Провідники	Значення C
Шини мідні	171
Шини алюмінієві	88
Кабелі до 10 кВ	
– з мідними жилами	141
– з алюмінієвими жилами	85

Додатки

Таблиця Д 1.1

Технічні параметри запобіжників 0,4 кВ

Тип	Номинальний струм, А		Граничний струм відключення, кА
	патрона запобіжника	плавкої вставки	
1	2	3	4
НПН 2-60	60	6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 60	10
ПН 2-100	100	31,5; 40; 50; 63; 80; 100	100
ПН 2-250	250	80; 100; 125; 160; 200; 250	100
ПН 2-400	400	200; 250; 315; 355; 400	40
ПН 2-600	600	31,5; 400; 500; 600	25
ПН 2-630	630	31,5; 400; 500; 630	25
ПП 17	1000	500; 630; 800; 1000	120
Пр-2	15	6; 10; 15	0,8/8
	60	15; 20; 25; 35; 45; 60	1,8/4,5
	100	60; 80; 100	6/11
	200	100; 125; 160; 200	6/11
	350	200; 235; 260; 300; 350	6/13
	600	350; 430; 500; 600	133/23
	1000	600; 700; 850; 1000	15/20
ПП 24	25	2,4; 6,3; 10; 16; 20; 25	100
	63	25; 40; 50; 63	100
	100	63; 80; 100	100

Таблиця Д 2.1

Основні технічні дані автоматичних вимикачів

Тип автомата	Номінальна напруга	Номінальний струм	Число полюсів	Вид розчеплювача максимального струму		Номінальні струми розчеплювача $I_{р.ном.}$	Уставка спрацьовування розчеплювача		Час витримки (спрацьовування), с			Гранична відключаюча здатність	Вид привода	Маса, кг	
				у зоні перевантаження	у зоні к.з.		у зоні перевантаження	у зоні к.з.	при струмі $1.05 \times I_{р.ном.}$	при струмі	у зоні к.з.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
АП 50	220	50	2	тепловий	ел. магніт	1,6; 2,5 4; 6,4; 10; 16 25; 40 50	1,25	3,5; 10	—	1,5-10	—	1,0 - 2,5	ручний	1,0	
	500		2; 3												
А 3160	110	50	1	тепловий	—	15; 20 25; 30 40; 50	1,25	—	не спрацює	—	—	3,6	ручний	0,48	
	220		2									5,0			
	280		3											1,2	
А 3110 А 3120	220	100	2		ел. магніт	15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 100		10						2,3; 3,6	
	220		2; 3									15		2,3; 2,6 3,6; 4,0	
	500							10; 18							
	380	60	15; 20; 25; 30; 40; 50; 60			до 9		4,5							

Продовження таблиці Д 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
А 3130	220	200	2	тепло- вий	ел. магніт	120; 150 200; 220	1,25	6; 7	—	—	—	28	ручний	6,3; 8,2 9,3
	500	220	2; 3									25		14,8
	380	170; 200						100; 170 200				7		30
А 3140	220	600	2	тепло- вий	ел. магніт	250; 300 400; 500 600	—	7	—	—	—	50	—	17,4
	500		2; 3									40		17,4; 19,4
АЕ 1000	240	25	1	тепло- вий	ел. магніт	6; 10 16; 25	1,5	12-18	—	—	—	2	ручний	0,6- 0,20
АЕ 2030	110	25	1; 2	тепло- вий	ел. магніт	0,6; 0,8 1; 1,25 1,6; 2 2,5; 3,2 4; 5; 6; 8; 10 12,5; 16 20; 25	1,25	3; 12	не спра- цює	—	—	2,5	ручний	0,38; 0,64
	220											2,0		
	380		3									3,0		0,9
	500													
АЕ 2040	110	63	1; 2	тепло- вий	ел. магніт	10 12,5; 16; 20; 25; 32 40; 50 63	1,25	3; 12	не спра- цює	—	—	5,0	ручний	0,52; 0,96
	220											4,0		1,4
	220		3									6,0		
	500											5,0		
АЕ 2050	110	100	1; 2	тепло- вий	ел. магніт	16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100	1,25	3; 12	не спра- цює у про- довж 2 годин	5220	—	12,0	ручний	0,9; 1,55
	220											4,0		2,2
	220		3									9,0		
	380											6,0		
	500											5,0		

