

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# Електричні системи та мережі

## Лабораторний практикум

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2018

Електричні системи та мережі: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.В. Кирик, С.В. Казанський, Т.Л. Кацадзе, О.Б. Бесараб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 92 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 21.06.2018 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 10д від 12.06.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

# ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

## ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Кирик Валерій Валентинович, д-р техн. наук, проф.*  
*Казанський Сергій Володимирович, канд. техн. наук, доц.*  
*Кацадзе Теймураз Луарсабович, канд. техн. наук, доц.*  
*Бесараб Олександр Борисович, канд. техн. наук.*

Відповідальний редактор *Баженов Володимир Андрійович, канд. техн. наук, доц.*

Рецензент: *Бардик Євген Іванович, канд. техн. наук, проф.*

*За редакцією укладачів.*

Лабораторний практикум з дисципліни «Електричні системи та мережі» складається із дев'яти лабораторних робіт.

Даний електронний ресурс призначений для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота №1 Режими роботи нейтралей електричних мереж.....	5
Лабораторна робота №2 Дослідження заземлювальних пристроїв.....	18
Лабораторна робота №3 Дослідження добового графіка навантаження енергосистеми і його покриття.....	28
Лабораторна робота №4 Конструкція та нагрівання силових кабелів.....	37
Лабораторна робота №5 Розрахунок усталених режимів простих замкнених електричних мереж.....	45
Лабораторна робота №6 Дослідження пристроїв для пошуку місць пошкодження при КЗ на ПЛ 6...750 кВ.....	52
Лабораторна робота №7 Комутаційне обладнання систем електропостачання 0,4 кВ .....	63
Лабораторна робота №8 Захист та комутація електричних двигунів.....	79
Лабораторна робота №9 Релейні пристрої у системах електропостачання.....	86
Список рекомендованої літератури.....	92

## ВСТУП

Навчальним планом здобувачів ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» передбачається виконання циклу лабораторних робіт з найбільш важливих розділів дисципліни «Електричні системи та мережі», присвячених дослідженню режимів роботи нейтралей електричних мереж, вивченню заземлювальних пристроїв, дослідженню графіку навантаження енергосистеми, вивченню конструкції та процесу нагрівання силових кабелів, розрахункам усталених режимів роботи електричних мереж, пошуку місць пошкоджень повітряних електричних мереж, комутаційному обладнанню систем електропостачання.

Мета проведення лабораторних робіт – закріпити знання основних теоретичних положень лекційного курсу; придбати вміння та навички, необхідні для обґрунтування вибору режиму роботи нейтралі, вибору заземлювальних пристроїв, розрахунку режимів замкнених електричних мереж, які надалі дозволять студентіві приймати самостійні творчі рішення в процесі курсового та дипломного проектування.

Методичні вказівки komponуються із дев'яти лабораторних робіт. Кожна з лабораторних робіт містить короткі теоретичні відомості, що сприяє ефективному сприйняттю та закріпленню теоретичного матеріалу при виконанні поставлених завдань.

## **РЕЖИМИ РОБОТИ НЕЙТРАЛЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

Мета роботи – дослідити поведінку електричних мереж при різних режимах роботи нейтралі; вивчити умови та причини, що визначають вибір режиму роботи нейтралі електричної мережі.

### **1.1 Основні і теоретичні положення**

#### **1.1.1 Режими роботи нейтралі мереж різних напруг**

Нейтраллю називають середню точку трансформаторів і генераторів, які мають схему з'єднання «зірка».

Якщо нейтраль трансформаторів(генераторів) приєднана до заземлювача безпосередньо або через малий опір, то таку нейтраль називають глухозаземленою, а мережі, приєднані до даних трансформаторів(генераторів) – мережами з глухозаземленою нейтраллю. Нейтраль, що не приєднана до заземлюючого пристрою або приєднана до нього через трансформатори напруг, називають ізольованою, а мережі, які працюють в цьому режимі нейтралі – мережами з ізольованою нейтраллю. Мережами з компенсованою нейтраллю називають мережі, нейтраль яких заземлена через налаштовані індуктивні опори, що компенсують ємнісний зарядний струм мережі.

Вибір режиму нейтралі в електричних мережах напругою до 1000 В визначається головним чином безпекою обслуговування мереж, а в мережах високої напруги насамперед, безперебійністю електропостачання, надійністю роботи та економічністю електроустановок.

#### **1.1.2 Електричні мережі напругою до 1000 В**

Відповідно до «Правил улаштування електроустановок» (ПУЕ) електроустановки напругою до 1000 В допускаються як з глухозаземленою, так і з ізольованою нейтраллю.

Для найбільш поширених чотиривідних мереж трифазного струму

напругою 380/220 В або 220/127 В, з якими стикається широке коло осіб, ПУЕ вимагає глухого заземлення нейтралі. Такий режим нейтралі виключає значне перевищення робочої напруги мережі відносно землі.

Стандарт ІЕС-60364-1 поділяє розподільні мережі до 1000 В залежно від конфігурації струмопровідних ліній з нульовим (нейтральним) провідником і типами систем заземлення включно.



Рис. 1.1. Підсистеми заземлення TN з глухозаземленою нейтраллю

**T** (від лат. *terra* – земля) – безпосереднє приєднання однієї точки струмовідних частин джерела живлення до заземлювального пристрою.  
**N** (від англ. *neutral* – нейтраль) – безпосередній зв'язок відкритих провідних частин електроустановки з точкою заземлення джерела живлення через *PEN*- або *PE*-провідник. (*PE* від англ. *protective earthing*- захисне заземлення) – захисний провідник в електроустановках напругою до 1 кВ

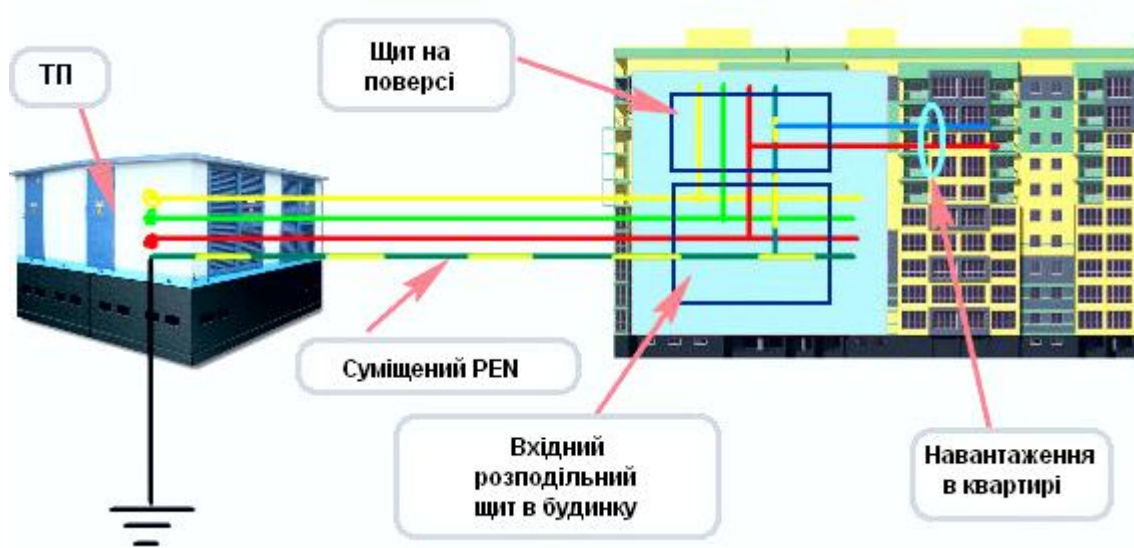


Рис. 1.2. Структурна схема система заземлення TN-C

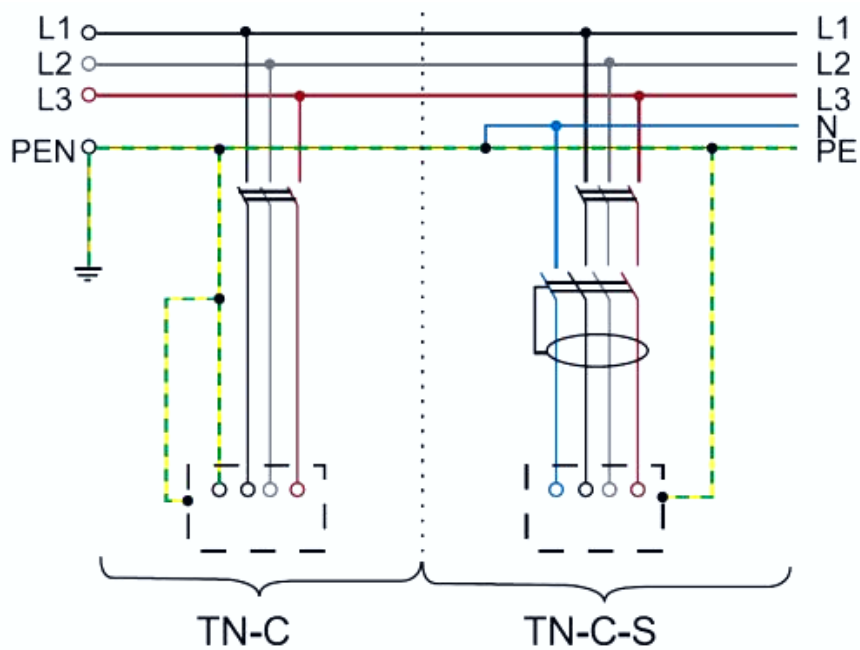


Рис. 1.3. Електрична принципова схема систем заземлення TN-C, TN-C-S

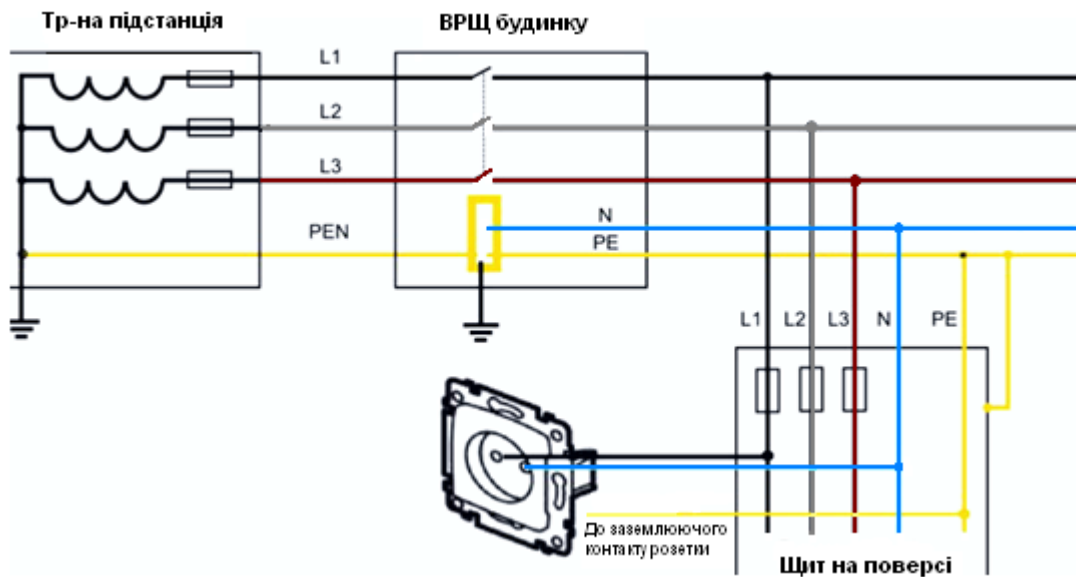


Рис. 1.4. Електрична принципова схема системи заземлення TN-C-S

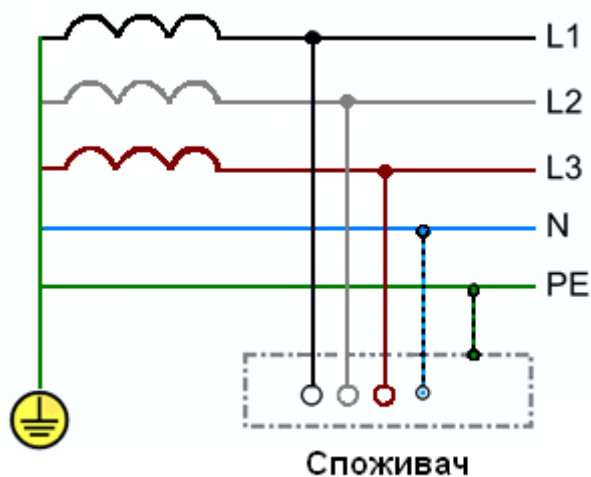


Рис. 1.5. Електрична принципова схема системи заземлення TN-S

В умовах підвищених вимог техніки безпеки (наприклад, на вугільних шахтах, торфорозробках, тощо) деякі трифазні мережі напругою до 1000 В виконують трипровідними з ізольованою нейтраллю. В таких мережах (рис. 1.6.а) замикання фази на землю не викликає КЗ і не призводить до вимикання пошкодженої фази. В разі повного (металевого – глухого) замикання фази на землю напруга відносно землі на цій фазі дорівнює нулю, а напруга



відносно землі двох інших фаз зростає до міжфазної. Векторну діаграму напруг в разі замиканій фази С на землю показано на рис. 1.6.б.

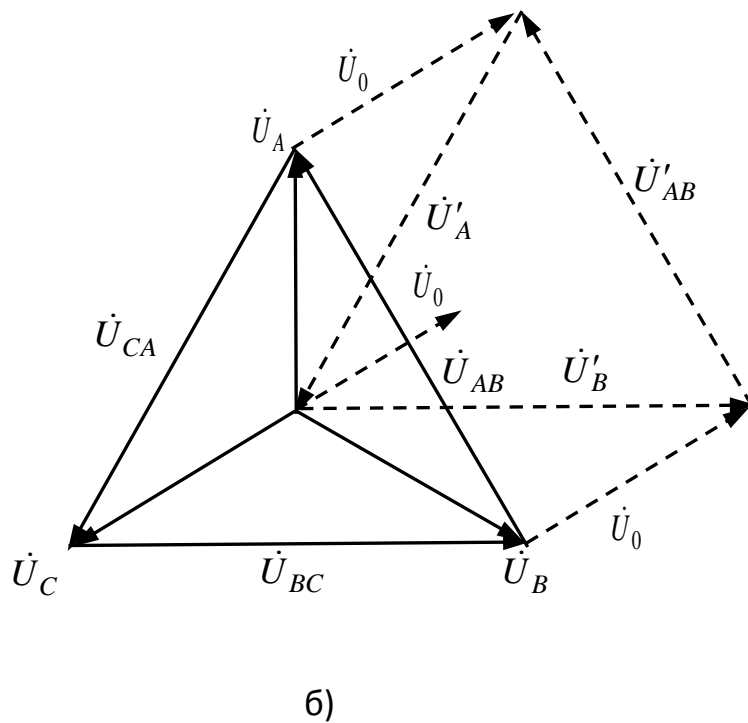
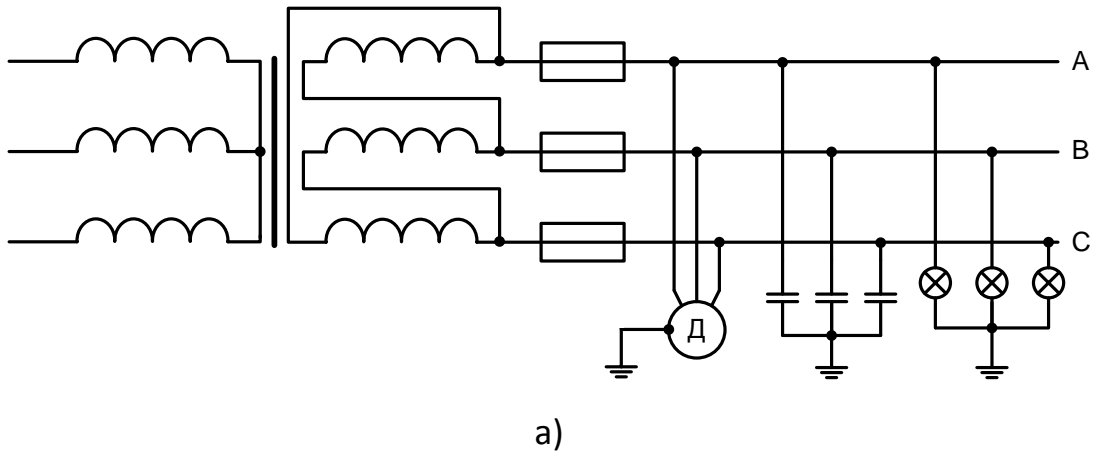


Рис. 1.6. Схема мережі з ізольованою нейтраллю(а) та діаграма напруг у режимі КЗ(б)

Напруги всіх фаз відносно землі  $\dot{U}'_A$ ,  $\dot{U}'_B$ ,  $\dot{U}'_C$  визначають за геометричною сумою напруг фази відносно землі в нормальному режимі роботи  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_C$  і напруг нульової послідовності  $\dot{U}_{0A}$ ,  $\dot{U}_{0B}$ ,  $\dot{U}_{0C}$ . Причому останні напруги рівні за значенням і протилежні за знаком фазній напрузі пошкодженої фази  $\dot{U}_C$  ( $\dot{U}_{0A} = \dot{U}_{0B} = \dot{U}_{0C} = -\dot{U}_C$ ), і зміну напруг в мережі відносно землі можна розглядати як наслідок накладення на напругу фаз напруг

нульової послідовності:

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + \dot{U}_{0A}, \dot{U}'_B = \dot{U}_B + \dot{U}_{0B}, \dot{U}'_C = \dot{U}_C + \dot{U}_{0C}.$$

З векторної діаграми (рис. 1.6.б) видно, що  $\dot{U}'_A = \dot{U}'_B = \sqrt{3}\dot{U}_A$ . Кут між векторами  $\dot{U}'_A$  і  $\dot{U}'_B$  становить  $60^\circ$ .

При однофазних замиканнях міжфазні напруги залишаються незмінними за амплітудою і зсунутими за фазою на кут  $120^\circ$ . В цьому неважко впевнитися розглядаючи діаграму рис. 1.6.б:  $\dot{U}'_{AB} = \dot{U}'_A - \dot{U}'_B = \dot{U}'_{AB}$ ,  $\dot{U}'_{BC} = \dot{U}'_B - \dot{U}'_C = \dot{U}'_{BC}$ ,  $\dot{U}'_{CA} = \dot{U}'_C - \dot{U}'_A = \dot{U}'_{CA}$ .

Основними заходами, що забезпечують безпеку обслуговуючого персоналу в разі пошкодження ізоляції в мережах з ізолюваною нейтраллю є наявність захисного заземлення обладнання і автоматичне відключення пошкоджених ділянок. Захисне заземлення (рис. 1.6.а) знижує напругу дотику в разі замикання фази на корпус до відносно безпечних значень.

В усіх мережах з ізолюваною нейтраллю повинен бути забезпечений також контроль ізоляції для швидкого виявлення замикання на землю. Найбільш проста схема контролю ізоляції – схема, що складається з трьох ламп розжарювання або трьох вольтметрів, що включені зіркою із заземленою нейтраллю (рис. 1.6.а). Очевидно, що при замиканні фази С на землю лампа фази С погасне, а дві інші горітимуть яскравіше. Вольтметр фази С при цьому показує нуль, а два інші вольтметри – лінійні значення напруги.

### **1.1.3 Електричні мережі напругою понад 1000 В**

Електроустановки напругою понад 1000 В згідно з ПУЕ розділяють на електроустановки з малими струмами замикання на землю ( $I_3 \leq 500$  А), до яких належать мережі, що працюють з ізолюваною та компенсованою нейтраллю та електроустановки з великими струмами замикання ( $I_3 \geq 500$  А), що працюють з глухозаземленою нейтраллю.

Струм однофазного замикання на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю визначається частковими ємностями фаз відносно землі та залежить від конструкції, протяжності та напруги мережі.

В мережах з глухозаземленою нейтраллю в разі замикання на землю або на заземлені частини електроустановок протікає дуже великий струм КЗ і тому має бути забезпечене автоматичне вимкнення пошкодженої ділянки мережі з найменшим часом вимкнення.

Мережі з ізольованою нейтраллю мають важливу перевагу – вони не вимагають негайного вимкнення пошкодженої ділянки при однофазних замиканнях на землю (пошкодження, що найчастіше зустрічаються на практиці). Така мережа може працювати при однофазному замиканні протягом декількох годин, поки споживач електроенергії не буде переведений на резервне живлення.

В Україні мережі до 35 кВ включно, як правило, працюють з ізольованою або з компенсованою нейтраллю, а мережі напругою від 110 кВ – з глухозаземленою нейтраллю.

#### *Мережі з ізольованою нейтраллю*

В разі замикання на землю однієї фази, наприклад С (рис. 1.6.а) напруга цієї фази відносно землі дорівнюватиме нулю, а напруги двох інших зростуть у  $\sqrt{3}$  раз, а кут зсуву між векторами цих напруг буде  $60^\circ$  (рис. 1.6.б). Наявність часткових ємностей проводів відносно землі призводить до того, що в нормальному режимі через зазначені ємності протікають ємнісні струми, що чисельно дорівнюють:  $\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = \dot{U}_\phi \omega C$ . В разі однофазного замикання ( $U_{\phi c} = 0$ ) ємнісний струм пошкодженої фази дорівнюватиме нулю, а ємнісні струми непошкоджених фаз зростуть пропорційно до зростання напруг на ємностях та будуть становити  $\dot{I}'_A = \sqrt{3}\dot{I}_A$  та  $\dot{I}'_B = \sqrt{3}\dot{I}_B$ . Сумарний струм через ємності непошкоджених фаз, що дорівнює геометричній сумі струмів цих фаз:  $\dot{I}'_A + \dot{I}'_B = \dot{I}_3$  чисельно дорівнює потроєному значенню ємнісного струму однієї фази нормального режиму ( $\dot{I}_3 = 3\dot{I}_C$ ) та проходить через місце замикання фази С на землю, замикаючись через джерело живлення мережі.

### Мережі з компенсованою нейтраллю

Практично всі кабельні мережі напругою 6...35 кВ та повітряні мережі 35 кВ з сумарною довжиною електрично пов'язаних ліній понад 100 км мають значні струми замикання на землю, що є небезпечним за напругою дотику до опор при тривалому протіканні струму. Тому такі мережі повинні працювати з компенсованою нейтраллю. Компенсація здійснюється шляхом ввімкнення в нейтральну точку трифазної мережі регульованого індуктивного опору – дугогасної котушки (реактору) з регульованим повітряним проміжком або з ступінчастим регулюванням числа витків обмотки. Компенсуючі пристрої, як правило, встановлюються в центрах живлення мережі, що компенсуються.

На рис. 1.7 показано схему найпростішої компенсованої мережі з ємнісним опором  $1/\omega C$  на фазу. Нейтраль первинної обмотки одного з трансформаторів мережі зі схемою з'єднання обмоток «зірка-трикутник» заземлена через регульований індуктивний опір – дугогасну котушку.

