

УДК 621.39.004.021

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ АВАРІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: papayka.yu.a@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6953-1705>;
- ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент кафедри електропривода НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: lysenko.o.g@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7041-671X>;
- МАЛИШКО М.М. аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: malyshko.m.m@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-0903>;
- БУРТНИЙ Д.І. магістр спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: dmitriyivanov5862@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7758-8566>;
- УДОВИК О.В. аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: udovuk.o.v@nmu.one, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1000-7815>.

**Мета роботи.** Дослідити характер аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств з метою виявлення основних причин виникнення аварійних ситуацій, виявити особливості протікання процесів, оцінити їх вплив на надійність систем електропостачання. Стаття ставить перед собою мету дослідження впливу режимів нейтралі на безпеку людини та дослідження методів контролю ізоляції мереж напругою 6 – 10 кВ для підвищення безпеки експлуатації електричних мереж підприємств.

**Методи дослідження.** Дослідження характеру аварійних перехідних процесів виконано шляхом статистичного аналізу з обробки даних про виникнення аварійних ситуацій на діючих підприємствах України та аналізу існуючих методів розрахунку, які наведено у науково – технічній літературі. Визначення основних причин та закономірностей розвитку процесів виконано шляхом аналізу аварійних процесів які виникають у мережах з ізолюваною нейтраллю при однофазному "металевому" замиканні на землю на початкових стадіях аварійного режиму та в післяаварійному режимі.

**Отримані результати.** Результатом проведеного аналізу основних закономірностей перебігу аварійних перехідних процесів в системах електропостачання підприємств є визначення початкового характеру процесів у мережах з ізолюваною нейтраллю під час однофазного замикання на землю та характеру процесів у післяаварійному режимі роботи. Також у статті виведено формули з розрахунку впливу режиму нейтралі на електробезпеку людини під час експлуатації розподільчих мереж. З метою підвищення надійності систем електропостачання та зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій у статті запропоновано метод контролю параметрів ізоляції електричних мереж напругою 6 – 10 кВ.

**Наукова новизна.** Визначення впливу сучасного обладнання на характер перебігу аварійних перехідних процесів, в тому числі з урахуванням нелінійного навантаження та вищих гармонік. Оцінка взаємозв'язку між параметрами перехідного процесу та надійності електропостачання, вплив аварійних режимів на технологічні процеси підприємства.

**Практична цінність.** Результат дослідження дає змогу проводити оцінку наслідків аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств, що веде до збільшення надійності систем електропостачання та покращенню умов безпеки праці на енергетичних об'єктах. Залежності впливу режиму нейтралі на електробезпеку при експлуатації розподільчих мереж.

**Ключові слова:** аварійні перехідні процеси; енергетична безпека; системи електропостачання; промислове енергозабезпечення; аналіз режимів; закономірності перебігу аварійних процесів.

### I. ВСТУП

Надійність електропостачання є одним із ключових чинників стабільного функціонування промислових підприємств. Ускладнення конфігурації

електричних мереж призводить до використання високочутливого обладнання, яке обумовлює необхідність дослідження характеру аварійних перехідних процесів, зокрема процесів, що супроводжують порушення нормальної роботи систем

електропостачання підприємств напругою 6 – 10 кВ [1]. Актуальність дослідження характеру аварійних перехідних процесів полягає у розумінні основних чинників які спричиняють аварійні режими [2], [3]. У статті розглядаються ключові питання, пов'язані з аварійними перехідними процесами, зокрема аналізуються початкові умови виникнення аварійних режимів, процес протікання перехідного процесу та стан мережі в післяаварійному режимі. Особлива увага приділена питанню впливу режиму нейтралі на електробезпеку обслуговуючого персоналу. Також окремо розглядаються методи контролю ізоляції в мережах напругою 6 – 10 кВ, що є важливим кроком до підвищення рівня ранньої діагностики пошкоджень та запобігання аваріям [4], [5].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика аварійних перехідних процесів широко розглядається в наукових публікаціях галузі теорії електричних кіл та електромагнітних процесів. З розвитком галузі електронно розрахункових машин в останні роки велика увага приділяється новітнім методам розрахунку, які базуються на впровадженні цифрових технологій моніторингу та запобігання аваріям у технологічний процес. Зокрема розглядаються аспекти виявлення аварійних режимів в реальному часі з проведенням оцінки ступеня зносу ізоляційних матеріалів обладнання [6]. Проте, незважаючи на значну кількість досліджень у цій галузі, низка важливих аспектів залишається недостатньо висвітленою [7].