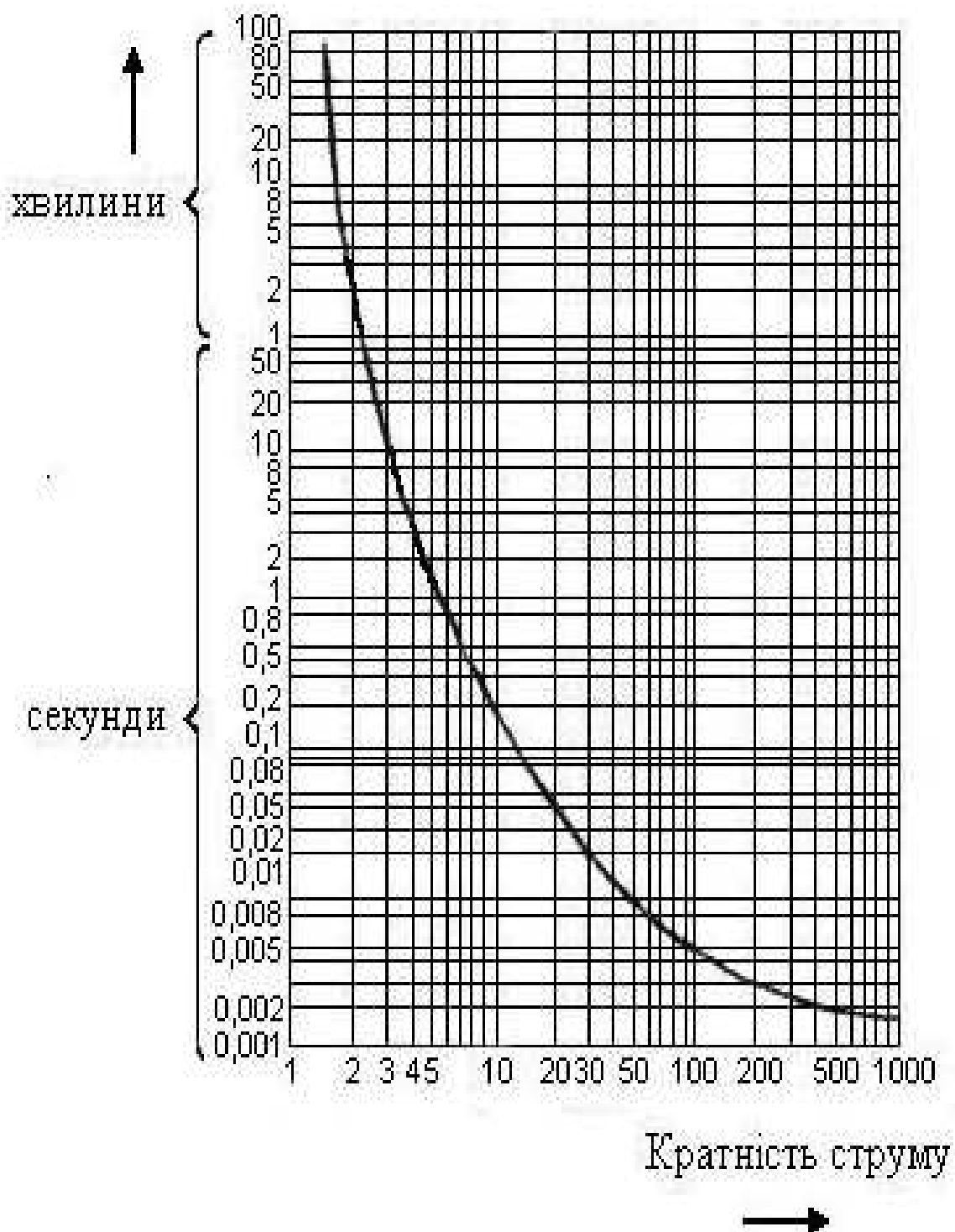


Рис. Д1.1. Типова захисна характеристика закритих запобіжників з наповненням типу НПН, НПР