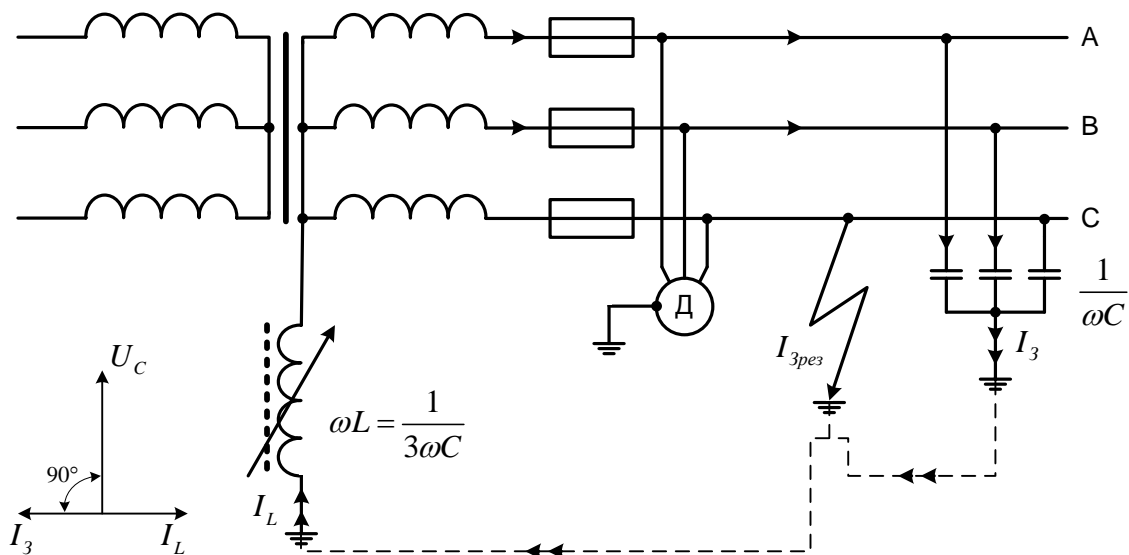


Рис. 1.7. Мережа з компенсованою нейтраллю

В разі замикання на землю однієї фази в такій мережі напруги двох не пошкоджених фаз, як і в мережі з ізолюваною нейтраллю зростають в  $\sqrt{3}$  разів, а напруга нейтралі дорівнюватиме фазній напрузі (рис. 1.6,б). Під дією цієї напруги через дугогасну котушку пройде струм. Опір котушки підбирають так,

щоб індуктивний струм  $I_L$ , що проходить через котушку, за значенням дорівнював би сумарному ємнісному струму  $I_3$  ( $I_3 = 3I_C$ ), що проходить через фазні ємності. Тепер на струми мережі в кожній фазі накладається додатковий струм  $i_0 = \frac{i_L}{3}$  (рис. 1.7). Результуючий струм у місці замикання фази на землю  $i_{зрез}$ , є геометричною сумою струмів котушки та ємнісного струму, дорівнюватиме нулю, отже, електричне дуга погасне. Таке настроювання котушки з повною компенсацією струму замикання називають резонансною.

Через місце замикання протікатиме залишковий струм, що складається з активної та реактивної складових. Перша з них зобов'язана своїм існуванням активному опору котушки та ізоляції мережі, а друга (тобто індуктивний або ємнісний струм) – неточній настройці котушки. Цей залишковий струм малий за значенням та знаходиться у фазі або ж становить невеликий кут відносно напруги нейтралі. Тому в тих випадках, коли (ізоляційна міцність дугового проміжку, поновлюючись при проходженні струму через нуль, перевищує робочу напругу мережі, дуга згасає і не поновлюється знову. У випадках же порушення ізоляції (поломкою ізоляторів, накиди на лінію, падіння проводу) дуга набуває перемінного характеру і мережа продовжує роботу в режимі однофазного замикання, однак на відміну від некомпенсованої мережі з малим струмом у дузі.

Компенсація ємнісного струму при резонансному або близькому до нього настроюванні дугогасної котушки знижує швидкість поновлення напруги на пошкодженій фазі та амплітуду напруги, що поновлюється. Амплітуда перенапруг за такого настроювання не перевищує  $2,8U_\phi$ , і ймовірність появи перенапруг вищої кратності менше, ніж у некомпенсованій мережі. Однак при розстроюванні компенсації понад  $\pm 5\%$  перенапруги в компенсованих мережах та ймовірність появи граничних перенапруг такі самі, як і в мережах з некомпенсованою нейтраллю.

За неможливості резонансного настроювання бажано мати невелику

перекомпенсацію ( $I_L > 3I_C$ ). Недокомпенсація ємнісного струму в аварійних випадках (при асиметрії ємностей фаз) може призвести до появи вищих перенапруг, ніж у некомпенсованій мережі.

#### *Мережі з глухозаземленою нейтраллю*

В мережах 110...220 кВ однофазні замикання на землю становлять понад 75...80% усіх пошкоджень, а в мережах вищих класів напруг пошкодження міжфазної ізоляції взагалі дуже рідкісні.

При КЗ на землю в місці пошкодження виникає електрична дуга з великим струмом, що гаситься вимкненням лінії електропередачі та її автоматичним повторним ввімкненням (АПВ). У перехідному режимі (тобто безпосередньо після замикання на землю) та при комутаціях в електричній мережі виникають внутрішні перенапруги, найбільше значення яких характеризується їх кратністю до номінальної фазної напруги. Вплив внутрішніх перенапруг є вирішальним при виборі ізоляції. Обов'язковими є заходи щодо обмеження внутрішніх перенапруг.

Щоб підвищення напруги відносно землі на непошкоджених фазах при однофазних замиканнях на землю в усталеному режимі не перевищувало 0,8 лінійної напруги, значення струму однофазного КЗ у будь-якій точці мережі повинно бути не менше як 60% струму трифазного КЗ у тій самій точці. Такий струм замикання на землю забезпечується заземленням необхідної кількості нейтралей трансформаторів та автотрансформаторів електричної мережі даної напруги, а мережу, що працює за таких умов, називають мережею з ефективним заземленням нейтралі. У перехідному режимі в мережах з ефективно заземленою нейтраллю кратність внутрішніх перенапруг не перевищує 2,5.

Чим більша кількість заземлених нейтралей, тим менші внутрішні перенапруги. Тому в мережах 330 кВ та вище застосовують глухе заземлення всіх трансформаторів та автотрансформаторів.

Однак заземлення всіх або дуже великої кількості нейтралей трансформаторів призводить до значного зростання струму однофазного короткого замикання, чого слід уникати у випадках, де це можливо, наприклад,

в мережах 110 кВ за наявності великої кількості підстанцій, що приєднані до ліній електропередачі глухими відгалуженнями. Кількість заземлених нейтралей трансформаторів у мережі обмежується також умовами роботи релейного захисту. Тому в мережах 110 кВ заземляють тільки таку кількість нейтралей, що забезпечує згадану вище ефективність заземлення та допустиму напругу на нейтралях незаземлених трансформаторів із РПН (регулюванням напруги під навантаженням) при однофазних коротких замиканнях.

## **1.2 Опис лабораторної установки**

Лабораторний стенд являє собою фізичну модель електричної мережі (рис. 1.8), що відповідає схемі, наведеній на передній панелі стенду.

Стенд дозволяє проводити дослідження таких трифазних мереж: трипровідної з ізольованою нейтраллю; трипровідної з компенсованою нейтраллю; трипровідної із заземленою нейтраллю; чотирипровідної з ізольованою нейтраллю; чотирипровідної із заземленою нейтраллю.

## **1.3 Робоче завдання**

На моделі необхідно дослідити роботу трипровідних електричних мереж з ізольованою, компенсованою та заземленою нейтраллю в нормальному та післяаварійному (замикання однієї з фаз на землю) режимах. При цьому фіксуються фазні та лінійні напруги мережі, напруга зміщення нейтралі, струм замикання фази на землю.

Результати вимірювань значень напруги та струму зміщення нейтралі у досліджуваних режимах занести до табл. 1.1.

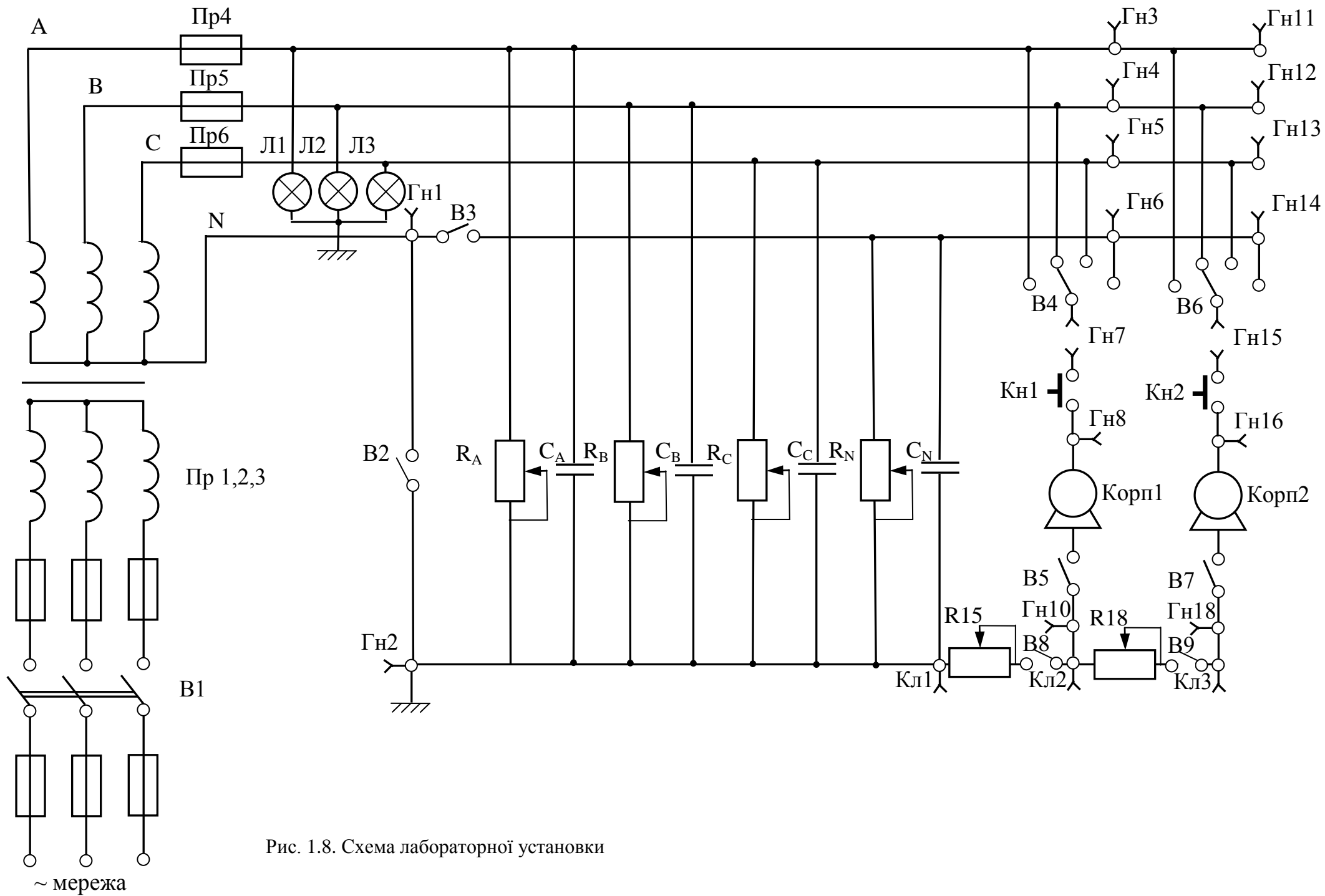


Рис. 1.8. Схема лабораторної установки



Таблиця 1.1 Результати вимірювань

Режим роботи нейтралі та характеристики мережі	Режим роботи	Лінійні напруги, В			Фазні напруги, В			Напруга зміщення нейтралі, В	Ємнісний струм замикання на землю, А
		$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_A$	$U_B$	$U_C$		

В звіті мають бути представлені:

1. Мета роботи та короткі теоретичні відомості.
2. Спрощена принципова схема мережі, що досліджується.
3. Результати лабораторних вимірювань.
4. Векторна діаграма напруг та струмів, побудована для випадку замикання фази на землю в мережі з ізольованою нейтраллю. Векторну діаграму слід будувати зазначивши масштаб за струмом та напругою.
5. Висновки про надійність та безперебійність електропостачання за різних режимів роботи нейтралі.
6. Висновки про безпеку обслуговування обладнання, що підключене до електричної мережі за різних режимів роботи нейтралі.

#### Контрольні запитання

1. Перелічіть відомі вам режими нейтралей та відповідні їм класи напруг електричних мереж?
2. Якими вимогами визначаються режими роботи нейтралей мереж до і понад 1000 В?
3. Як можна компенсувати ємнісний струм замикання фази на землю в мережі, що працює з ізольованою нейтраллю?
4. Що означав вираз «мережа з ефективним заземленням нейтралі»?
5. Як режим роботи нейтралі впливає на надійність та безперебійність електропостачання?

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Мета роботи – вивчити заземлювальні пристрої (ЗП) електроустановок та вимоги, які пред'являються до їх характеристик.

### 2.1 Загальні положення

Заземлення електричних установок прийнято підрозділяти на захисні і робочі.

*Захисним заземленням*, яке виконують для забезпечення електробезпеки персоналу, називається навмисне металеве з'єднання з ЗП елементів електроустановок, які в нормальному режимі не знаходяться під напругою.

*Робочим заземленням* називається заземлення будь-якої точки електроустановки, що функціонує під напругою, необхідне для забезпечення належного режиму роботи установки в нормальних або аварійних умовах. Воно може здійснюватися безпосередньо або через спеціальні апарати (опори, розрядники, пробивні запобіжники та ін.).

*Заземлювальний пристрій* представляє собою сукупність заземлювача і заземлювальних провідників.

*Заземлювач* – це електрод або група електродів, забитих вертикально в землю.

В електроустановках із глухозаземленою нейтраллю при замиканнях на заземлені частини повинне бути забезпечене надійне автоматичне відключення пошкоджених ділянок мережі з найменшим часом відключення. З цією метою на електроустановках напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю є обов'язковим металевий зв'язок корпусів електроустановки із заземленою нейтраллю електроустановки.

До частин, що підлягають заземленню, відносяться:

- корпуси електричних машин, апаратів, трансформаторів, світильників;

- приводи електричних апаратів;
- вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів;
- каркаси розподільчих щитів, щитів керування, щитків і шаф;
- металеві конструкції розподільчих пристроїв, металеві кабельні конструкції, металеві корпуси кабельних муфт, металеві оболонки і броня контрольних і силових кабелів, металеві оболонки проводів, сталеві труби електропроводки та інші металеві конструкції електроустаткування.

Широко поширені заземлювачі із сталевих стрижнів, труб і куткової сталі. Довжина електродів 2...3 м, а відстань між ними – приблизно 2,0...2,5 м.

Щоб зменшити коливання значення опору заземлювача, пов'язаного зі зміною вологості ґрунту та температури, заземлювачі забивають у траншеї глибиною 0,5...0,7 м. Торці електродів з'єднують зварюванням з горизонтально розташованими сталевими пластинами, переріз яких визначається, в основному, міркуваннями можливої корозії.

Разом зі штучними заземлювачами використовують і природні, які включають паралельно. Природними заземлювачами називають струмопровідні частини комунікацій і споруд будь-якого призначення, що знаходяться в контакті з землею. Сюди відносяться трубопроводи, обсадні труби, оболонки кабелів, металеві каркаси будівель, залізобетонні фундаменти та інше.

Опір ЗП представляє собою суму опорів заземлювальних провідників та опору, який чинить земля струму, що протікає по ній. Земля як провідник електричного струму має дві особливості:

1. Земля має дуже великий питомий опір. Наприклад, питомий опір суглинку дорівнює приблизно  $1 \cdot 10^{-4}$ , а мідного провідника –  $0,0175 \cdot 10^{-4}$  Ом·см.

2. Переріз землі, як провідника, не однаковий. У місці входу (виходу) струму в землю він дорівнює сумі поверхонь всіх електродів заземлювача, тобто поверхні стикання заземлювача з землею, а в міру віддалення від нього переріз землі дуже швидко зростає. Тому найбільший опір струму земля створює поблизу входу (виходу) струму в землю. У міру віддалення від цього місця опір струму, що розтікається, швидко спадає. На відстані більше 20 м від

місця входу (виходу) струму в землю струм розтікається за настільки великим перерізом, що земля практично перестає чинити опір струму, що розтікається.

Оскільки опір заземлювальних провідників набагато менший опору, що чинить зона розтікання, тому ним нехтують, і під опором  $R_3$  ЗП розуміють тільки опір зони розтікання.

Опори заземлювачів різні для електродів з різними поверхнями стикання із землею (чим більше поверхня стикання, тим менше опір). Опір розтіканню струму може бути визначено методом амперметра-вольтметра на підставі закону Ома:

$$R_3 = \frac{U_3}{I_3}, \quad (2.1)$$

де  $U_3$  - падіння напруги на об'ємі землі, який чинить опір струму, що розтікається;  $I_3$  - струм заземлювача.

Розглянемо рис. 2.1, на якому представлено схему вимірювання падіння напруги на об'ємі землі.

Положення електрода 2, званого зазвичай зондом, за допомогою якого вольтметр з'єднується з нульовою зоною землі, не грає ролі. Істотним є лише те, що він повинен знаходитися в зоні розтікання, оскільки в цьому випадку вольтметр виміряє не повну величину  $R_3$ , а тільки її частину, і величина  $R_3$ , знайдена за (2.1), буде менше дійсної. При вимірюванні величини  $R_3$  слід пам'ятати, що на точність її визначення впливають внутрішній опір вольтметра  $r_6$  і опір  $R_{33}$  зонда.

Розглянемо схему заміщення, елементів схеми рис. 2.1, показану на рис. 2.2.

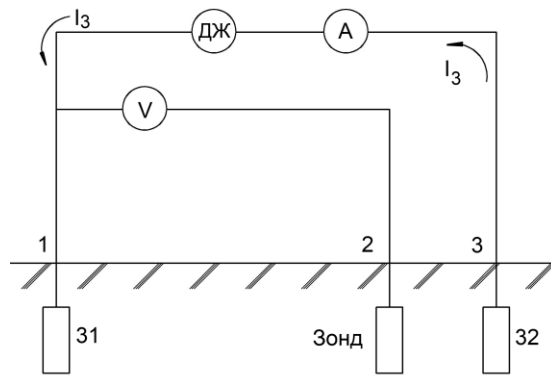


Рис. 2.1. Схема елементів мережі

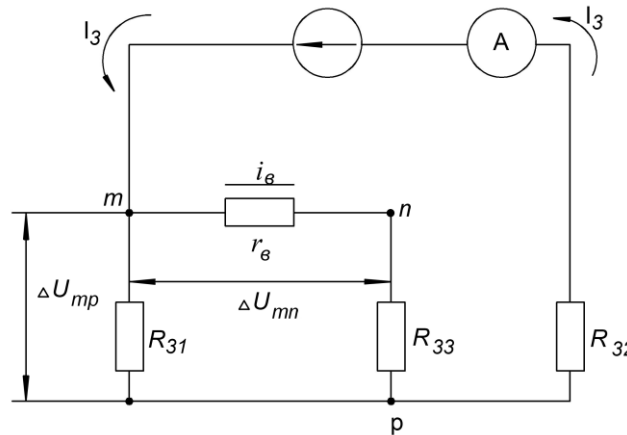


Рис. 2.2 Схема заміщення елементів мережі

В формулу (2.1) при визначенні опору розтіканню струму треба підставляти замість величини  $U_3$  падіння напруги  $\Delta U_{mp}$  між точками  $m$  і  $p$ , яке вимірюється вольтметром:

$$\Delta U_{mn} = \Delta U_{mp} - i_e \cdot R_{33},$$

де  $i_e$  – струм, який протікає через вольтметр,  $i_e = \frac{\Delta U_{mp}}{r_e + R_{33}}$ .

Тоді покази вольтметра дорівнюватимуть

$$U_e = \Delta U_{mn} = \Delta U_{mp} \left( 1 - \frac{R_{33}}{r_e + R_{33}} \right). \quad (2.2)$$

Таким чином, чим менше опір  $R_{33}$  зонда і чим більший внутрішній опір вольтметра, тим ближче до одиниці вираз, що стоїть у дужках, тобто виявиться ближче виміряна напруга до напруги між точками  $m$  і  $n$ .

При вимірі  $R_3$  в умовах експлуатації, користуючись вольтметром з відомим внутрішнім опором  $r_6$  і відомим опором зонда  $R_{33}$ , знаходять значення падіння напруги на заземлювачі:

$$\Delta U_{mp} = \frac{U_6}{1 - R_{33}/(r_6 + R_{33})}, \quad (2.3)$$

яке отримане перетворенням формули (2.2).

Для виконання своїх функцій ЗП повинен мати мінімальний опір  $R_3$ . Однак зниження опору розтіканню струму пов'язане з додатковими витратами, тому ПУЕ регламентує використання найбільших допустимих опорів заземлювальних пристроїв електроустановок. Наприклад, в установках напругою вище 1000 В, що живляться від мереж з глухозаземленою нейтраллю, опір  $R_3$  не повинен перевищувати 0,5 Ом; в установках напругою вище 1000 В, що живляться від мереж з ізольованою нейтраллю, якщо ЗП одночасно використовується для заземлення обладнання напругою до 1000 В,  $R_3$  обмежується такою нерівністю  $R_3 \geq 125/I_3$ ; в тому випадку, якщо до ЗП підключаються тільки електроустановки напругою вище 1000 В, то використовують нерівність  $R_3 \leq 250/I_3$ ; причому в обох останніх випадках опір  $R_3$  не повинен перевищувати 10 Ом. В установках напругою менше 1000 В з глухим заземленням нейтралі заземлення нейтралі генераторів і трансформаторів потужністю понад 100 кВА опір заземлювача повинен мати величину  $R_3 \leq 4$  Ом.

Для створення пристроїв з малим опором  $R_3$  необхідно вводити в ґрунт велику кількість електродів. При цьому треба враховувати, що збільшення кількості паралельно включених електродів знижує загальний опір заземлювача значно менше, ніж цього слід було очікувати згідно з розрахунком еквівалентного опору групи паралельно включених звичайних опорів. Таку ситуацію можна пояснити наступним чином.

Припустимо, що заземлювач, який складається з однієї труби, має опір  $R_3$ . Потрібно знизити його опір вдвічі. Кількість додаткових труб тих же

геометричних розмірів, які треба забити в землю, буде залежати від відстані між трубами. Наприклад, щоб обійтися забиванням тільки однієї додаткової труби, її необхідно ввести в землю на відстані, більшій ніж 40 м від першої труби. При менших відстанях труби будуть екранувати одна одну, і еквівалентний опір двох паралельно включених труб буде більше  $0,5 \cdot R_3$ .

Пояснимо причину цього явища. Струм з однієї труби розтікається по всіма можливими напрямками (рис. 2.3, а), використовуючи весь об'єм землі в зоні розтікання тільки в тому випадку, коли поблизу немає інших електродів. Якщо в зоні розтікання є інші електроди, то картина розтікання змінюється (рис. 2.3,б). Тепер кожен з електродів не повністю використовує об'єм землі навколо себе, що призводить до зростання опору розтіканню кожного електрода. Наявність третього електрода (рис. 2.3, в) ще збільшує ефект екранування, знижуючи тим самим переріз землі, що використовується навколо електрода.