Одним з важливих аспектів проблеми є необхідність кореляції характеру перебігу аварійних перехідних процесів у системах електропостачання підприємств з технічними аспектами експлуатації обладнання та питанням електричної безпеки персоналу під час роботи з обладнанням в залежності від режиму нейтралі. Також недостатньо розглянуто питання практичної методики оцінки параметрів ізоляції мереж напругою 6 – 10 кВ.

Таким чином актуальність дослідження полягає у необхідності глибокого аналізу характеру аварійних перехідних процесів в системах електропостачання підприємств, з урахуванням впливу режиму нейтралі на електробезпеку та вдосконаленні методів контролю ізоляції, що є критично важливими критеріями для забезпечення надійності та безперебійності роботи промислових об'єктів з обмеженими можливостями.

## III. МЕТА РОБОТИ

Мета даної роботи - дослідження аварійних струмів у перехідному режимі в електричних мережах при несиметричних пошкодженнях, що необхідно для визначення частоти власних коливань напруги і струмів нульової послідовності, розрахунку тривалості процесу. Результат дослідження дозволяє отримати залежності напруги дотику до корпусів

електрообладнання від тривалості перехідного процесу.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

### Початковий характер перехідних процесів під час виникнення аварійних режимів

Аварійні режими призводять до миттєвих змін електричних параметрів мережі [8]. Серед найбільш поширених причин виникнення збурень у мережах промислових підприємств із ізолюваною нейтраллю є пошкодження ізоляції однієї з фаз відносно землі. У початковій фазі перехідного процесу система намагається адаптуватися до нових умов роботи мережі, причому швидкість реакції залежить від інерційних властивостей мережі, таких як значення індуктивного, ємнісного та активного опорів. Виникнення аварійного процесу безпосередньо впливає на систему в цілому, адже призводить до перерозподілу електричних параметрів у фазних провадах.

У системах з ізолюваною нейтраллю під час однофазного замикання на землю перехідний процес має особливий характер. В початковий момент перехідного процесу виникає імпульс струму, який спричинений перерозподілом енергії накопиченої в ємності фазних проводів відносно землі. Значення напруги у пошкодженій фазі спадає до нуля одночасно з збільшенням напруги у непошкоджених фазах. Тобто відбувається фізичний процес перерозподілу заряду між пошкодженою фазою та потенціалом землі, а також появою надлишкового заряду у непошкоджених фазах [9].

Струм металевого замикання на землю у перехідному режимі характеризується максимальними значеннями трьох складових. Для детального розуміння виразів, що описують співвідношення між параметрами перехідного процесу скористаємося спрощеною схемою заміщення мережі, наведеної на рис. 1.

Усталена складова перехідного струму може бути розрахована [1]:

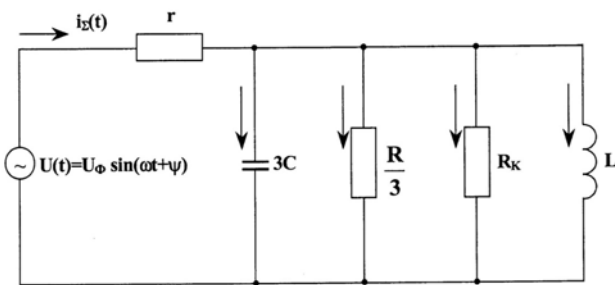
$$I_z = 3U_{\phi} \omega c \quad (1)$$

Усталена складова перехідного струму зберігається в електричному колі після завершення перехідного процесу. Значення складової відображає режим роботи системи, який встановлюється після завершення дії збурень, значення складової є постійною величиною або періодичною у часі. Тобто усталена складова характеризує післяаварійний режим роботи мережі після завершення дії чинника, яким було розпочато перехідний процес.