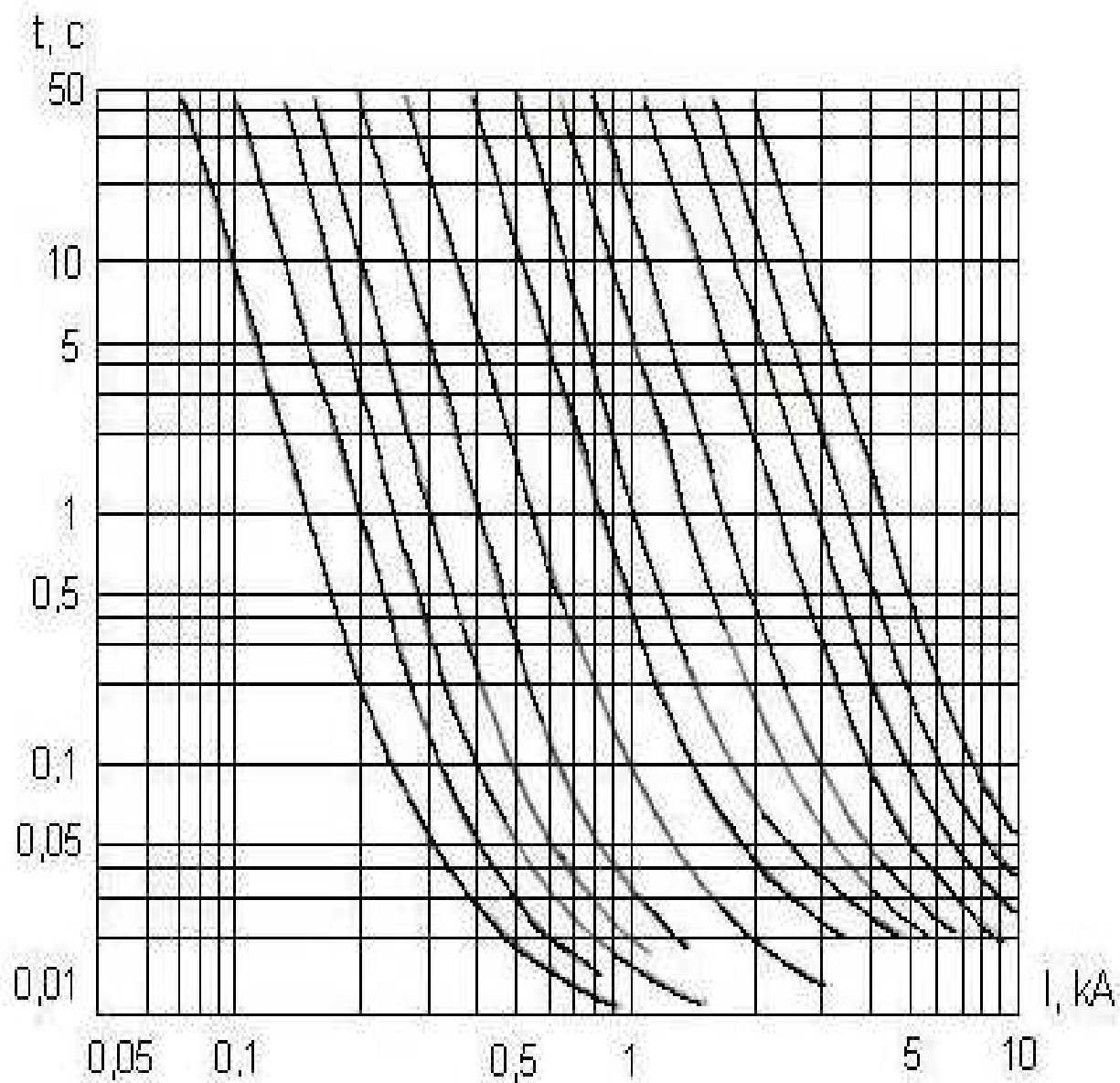


Рис. Д1.2. Захисні характеристики закритих запобіжників типу ПН

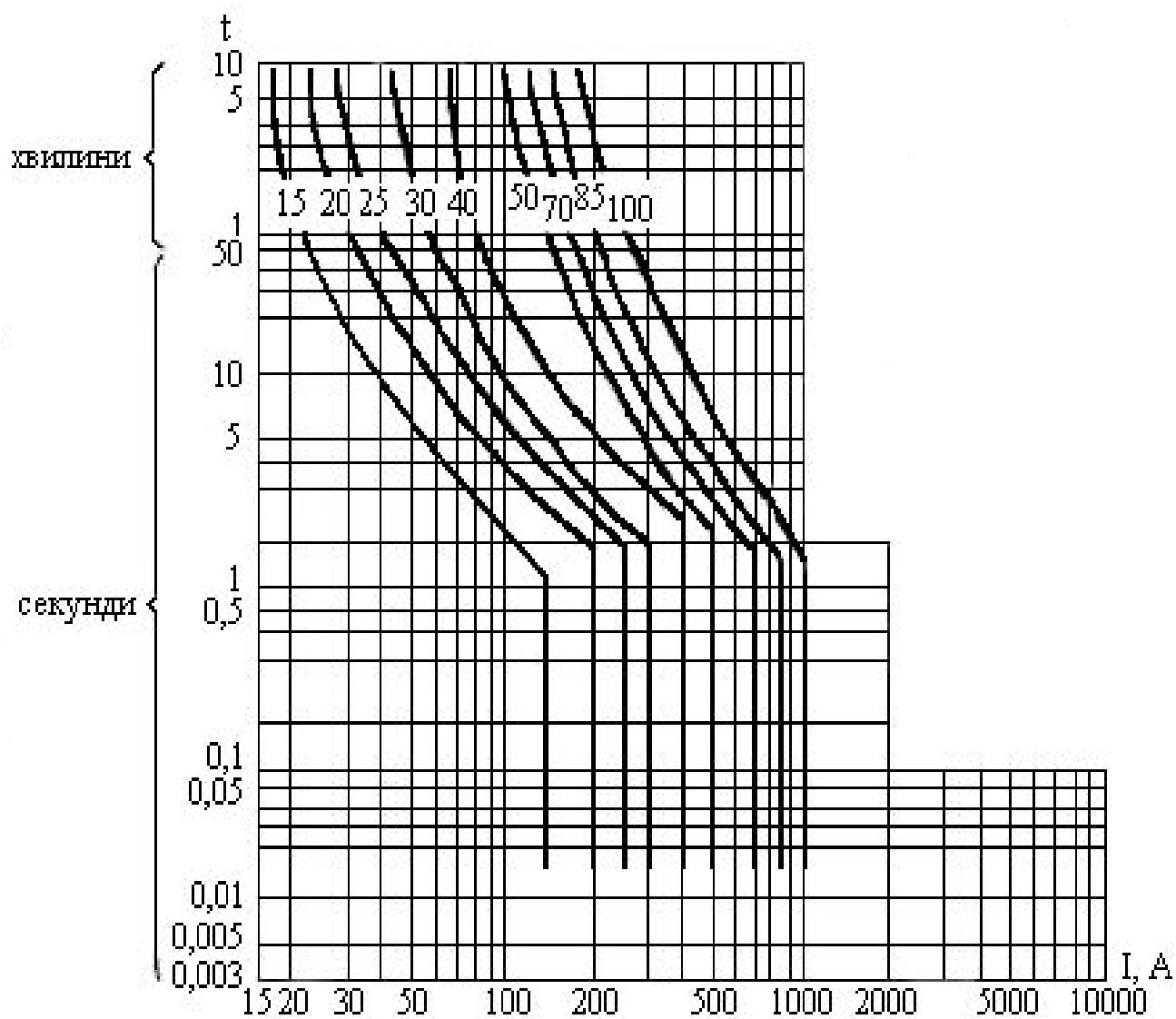