Ступінь екранування характеризується коефіцієнтом екранування, який визначається як відношення опору  $R_e$ , знайденого без урахування екранування, до дійсного опору  $R_0$  заземлювача.

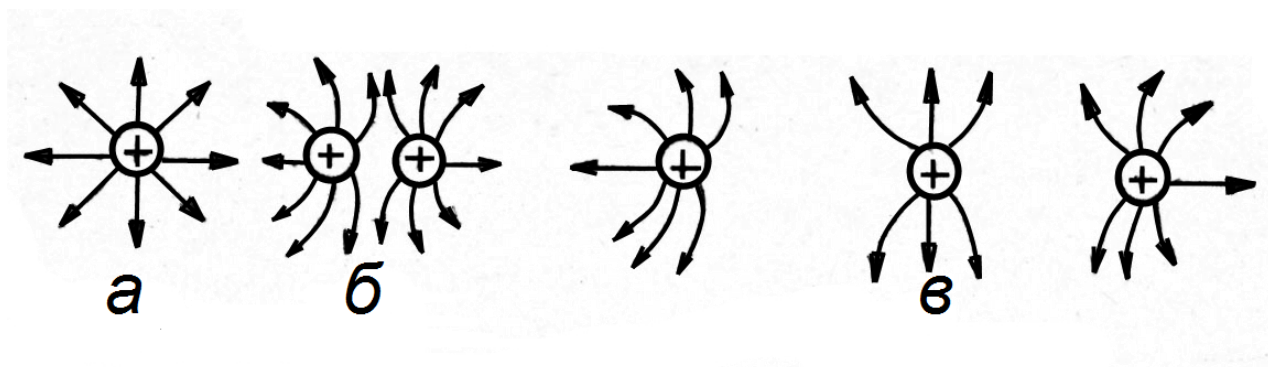


Рис. 2.3 Схема розтікання струму заземлення

При стіканні струму з заземлювача останній набуває деякого потенціалу  $U_0 = R_3 I_3$ . Поверхня землі в зоні розтікання струму також набуває певного потенціалу, розподіл якого залежить від схеми і розмірів заземлювача, глибини закладення провідників, структури і питомого опору ґрунту. Розподіл

потенціалу по поверхні землі з точки зору електробезпеки персоналу характеризується двома величинами:

- а) *Напругою дотику*  $U_{\text{дот}}$  називається напруга, що виникла в ланцюзі струму замикання на землю між точкою в зоні розтікання і обладнанням, до якого торкається (або може торкнутися) людина (див. рис. 2.4).
- б) *Напругою кроку або кроковою напругою*  $U_{\text{кр}}$ , якою називається напруга, зумовлена струмом замикання на землю між точками землі або підлоги, на яку людина або тварина може наступити одночасно (рис. 2.4).

Напруги  $U_{\text{дот}}$  і  $U_{\text{кр}}$  можна значно зменшити вирівнюванням потенціалів шляхом спорудження контурів заземлення, з великою кількістю забитих в землю електродів.

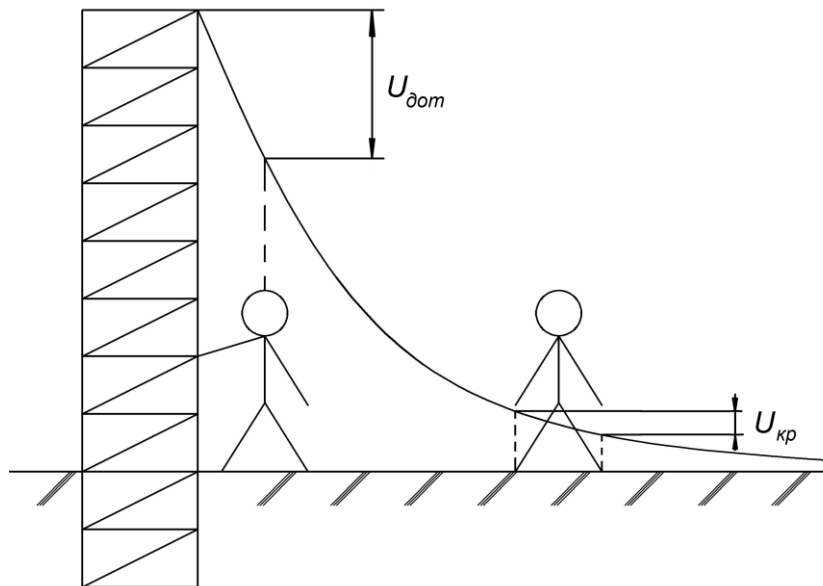


Рис. 2.4 Розподіл потенціалу по поверхні землі

На рис. 2.5 показано, як вирівнюється потенціал землі при збільшенні кількості електродів. Пунктирними лініями показані криві розподілу потенціалів від кожного електрода окремо, а суцільними – результуюча крива розподілення.



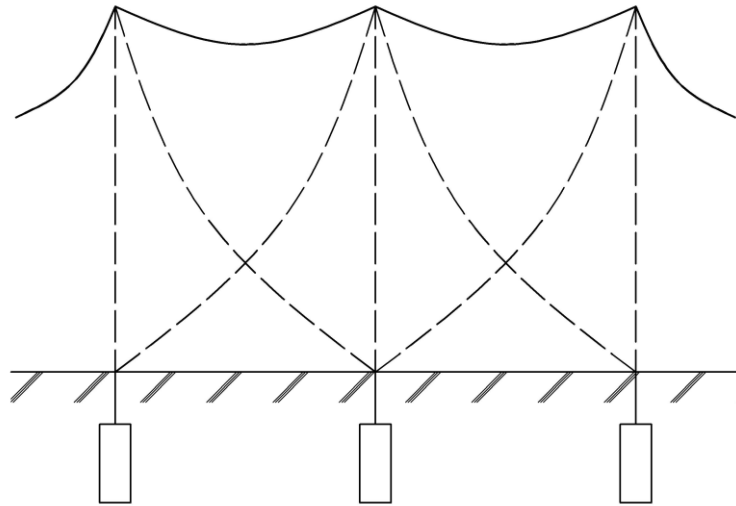


Рис. 2.5 Розподіл потенціалу по поверхні землі при збільшенні кількості електродів

## 2.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з макетом лабораторної установки, замалювати схему лабораторного стенду.
2. Визначити методом амперметра-вольтметра опір розтіканню струму:
  - а) для труб 1,2,3,4,5,6;
  - б) для дослідного контуру (ДК).

Результати вимірювань і обчислень занести в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Результати вимірювань для одиничних заземлювачів

№ труби	Струм в землю $I_3$ , А	Падіння напруги $U_3$ , В	Опір розтіканню струму, Ом

3. Визначити коефіцієнт використання заземлювача, що складається з труб:
  - а) 1 і 2; б) 1,2,3; в) 1,2,3,4; г) 1,2,3,4,5; д) 1,2,3,4,5,6.

Результати вимірювань і обчислень занести в табл. 2.2.

4. Переключити стенд в режим «Зняття кривої розподілу потенціалів» тумблером S1. Зняти дані для побудови кривої розподілу потенціалів навколо труби 1 (сім точок що досліджуються: труби 1,2,3,4,5,6 і дослідний контур). При цьому повинна бути включена труба № 1, всі інші

труби знаходяться у відключеному стані; вольтметр повинен постійно бути включеним на один діапазон (наприклад, 30 В). Результати вимірювань звести до табл. 2.3.

Таблиця 2.2 Результати вимірювань для групових заземлювачів

№ труби	Струм в землю, $I_3, A$	Падіння напруги $U_3, B$	Дійсний опір розтіканню струму, $R_\partial, Ом$	Еквівалентний опір складного заземлювача $R_e = \frac{1}{\sum y_i}$	Коефіцієнт використання заземлювача $\eta_e = \frac{R_e}{R_\partial}$

$y_i$  – провідність і-тої труби;

Таблиця 2.3 Розподіл потенціалу по поверхні землі при відділенні від місця замикання

Відстань від місця входу струму в землю, м	0	1	2	3	4	5	18	30
Потенціал, В								

Накреслити криву розподілу потенціалів навколо труби №1.

Примітка: при роботі стенду в режимі «Зняття кривої розподілу потенціалів» допустимо включати тільки першу трубу.

5. Користуючись кривою розподілу потенціалів, графічно визначити:

- напругу дотику за умови, що людина торкається до заземленого предмету, котрий знаходиться від неї на відстані 0,8 м;
- крокову напругу на відстані 0,8 м від заземлення (довжину кроку людини прийняти рівною 0,8 м) .

Примітка: Необхідно пам'ятати, що в лабораторній установці використовується вимірювальний струм  $I_{вим}$ , а не аварійний струм  $I_{ав}$  замикання на землю. Тому виміряні потенціали виявляться меншими ніж дійсні у відношенні  $I_{вим} / I_{ав}$ .

## 2.3. Зміст звіту

1. Мета і порядок виконання роботи.
2. Схема вимірювань.
3. Результати лабораторних досліджень.
4. Результати обробки експериментальних даних.

### Контрольні питання

1. Дайте визначення термінам «робоче» і «захисне» заземлення.
2. Для чого використовується захисне заземлення?
3. Що слід розуміти під природним заземленням?
4. Дайте визначення поняттям напруги кроку та дотику.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДОБОВОГО ГРАФІКА НАВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ І ЙОГО ПОКРИТТЯ

Мета роботи – вивчити основні принципи організації побудови добових графіків навантаження енергосистеми, величини, які характеризують його, і методику оптимального розподілення потужності між різними типами електричних станцій.

### 3.1 Загальні положення

Електричне навантаження окремих споживачів, та, відповідно, їх сумарне навантаження, є не постійним, воно безперервно змінюється в часі. Цей факт прийнято відображати графіком навантаження, тобто кривою зміни потужності електроустановки в часі, така крива найчастіше має два виражені максимуми.

Розрізняють графіки активної  $P$ , реактивної  $Q$ , повної  $S$  потужностей і струму  $I$  електроустановки. Як правило, графіки відображають зміну навантаження за певний період часу. За цією ознакою їх поділяють на добові (24 г), місячні, сезонні, річні і т. п.

За місцем, де знімається графік навантаження, або елемента енергосистеми, до якого вони належать, графіки можна розділити на такі групи:

1. Графіки навантаження споживачів, які визначають на шинах підстанцій;
2. Мережеві графіки навантаження – на шинах районних та вузлових підстанцій;
3. Графіки навантаження енергосистеми, що характеризують результуюче навантаження енергосистеми;
4. Графіки навантаження електростанцій.

За допомогою графіків електричних навантажень здійснюється обґрунтований вибір основного електротехнічного обладнання підстанцій (трансформаторів, компенсуючих пристроїв), перерізу провідників і визначення найбільш економічного режиму роботи всього електрообладнання.

Дослідження графіків на діючому підприємстві дозволяє виявити основні показники електричних навантажень протягом доби, що допоможе набутти практичного досвіду проектування електроустановок на підприємствах зі схожими електроприймачами.

### 3.2 Добові графіки навантаження

Добові графіки показують зміну навантажень протягом доби. Їх будують за показниками лічильників активної та реактивної енергії через кожен годину або декілька годин (для виявлення максимуму навантаження). Типові добові графіки найчастіше використовуються для проектування, вони є характерними для даного виду виробництва. У таких графіках максимальне добове навантаження прийняте за одиницю або за 100%, а решту навантаження виражено в частках одиниці або у відсотках. Для побудови конкретного добового графіка необхідно знати максимальне навантаження і мати типовий добовий графік.

Для добових графіків активного та реактивного навантажень характерні такі величини: максимум активного (реактивного) навантаження за добу  $P'_m$ (МВт) і  $Q'_m$ (МВАр) .

Використовуючи добові графіки навантажень по тривалості можна одержати ряд узагальнених параметрів, які дозволяють достатньо легко оцінювати величини переданої енергії та її втрати в електричній мережі.

Графіки можуть бути задані у вигляді кривої  $P=f(t)$  або мати ступінчасту форму (рис. 3.1).

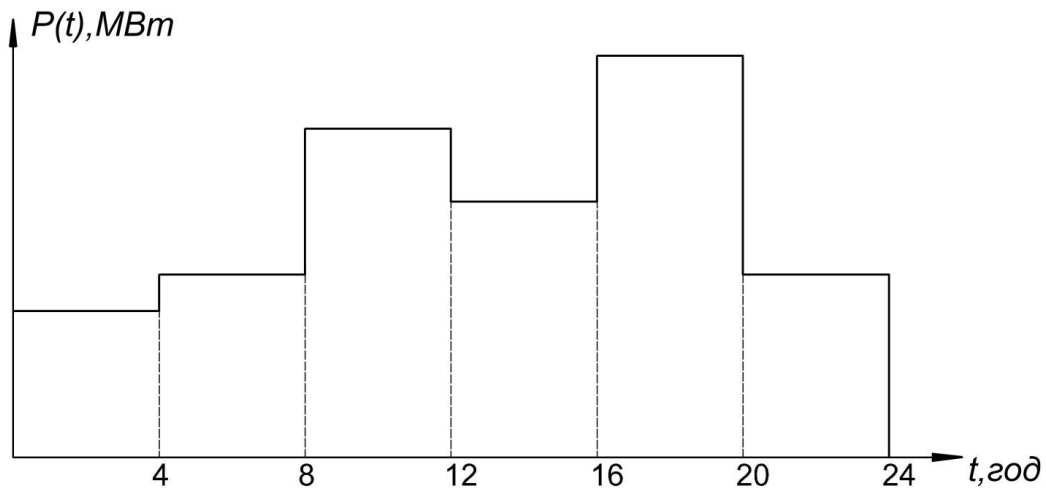


Рис. 3.1. Добовий ступінчастий графік навантаження енергосистеми

Основні показники для добових графіків:

1. Кількість електричної енергії, переданої електричною мережею до споживачів за добу (МВт·год):

$$A_{\text{доб}} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i$$

2. Середнє активне навантаження за добу (МВт):

$$P_{\text{ср}} = \frac{A_{\text{доб}}}{24} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{24}$$

Для характеристики щільності графіка навантажень використовують два коефіцієнти:  $K_n$  – відношення мінімального навантаження до максимального;  $K_{щ}$  – відношення середнього навантаження до максимального.

3. Коефіцієнт нерівномірності навантаження (в.о.):

$$K_n = \frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{max}}}$$

4. Коефіцієнт щільності (в.о.):

$$K_{щ} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{max}}}$$

5. Число годин використання максимуму навантаження  $T_{\max}$  – час, протягом якого споживач, працюючи з найбільшим навантаженням, отримав би таку кількість енергії  $A$ , як за добу при роботі за реальним графіком навантаження:

$$T_{\max} = \frac{A_{\text{доб}}}{P_{\max}} = \frac{\int_0^t P dt}{P_{\max}} = \frac{\sum_0^t P_i \Delta t_i}{P_{\max}}$$

6. Час найбільших втрат  $\tau$  – час, протягом якого втрати енергії  $\Delta A$  в системі електропостачання, що працює з максимальним навантаженням, будуть дорівнювати втратам енергії за добу при роботі за реальним графіком навантаження:

$$\tau = \frac{\Delta A_{\text{доб}}}{\Delta P_{\max}} = \frac{\int_0^t P^2 dt}{P_{\max}^2} = \frac{\sum_0^t P_i^2 \Delta t_i}{P_{\max}^2}$$

7. Середньоквадратична потужність (МВт):

$$P_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{24} \left( \sum_{i=1}^n P_i^2 t_i \right)}$$

Є декілька методів знаходження втрат енергії в лініях енергосистеми:

За допомогою часу найбільших втрат  $\Delta P_{\max}$  :

$$\Delta P_{\max} = \frac{P_{\max}^2}{U_i^2} \cdot r$$

$$\Delta A = \Delta P_{\max} \cdot \tau$$

За допомогою середньоквадратичної потужності  $P_{\text{ср.кв}}$  :

$$\Delta P_{\text{ср.кв.}} = \frac{P_{\text{ср.кв.}}^2}{U_H^2} \cdot r$$

$$\Delta A = \Delta P_{\text{ср.кв.}} \cdot 24$$

### 3.3 Поняття про оптимальний розподіл активних потужностей

Енергетична система об'єднує електростанції різних типів, кожна з яких має кілька генераторів. Зазвичай сумарна потужність встановлених генераторів перевищує навантаження енергосистеми. При цьому виникає питання про розподіл активного навантаження між електростанціями і окремими генераторами.

При визначенні оптимального режиму треба враховувати техніко-економічні показники устаткування електростанцій, вартість палива і втрати потужності в електричній мережі.

За критерій оптимального розподілу активних потужностей між тепловими електростанціями в Україні приймають мінімум сумарної витрати палива в енергосистемі  $B_{\Sigma}$  при дотриманні балансу потужності

$$\Sigma P_G = \Sigma P_C = \Sigma P_H + \Sigma \Delta P$$

де  $\Sigma P_G$  – генерація активної потужності станціями (з урахуванням потужності, що витрачається на власні потреби);

$\Sigma P_C$  – сумарне споживання активної потужності;

$\Sigma P_H$  – сумарна активна потужність навантаження споживачів;

$\Sigma \Delta P$  – сумарні втрати активної потужності.

На рис. 3.2 наведено сумарний графік навантаження енергосистеми. Розподіл навантаження між різними електростанціями виконують, враховуючи особливості їх технологічного режиму. У нижній – базовій частині графіка навантаження працюють ті електростанції, потужність яких за умовами роботи обладнання регулюватися не може. Це гідроелектростанції (ГЕС) без водосховищ або ГЕС з водосховищами, які мають виробляти потужність, що відповідає санітарному пропуску води, а також теплоелектроцентралі (ТЕЦ) і атомні станції (АЕС). У напівпіковій частині графіка працюють конденсаційні електростанції (КЕС), а у верхній – піковій частині – ГЕС з водосховищами і гідроакumuлюючі станції (ГАЕС).



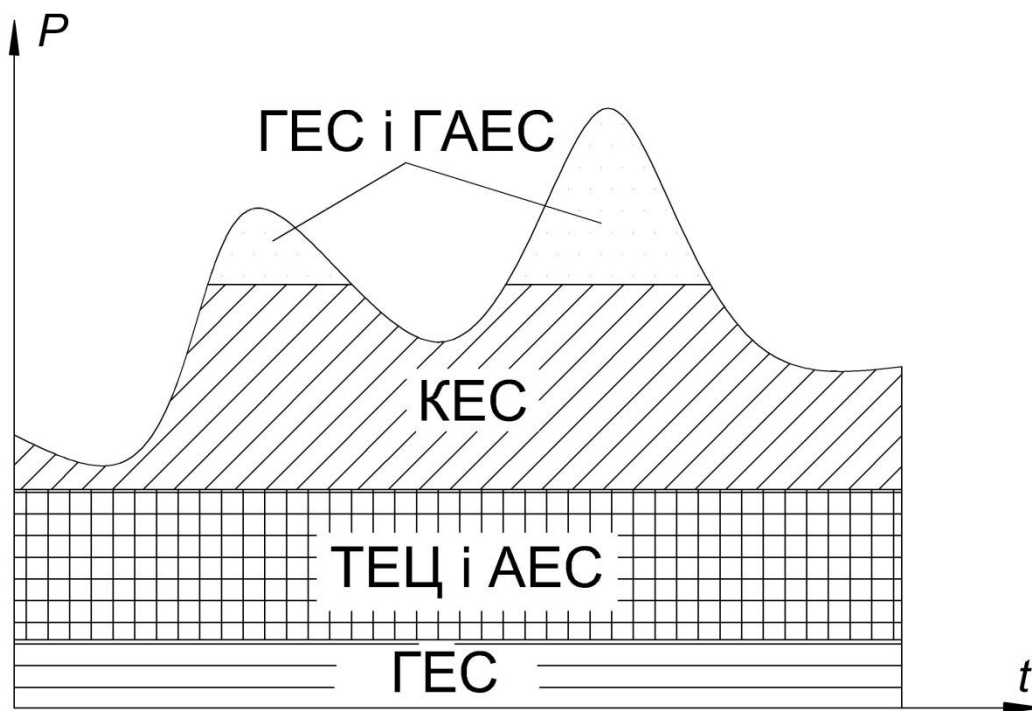


Рис. 3.2. Розподіл активної потужності між електростанціями

Електростанції, що працюють в піковій частині графіка навантаження, регулюють активну потужність, тобто завантажуються пізніше інших і розвантажуються раніше. Це маневрені станції, що регулюють частоту і обмінні потоки потужності з іншими енергосистемами. Вони повинні мати достатній діапазон регулювання та надійне обладнання з добре працюючою системою вторинного регулювання частоти.

### 3.4 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторним стендом;
2. Подати напругу на лабораторний стенд;
3. Включити генератор випадкових чисел тумблером S1. Після натискання кнопки К на табло з'явиться цифра, яка вказуватиме у яке положення потрібно перевести вимикач на першій секції. Для отримання свого варіанту повторити цю дію 6 разів для наступних секцій. Записати шифр варіанту в протокол. Виключити тумблер S1.

4. Включити тумблер S2, при цьому загоряться світлодіоди першої секції. Зняти покази струму і напруги на всіх секціях по чергово. Переключення між секціями відбувається автоматично.

За результатами вимірювань визначити:

1. Кількість електричної енергії, переданої по електричній мережі до споживачів за добу  $A_{об}$  ;
2. Максимальне активне навантаження за добу  $P_{max}$
3. Середнє активне навантаження за добу  $P_{cp}$  ;
4. Коефіцієнт нерівномірності навантаження  $K_n$  ;
5. Коефіцієнт щільності  $K_{щ}$  ;
6. Число годин використання максимуму навантаження  $T_{max}$  ;
7. Час найбільших втрат  $\tau$  ;
8. Середньоквадратичну потужність  $P_{cp.kv}$  ;
9. Втрати енергії в лініях енергосистеми  $\Delta A$  ;

Опори ліній приведені до вищої напруги 750 кВ, характерної для функціонуючих системоутворюючих зв'язків, приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Варіанти активного опору лінії

№ бриг.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r, Ом	3	3.4	5.1	4.7	3.5	4.2	3.9	4.5	5	3.7

10. У Вашому варіанті завдання (для кожного 4-годинного інтервалу графіка) запропонувати розподілення типів електростанцій в базисній, піковій і напівпіковій зонах добового графіка навантаження. Параметри блоків електростанцій зазначені у таблиці 3.2.

Для розрахунку активної потужності слід використовувати формулу із наступним поправочним коефіцієнтом:  $P = I \cdot U \cdot 10^8$

Таблиця 3.2. Варіанти параметрів блоків електричних станцій

№ бригади	АЕС	КЕС	ТЕЦ	ГЕС	ГАЕС
1	4000	2x1600	1500	2x1500	2x600
2	3800	3x1500	2x1000	1500	1200
3	3500	3x2000	800	6x300	1300
4	4600	3x1200	2x1000	1600	1600
5	4500	3x1500	1400	500	2x900
6	4800	2000	2x1000	1500	1300
7	5000	2x1200	1300	1200	2x700
8	5500	3000	2x600	1000	1300
9	4000	2200	1600	1400	800
10	4000	2x1500	1200	1300	900

Мінімальні потужності, на яких повинні працювати КЕС, АЕС, ТЕЦ і ГЕС, задаються викладачем в границях 70-80% від їх номінальної потужності. Надлишкову енергію або нестачу енергії віддаємо або отримуємо з сусідньої енергосистеми. Результати замірів та обчислень приводимо в табл.3.3.