В початковий момент виникнення перехідного процесу виникає перехідна складова, яка характеризує

частину струму або напруги, виникає у момент зміни режиму роботи електричної системи та завершує вплив з завершенням часу перебігу перехідного процесу. Основною причиною виникнення складової є інерційність елементів системи, тобто наявність індуктивної та ємнісної складової, які унеможливають миттєву зміну значень струму та напруги. Тобто під час металевого замикання на землю перехідна складова зумовлена зміною потенціалу нейтралі при виникненні замикання фазного провідника відносно землі за наявності напруги в непошкоджених фазах [1]:

$$i_{a1} = \frac{2}{3} I_{3M} \frac{c}{c + c_M} \sin \omega t_0 \quad (2)$$



**Рисунок 1.** Спрощена схема замінення системи електропостачання підприємства для дослідження початкового характеру аварійних перехідних процесів при металевому короткому замиканні

Перехідна складова, значення якої обумовлено зміною напруг непошкоджених фаз [1]:

$$i_{a1} = \frac{2}{3} I_{3M} \frac{c}{c + c_M} \frac{\omega_{CB}}{\omega} \cos \omega t_0 \quad (3)$$

де  $C_M$  - міжфазна ємність всієї електрично пов'язаної мережі;

$t_0$  - початок відліку часу, що відповідає моменту позитивного максимуму напруги пошкодженої фази;  
 $\omega_{CB}$  - кутова частота вільних коливань системи в режимі однофазного замикання на землю.

Дослідження початкового характеру аварійних перехідних процесів можливо провести виходячи з припущення, що окрім вільних коливань середньої частоти в мережі наявні високочастотні коливання, особливо на початкових стадіях перехідного процесу, які затухають упродовж чверті періоду промислової частоти.

З урахуванням виразів, які відображають зв'язок між фізичними явищами перехідного процесу у часі, вираз вільної складової перехідного струму, відповідно до значення усталеної складової струму [1]:

$$i_{a.CB} = I_{3M} \frac{\gamma}{3\gamma} = I_{3M} \frac{z}{r} = I_{3M} \frac{R}{3r\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} \quad (4)$$

Наведений вираз демонструє, що кратність зміни вільної складової струму замикання визначається з співвідношення опору ізоляції мережі відносно потенціалу землі і перехідного опору [1]:

$$Z = \frac{R}{3r\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} \quad (5)$$

### Характер перехідних процесів в після аварійному режимі

Перехідні процеси в післяаварійному режимі мають динамічний, нестационарний характер, якому відповідає наявність електромагнітних коливань. Електромагнітні процеси характеризуються швидким перебігом у часі. Під час замикання на землю система електропостачання підприємства переходить на режим роботи, який характеризується швидкою зміною усталених параметрів на примусові. В зазначений період часу значення зсуву нейтралі коливається від нуля до значення напруги у непошкодженій фазі. За результатом роботи пристроїв захисної апаратури або факторів які обумовлюють самостійне завершення перехідного процесу розрив струму замикання відбувається у момент переходу значення струму замикання через нуль. Тобто фізично процес відновлення напруги у пошкодженій фазі відбувається упродовж певного проміжку часу зі зростанням від нульового значення, для випадку металевого замикання на землю.

На рис. 2 зображена спрощена схема замінення мережі для дослідження перехідних процесів, що виникають після зникнення замикання фази на землю.