Рис. Д2.1. Захисна характеристика автоматичного вимикача типу А3110

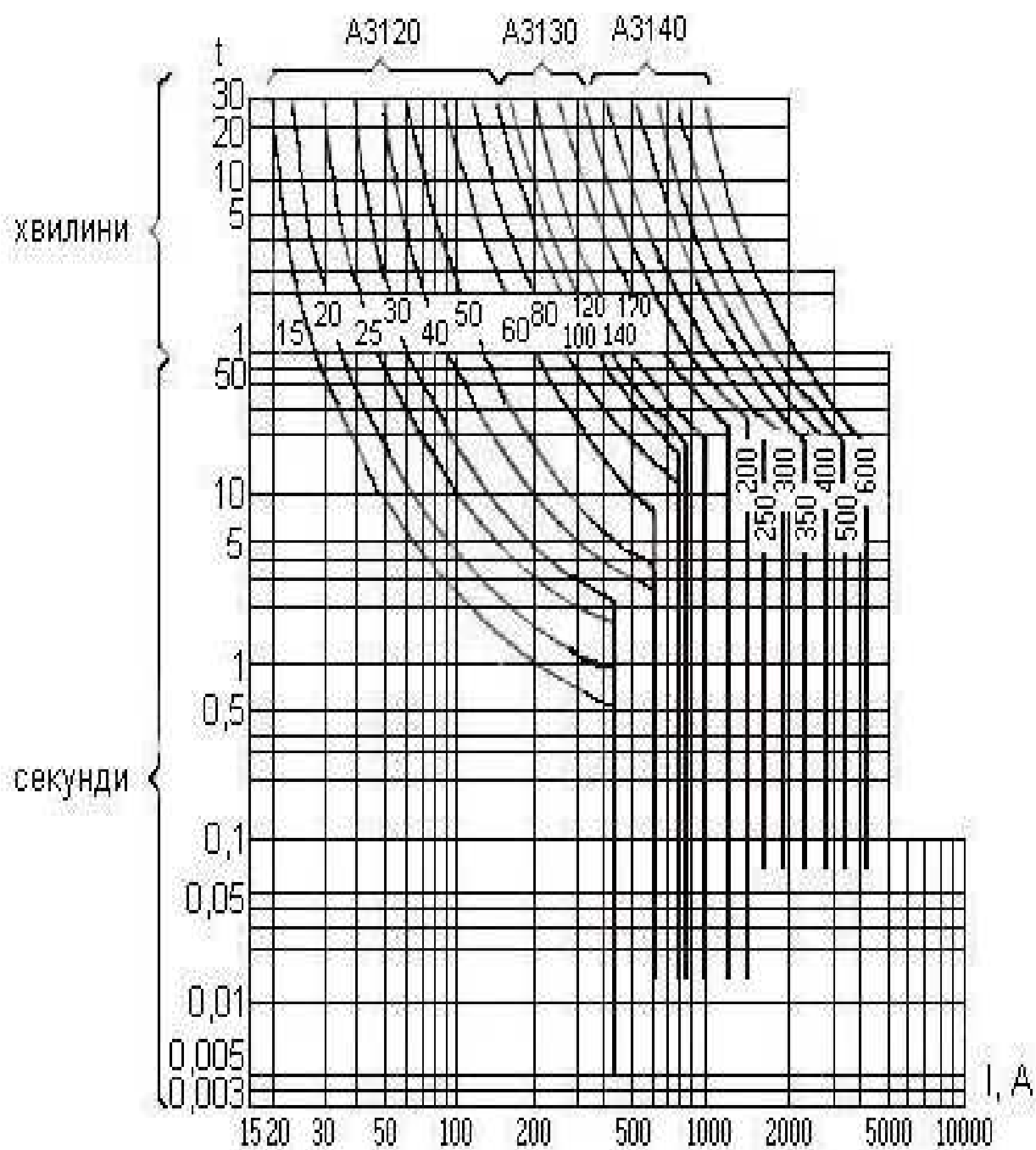


Рис. Д2.2. Захисні характеристики автоматичних вимикачів
типу А3120, А3130, А3140