Таблиця 3.3. Результати замірів та обчислень

Інтервали графіка	Положення тумблера	I, мА	U, В	P, МВт
0-4 год				
4-8 год				
8-12 год				
12-16 год				
16-20 год				
20-24 год				

### 3.5 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Визначення якісних показників графіка навантаження за даними вимірів.
3. Ступінчатий добовий графік навантаження  $P(t)$ .
4. Варіанти розподілу типів електростанцій в базисній, піковій і напівпіковій зонах добового графіка навантаження.
5. Висновки по роботі.

## Контрольні запитання

1. Які основні характеристики графіка навантаження ?
2. Які характерні зони графіків навантаження і типи електростанцій, які використовуються для їх покриття?
3. Що є фізичним змістом понять про величини  $T_{\max}$ ,  $\tau$ ,  $P_{\text{ср.кв}}$  ?
4. В якій частині графіка навантаження розташовується генерація ГАЕС? Чому?

## КОНСТРУКЦІЯ ТА НАГРІВАННЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ

Мета роботи – вивчити конструкції силових кабелів, дослідити їхнє нагрівання при різних умовах і режимах експлуатації.

### 4.1 Конструкція силових кабелів

Силові кабелі та кабельні лінії (КЛ) призначені для передачі та розподілу електричної енергії. Силові кабелі можна класифікувати за такими ознаками: конструктивним особливостям, видом ізоляції, характерними умовами експлуатації. Найбільш розповсюджений варіант класифікації силових кабелів наведено на рис. 4.1.

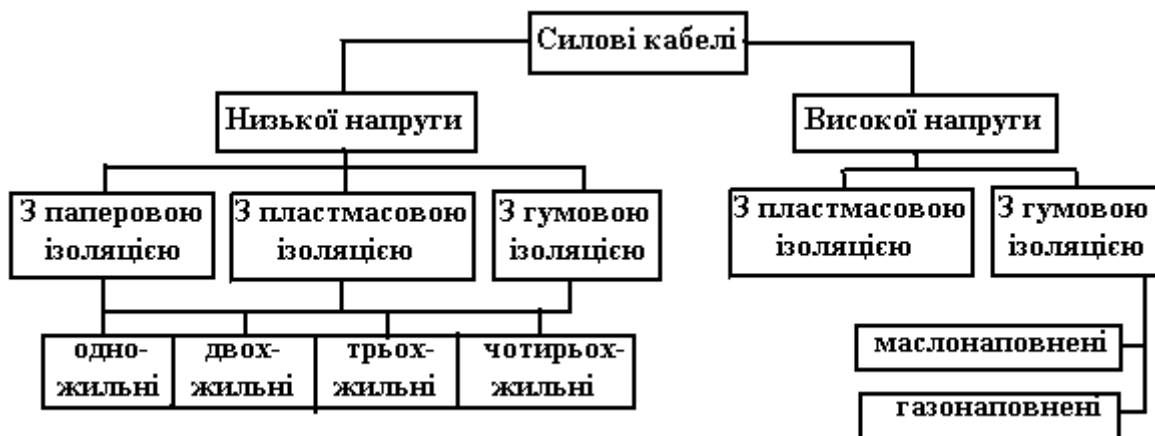


Рис. 4.1. Класифікація силових кабелів

Силові кабелі складаються з наступних основних конструктивних елементів: струмопровідних жил, ізоляції, оболонки і захисних покривів. Крім основних елементів у конструкцію силових кабелів можуть входити екрани, нульові жили, жили захисного заземлення й заповнювачі.

Струмопровідні жили використовують для проходження електричного струму. Вони бувають основними й нульовими.

Основні жили призначені для здійснення основної функції кабелю – передачі електроенергії.

Нульові жили використовуються для протікання різниці струмів фаз за умови нерівномірного їх навантаження. Приєднані вони до нейтралі джерела струму.

Жили захисного заземлення є допоміжними жилами кабелю і призначені для з'єднання неметалевих частин, що перебувають під робочою напругою, електроустановок, до яких підключений кабель з контуром захисного заземлення джерела струму.

Виготовляються струмопровідні жили з міді або алюмінію. Опір мідної струмопровідної жили, перерахований на  $1 \text{ мм}^2$  номінального перетину, 1 метр довжини й приведений до температури  $20^\circ\text{C}$ , повинний бути не більше  $0,0178 \text{ Ом}$ , алюмінієвої жили – не більше  $0,029 \text{ Ом}$ .

Ізоляція служить для забезпечення необхідної електричної міцності струмопровідних жил кабелю відносно одна одної і до заземленої оболонки (землі).

Ізоляція, яка розташована безпосередньо на струмоведучій жилі, називається ізоляцією жили.

Ізоляція багатожильного кабелю, накладена поверх ізольованих скручених жил, називається поясною ізоляцією.

У силових кабелях використовуються паперова просочена й пластмасова ізоляції.

Паперова просочена ізоляція – це багат шарова ізоляція зі стрічок кабельного паперу, накладена у вигляді обмотки на струмопровідну жилу й просочена ізоляційним складом.

Для виготовлення пластмасової ізоляції у вигляді суцільного шару використовують полівінілхлорид, поліетилен, етиленпропілен або зшитий поліетилен. Поверх скручених ізольованих жил розташовують поясну ізоляцію, виготовлену з матеріалу цієї ізоляції або з полівінілхлоридного пластикату.

Основною вимогою, що пред'являється до ізоляції силових кабелів, є висока електрична міцність. Збільшення електричної міцності ізоляції, дозволяє зменшити її товщину, що, відповідно, поліпшує відвід тепла від жили, дозволяє збільшувати робочий струм, зменшує витрату матеріалів на виготовлення кабелю, а також підвищує його гнучкість.

Екрани призначені для вирівнювання електричного потенціалу уздовж ізоляційної конструкції, а також для захисту зовнішніх ланцюгів від впливу електричних полів струмів, що протікають кабелем.

Заповнювачі використовуються для усунення вільних проміжків між конструктивними елементами кабеля з метою герметизації, надання необхідної форми й механічної стійкості конструкції.

Оболонки призначені для запобігання проникненню в ізоляцію вологи, захисту її від впливу світла, різних хімічних речовин, а також запобігання механічних ушкоджень. У кабелях з паперовою ізоляцією оболонки виготовляють зі свинцю або алюмінію.

Алюмінієві оболонки герметичні та у 2-2,5 рази міцніші свинцевих, а також мають підвищену стійкість до вібраційних навантажень. Висока електрична провідність алюмінію дозволяє використовувати оболонки як екран для захисту кабеля від зовнішніх електричних впливів. У ряді випадків алюмінієва оболонка може використовуватися як нульова жила силового кабелю.

Пластмасові – полівінілхлоридні й поліетиленові оболонки відрізняються від ізоляційного шару відповідним підбором пластифікаторів та стабілізаторів, які забезпечують підвищену стійкість проти світлового старіння. Крім того, ці оболонки більш стійкі до агресивних середовищ порівняно з алюмінієвими й свинцевими.

Оболонки з полівінілхлоридного пластикату не поширюють горіння, вологостійкі, маслостійкі, але мають істотний недолік – при низьких температурах стають крихкими.

Захисні покриття призначені для захисту оболонки кабелю від зовнішніх впливів. Залежно від конструкції кабелю у захисні покриття входять подушка, бронепокров і зовнішній покров.

Подушка – частина захисного покриття, накладена на оболонку й призначена для захисту оболонки від ушкодження її стрічками або дротом броні. Товщина подушки залежно від конструкції кабелю перебуває у межах від 1,4 до 3,2 мм.

Бронепокров – частина захисного покриття, яка виготовляється з металевих стрічок або дротів і використовується для захисту кабелю від зовнішніх механічних впливів. Застосовуються сталеві стрічки, покриті бітумним складом або оцинковані, товщиною 0,3; 0,5; 0,8 мм і шириною 10-60 мм. Діаметр сталевих оцинкованих дротів від 1,4 мм до 6,0мм.

Зовнішній покров – частина захисного покриття, кабелю призначеного для захисту броні від корозії й виконана із захисного шланга, який випресовують з пластмаси або з волокнистих матеріалів, просочених спеціальним протигнільним або негорючим складом. Товщина зовнішнього покриття з волокнистих матеріалів становить від 1,6 до 3,1 мм.

## 4.2 Нагрівання силових кабелів

Рівняння кривої нагрівання провідників під впливом електричного струму, при незмінних умовах охолодження та потужності нагрівання, має вигляд

$$\theta_t = \theta_{max} (1 - e^{-t/T}) \quad (4.1)$$

де  $\theta_t$  – поточне значення перевищення температури провідника над температурою повітря під впливом електричного струму, °С;  $\theta_{max}$  – гранична максимальна температура перевищення температури провідника над температурою повітря, °С;  $T$  – постійна часу нагрівання (часу досягнення температури провідника усталеного значення за умови повної відсутності теплового обміну з навколишнім середовищем).



Рівняння кривої охолодження провідників після відключення електричного струму має вигляд:

$$\theta_I = \theta_{max} e^{-t/T} \quad (4.2)$$

Криві нагрівання  $\theta_I(t)$  і охолодження  $\theta_I'(t)$  провідника, побудовані по (4.1) і (4.2), зображені на рис. 4.2.

Якщо струм проходить провідником переривчасто, крива зміни температури при нагріванні має вигляд ламаної  $a-b-c-d-e$ , що складається з відрізків кривої нагрівання  $\theta_I(t)$  і охолодження  $\theta_I'(t)$ . Криві  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  і  $\theta_4$  характеризують, відповідно, значення максимальної, середньої й нижньої температури перегріву провідника при переривчастому й циклічному режимах роботи електроспоживачів.

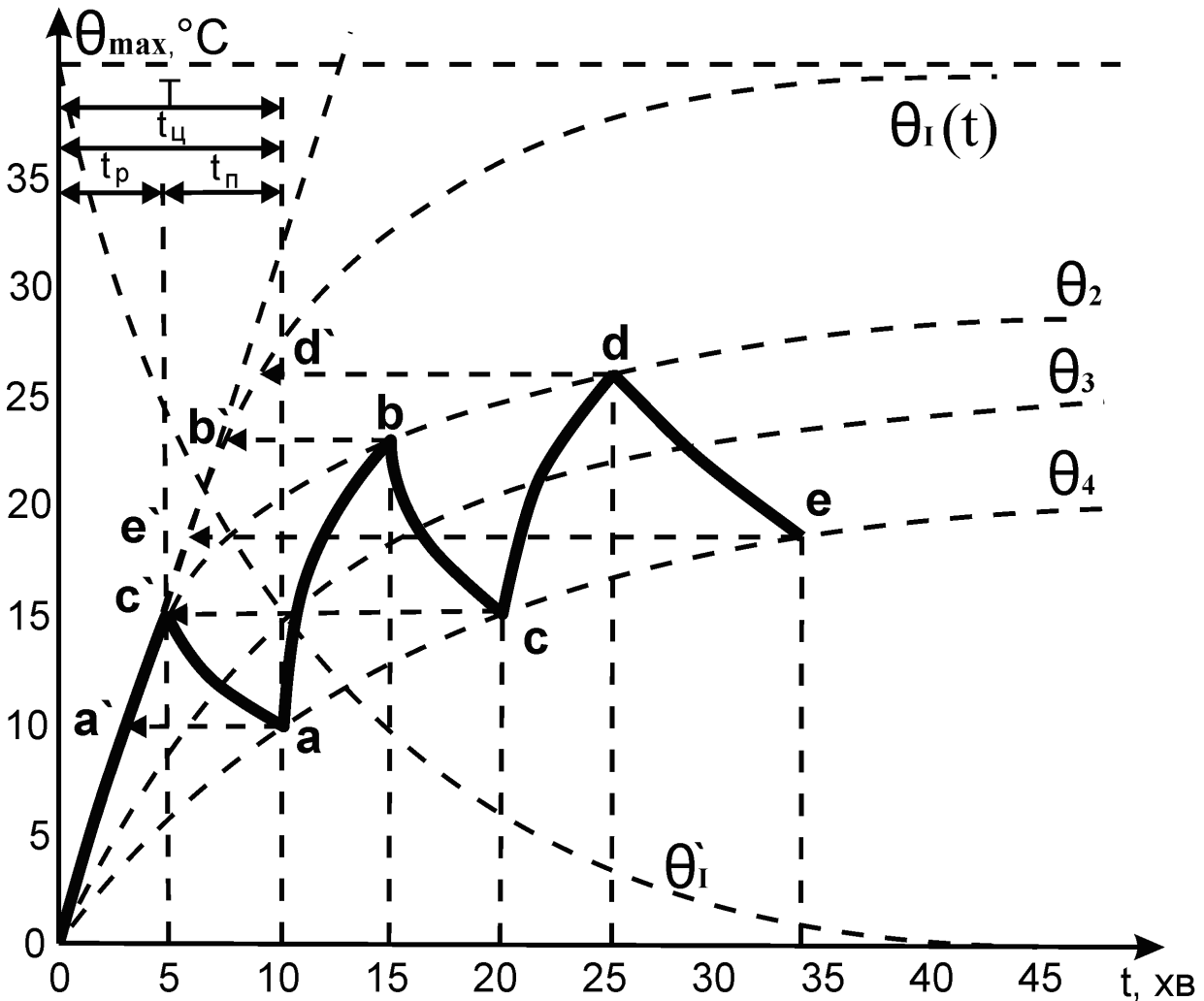


Рис. 4.2. Криві нагрівання  $\theta_I(t)$  і охолодження  $\theta_I'(t)$  провідника

Крива  $\theta_I(t)$  може бути отримана шляхом графічного переносу точок  $a$  в  $a'$ ,  $b$  в  $b'$  і т.д. З рис. 4.2 слідує, що за умовою перегріву припустимі струми в провідниках при переривчастому режимі роботи можуть бути більшими, ніж у режимі постійного навантаження.

#### *Визначення постійної часу нагрівання*

Підставляючи у рівняння 4.1 значення часу  $t = T$ ,  $t = 2T$ ,  $t = 3T$  множник  $(1 - e^{-t/T})$  приймає значення 0,632; 0,867; 0,95. Таким чином, якщо відоме усталене значення перевищення температури, можна визначити і постійну часу нагріву рис. 4.3.

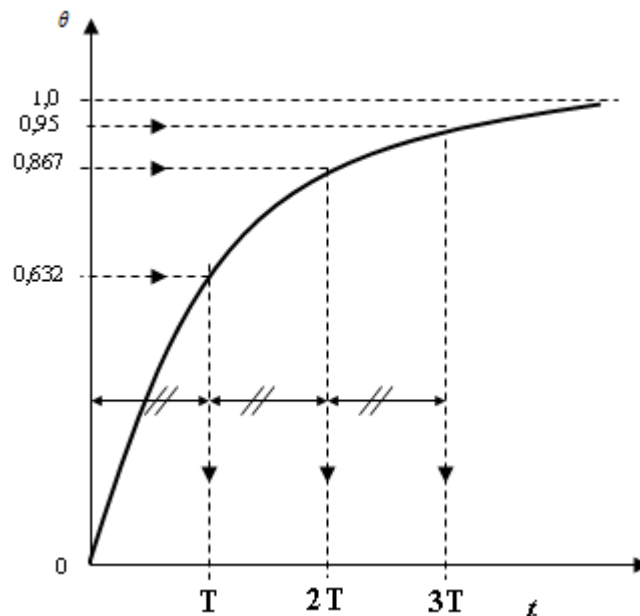


Рис. 4.3. Визначення постійної часу нагрівання

### **4.3 Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитися із лабораторним стендом.
2. Дослідити температурний режим кабелю КЛ-1 або КЛ-2 (за вказівкою викладача) при циклічному режимі роботи. Вимірювання температури провести для 3-х циклів (5 хв нагрівання та 2 хв охолодження), інтервал виміру температури 30 с. Виміряні значення температури занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Результати вимірювань при циклічному нагріванні

Час, с	Перевищення температури $\theta, ^\circ\text{C}$					
	Цикл 1		Цикл 2		Цикл 3	
	нагрівання	охолодження	нагрівання	охолодження	нагрівання	охолодження

3. Дослідити температурний режим того ж кабелю, при постійному нагріванні. Попередньо слід довести температуру кабелю до значення в кінці нагрівання першого циклу. Увімкнути нагрівання кабелю, та фіксувати температуру кожні 60 с. Вимірювання проводити доти, доки не перестане зростати температура (буде однаковою упродовж останніх 5-ти хвилин). Вимірянні значення температури занести до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Результати вимірювань при постійному нагріванні

Час, с												
$\theta, ^\circ\text{C}$												

4. За даними таблиць 4.1 та 4.2 побудувати графіки кривих нагрівання кабелю при постійному та циклічному нагріванні.

5. Визначити постійну часу нагрівання. Для цього слід відкласти на осі  $\theta$  значення 0,632; 0,867; 0,95 та відповідно до рис 4.3 визначити 3 значення постійної часу.

\*Примітка: При визначенні температури перегріву вважати температуру навколишнього середовища рівною температурі кабелю до початку нагрівання.

#### 4.4 Зміст звіту

1. Мета і порядок виконання роботи.
2. Опис основних конструкцій кабелів 0,38...10 кВ.
3. Основні положення теорії нагрівання проводів і кабелів струмом.
4. Результати досліджень відповідно до порядку виконання роботи.

## Контрольні запитання

1. Основні конструктивні елементи силових кабелів.
2. Призначення та складові захисних покрів кабеля.
3. Струмopрoвідні жили та їх призначення.
4. Постійна часу нагрівання та її експериментальне визначення.

## РОЗРАХУНОК УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ПРОСТИХ ЗАМКНЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Мета роботи – навчитися визначити поточкорозподіл та режим напруги у простих замкнених електричних мережах.

### 5.1 Загальні положення

Лінія з двобічним живленням є найпростішим видом замкненої електричної мережі. Тут електрична енергія передається споживачам з двох боків від двох джерел живлення, як показано на рис. 5.1 а. Окремим випадком лінії з двобічним живленням є кільцева електрична мережа, представлена на рис. 5.1 б.

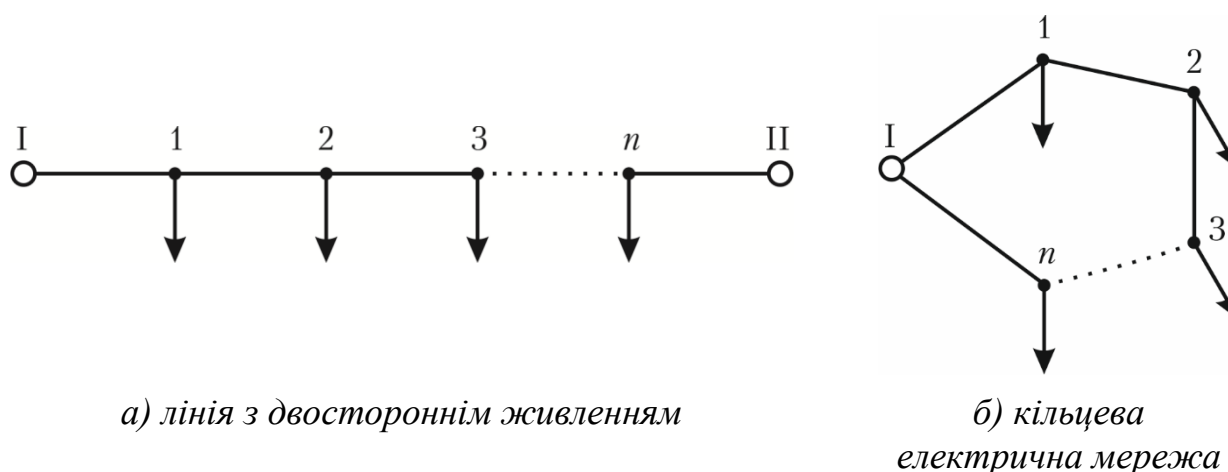


Рис. 5.1. Розрахункові схеми ліній з двобічним живленням

Лабораторна модель має 3 навантажувальні вузли та 2 джерела живлення рис. 5.2.

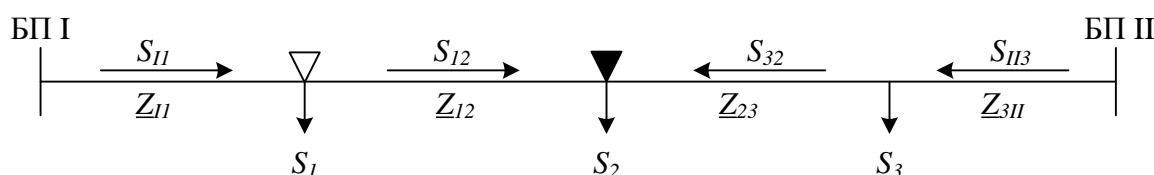


Рис. 5.2 Розрахункова схема мережі.

Потік потужності головної ділянки схеми дорівнює

$$\dot{S}_{I1} = \frac{\dot{U}_I - \dot{U}_{II}}{z_{I-II}} \hat{U}_I + \frac{\sum \dot{S}_i z_{iII}}{z_{I-II}} \hat{U}_I.$$

Зазначимо, що безпосереднє використання даного виразу для визначення потоку потужності головної ділянки неможливо, оскільки невідомий режим напруги в проміжних пунктах схеми. Оскільки режим напруги в пунктах схеми електричної системи в нормальних режимах відрізняється від номінального значення не більше, ніж на  $\pm 10\%$ , з достатньою інженерною точністю можна визначати вузлові струми і зрівняльну потужність за номінальною напругою електричної мережі. У цьому разі вираз набуває вигляду

$$\dot{S}_{I1} = \frac{\dot{U}_I - \dot{U}_{II}}{z_{I-II}} U_H + \frac{\sum \dot{S}_i z_{iII}}{z_{I-II}},$$

де  $U_H$  – номінальна напруга електричної системи,  $z_{iII}$  – опір мережі між вузлами  $i$  та  $II$ ,  $z_{I-II}$  – опір мережі між балансуєчими пунктами.

Потужності на інших ділянках мережі визначаються за допомогою I-го закону Кірхгофа:

$$\dot{S}_{12} = \dot{S}_{I1} - \dot{S}_1; \dot{S}_{23} = \dot{S}_{12} - \dot{S}_2; \dot{S}_{3II} = \dot{S}_{23} - \dot{S}_3.$$

На підставі отриманого наближеного потокорозподілу виконується розрахунок напруг у пунктах з урахуванням поздовжніх складових втрат напруги на ділянках.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_I - \frac{P_{11}r_{11} - Q_{11}x_{11}}{U_H} \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 - \frac{P_{12}r_{12} - Q_{12}x_{12}}{U_H} \\ \dot{U}_3 &= \dot{U}_{II} + \frac{P_{32}r_{32} - Q_{32}x_{32}}{U_H} \end{aligned}$$

Під час аналізу усталених режимів ліній з двобічним живленням у складі розрахункової схеми можна виділити вузол, до якого стікаються потоки

потужностей від обох джерел живлення. Такі вузли називають точками поточкорозділу. На рис. 5.2 точка поточкорозділу показана перегорнутим чорним трикутником.