Напруга джерела живлення пошкодженої фази визначається [1]:

$$U(t) = U_\phi \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

Напруга джерела в момент відключення пошкодження [1]:

$$U(t = 0) = U_\phi \sin \phi \quad (7)$$

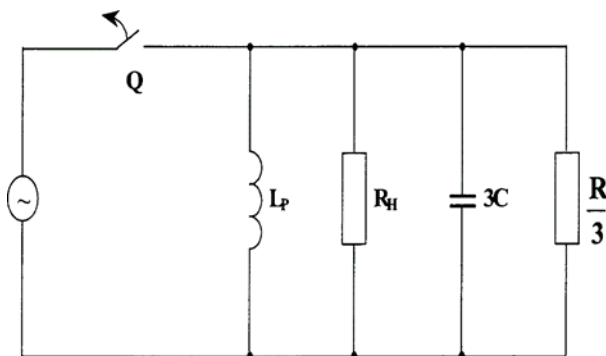
Відключення пошкодженої ділянки електричного кола веде до закінчення аварійного перехідного процесу та появи коливальних процесів у контурі який складається з індуктивної та ємнісної складової мережі.

Найбільш значущими характеристиками отриманого контуру, які враховуються при дослідженні післяаварійних перехідних процесів є значення коливальної частоти та постійна часу

затухання [10].

Значення коливальної частоти:

$$\omega'_{CB} = \frac{I}{\sqrt{L_p C_\Sigma}} = \frac{I}{\sqrt{3L_p C}} \quad (8)$$



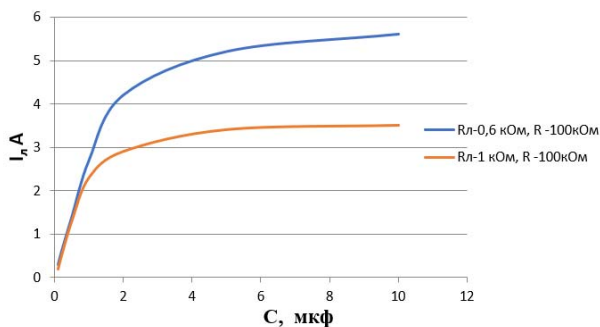
**Рисунок 2.** Спрощена схема заміщення системи електропостачання підприємства для дослідження перехідних процесів після усунення замикання фази на землю

**Вплив режиму нейтралі на електробезпеку при експлуатації розподільчих мереж**

Загальні показники електричної безпеки оцінюються величиною струму, що проходить через тіло людини.

В мережах із повністю ізолюваною нейтраллю струм через тіло людини проходить при безпосередньому дотику до однієї з фаз з повністю ізолюваною нейтраллю [11].

На графіку нижче наведено залежності значення струму через людину при дотику до однієї фази мережі з ізолюваною нейтраллю від сумарної ємності однієї фази мережі відносно землі.

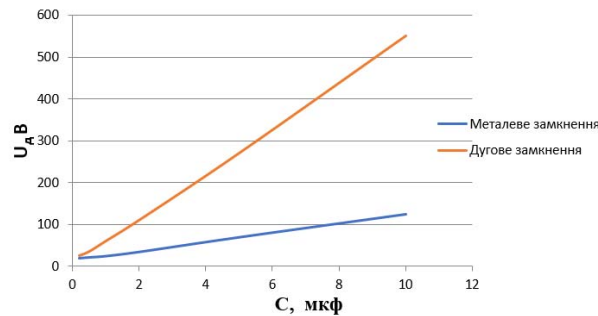


**Рисунок 3.** Графік проходження струму через тіло людини залежно від ємності мережі

Аналіз графічних залежностей показує, що для часу впливу електричного струму на організм людини до моменту спрацювання пристроїв захисту мереж напругою до 11 кВ допускається ємність мережі

відносно землі не більше 0,1 мкФ на фазу і активного опору ізоляції не менш ніж 100 кОм на фазу.