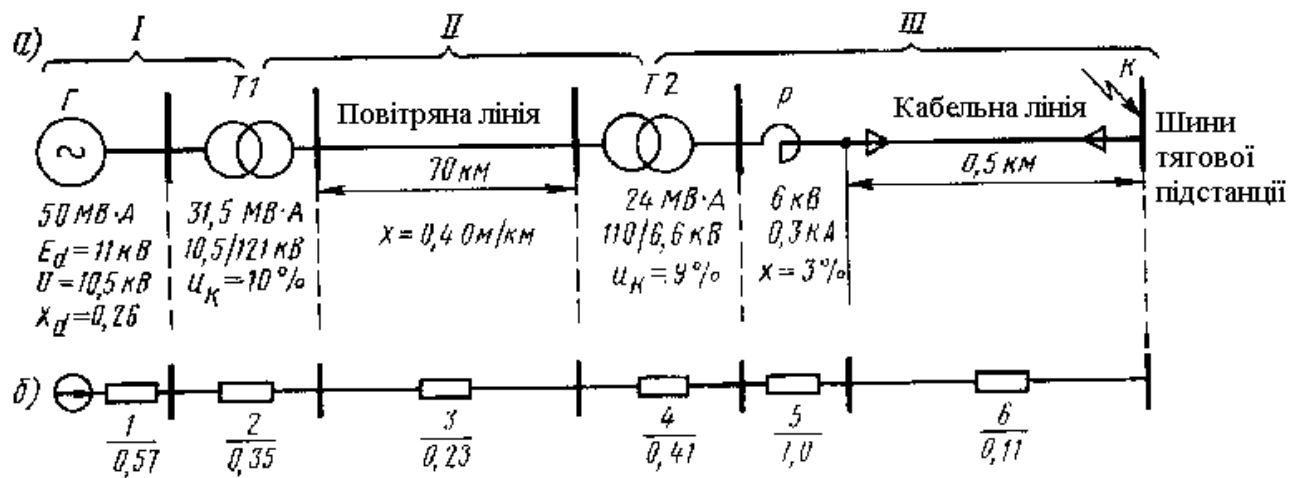


Рис. Д 3.1 – Приклад розрахункової схеми для визначення струмів КЗ:

а – загальна розрахункова схема;