Положення точки поточкорозділу у складі розрахункової схеми визначається різницею напруг на шинах джерел живлення та електричними навантаженнями в пунктах розрахункової схеми. Це означає, що зміна режимів джерел живлення та споживання електричної енергії може призводити до зміни положення точки поточкорозділу в розрахунковій схемі електричної системи. Зазначимо, що можливі випадки, коли точки поточкорозділу за активною та реактивною потужностями не співпадають. Так, наприклад, на рис. 5.2 незафарбований перегорнутий трикутник вказує на точку поточкорозділу за реактивною потужністю.

Очевидно, що точки поточкорозділу є електрично найвіддаленішими від джерел живлення з найнижчою напругою на своїх шинах. Це означає, що у разі, коли режим напруги в точках поточкорозділу задовольняє вимогам якості електричної енергії за напругою, у всіх інших пунктах розрахункової схеми режим напруги гарантовано допустимий.

## **5.2. Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитися із лабораторною моделлю.
2. По заданому викладачем варіанту вихідних даних і довідковій літературі заповнити табл. 5.1, 5.2.
3. Встановити на стенді необхідні опори ділянок моделі та навантажень пунктів.
4. Напруги в обох балансуєчих пунктах встановити 115 кВ. Фазу напруги другого БП встановити  $0^\circ$ .
5. Зняти покази на моделі та занести їх до таблиці 5.3. Визначити сумарні втрати потужності у мережі за потужностями балансуєчих пунктів:

$$\Delta \dot{S} = \dot{S}_I + \dot{S}_{II} - (\dot{S}_1 + \dot{S}_2 + \dot{S}_3).$$

6. Виконати аналітичних розрахунків режиму роботи лінії із двостороннім живленням та порівняти отримані результати із показами на моделі.

Таблиця 5.1 Параметри ліній електропередачі

№	Вихідні дані			Довідкові дані		Розрахункові значення	
	Ділянка	Марка проводу	Довжина l, км	Питомий опір, Ом/км		Опір ділянки, Ом	
				r <sub>0</sub>	x <sub>0</sub>	r	x
1	ДЖ-1						
2	1-2						
3	2-3						
4	3-ДЖ						

Таблиця 5.2 Навантаження пунктів

Номер пункту, №	Вихідні дані	
	P, МВт	Q, МВт
1		
2		
3		

Таблиця 5.3 Результати вимірів на моделі

Ділянки ліній	Виміри на ділянках		Номер пункту, №	Виміри в пунктах
	P, МВт	Q, МВАр		U, кВ
ДЖ-1			1	
1-2			2	
2-3			3	
3-ДЖ				

7. Дослідити вплив різниці напруг на кінцях лінії із двостороннім живленням на розподіл навантаження мережі між балансуєчими пунктами.

7а. При фіксованому рівні напруги  $U_I = 115$  кВ змінювати рівень напруги  $U_{II}$  в межах від 110 до 120 кВ при сталій фазі напруги  $\varphi_{II} = 0$ .



Результати вимірів потужностей балансуєчих пунктів занести до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 Вплив різниці рівнів напруг

	Напруга $U_{II}$ , кВ										
	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
$P_I$											
$Q_I$											
$P_{II}$											
$Q_{II}$											

7б. При фіксованих рівнях напруги  $U_I = U_{II} = 115$  кВ змінювати рівень фази  $\varphi_{II}$  в межах від  $-5^\circ$  до  $+5^\circ$ . Результати вимірів потужностей балансуєчих пунктів занести до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 Вплив різниці фаз напруг

	фаза $\varphi_{II}$										
	$-5^\circ$	$-4^\circ$	$-3^\circ$	$-2^\circ$	$-1^\circ$	$0^\circ$	$1^\circ$	$2^\circ$	$3^\circ$	$4^\circ$	$5^\circ$
$P_I$											
$Q_I$											
$P_{II}$											
$Q_{II}$											

8. За даними таблиць 5.4 та 5.5 побудувати відповідні графіки. Зробити висновки про вплив різниці напруг на кінцях лінії із двостороннім живленням на розподіл навантаження мережі між балансуєчими пунктами

### 5.3 Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Розрахункові формули.

3. Результати розрахунків і вимірів представити у вигляді табл. 5.1-5.5.
4. Побудувати відповідні графіки.
5. Висновки по роботі.

#### Контрольні питання

1. Методика розрахунків режимів кільцевих замкнутих електричних мереж.
2. Дати визначення точки поточкорозподілу активної та реактивної потужностей.

#### *Додаток 1*

#### Розрахункові дані ПЛ 35-150 кВ зі сталелюмінієвими проводами

Перетин провoda, мм <sup>2</sup>	$r_0$ , Ом/км при +20 <sup>0</sup> С	$x_0$ , Ом/км
35	0,773	0,445
50	0,592	0,433
70	0,42	0,42
95	0,314	0,411
120	0,249	0,403
150	0,195	0,398
185	0,156	0,384

## Вихідні дані схеми електричної мережі

Варіант	Повна потужність навантажень, мВА			Коефіцієнт потужності навантаження			Довжина ділянок l, км				Перетин проведення марки АСК, мм <sup>2</sup>			
	1	2	3	1	2	3	I-1	1-2	2-3	3-II	I-1	1-2	2-3	3-II
1	8	11	14	0,8	0,9	0,8	27,2	13	26,8	19	120	95	120	95
2	7	10	5	0,75	0,9	0,8	8,4	27,1	13,1	17	70	120	95	120
3	8	6	8	0,8	0,8	0,9	21	5,25	18,85	20,5	120	35	95	120
4	8	6	8	0,8	0,85	0,9	12,5	13,2	27	27,1	50	95	120	120
5	10	12	10	0,9	0,8	0,8	27	27	13	13	120	120	95	95
6	9	10	8	0,75	0,8	0,9	5,2	27	8,4	2,6	35	120	70	35
7	8	10	11	0,8	0,75	0,8	27	8,25	27	19	120	50	120	95
8	10	9	10	0,9	0,9	0,9	13	18,9	2,6	19	95	95	35	95
9	8	11	14	0,8	0,9	0,9	8,2	2,6	8,2	5,25	50	35	50	35
10	12	10	12	0,9	0,8	0,75	12,25	27	27	12,9	50	120	120	95

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОШУКУ МІСЦЬ ПОШКОДЖЕННЯ ПРИ КЗ НА ПЛ 6...750 кВ**

Мета роботи: ознайомитися з теорією побудови пристроїв для визначення місць ушкодження при КЗ на ПЛ різних класів напруг, заснованих на автоматичному вимірі, фіксації та індикації електричних величин під час КЗ; вивчити роботу та конструктивні особливості фіксуючих імпульсних приладів (ФІП) для визначення відстані до місця КЗ на ПЛ за миттєвим значенням струмів і напруг КЗ, пропорційних відстані до точки КЗ на ПЛ; виконати експериментальні дослідження та графоаналітичні побудови для визначення відстані до точок КЗ на моделі ПЛ за допомогою ФІПів різних типів; оцінити вплив опору дуги КЗ на точність виміру відстані до точки КЗ на ПЛ із однобічним живленням.

### **6.1 Загальні положення**

В енергосистемах колишнього СРСР одержали широке поширення пристрої для визначення місця ушкодження на ПЛ, засновані на вимірі параметрів аварійного режиму. Ці пристрої можна розділити на три основні групи:

1. стаціонарні ФІПи, установлювані на підстанціях, для визначенні відстані до місця ушкодження на контрольованих ПЛ, що автоматично вимірюють та фіксують електричні струми або напруги під час аварійного режиму при КЗ (рис.6.1);

2. мережеві пристрої, установлювані безпосередньо на опорах, для визначення ушкоджених ділянок електричної мережі, автоматично контролюючі та фіксуючі зміни електричних величин під час аварійного режиму;

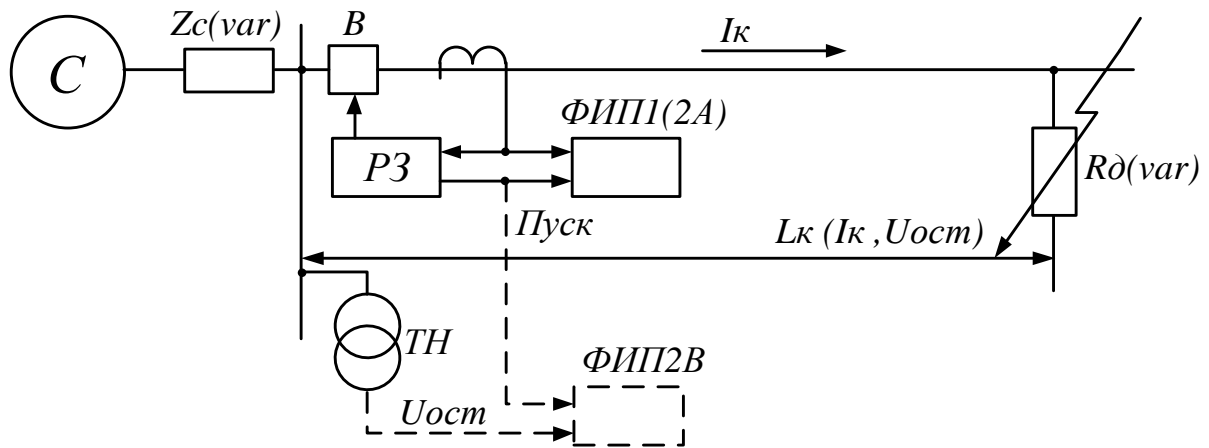


Рис. 6.1. Схема вимірювання

3. переносні прилади для визначення місця замикання на землю в електричних мережах 6...10 кВ із ізольованої або компенсованої нейтраллю.

У рамках даної лабораторної роботи будемо вивчають ФІПи першої групи.

У наш час вважається необхідною установка ФІПів на всіх ПЛ 110 кВ і вище, довжиною більше 20 км. Є позитивний досвід впровадження цих приладів і в мережах 6...35 кВ. ФІПи реагують на симетричні складові струмів та напруг. При цьому фіксуються струми та напруги нульової або зворотної послідовностей. Звичайно фіксація відбувається на обох кінцях контрольованої ПЛ, що дозволяє виключити вплив перехідного опору дуги КЗ і режимів навантажень ділянок мережі, що суміжні із досліджуваною ПЛ. Визначення розрахункової відстані до місця ушкодження на ПЛ здійснюється черговим персоналом підстанцій та диспетчерських пунктів аналітичним, графічним або графоаналітичним методами. Результати розрахунку передаються персоналу підприємства електричних мереж, що направляє ремонтну бригаду на місце ушкодження ПЛ для ліквідації аварії. Таким чином, при застосуванні даного типу пристроїв різко скорочується час перерви живлення споживачів, підвищується надійність електропостачання народного господарства.

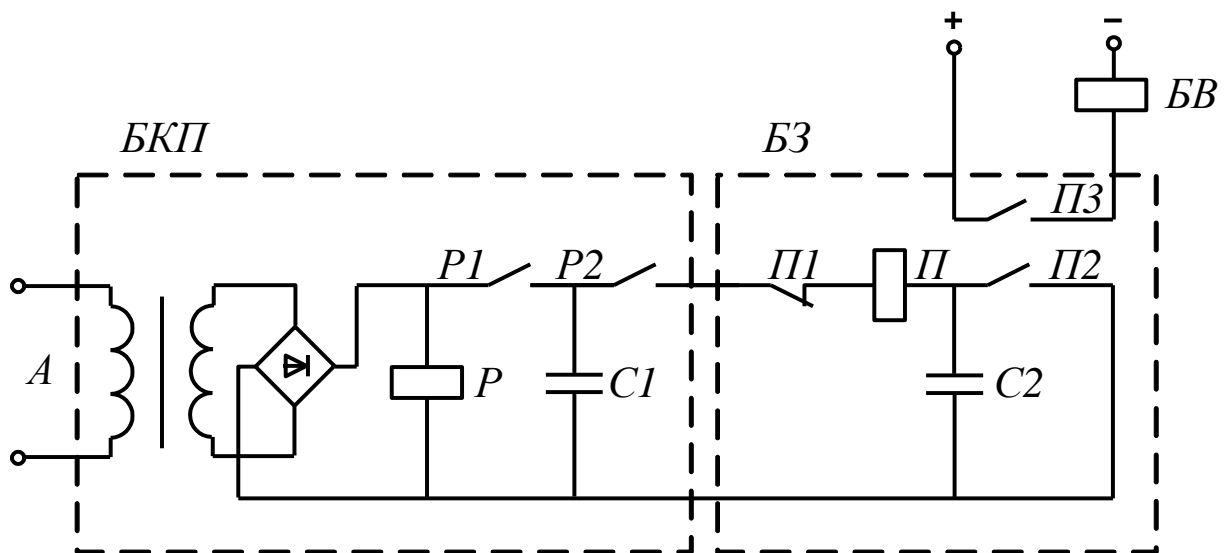


Рис. 6.2. Функціональна схема ФІП

Прилади ФІП-1 , ФІП-2А и ФІП-2В, виробництва ризького дослідного заводу «Энергоавтоматика», відносяться до групи приладів з «запам'ятовувальним конденсатором». На рис. 6.2. наведена функціональна схема приладу, що містить блок короткочасної пам'яті БКП, що складає із вхідного трансформатора, випрямляча, пускового органа реле Р і «запам'ятовувального» конденсатора С1; блок зчитування (БЗ), що складає з вимірювального органа (реле) П, конденсатора, що зчитує, С2 та блоку відліку (БВ) на основі лічильника електричних імпульсів.

Прилад типу ФІП-1 виконаний на основі електромеханічного стрілочного лічильника імпульсів, а ФІП-2А и ФІП-2В – електронні цифрові лічильники. У струмових приладів ФІП-1 та ФІП-2А в БКП встановлюється проміжний трансформатор, а у «вольт метрового» приладу типу ФІП-2В - трансформатор напруги. При КЗ на контрольованій ПЛ на вході БКП з'являється сигнал А, що викликає спрацьовування пускового реле Р. При спрацьовуванні пускового реле через 0,04 із замикається контакт Р1 і підключається конденсатор С1 до ланцюга заряду. При цьому конденсатор С1 заряджається до напруги  $U_c = k$ , де k - коефіцієнт пропорційності.

Через 0,09 з після появи сигналу А пусковий орган розмикає контакт Р1, а

через 2...3 с замикає контакт P2, після чого заряджений конденсатор C1 підключається до конденсатора C2 через контакти P2, П1 і обмотку реле П. При цьому відбувається заряд конденсатора C2 і зниження напруги на конденсаторі C1:

$$U_1 = U_c \frac{C_1}{C_1 + C_2} .$$

Під дією струму заряду конденсатора C2 відбувається спрацьовування реле П. З витримкою часу, достатньої для закінчення процесу заряду конденсатора C2, реле розмикає контакт П1 і замикає контакти П2 і П3. При цьому C2 відключається від C1 і замикається на коротко, а на вхід лічильників імпульсів БВ надходить перший імпульс постійного струму. Потім з витримкою часу, достатньої для закінчення процесу розряду конденсатора C2 і для надійного спрацьовування БВ, відбувається повернення реле П та розряджений конденсатор C2 знову підключається до конденсатора C1. Весь цикл повторюється, а БЗ генерує наступний імпульс, що фіксується БВ. Через N імпульсів (тактів) напруга на конденсаторі C1 знизиться до величини Uэ (рис.15.3), після чого дія БЗ припиняється.

Зв'язок між кількістю імпульсів N і контрольованою величиною A визначається рівнянням виду:

$$N = Kc \left( \ln A + \ln \frac{Uэ}{K} \right) ,$$

де Kc, Uэ, K - постійні коефіцієнти, причому

$$Kc = \frac{1}{\ln(1 + \frac{C_2}{C_1})} \approx \frac{C_1}{C_2} .$$

Як видно з наведеного рівняння кількість імпульсів, зафіксована лічильником, є логарифмічною функцією вимірюваної величини A. У напівлогарифмічних осях характеристика залежності A від N (градуювальна характеристика приладів) являє собою пряму лінію (рис. 6.3).

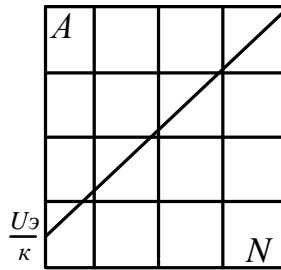


Рис. 6.3. Градууювальна характеристика ФПП

Для більш ефективного використання ФППів в електричних мережах, наприклад, 6...35 кВ, доцільно застосовувати номограму залежностей значень струмів (напруг) зворотної послідовності від відстані до місця ушкодження й марки проводів для конкретної підстанції. Графік може мати кілька абсцис – по кількості марок проводів, використаних на одній ВЛ. По цих осях у лінійному масштабі відкладаються значення відстаней до точки двофазного КЗ на ПЛ. По осі ординат у логарифмічному масштабі відкладається значення струму /напруги/ зворотної послідовності. Для побудови графіків визначаються максимальні й мінімальні значення струму зворотної послідовності  $I_2$  при КЗ відповідно на початку та кінці контрольованої ПЛ по формулах:

$$I_{2\max} = \frac{U_n}{2Z_c} \quad (6.1)$$

$$I_{2\min} \approx \frac{U_n - I_{2\min} Z_c}{2\sqrt{(er_0)^2 + (ex_0)^2}}, \quad (6.2)$$

де  $U_n$  - номінальне значення напруги джерела живлення, В;  $Z_c$  - опір системи, Ом;  $l$ - довжина ВЛ, км;  $r_0, x_0$  - погонні опори ВЛ, Ом/км.

З (6.2) знаходимо  $l$  :

$$I_{2\min} 2\sqrt{l^2 r_0^2 + l^2 x_0^2} = U_n - I_{2\min} Z_c;$$

$$I_{2\min} 2l\sqrt{r_0^2 + x_0^2} = U_n - I_{2\min} Z_c,$$

Звідки

$$l = \frac{U_n - I_{2\min} Z_c}{I_{2\min} 2\sqrt{l^2 r_0^2 + l^2 x_0^2}}. \quad (6.3)$$

При КЗ у різних точках ПЛ відстані  $l_i$  до точок КЗ можна знайти по формулі:



$$l = \frac{U_n - I_{2i} Z_c}{I_{2i} 2\sqrt{l^2 r_0^2 + l^2 x_0^2}}. \quad (6.4)$$

де  $I_{2\min} < I_{2i} < I_{2\max}$  ;  $i$  - номер точки КЗ на ВЛ.

Погонні опори  $r_0$  і  $x_0$  залежать від перетинів та марки проводів, а також від розташування проводів на опорах ВЛ:

$$r_0 = \frac{\rho}{F} \text{ у } x_0 = 0,14451g \frac{D_{cp}}{r_{cp}} + 0,016, ,$$

де  $\rho$  - питома провідність матеріалу проводів;  $F$  - площа перетину проведення;  $D_{cp}$  - середня відстань між проводами на опорі

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}},$$

$D_{12}, D_{23}, D_{13}$  - відстані між проводами, м;  $r_{np}$  - радіус проведення;

$$r_{np} \approx \sqrt{\frac{F}{\pi}}$$

$F$  - перетин алюмінієвої й сталеві частин для проводів марки АС.

При побудові графіка залежності напруги зворотної послідовності від відстані до місця КЗ варто використовувати очевидне співвідношення:

$$U_{2i} = I_{2i} Z_c \quad (6.5)$$

Номограми можуть будуватися в первинних або у вторинних струмах та напругах. За допомогою заздалегідь побудованих номограм, використовуючи показання ФІПів в  $I_2(N)$  або  $U_2(N')$  , можна легко визначити відстань до місця КЗ на конкретних ПЛ. Тут  $N$  і  $N'$  - показань відповідних фіксуєчих приладів на лічильниках імпульсів. Ці показання за спеціальними градуєвальними кривими переводяться у відповідні значення струмів  $I_2$  і напруг  $U_2$ .

При визначенні місць ушкодження за допомогою фіксуєчих приладів варто враховувати вплив опорів навантаження ПЛ і дуги КЗ, тому що формули (6.3) і (6.4) складені без обліку цих факторів. Вплив опору дуги в місці КЗ зводиться до «подовження» дійсної відстані до місця КЗ, що у даній лабораторній роботі визначають експериментально.

На стенді даної лабораторної роботи зібрана модель системи електропередачі, відповідна схемі на рис.6.1, у яку входять: джерело живлення

$U_n = 120$  В; дроселі на чотири фіксованих значення ( $Z_c = 0, Z_c = 5, Z_c = 10, Z_c = 15$  Ом); модель ПЛ із десяти ділянок; змінний резистор для імітації опору дуги КЗ, що може бути зашунтований тумблером; фіксуючі імпульсні прилади типів ФПІ-І, ФПІ-2А, ФПІ-2В; загальний блок живлення для ФПІв; перемикач для почергового підключення ФПІв до блока живлення, клеми для виконання штучних КЗ на моделі ПЛ; амперметр зі шкалою 0.5(10) А; вольтметр зі шкалою 0...150 В; пускач; реле захисту; кнопка включення й відключення моделі ПЛ та ін. (величина  $Z_c$  встановлюється за допомогою окремої обмотки; значення  $Z_c$  зазначені на стенді, при вийнятій вилці  $Z_c = 15$  Ом).

## 6.2 Порядок виконання роботи

1. Вивчити призначення та принцип дії пристроїв для знаходження місць ушкоджень на ВЛ.

2. Ознайомитися із пристроєм та конструктивними особливостями фіксуючих приладів різного виконання, а також зі схемою лабораторного стенда для дослідження цих приладів.

3. Використовуючи схему на передній панелі стенда та рис.6.1, скласти спрощену схему лабораторної роботи (показати точки КЗ на моделі ПЛ, підключення фіксуючих приладів для імітації опору дуги КЗ та ін).

4. Включити тумблер, шунтувальний змінний резистор. За вказівкою викладача встановити (або зняти) перемичку дискретної зміни опору  $Z_c$ .

5. Виконати виміри для побудови градувальних кривих для перерахування показань ФПІв у струми  $I_2$  (А) і напруги  $U_2$  (В), при цьому амперметр зі шкалою 0...5 А по черзі підключається в клеми 11 і 5 точок закорочування ділянок моделі ПЛ, а вольтметр зі шкалою 0...150 В - у клеми І («шини підстанції» - початок ВЛ).

6. Включення моделі ПЛ на КЗ здійснюється кнопкою «Вкл» пускача, що імітує вимикач ПЛ. Через регульовану витримку часу пристрій захисту ПЛ автоматично відключить її. За час роботи захисту необхідно зафіксувати

показання вольтметра і амперметра.

7. При цих вимірах необхідно також знімати показання фіксуєючих приладів, підключаючи їх по черзі до ланцюгів блока живлення перемикачем на стенді. Перед кожним виміром роботи «скидання» показань ФПів.