На рис. 4 криві 1 та 2 відображають зміну величини напруги дотику в мережі з ізолюваною нейтраллю, при глухому (коефіцієнт  $k_6=1$ ) і дуговому (коефіцієнт  $k_6=4$ ) замиканні на землю залежно від величини ємності мережі відносно землі за опору захисного заземлення 4 Ом.



**Рисунок 4.** Залежність напруги дотику від ємності мережі

При умовах експлуатації, що передбачають дію захисту від однофазних замикань на землю з вимкненням без витримки часу, час впливу на організм людини напруги дотику дорівнює близько 0,3 с.

**Метод контролю параметрів ізоляції мереж напругою 6 – 10 кВ**

Підвищення надійності і безпеки роботи систем електропостачання залежить від параметрів ізоляції електричної мережі відносно землі [12].

Для підвищення показників надійності та безпеки функціонування системи електропостачання підприємств необхідна система безперервного контролю стану ізоляції.

Сутність запропонованого методу полягає у накладанні двох оперативних сигналів, з частотами, які не рівні між собою та відрізняються від промислової. Пристрої моніторингу та SCADA система підключається у місці підключення оперативного джерела.

Значення оперативного струму в підконтрольній мережі:

$$I = U/Z \quad (9)$$

де  $I$  – струм накладеного сигналу;  
 $U$  – напруга оперативного джерела.

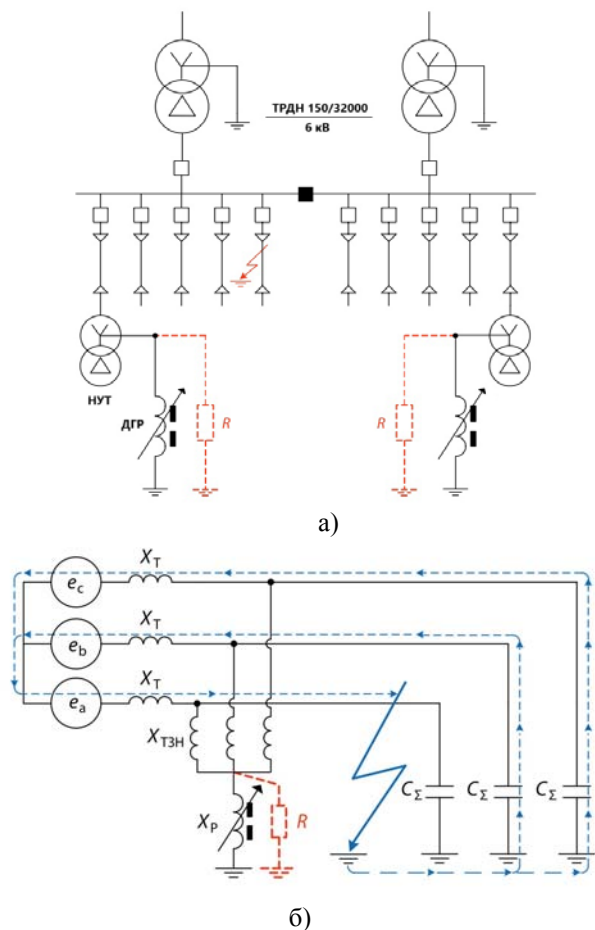
При накладанні двох сигналів на мережу:

$$I_1 = \frac{U_1}{R + j \frac{1}{\omega_1 c}}, I_2 = \frac{U_2}{R + j \frac{1}{\omega_2 c}} \quad (10)$$

Припустивши, що активний опір ізоляції не зменшується ( $R = \text{const}$ ), отримуємо вираз для ємності:

$$C = \frac{I_1 I_2 (\omega_2 - \omega_1)}{\omega_2 \omega_1 (U_1 I_2 - U_2 I_1)} \quad (11)$$

Передбачається побудова SCADA системи за модульним принципом компонування за рахунок перспективної можливості подальшого розширення та модернізації. Дослідження впливу режиму роботи нейтралі на значення струмів однофазного замикання на землю проводились в умовах феросплавного виробництва (рис. 5) [13].