б – схема заміщення

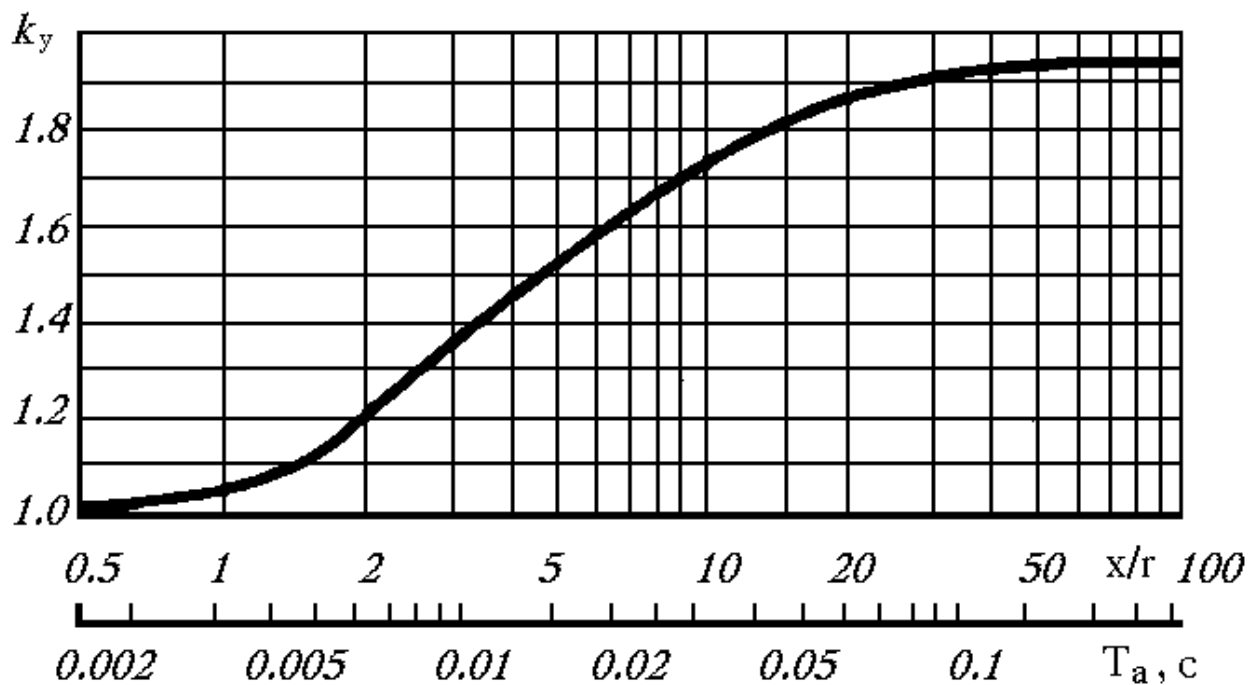


Рис. Д 3.2 – Залежність ударного коефіцієнта k_y від постійної часу T_a

(або відношення x/r).

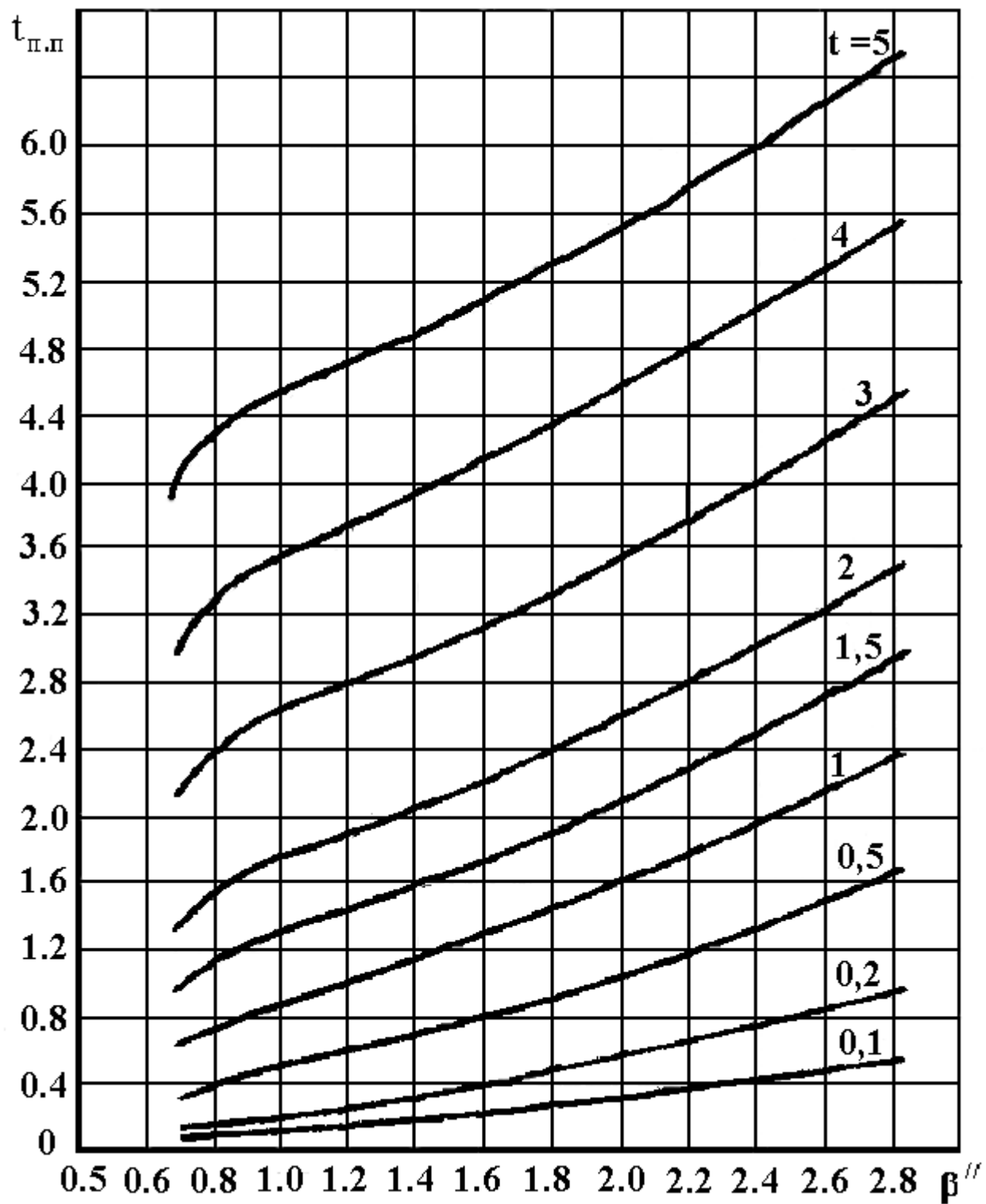


Рис. ДЗ. 3 – Залежність приведенного часу для періодичної складової струму КЗ.