8. Виміри по пп. 6 і 7 виконати для кожної із двох точок КЗ і всіх ФПів, з метою підвищення точності вимірів, роботи по 5 раз із наступним визначенням середнього значення обмірюваної величини.

9. Результати вимірів по пп. 6-8 занести в табл.6.1.

Табл. 6.1 Результати вимірювань для градуювання

Номер виміру	Точка 11						Точка 5					
	1	2	3	4	5	Порівн.	1	2	3	4	5	Порівн.
ФП-1 I, A U, B												
ФП-2А I, A U, B												
ФП-2В I, A U, B												

10. За результатами вимірів, записаних у табл. 6.1, по двох точках побудувати на міліметровці градуювальні криві для кожного фіксуєючого приладу. По осі Х у лінійному масштабі відкладається величина N (від 0 до 100), а по осі В - у логарифмічному масштабі обмірювані величини  $I_2$  (А) і  $U_2$  (В). Отримані дві крапки на графіку з'єднати прямою до перетинання з віссю В (загальний вид градуювального графіку див. на рис.6.3).

11. По черзі підключаючи ФПи до блока живлення, відповідно до п. 6, виміряти силу струму  $I_2$  і напруга  $U_2$  при КЗ у крапках 4, 6, 8 і 10

контрольованої ПЛ почерговою установкою «замикаючої» перемички в клемі зазначених точок (при цих вимірах амперметр не використовується). Результати вимірів занести в табл.6.2. Знімання показників ФПів роботи через 5.. .10 с після відключення КЗ.

Таблиця 6.2 Результати дослідних вимірювань

Тип приладу	Величина, та одиниця	Точка			
		4	6	8	10
ФП-1	$U_2, В$ $I_2, А$				
ФП-2А	$U_2, В$ $I_2, А$				
ФП-2В	$U_2, В$ $I_2, А$				

12. Повторити виміри по п.10 при будь-якому довільно встановлюваному значенні  $R_g$  (при відключеному тумблері шунтування резистора  $R_g$ ). Результати вимірів звести в таблицю аналогічну табл. 6.2, із вказівкою, що  $R_g \neq 0$ .

13. Використовуючи градуовальні криві, перевести показання ФПів в іменовані одиниці  $I_2, U_2$  і заповнити табл.6.2.

14. Використовуючи формули (6.4) і (6.5) та варіюючи значеннями струму  $I_2$  у межах від 1 до 5 А (при одному із заданих  $Z_c = 0; 5; 10; 20$  Ом) для конкретних ПЛ, марок і перетинів проводів та відстаней між проводами на опорах ПЛ зробити розрахунки і побудувати графіки залежностей  $I_i(I_{2i}), I_i(U_{2i})$ . Зразковий вид графіка  $I_i(I_{2i})$  наведений на рис. 6.4. (Всі параметри, що змінюються, задає викладач індивідуально для кожного студента).

15. За допомогою побудованого графіка та даних вимірів у табл.6.2 знайти відстані від шин підстанції до і-ої точки КЗ на ПЛ при  $R_g = 0$  і  $R_g \neq 0$ . При визначенні  $I_i$  можна використовувати показання одного із приладів ФП-1 (ФП-2А) або ФП-2В. Знайти погрішність виміру. Всі ці дані звести в табл.6.3.

Таблиця 6.3 Результати визначення погрішності вимірів

Параметр	КЗ у точках			
	4	6	8	10
$l_i$ , км, $R_g=0$				
$l_i$ , км, $R_g \neq 0$				
Похибка, %				

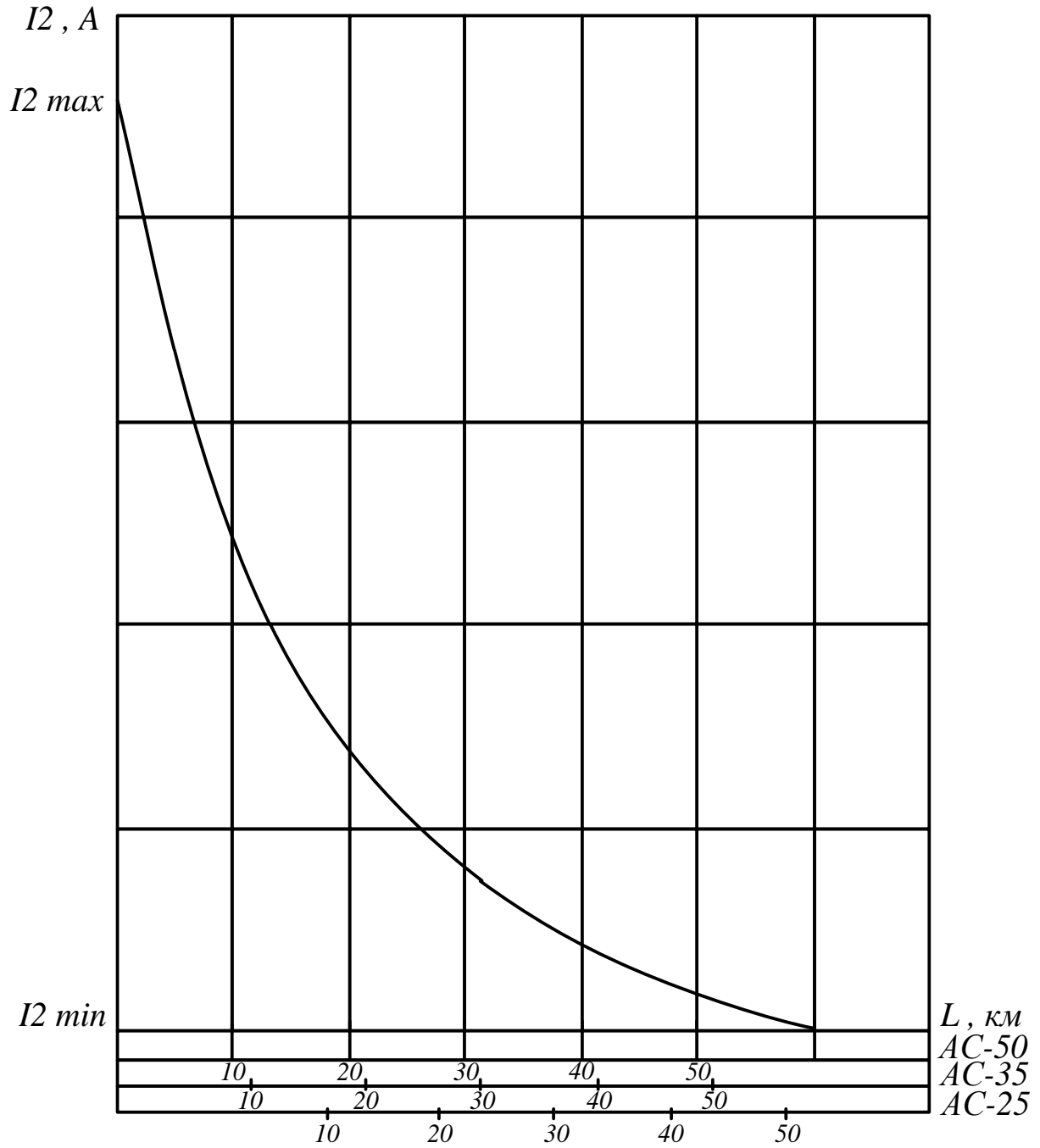


Рис. 6.4. Зразковий вид графіка

### **6.3 Зміст звіту**

1. Мета роботи.
2. Короткий опис і призначення, принцип дії й пристрій фіксуючих імпульсних приладів.
3. Результати вимірів і розрахунків у вигляді таблиць і графіків відповідно до розд.6.2.
4. Висновки по роботі.

## КОМУТАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ 0,4 КВ

Мета роботи: ознайомитися із загальними відомостями про автоматичні вимикачі, їх параметри та характеристики.

В електричних мережах 0,4 кВ встановлюються різні за призначенням види автоматичних вимикачів, серед яких:

- автоматичні вимикачі;
- вимикачі керовані диференційним струмом;
- диференційні автомати.

Диференційні автомати є фактично комбінацією автоматичного вимикача та вимикача керованого диференційним струмом.

### 7.1 Автоматичні вимикачі

Автоматичні вимикачі призначені для автоматичного захисту електричних мереж та устаткування від аварійних режимів – надструмів (перевантажень та струмів короткого замикання), а також для оперативної комутації струмів у ділянках електричних кіл.

Основною характеристикою автоматичного вимикача є часострумова (вимикальна) характеристика – залежність часу затримки вимикання від значення надструму. Формування вимикальної характеристики може бути реалізовано порізному. Найчастіше її формують за допомогою теплового та електромагнітного пускових механізмів або застосуванням внутрішніх контролерів, що програмуються. У першому випадку при виготовленні автоматичних вимикачів широкого вжитку стандарт EN 60898 передбачає для одного і цього самого номінального струму три різні фіксовані типи вимикальних характеристик – В, С, D (рис. 1). Відзначимо, що тип В, С чи D

визначає, за якої кратності надструму щодо номінального спрацьовує миттєвий електромагнітний розчеплювач.

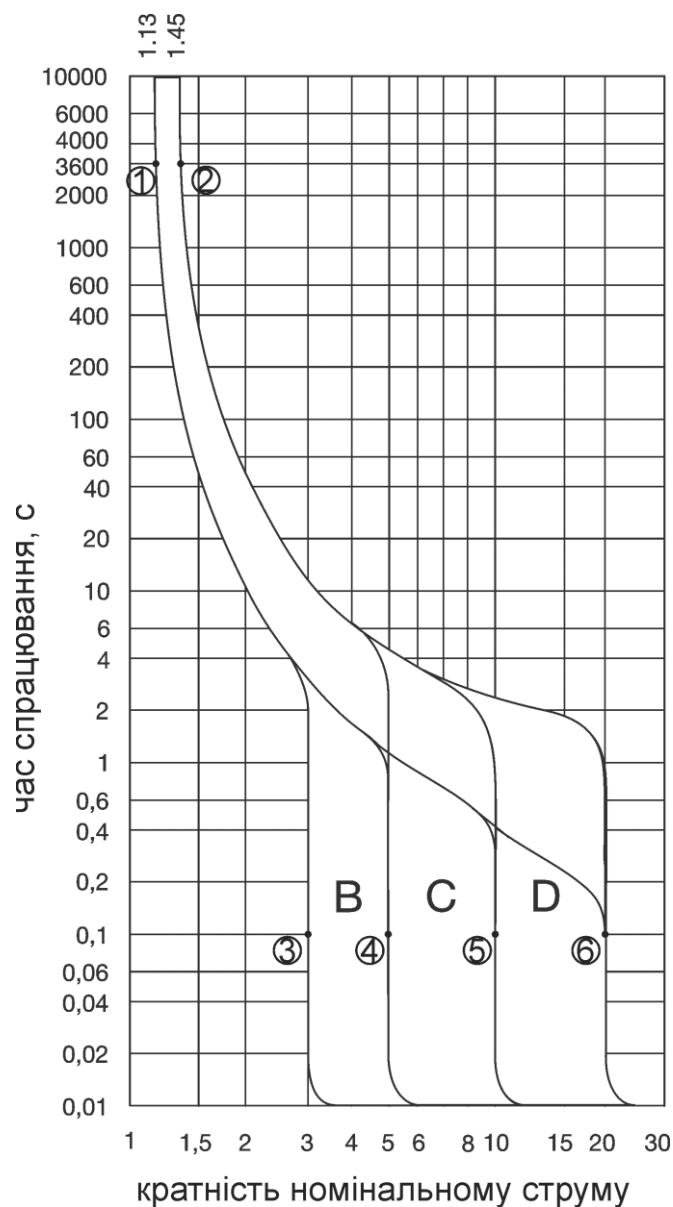


Рис. 7.1. Вимикальні характеристики автоматичних вимикачів

Для прикладу наведемо характерні місця застосування автоматичних вимикачів з вимикальними характеристиками B, C, D:

**B:** обладнання з невеликими надструмами (захист проводу, звичайні прилади);

**C:** обладнання з надструмами до  $5I_n$  (багатополюсні асинхронні двигуни тощо);

**D:** обладнання з великими надструмами (трансформатори, двополюсні асинхронні двигуни).



### 7.1.1 Модульні автоматичні вимикачі

Модульні автоматичні вимикачі, монтаж яких здійснюють на 35 мм монтажну DIN-рейку, виготовляють одно-, дво-, три- і чотирьополюсними, на струми від 0,5 до 63 А

#### *Суміжне розташування модульних автоматичних вимикачів*

Номінальний струм вимикача, вказаний на маркуванні, стосується умовної температури 30 °С. Зі зростанням температури довкілля цей струм зменшується. Дана залежність, для модульних автоматичних вимикачів фірми Nager відображена у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1. Вплив температури довкілля на номінальний струм спрацювання

<b>In (A)</b>	<b>30°C</b>	<b>35°C</b>	<b>40°C</b>	<b>45°C</b>	<b>50°C</b>	<b>55°C</b>	<b>60°C</b>
<b>0,5</b>	0,5	0,47	0,45	0,4	0,38	-	-
<b>1</b>	1	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
<b>2</b>	2	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
<b>3</b>	3	2,8	2,5	2,4	2,3	2,1	1,9
<b>4</b>	4	3,7	3,5	3,3	3	2,8	2,5
<b>6</b>	6	5,6	5,3	5	4,6	4,2	3,8
<b>10</b>	10	9,4	8,8	8	7,5	7	6,4
<b>16</b>	16	15	14	13	12	11	10
<b>20</b>	20	18,5	17,5	16,5	15	14	13
<b>25</b>	25	23,5	22	20,5	19	17,5	16
<b>32</b>	32	30	28	26	24	22	20
<b>40</b>	40	37,5	35	33	30	28	25
<b>50</b>	50	47	44	41	38	35	32
<b>63</b>	63	59	55	51	48	44	40

Впливає на номінальний струм і кількість розташованих поруч вимикачів: з їхнім зростанням номінальний струм падає. Дана залежність, для модульних автоматичних вимикачів фірми Nager відображена у таблиці 2.

Таблиця 7.2. Вплив кількості суміжних автоматичних вимикачів

Кількість автоматичних вимикачів, $N$	Коефіцієнт $K$
1	1,0
2..3	0,95
4..5	0,9
більше 5	0,85

В загальному випадку робочий номінальний струм  $I_e$  в зоні теплового захисту визначають за виразом:

$$I_e = I_n(t) \cdot K(N),$$

де  $I_n(t)$  – залежність номінального струму від температури  $t$  довкілля;  $K(N)$  – коефіцієнт зміни номінального струму залежно від кількості вимикачів  $N$ , що розташованні поруч.

Зазначимо, що для зони миттєвого захисту номінальним залишається струм  $I_n$ , вказаний на маркуванні.

#### *Додаткові пристрої до модульних автоматичних вимикачів*

Розчеплювач мінімальної напруги призначений для вимикання одно-, дво-, три- або чотиріполюсного автоматичного вимикача у разі недопустимого зниження напруги.

Розчеплювач є електронним пороговим елементом, що під'єднується до контрольованого електричного кола (рис. 7.2.а). На конструктивний вихід порогового елемента виведено важіль, який діє на механізм скидання незалежного розчеплення автоматичних вимикачів.

Він має убудоване коло контролю працездатності, що приводиться в дію кнопкою «ТЕСТ». Після натискання на кнопку «ТЕСТ» спрацьовує розчеплювач і вимикається автоматичний вимикач.

Незалежний розчеплювач (рис. 7.2.б) призначений для дистанційного вимикання одно-, дво-, три- або чотиріполюсного автоматичного вимикача модульної серії. Розчеплювач є електромагнітом, що через важіль впливає на механізм скидання незалежного розчеплення автоматичних вимикачів.

Додатковий контакт стану та аварійний контакт сигналізації. Під час експлуатації автоматичних вимикачів виникає необхідність одержання інформації про стан того чи іншого кола навантаження. Таку функцію виконують контакти стану – OF (рис. 7.2.в) та аварійної сигналізації – SD (рис. 7.2.г).

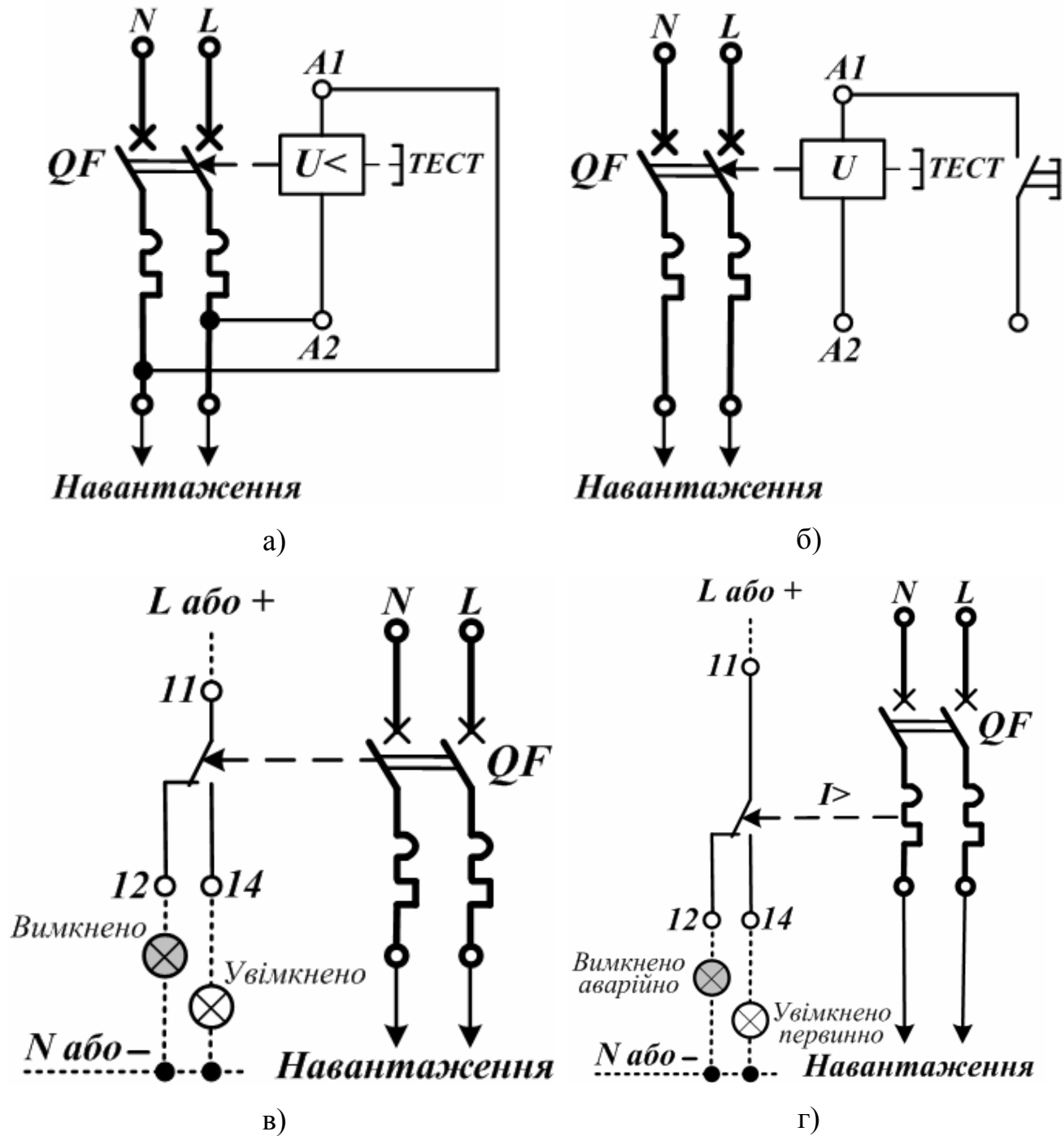


Рис. 7.2. Схеми додаткових пристроїв до модульних автоматичних вимикачів

Модуль «*Контакт стану*» – *OF* сигналізує про стан вимикача: «Увімкнено» чи «Вимкнено». Перемикач контактів відбувається навіть, якщо руків'я керування вимикача утримується у зведеному положенні, що стається у разі вимкнення за надструмами. Застосовується для звукової чи світлової сигналізації стану кола. Цей вид повідомлення може бути виведений на лицьову панель розподільного щита, а також (чи) на центральний пульт керування.

Модуль «*Контакт аварійної сигналізації*» – *SD* інформує про положення механізму зведення автоматичного вимикача. Після установа модуля в зачеплення з механізмом вимикача, при першому зведенні руків'я керування вимикача перемикаються контакти стану, що залишаються в такому положенні і при ручному вимиканні вимикача. Перемикач контактів відбудеться тільки у разі спрацьовування вимикача від надструмів. Можливе тестування контактів модуля за допомогою кнопки, розташованої у верхній частині корпусу.

Модулі монтують до вимикачів з лівого боку, попередньо знявши захисну заглушку на корпусі вимикача. Верхній важіль модуля вводять у зачеплення з руків'ям керування вимикача, а нижній з механізмом зведення.

### **7.1.2 Корпусні автоматичні вимикачі**

Призначені для проведення струму в нормальному режимі і вимикання струму під час коротких замикань, перевантажень, недопустимих знижень напруги; вимикачі допускають також оперативні вмикання та вимикання електричних кіл, кількість яких на добу не повинна перевищувати 30 і які розраховані для експлуатації в електроустановках з номінальною робочою напругою до 400 В змінного струму частотою 50 Гц.

Передбачено шість типорозмірів на номінальні струми вимикачів (типорозмірів) із номінальним струмом,  $I_n$  від 16 до 1600 А.

Вимикач виконаний у вигляді моноблока і складається з підставки і накривки з фальшпанеллю, у якій є вікно для руків'я керування і штовхач кнопки «ТЕСТ» (перевірки механізму вимкнення вимикача). Підставка є несучою конструкцією для приєднувальних затискачів, нерухомих силових

контактів із системою дугогасіння, механізму керування із системою рухомих контактів, блока захисту від надструмів. Накривка закриває всі рухомі елементи механізму керування і внутрішніх струмоведучих частин.

Передбачені три варіанти монтажу вимикачів: звичайне підімкнення наконечників провідників і шин під затискач вимикача; втичний монтаж, що вимагає спеціальної панелі, яка кріпиться на монтажній плиті шафи і в комплект не входить; висувний варіант, який дає змогу виймати і вставляти апарат, не рухаючи з'єднань. Він також потребує додаткового обладнання.

### Додаткові пристрої корпусних автоматичних вимикачів

Незалежний розчеплювач (РН) використовують для дистанційного вимкнення вимикача поданням напруги в коло керування незалежного розчеплювача. Якщо вимкнено вимикач, подавання напруги на незалежний розчеплювач блокується. Вимикач після його дистанційного вимкнення вмикають вручну.

Розчеплювач мінімальної напруги (РМ) вимикає вимикач у разі зниження фазної чи лінійної напруги на його ввіді до 70 % від номінальної. Він може слугувати незалежним розчеплювачем, якщо в коло його керування послідовно увімкнути кнопковий вимикач з розмикальними контактами.

Вимкнення вимикача від РН чи РМ сприймається сигналізацією як аварійне.

Додаткові контакти стану OF призначені для сигналізації про положення контактів вимикача (увімкнено/вимкнено).