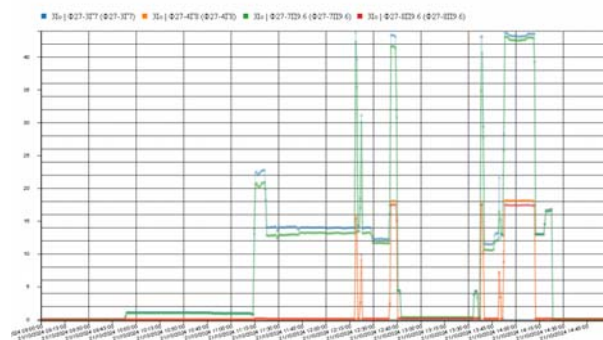
**Рисунок 5.** Схема електропостачання підприємства (а) та схема заміщення (б)

У мережах з ізолюваною нейтраллю пошкодження ізоляції щодо землі однієї з фаз призводить до повного перерозподілу фазних напруг у всій системі, а джерелом змін є місце пошкодження.

Перехідний процес у цьому випадку характеризується стіканням заряду з провідників пошкодженої фази та їх розрядом до потенціалу землі, а також перенесенням додаткового заряду на непошкоджені фази для надання їм нового потенціалу щодо землі (рис. 6).



**Рисунок 6.** Приклад перерозподілу напруг при однофазному «металевому» замиканні на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю



**Рисунок 7.** Приклад стікання заряду з провідників пошкодженої фази та їх розрядом до потенціалу землі з усіх ділянок мережі

Коректність розрахунків струмів однофазного замикання на землю підтверджується даними, зафіксованими на реєстраторі аварійних подій з урахуванням коефіцієнту трансформації трансформатора струму нульової послідовності та відключеним секційним вимикачем, що зменшує ємність мережі вдвічі. При цьому значення струму замикання досягає 55А, що перевищує допустимі ПУЕ межі (рис. 7).

З метою підвищення функціональної надійності пристроїв першого і другого ступенів захисту від однофазних замикань на землю розроблено наступні рекомендації:

Для зменшення впливу перехідних процесів на якість роботи пристроїв захисту від замикань на землю, а також з метою виключення або зменшення ймовірності появи ферорезонансних процесів, режим

нейтралі розподільчої мережі слід перевіряти для усіх варіантів схем живлення підприємства [14].



**Рисунок 8.** Зареєстрований перехідний процес при однофазному замиканні на землю

Якщо мережа працює з повністю ізольованою нейтраллю, то для наявних у розподільчій мережі вимірювальних трансформаторів напруги, що працюють із заземленою нейтраллю, відповідно до ПУЕ, слід навантажити додаткову обмотку, увімкнену за схемою розімкненого трикутника, активним опором величиною 25 Ом і потужністю 100 Вт. Тому створення додаткової активної складової струму замикання на землю (режим роботи мережі з резистором у нейтралі) в електричних мережах напругою 6 і 10 кВ системи електропостачання феросплавного підприємства є простим та дієвим способом обмеження струмів замикання.

Для створення додаткового штучного активного струму замикання можуть використовуватися резистори, які підключаються між нейтральною точкою мережі і землею. У цьому випадку високовольтний резистор може приєднуватися:

- до нейтралі силового трансформатора при з'єднанні його обмоток у зірку з виведеною нульовою точкою;
- до нейтралі первинної обмотки спеціального заземлювального трансформатора;
- між кожною фазою і землею трьох опорів, з'єднаних у зірку з штучною нульовою точкою.