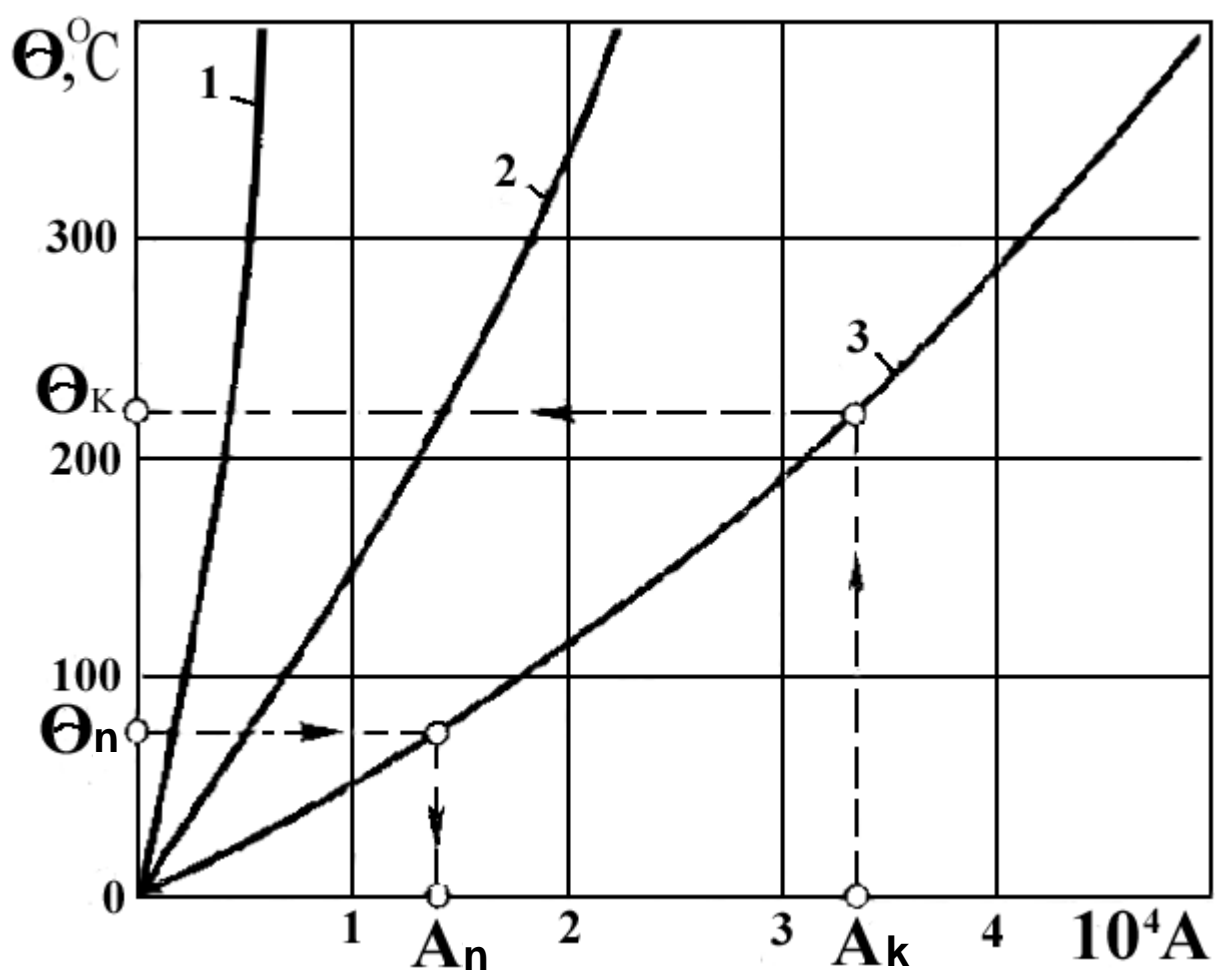


Рис. Д3.4 – Криві для визначення температури нагріву провідника при короткому замиканні: 1 - сталь; 2 - алюміній; 3 - мідь.

Таблиця Д3.1

Середній опір автоматичних вимикачів, рубильників, роз'єднувачів
напругою до 1 кВ.

Номінальний струм, А	Опір котушок авт. вимикачів, мОм		Перехідний активний опір котушок, мОм		
	г	х	вимикач	рубильник	роз'єднувач
50	5.5	2.7	1.3	—	—
70	2.35	1.3	1.0	—	—
100	1.8	0.86	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	0.2
600	0.12	0.094	0.25	0.15	0.15
1000	—	—	—	0.08	0.08
2000	—	—	—	—	0.03

Таблиця Д3.2

Опір первинних обмоток котушкових трансформаторів струму

Опір, мОм	Значення опорів при номінальному струму, А										
	20	30	40	50	75	100	150	200	300	400	600
г	42	20	11	7	3	1.7	0.75	0.42	0.2	0.11	0.00 5
Х	67	30	17	11	4.8	2.7	1.2	0.67	0.3	0.17	0.07