Аварійні контакти стану SD призначені для сигналізації про вимкнення вимикача від надструмів, розчеплювача незалежного чи мінімальної напруги, кнопки «ТЕСТ». У разі повторного увімкнення вимикача сигналізація вимикається.

Для захисту кіл керування незалежних розчеплювачів і додаткових контактів від короткого замикання варто застосовувати плавкі запобіжники чи

автоматичні вимикачі з номінальним струмом, зазначеним в інструкції з експлуатації.

Ручний поворотний привід призначений для перетворення обертального руху на поступальний для керування автоматичним вимикачем. Привід закріплюється на двері розподільного пристрою для оперування вимикачем через двері або безпосередньо на вимикачі. Він може містити пристрій для навісного замка для блокування у вимкненому стані.

Електромагнітний привід – це електромеханічний пристрій оперування вимикачем (увімкнути/вимкнути), який має також ручне керування. Привід дає змогу дистанційно керувати вимикачем і особливо зручний в системах телекерування енергозбереженням. Може мати пристрій для навісного замка для блокування у вимкненому стані.

Електромагнітний привід встановлюють на передню панель вимикача.

Встановлення привода не змінює ніяких функцій вимикача.

### **7.1.3 Селективний захист на автоматичних вимикачах**

Під селективним захистом розуміють здатність системи так працювати, щоб у разі виникнення аварії в радіальній ланці послідовно розташованих автоматичних вимикачів вимикався лише той автомат, який розташований першим від об'єкта – причини аварії.

Наслідки неселективного вимикання ліній електропостачання можуть мати більш чи менш серйозний характер. Неселективне вимикання всього під'їзду при КЗ в одній із квартир розглядають як прикру незручність, але вимикання цілої групи паралельно під'єднаних споживачів, коли один із групи відповідає за безпеку, у деяких випадках недопустиме. Неселективне вимикання на виробництві може спричинити значні збитки внаслідок недовипуску продукції тощо. Отож, залежно від характеру під'єднаних до мережі об'єктів до селективності захисних пристроїв ставлять помірковані або строгі вимоги.

## 7.2 Вимикачі керовані диференційним струмом

Пристрої захисного вимкнення, керовані диференційним струмом (ПЗВ), значною мірою підвищують рівень електробезпеки електроустановок, а також захищають майно і здоров'я людей, запобігаючи виникненню пожеж, спричинених несправністю електромереж. Перевагами ПЗВ є висока надійність, простота монтажу і невеликі розміри. Використання таких пристроїв дає змогу досягти високого ступеня захисту. Необхідно виконати лише декілька, здебільшого легко реалізовуваних вимог.

Пристрій захисного вимкнення за призначенням повинен бути вимикачем швидкої дії. У разі появи в мережі струму витоку, який перевищує уставку ПЗВ, він повинен автоматично від'єднати від мережі установку (або її частину), яка через нього під'єднана до електричної мережі. Цим забезпечується обмеження величини і тривалості протікання струму через тіло людини у разі прямого дотику. Отже, найважливішою особливістю захисного вимкнення є те, що воно, власне кажучи, – єдиний електрозахисний захід, що захищає людину від ураження.

### 7.2.1 Будова та принцип дії

ПЗВ складається з підсумовувального трансформатора струму 1, чутливого вимикального реле 2, механізму розчеплення 3 з контактною системою 4 і кола контролю 5 (рис. 7.3).

Через вікно трансформатора струму пропускають всі провідники: *фазний робочий L* та *нульовий робочий N*. Якщо у споживача відбувається пошкодження ізоляції і контакт електричного кола з корпусом, то у разі дотику людини до корпусу у колі з'явиться струм витоку, який, як показано на рис. 7.3, протікає по тілу людини чи якимось іншим шляхом у землю. У такому разі векторна сума струмів у робочих провідниках, пропущених через трансформатор струму, буде мати відмінне від нуля значення, тобто з'явиться так званий *диференційний струм  $I_d$* . Наявність диференційного струму зумовлює появу електрорушійної сили у вторинній обмотці трансформатора

струму  $I_1$ , яка за допомогою вимикального реле 2 запускає механізм розчеплення 3. Отже, ушкоджена частина мережі швидко вимикається.

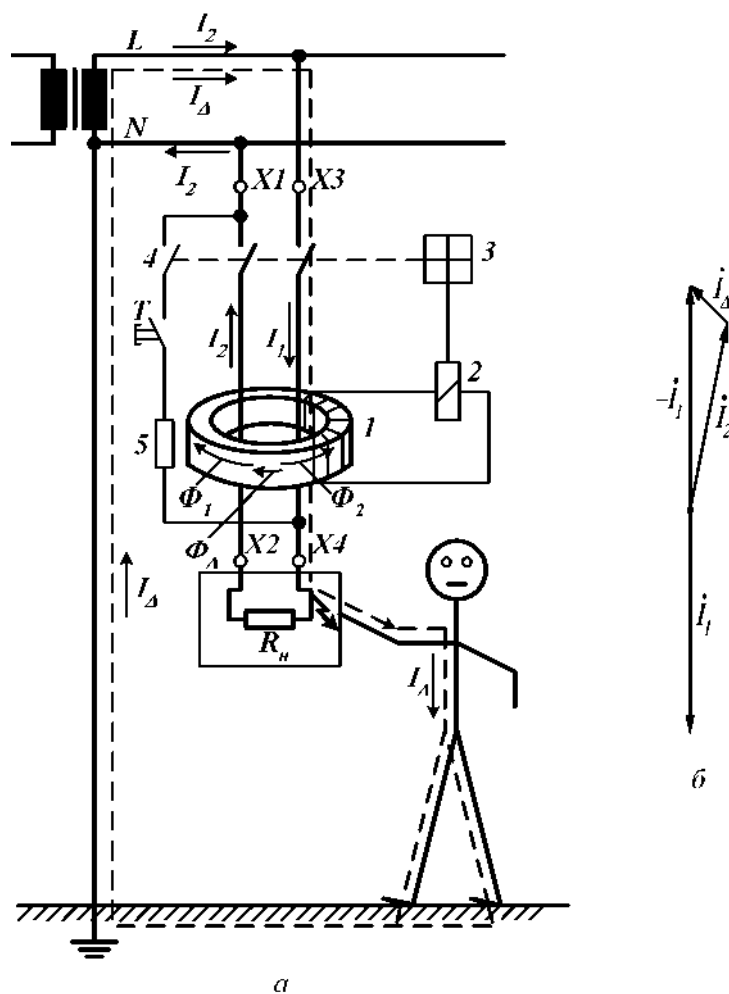


Рис. 7.3. Функціональна схема пристрою захисного вимкнення (а) та векторна діаграма струмів (б).  $I_1$  – струм фазного робочого провідника L;  $I_2$  – струм нульового робочого провідника N;  $I_A$  – струм витоку.

Очевидно, значення диференційного струму повинно бути достатнім для спрацювання реле. Тому існує поняття *номінального вимикального диференційного струму ПЗВ*. Його необхідно відрізнити від *номінального струму ПЗВ*, який ПЗВ може пропустити в тривалому режимі роботи. Номінальний струм ПЗВ є, по суті, пасивним транзитним струмом пристрою. Обидва ці струми вказує виробник. У схемі пристрою передбачено коло 5 для тестування працездатності ПЗВ.

### 7.2.2 Особливості виконання.

Залежно від способу монтажу розрізняють ПЗВ для фіксованого монтажу



у розподільних щитах (рис. 7.4, а) і мобільного монтажу (рис. 7.4, б).

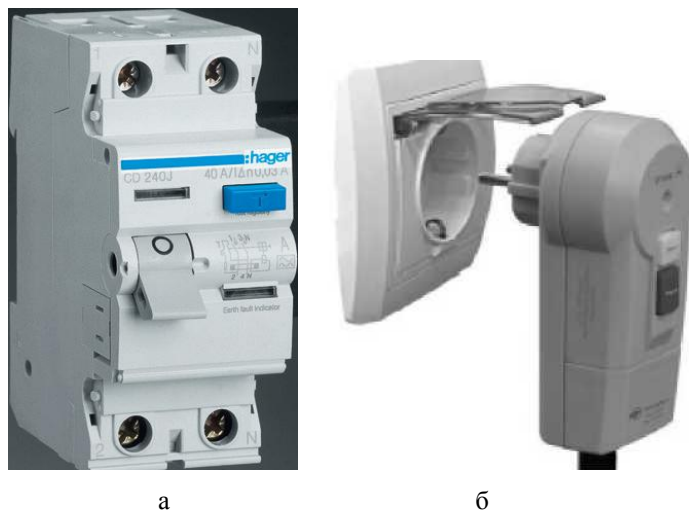


Рис. 7.4. Зовнішній вигляд ПЗВ для фіксованого (а) і мобільного (б) монтажу

За кількістю полюсів ПЗВ поділяють на двополюсні, які призначені для захисту в однофазних колах ( $L, N$ ), і чотириполюсні, які використовують в трифазних мережах ( $L1, L2, L3, N$ ). Схеми двополюсного та чотириполюсного ПЗВ показані на рис. 3.

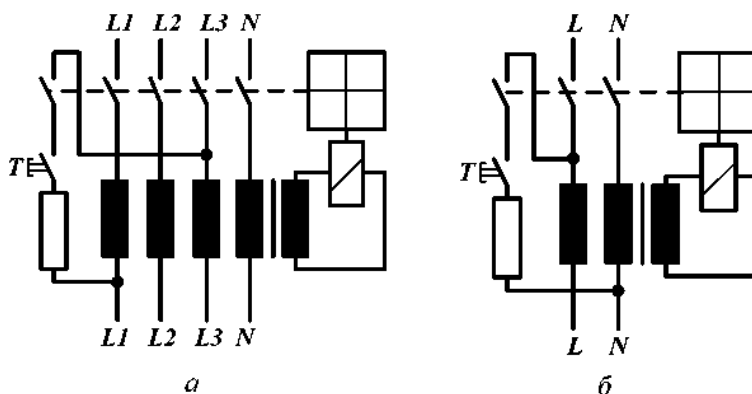





Рис. 7.5. Структурні схеми ПЗВ з різною кількістю полюсів: а - чотириполюсний; б - двополюсний

Чутливість ПЗВ до різних видів диференційного струму. Іноді у зв'язку з використанням силових схем з напівпровідниковими елементами спотворюється крива змінного струму, що супроводжується збільшенням у ній частки постійної складової. У разі застосування ПЗВ в колах з потужними споживачами необхідно аналізувати криву струму, що протікає через ПЗВ, і вибрати відповідний цій кривій тип пристрою. Найчастіше застосовують ПЗВ,

призначені для змінного диференційного струму (тип АС), рідше – для змінного й водночас для пульсуючого постійного струму (тип А). Графічні позначки, що характеризують відповідний тип ПЗВ, наведені в табл. 7.3; їх наносять на корпус кожного пристрою.

Таблиця 7.3. Позначки, що характеризують чутливість ПЗВ до різних видів диф. струму




Позначки	Тип	Властивості ПЗВ
	АС	Чутливий до змінного диференційного струму
	А	Чутливий до змінного і пульсуючого постійного* диференційних струмів
	В	Чутливий до змінного, пульсуючого постійного і згладженого постійного** диференційних струмів

\* Пульсуючий постійний струм – хвилеподібні імпульси струму тривалістю (у кутовому вимірюванні) не менше за  $150^\circ$  за один період пульсації, що виникають періодично з номінальною частотою і розділені проміжками часу, протягом яких постійний струм набуває значення, що не перевищує  $0,006\text{ А}$ .

\*\* Згладжений постійний струм – постійний струм з незначними хвилеподібними імпульсами (коефіцієнт пульсації не вище ніж  $10\%$ ).

Час спрацювання є одним із важливих параметрів ПЗВ. В цьому аспекті ПЗВ поділяють на такі: загального застосування та з певною невеликою затримкою спрацювання. Перші вимикають одразу після виникнення диференційного струму, значення якого перевищує те, що необхідне для спрацювання. Для других затримка характеризується терміном – *граничний час невимикання*. Упродовж цього нормованого відрізка часу ПЗВ не повинен спрацювати навіть за великого диференційного струму.

Залежно від граничного часу невимикання розрізняють ПЗВ:

- загального призначення з мінімальною природною затримкою – ;
- з підвищеною стійкістю до струму короткого замикання і середньою затримкою – ;
- селективні з істотною затримкою – .

ПЗВ типу G може бути використаний, щоб не допустити хибних

спрацювань під впливом зовнішніх чинників (перенапруг, різних завад, комутацій електроприймачів тощо).

### 7.2.3 Дія електричного струму на організм людини

У разі дотику людини до частини електроустаткування, що опинилося під напругою, по тілу людини протікає електричний струм. Реакція організму на вплив електричного струму й можливі наслідки цього впливу залежать від дуже багатьох чинників, основними з яких є: параметри електричної мережі, умови довкілля (кліматичні й погодні), тривалість впливу струму, перехідний опір між тілом людини й землею (взуття, підлога), характеристика приміщення й опір тіла людини.

На рис. 7.6 зображено граничні криві змінного струму промислової частоти (повідомлення ІЕС 479, розділ 2, 3-тє видання 1994 року), що характеризують вплив сили електричного струму на людину залежно від тривалості часу його протікання. Пояснення до рис. 5 наведено в табл. 7.4.

**Таблиця 7.4.** Фізіологічний вплив електричного струму на людину залежно від інтервалу значень струму і часу його протікання по тілу

Позначення інтервалу	Граничні значення струму в інтервалі	Фізіологічний вплив
АС-1	до 0,5 мА (пряма а)	Звичайно без відчутного впливу
АС-2	від 0,5 мА до лінії b	Звичайно без шкідливого фізіологічного впливу
АС-3	від лінії b до кривої с	Звичайно без органічного ушкодження. Можлива судома м'язів і проблеми з диханням, якщо струм протікає довше за 2 с. Порушення серцевої діяльності без фібриляції серцевого м'яза спостерігається тільки при тривалішому часі протікання і за вищих значень струму
АС-4	вище від кривої с	Збільшується ймовірність виникнення таких небезпечних патологічних явищ, як зупинка дихання, важкі опіки і фібриляція серцевого м'яза

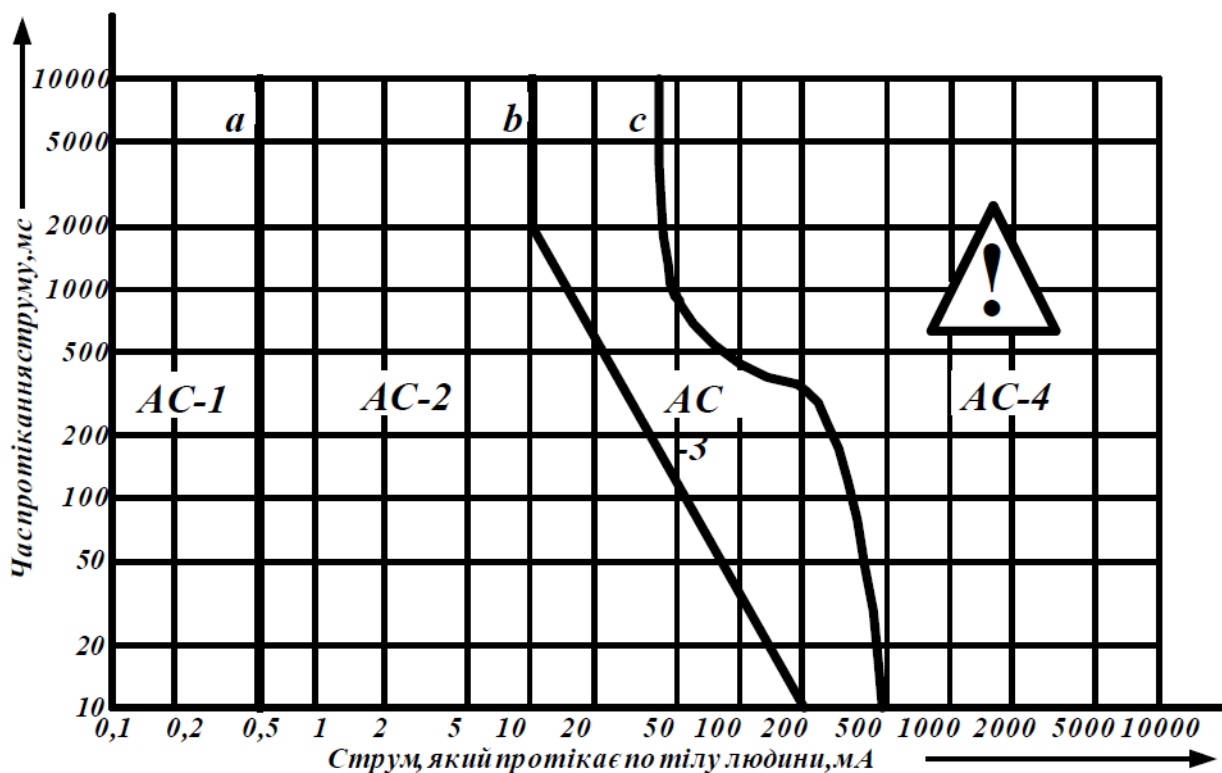


Рис. 7.6. Граничні криві змінного струму

Головним чинником, що зумовлює відсутність смертельного результату у разі ураження людини електричним струмом, є малий час протікання електричного струму. У спеціальній літературі наводиться значення граничнодопустимого добутку струму, що протікає по тілу людини, і часу його протікання, який дорівнює 70 мАс. При значеннях опору тіла людини 2000 Ом і напруги дотику 230 В значення струму, що протікає по тілу, становитиме  $230/2000 = 0,115$  А. Час протікання струму у такому разі не повинен перевищувати значення 0,6 с. За умови використання ПЗВ з номінальним вимикальним диференційним струмом 30 мА значення часу вимкнення при доторканні людини до струмоведучого провідника звичайно лежить в межах від 10 до 30 мс, що гарантує високий ступінь безпеки. Залежно від умов довкілля, особливо за наявності чи відсутності вологи, згідно зі стандартом ІЕС 60364-4-41 прийнято, що значення безпечної напруги змінного струму становить:

- 50 В для сухого середовища;
- 25 В для вологого середовища.

### 7.3 Маркування модульних вимикачів

У однофазних електричних мережах із номінальною напругою 220 В можуть одночасно бути використані різні двополюсні комутаційні апарати різних типів. Основні характеристики за якими можна ідентифікувати тип модульного вимикача та які розміщуються безпосередньо на них самих зведено до таблиці 7.5

Таблиця 7.5 Маркування вимикачів

Показник	Позначення	Автоматичні вимикачі	Вимикачі керовані диференційним струмом	Диференційні автомати	Вимикачі навантаження
1) Наявність дугогасильних контактів, що призначені здійснювати комутації у нормальних та аварійних режимах, у т.ч. відключення струмів КЗ.		+	-	+	-
2) Відсутність дугогасильних контактів, комутація струмів, що не перевищують номінальні.		-	+	-	+
3) Наявність теплового та електромагнітного захисту.		+	-	+	-
4) Вимикальна здатність вимикача (10 кА).		+	-	+	-
5) Позначання номінального струму. Зображення літери В, С чи D перед числовим значенням номінального струму вказує на наявність електромагнітного захисту, літера відповідає його класу.		C10	10	B10	10
6) Керованість диференційним струмом: часто наводиться схема диференційного захисту, вказується номінальний диференційний струм, а також відповідно до таблиці 7.3 позначається тип диференційного струму, до якого чутливий вимикач.	(Рис. 7.5 б) 30 mA ІΔn 30mA	-	+	+	-

## Контрольні питання

1. Призначення автоматичних вимикачів.
2. Види диференційних струмів на які спрацьовують автоматичні вимикачі.
3. Призначення незалежного розчеплювача.
4. Принцип дії електромагнітного розчеплювача.
5. Принцип дії теплового розчеплювача.

## ЗАХИСТ ТА КОМУТАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

Мета роботи – вивчення принципу дії та характеристик блоків захисту електродвигунів

### 8.1 Теоретична частина

Правильний вибір та налагоджування захисту асинхронних машин дають змогу істотно подовжити їх ресурс і забезпечити надійну та безаварійну роботу самої машини і технічних засобів, в складі яких її використовують. Як правило, вартість системи захисту та її експлуатації значно менша від вартості машини, яку вона захищає, та розміру збитків від простоювання обладнання, в якому вона працює.

Аналіз аварійних режимів асинхронних двигунів (АД) з короткозамкненим ротором дає змогу виділити такі типи аварій, що часто стаються на практиці:

- коротке замикання (КЗ) на затискачах двигуна або в його статорній обмотці;
- обрив фази статорної обмотки двигуна (часто трапляється у разі захисту двигунів запобіжниками);
- загальмування ротора під час пуску двигуна (особливо часто зустрічається під час прямого пуску двигуна за рахунок зниження напруги мережі);
- технологічні перевантаження, що виникають при накиді навантаження під час функціонування двигуна;
- тощо.

Аварійні режими в колі асинхронного двигуна можуть спричиняти або короткочасне підвищення струму в десятки разів порівняно з номінальним (КЗ у колі), або тривале протікання струму перевантаження, який у рази перевищує номінальне значення струму.

Для захисту електричних кіл широко застосовують автоматичні вимикачі з

максимальним та тепловим розчеплювачем струму, реле струму, теплові реле, запобіжники, мікропроцесорні апарати захисту тощо. Аварійні режими вимагають вибору захисту, який є найефективнішим при тій чи іншій аварії.

Правильний і раціональний вибір пусказахисних апаратів є основним у розробленні схем керування й захисту. Різноманітність схем захисту як за потужністю, так і за ступенем відповідальності, надійності, економічності змушує мати справу з такою самою різноманітністю виконавчих елементів, правильний вибір яких багато в чому визначає техніко-економічні показники об'єкта керування та захисту загалом. Вибір тих або інших показників якості (як правило, суперечливих) залежить від об'єкта керування та захисту й вимог до нього.

Основним завданням, яке виникає під час вибору апаратури захисту асинхронного двигуна, є узгодження часострумівих характеристик апаратів захисту 1 з граничнодопустимими навантаженнями за струмом і часом споживачів 2 (рис. 8.1). Для кожного конкретного типу споживачів найповніше узгодження може бути досягнуте за умови використання визначеного типу апаратів захисту.

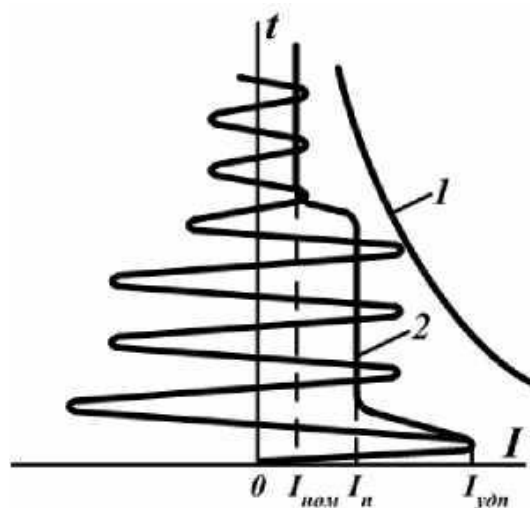


Рис. 8.1. Узгодження часострумівих характеристики апарата захисту 1 і навантажувальної характеристики АД 2.  $I_{ном}$ ,  $I_n$ ,  $I_{удп}$  – відповідно номінальний, пусковий та ударний пусковий струми двигуна.

Найповніше узгодження захисних і навантажувальних характеристик



досягається тоді, коли часострумова характеристика апарата проходить понад і якомога ближче до захисної характеристики споживача.

## 8.2 Автоматичний вимикач для захисту АД

Різні виробники постійно працюють над створенням ефективного і повноцінного захисту АД. Але завдання створення захисного пристрою, який контролює струми, виявилось доволі складним. По-перше, струм необхідно вимірювати якомога точніше, адже відомо, що тривала робота АД зі струмовим перевантаженням лише 5 % від номінального скорочує термін служби обмоток у 10 разів. По-друге, у разі сильного відхилення форми кривої струму від синусоїди необхідно визначати діючі значення струмів або максимально до них наближені, оскільки контроль за піковими значеннями струму є недопустимим, адже це призводить до помилкових спрацьовувань. По-третє, необхідно забезпечити пуск АД при 7-8-кратних пускових струмах, одночасно забезпечуючи вимикання двигуна навіть за невеликих тривалих перевантажень.



Рис. 8.2. Автоматичний вимикач для захисту електродвигунів

По-четверте, захист від перевантаження повинен бути “розумним”, тобто час спрацьовування має залежати від струму. Одним із простих та ефективних засобів, що відповідають наведеним вище вимогам є автоматичні вимикачі для захисту електродвигунів виробництва Hager (рис. 8.2).

Автоматичний вимикач захисту двигуна має тепловий та електромагнітний захист і фактично являє собою триполюсний автоматичний вимикач, схема рис 8.3.

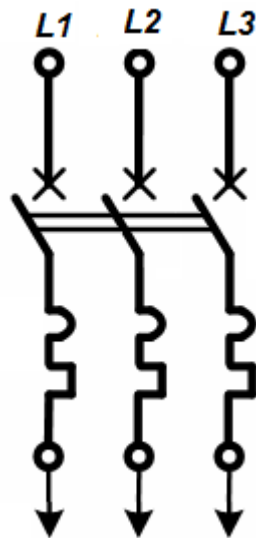


Рис. 8.3. Електрична схема автоматичного вимикача захисту двигуна

Відмінність автоматичного вимикача захисту двигуна від триполюсного автоматичного вимикача полягає у можливості плавного регулювання номінального струму та у відмінності вимикальної характеристики, рис 8.4.

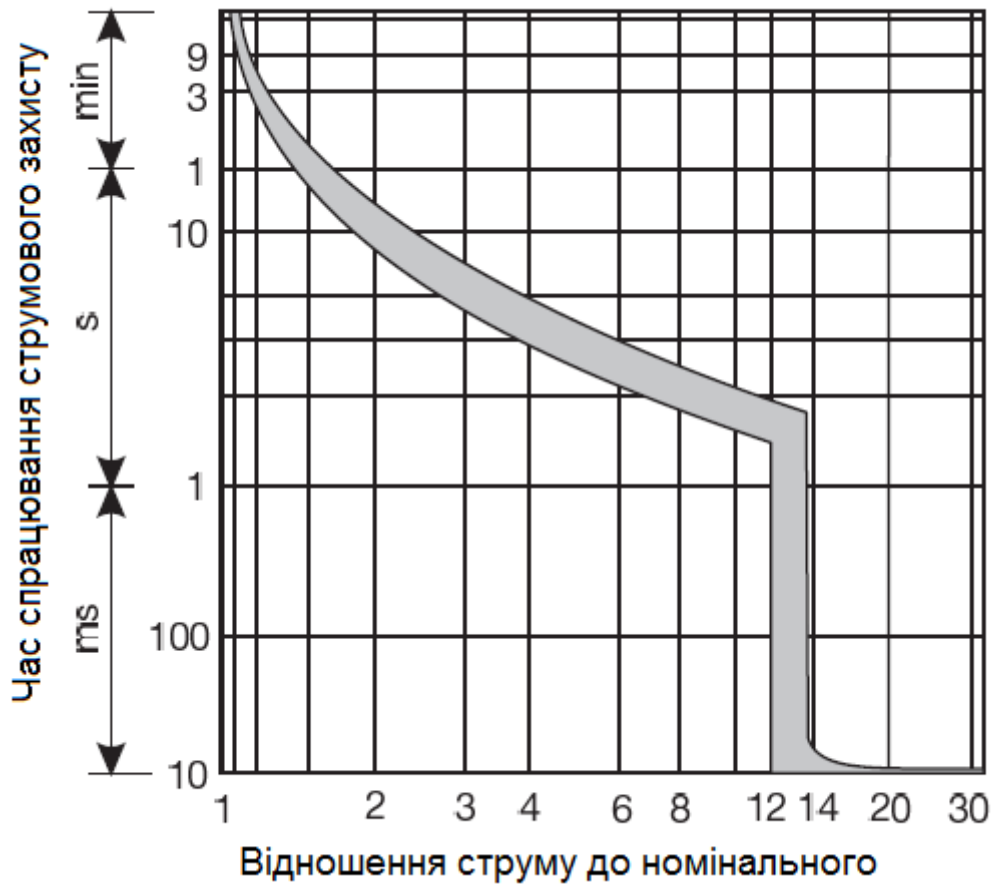


Рис. 8.4. Вимикальна характеристика автоматичного вимикача захисту двигуна

## 8.3 Контактори

### 8.3.1 Малогабаритні контактори

Малогабаритні контактори виготовляються на струми від 9 до 95 А. Їх використовують для комутації струмів у силових колах трифазних асинхронних двигунів, а також кіл освітлення, нагрівання; вони можуть комутувати струми у трифазних конденсаторних батареях та первинних обмотках трифазних низьковольтних трансформаторів тощо.

Електричні схеми різних типів виконань контакторів наведено на рис. 8.5.

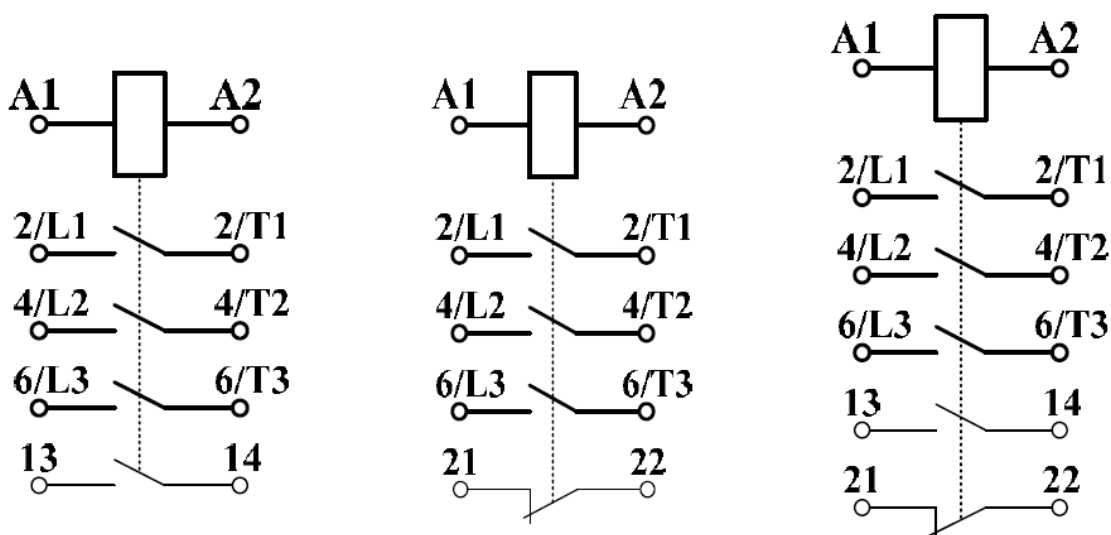


Рис. 8.5. Електричні схеми різних типів виконань контакторів

Контактори можуть комплектуватись додатковими пристроями, а саме:

- електротепловим реле;
- контактними приставками без витримки часу та з витримкою часу.

Електротеплові реле призначені для захисту електродвигунів від перевантажень, асиметрії фаз, затяжного пуску, заклинювання ротора і встановлюються безпосередньо на контакторі. Для захисту від короткого замикання необхідно передбачити запобіжники або автоматичні вимикачі з миттєвими електромагнітними розчеплювачами.

Приставки контактні на дві і чотири групи призначені, щоб розширити можливості використання контакторів у системах автоматизації технологічних процесів. Приставки контактні є механічними пристроями миттєвої дії без власного споживання енергії, які комутують своїми контактами електричні кола сигналізації і керування.

У контактних приставка з витримкою часу витримку часу задають за допомогою регульовального руків'я.

### 8.3.2 Важкі контактори

Типовиконання важких контакторів залежить від струму навантаження, що лежить у межах від 115 до 630 А. Ці контактори виділені в окрему групу

“важких”. Функціонально важкі контактори аналогічні малогабаритним, але конструктивно мають низку серйозних особливостей. Важкі контактори комутують струм у силових колах електроприводів на базі трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, а також можуть бути використані в силових колах іншого електроустаткування. Електрична схема важкого контактора наведена на рис. 8.6.

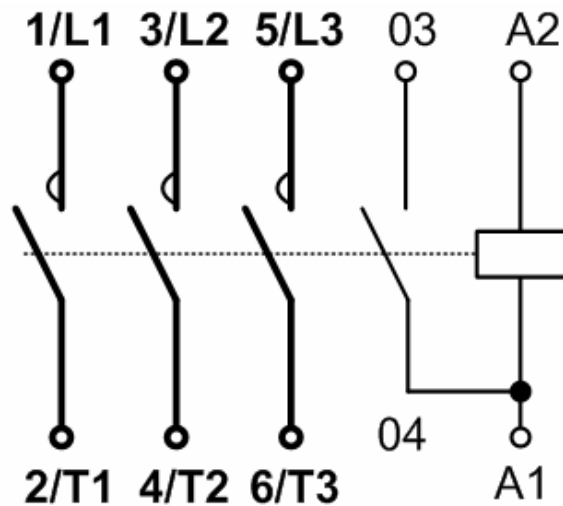


Рис. 8.6. Електрична схема важкого контактора

#### Контрольні питання

1. Призначення контакторів.
2. Вимикальна характеристика автоматичного вимикача захисту двигуна.

## **РЕЛЕЙНІ ПРИСТРОЇ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Мета роботи – вивчення принципу дії та функціональних властивостей реле напруги, чергування фаз, перекосу фаз, перемикання фаз, часу та затримки.

### **9.1 Вступ**

Можливості і галузі застосування цифрової мікропроцесорної техніки, безумовно, знайшли своє втілення в проектуванні і виготовленні електронних релейних апаратів.

Сьогодні ринок пропонує цілу низку реле, в яких логічне опрацювання інформації ведеться за допомогою мікроконтролера і на підставі результатів цього опрацювання реалізується алгоритм вмикання чи вимикання комутаційного пристрою, що будується в певному сенсі як класичне електромагнітне чи безконтактне реле. У структурі вищого рівня таких реле можна виділити: мікроконтролерний пристрій, задавачі рівня порогів вхідних фізичних величин (аргументів) та логічних розгалужень, аналого-цифровий та цифроаналоговий перетворювачі, підсилювач потужності, комутаційний пристрій кола навантаження (функцію), блок живлення, індикатори стану тощо.

У практичній роботі вивчаються функціональні властивості і основні технічні характеристики: однофазного реле напруги, трифазного реле напруги, перекосу і послідовності фаз, універсального автоматичного електронного перемикача фаз, реле затримки, реле часу.

### **9.2 Однофазне реле напруги**

Призначене для захисту навантаження, що живиться від мережі

номінальною напругою 220 В, частотою 50 Гц, від недопустимих коливань напруги мережі.

Забезпечує три незалежні регулювання:

- поріг спрацювання за мінімальною напругою  $U_{min}$ ;
- поріг спрацювання за максимальною напругою;
- час затримки автоматичного повторного вмикання після відновлення параметрів мережі.

Лицьова панель та органи керування електронного реле напруги показані на рис. 9.1.

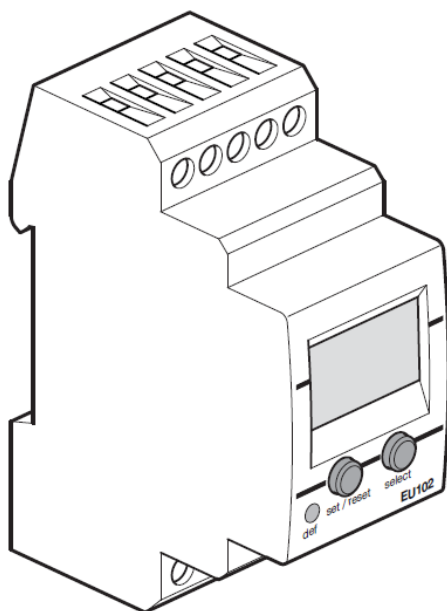


Рис. 9.1. Лицьова панель та органи керування електронного реле напруги

Роботу реле можна описати вербально, проте якість описання зростає, якщо його супроводжують часовими діаграмами напруги та сигналів станів вихідних контактів й індикації, які відображають вмикання та вимикання реле в часі (рис. 2).

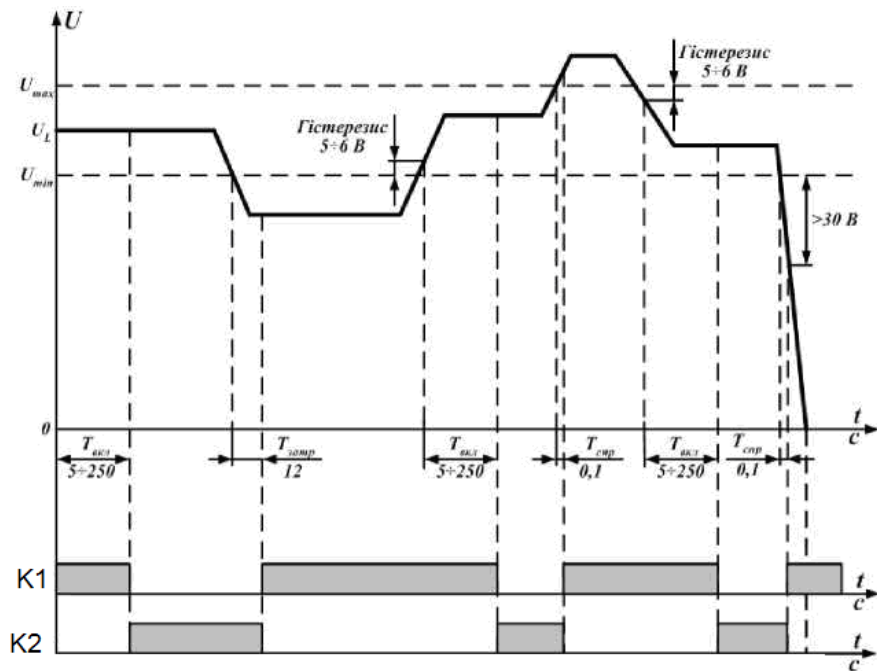


Рис. 9.2. Діаграма режимів роботи реле напруги

У разі подання на вхід реле напруги, яка лежить у межах максимальної та мінімальної наставок, через виставлений час  $T_{вкл}=5+250\text{ с}$ , реле подає живлення – замикає контакт К2.

У разі відхилення напруги нижче від уставки  $U_{min}$  реле спрацьовує з заданою затримкою  $T_{затр}$ : контакти К2 розмикаються, а К1 – замикаються.

Після відновлення рівня вхідної напруги між заданими порогоми з урахуванням гістерезису за напругою реле з регульованою затримкою  $T_{вкл}$  повертається у вихідний робочий стан: контакти К2 замикаються, а К1 – розмикаються. Якщо напруга відхилиться вище від уставки  $U_{max}$ , реле спрацьовує з часом  $T_{спр}$  с: контакти К2 розмикаються, а К1 замикаються. Після відновлення рівня вихідної напруги між заданими порогоми із урахуванням гістерезису за напругою реле повертається у вихідний робочий стан із регульованою затримкою  $T_{вкл}$ . У разі зниження напруги більше ніж на 30 % від уставки  $U_{min}$  реле спрацьовує з затримкою  $T_{спр}$ .

### 9.3 Трифазне реле напруги, перекошу та послідовності фаз

Призначене для вимикання навантаження 380 В/50 Гц за



недопустимих коливань напруги в мережі, порушення амплітудної симетрії напруги мережі (перекосу фаз), обриву фаз та порушення послідовності фаз.

Забезпечує чотири незалежні регулювання:

- поріг спрацювання за мінімальною напругою  $U_{min}$ ;
- поріг спрацювання за максимальною  $U_{max}$ ;
- час затримки спрацювання за мінімальною напругою;
- амплітудний перекіс фаз.

Лицьова панель, органи керування та схема вмикання показані на рис. 9.3.

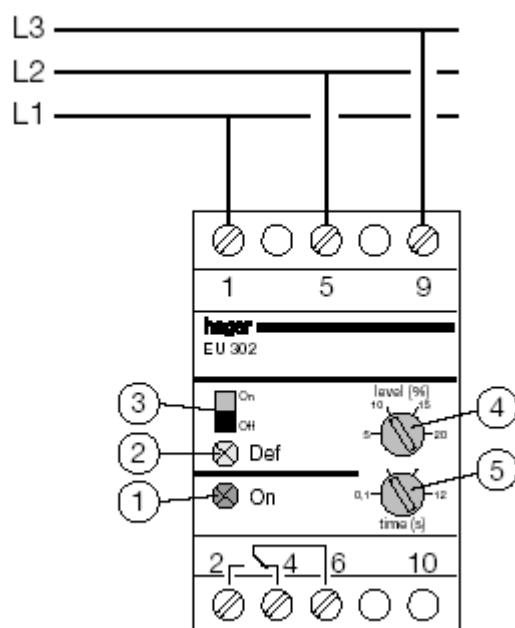


Рис. 9.3. Лицьова панель та органи керування трифазного реле напруги

Про неправильне чергування фаз сигналізує послідовне миготіння червоних індикаторів.

#### 9.4 Електронне реле затримки

Призначене для комутації електричних кіл змінного (220В/50Гц) струму з регульованою витримкою часу від 0,1 секунд до 10 годин (рис. 9.4). Має режими затримки на увімкнення та вимкнення.

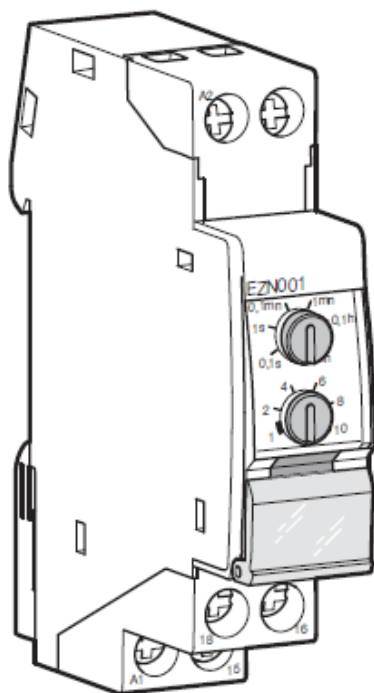


Рис. 9.4. Зовнішній вигляд реле затримки

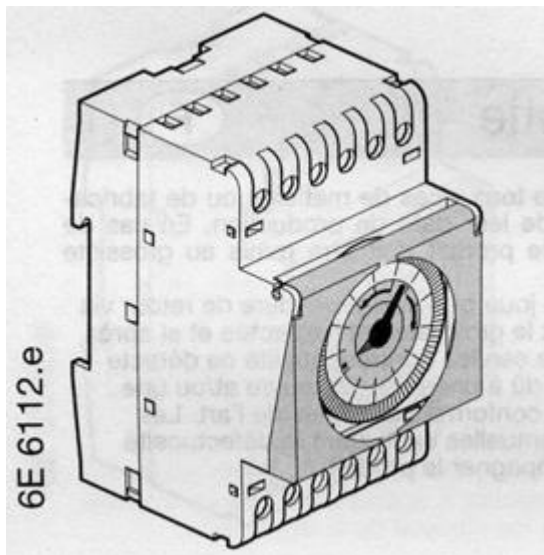
Затримку виставляють двома ручками потенціометрів: від 0,1 секунд до 1 години і множник від 1 до 10.

Після відповідних комутацій починається зворотній відлік, про що сигналізує блимання світло діода. Коли відлік часу закінчиться відбудеться комутація силового контакту.

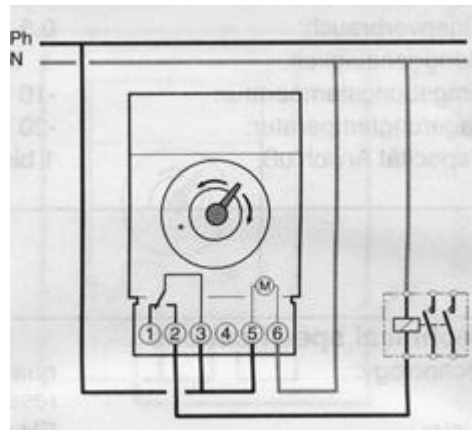
### **9.5 Електромеханічне реле часу**

Електромеханічне реле часу призначено для керування включенням і відключенням живлення споживача в задані інтервали часу.

Передня кришка має можливість пломбування для запобігання несанкціонованому доступу після завершення програмування. Зовнішній вигляд та схема підключення таймера подані на рис. 9.5



а)



б)

Рис. 9.5. Зовнішній вигляд реле часу (а) та схема його підключення (б)

У таймері передбачено автоматичний і ручних режими роботи. При ручному режимі контакти 1 і 3 завжди замкнуті або розімкнуті.

Для автоматичної роботи таймера необхідно:

1.Перемикач режиму перевести в положення AUTO (перемикач розміщено під передньою кришкою).

2.На зубчастому колесі встановити час роботи контактів 2 і 3 у включеному і відключеному стані. Для цього необхідно: час роботи у включеному стані встановити висуванням відповідних засувки, а для роботи у відключеному стані – засунути відповідні засувки. Засувка відповідає 15 хвилинам. Повний оборот зубчастого колеса відповідає 24 годинам.

### Контрольні питання

1. Призначення реле напруги та його види.
2. Призначення реле часу.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричні мережі та системи. Режими роботи розімкнених мереж: Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»/Уклад. В.В.Кирик.-К.: НТУУ «КПІ», 2014.-130с.
2. Электрические системы и сети / Н.В. Буслова, В.Н. Винославский, Г.И. Денисенко и др. / Под ред. Г.И. Денисенко. – К.: Вища шк., 1986. – 584 с.
3. Электрические системы / Под ред. В.А. Веникова. Т.2 – М.: Высш. шк., 1971. – 440 с.
4. Ершевич В.В., Зейлигер А.Н., Илларионов Г.А. и др. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Под. ред. Рокотяна С.С. и Шапиро И.М. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
5. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 365 с.
6. Апарати захисту та керування в електричних установках низької напруги. Навчальний посібник / М. В. Бурштинський, Л. С. Копчак, М. В. Хай. 2-ге вид. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2008. 184 с.