Таблиця Д3.3

Активні й індуктивні опори, мОм, трансформаторів 6(10)/0.4 кВ

Потужність трансформа тора, кВА	$U_{\text{к\%}}$	$x_{1\text{T}} = x_{2\text{T}}$	$x_{0\text{T}}$	$r_{1\text{T}} = r_{2\text{T}}$	$r_{0\text{T}}$	$\frac{1}{3} Z_{\square}^{(1)}$
З'єднання обмоток “зірка–зірка”						
100	4.5	64.7	581.8	31.5	253.9	260
160	4.5	41.7	367	16.6	150.8	162
250	4.5	27.2	234.9	9.4	96.5	104
400	4.5	17.1	148.7	5.5	55.6	65
630	5.5	13.6	96.2	3.1	30.3	43
1000	5.5	8.5	16.6	2.0	19.1	27
1000	8.0	12.6	72.8	2.0	19.1	33.6
1600	5.5	4.9	37.8	1.3	11.9	16.6
З'єднання обмоток “трикутник–зірка”						
100	4.5	66	66	36.3	36.3	75.3
160	4.5	43	43	19.3	19.3	47
250	4.5	27	27	10.7	10.7	30
400	4.5	17	17	5.9	5.9	18.7
630	5.5	13.5	13.5	3.4	3.4	14
1000	5.5	8.6	8.6	2.0	2.0	9
1000	8.0	12.65	12.65	1.9	1.9	12.8
1600	5.5	5.4	5.4	1.1	1.1	5.7

Таблиця Д3.4

Активний і реактивний опір трижильних кабелів 6, 10 кВ

S, мм ²	Активний опір, Ом/км		Реактивний опір, (Ом/км) при U _{ном.} , кВ	
	Мідь	Алюміній	6	10
1.5	12.3	—	—	—
2.5	7.35	—	—	—
4	4.6	—	—	—
6	3.07	—	—	—
10	1.84	3.1	0.11	0.122
16	1.15	1.94	0.102	0.113
25	0.74	1.24	0.091	0.099
35	0.52	0.89	0.087	0.095
50	0.37	0.62	0.083	0.09
70	0.76	0.443	0.08	0.086
95	0.194	0.326	0.078	0.083
120	0.153	0.258	0.076	0.081
150	0.122	0.206	0.074	0.079
185	0.099	0.167	0.073	0.077
240	0.077	0.129	0.071	0.075
300	0.061	0.103	—	—
400	0.046	0.077	—	—

Таблиця Д3.5

Питомий опір (прямої послідовності) кабелів 0.4 кВ з алюмінієвими жилами
при температурі жили 65 °С (мОм/м)

Переріз жил, мм ²		R _{пит}	X _{пит}	
фазних	нульової		трижильний кабель	чотирижильний кабель
3×4	2.5	9.610	0.092	0.098
3×6	4	6.410	0.087	0.094
3×10	6	3.840	0.082	0.088
3×16	10	2.400	0.078	0.084
3×25	16	1.540	0.062	0.072
3×35	16	1.100	0.061	0.068
3×50	25	0.769	0.06	0.066
3×70	35	0.549	0.059	0.065
3×95	50	0.405	0.057	0.064
3×120	50	0.320	0.057	0.064
3×150	70	0.256	0.056	0.063
3×240	—	0.160	0.055	—

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростаций и подстанций: Учебник для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / Под. общ. ред. Федорова А.А. Т1, – М.: Энергоатоиздат, 1986.
4. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Уч. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Буряк В.Н., Дейнеко Н.А. Тяговые подстанции.: Метод. пособие к практическим занятиям. – Харьков: ХГАГХ, 1998.
6. Буряк В.Н., Дейнеко Н.А. Визначення струмів короткого замикання в електричних мережах: Метод. посібник до практичних занять, курсового та дипломного проектування. – Харків: ХДАМГ, 2003.
7. Дейнеко Н.А. Розрахунок пристроїв захисту в системах електропостачання. Метод. Посібник до курсового та дипломного проектування. – Харків: ХДАМГ, 2003.
8. Буряк В.Н., Дейнеко Н.А. Електричні апарати: Навчально - методичний посібник до лабораторного практикума.- Харків: ХНАМГ, 2007.

Навчальне видання

ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ЗАХИСТУ В МЕРЕЖАХ ДО 1000 В

Навчально - методичний посібник до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни “Електричні апарати” (для студентів 3 - 4 курсів денної та заочної форм навчання спеціальності 6.090603 "Електротехнічні системи електроспоживання")

Автори: БУРЯК ВАЛЕНТИН МИКОЛАЙОВИЧ,
ДЕЙНЕКО НАТАЛІЯ АНАТОЛІЇВНА

Редактор М.З.Аляб'єв

План 2007, поз. 100Н

Підп. до друку 29.11. 2007 р.	Формат 60х84. 1/16	Папір офісний
Друк на ризографі	Умовн.-друк. арк. 2,6	Обл.-вид. арк. 3,0
Тираж 200 прим.	Замовл. №	

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції, 12

Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ
61002, Харків, вул. Революції, 12