## V. ВИСНОВКИ

У мережах з повністю ізольованою нейтраллю коливальний процес визначається наявністю в мережі вимірювальних трансформаторів напруги із заземленою нульовою точкою первинної обмотки. Характер перехідного процесу (частота власних коливань напруги і струмів нульової послідовності та тривалість процесу) визначається головним чином сумарною ємністю мережі відносно землі та кількістю одночасно увімкнених вимірювальних трансформаторів напруги. Для реальних параметрів розподільчих мереж тривалість перехідного процесу знаходиться в межах від 2 до 10 періодів промислової частоти, а частота вільних коливань, як правило,

менша за промислову частоту. Частота вільних коливань безпосередньо в процесі затухання коливань змінюється через нелінійний характер реактивного опору вимірювальних трансформаторів напруги.

У мережах з компенсованою нейтраллю характер перехідного процесу за інших рівних умов залежить від режиму налаштування компенсуючого пристрою. Затухання напруги на нейтралі визначається головним чином параметрами ізоляції розподільчої мережі відносно землі і не залежить від режиму налаштування компенсуючого пристрою. Частота вільних коливань і стала часу їх затухання в компенсованих мережах значно перевищують аналогічні характеристики в мережах з повністю ізольованою нейтраллю.

При замиканнях на корпус через переважаючу дугу напруга дотику перевищує короткочасно допустиме значення при ємності електрично пов'язаної мережі відносно землі приблизно 2,5 мкФ на фазу і тривало допустиме значення при ємності мережі приблизно 0,3 мкФ на фазу. В усталеному режимі замикання (при відсутності перехідного процесу) напруга дотику перевищить тривало допустиме значення при ємності мережі відносно землі приблизно 1,6 мкФ на фазу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Pivnyak G.G., Zhezhelenko I.V., Papaika Y.A. (2016), Transients in Electric Power Supply Systems, Trans Tech Publications LTD, Switzerland. <http://trove.nla.gov.au/version/232262440>.
- [2] Stepanenko Y.V. (2024). Study of unbalance voltage in three-phase networks with different neutral modes. *Electrical Engineering & Power Engineering* (2), 27–35. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-2-3>
- [3] Papaika Y. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality / Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko, Yevgenij Koshelenko, Illa Olishevskiy // *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, - 2021 (2), p.97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.
- [4] Lowczowski K, Lorenc J, Andruszkiewicz J, Nadolny Z, Zawodniak J. Novel Earth Fault Protection Algorithm Based on MV Cable Screen Zero Sequence Current Filter. *Energies*. 2019; 12(16):3190. <https://doi.org/10.3390/en12163190>.
- [5] Pivnyak G. ASSESSMENT OF POWER SUPPLY ENERGY EFFICIENCY BY VOLTAGE QUALITY CRITERION / Gennadiy Pivnyak, Oleksandr Azukovskiy, Yurii Papaika, Careres Cabana Edgar, Olczak Pawel, Artur Dyczko // *Rynek Energii*. - 2021 № 4(155). p. 75-84. ISSN 14255960.
- [6] IEEE 1547:2003-Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System.
- [7] Pivniak H. Problems of development of innovative

- power supply systems of Ukraine in the context of European integration / H. Pivniak, O. Aziukovskiy, Yu. Papaika, I. Lutsenko, N. Neuberger // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* - 2022 (5), 89-103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>.
- [8] Shcherba M. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation / M. Shcherba, A. Shcherba, Y. Peretyatko // *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS 2020.* Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. p. 353–356. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>.
- [9] Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. London, Springer, 2017, 198 pp.
- [10] Babak S. Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring / S. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk // *Studies in Systems, Decision and Control.* – 2023. 454, p. 181–193 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10).
- [11] Sokol Y. Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation / Y. Sokol, V. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko // *Studies in Systems, Decision and Control.* – 2024. 509, p. 137–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7).
- [12] Nikander A.; Järventausta P. Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2017, 32, 1187–1195. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183>.
- [13] Papaika Yu., Lysenko O., Rogoza M., Stepanenko Yu., Tokar L., Yakimets S. (2019). Energy losses within the electric equipment in terms of poor voltage quality. *Bulletin of Mykhailo Ostrohradskiy KrNU 1/2019* (114), 9–13. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13>.
- [14] Abbas A. K., Hamad S., and Hamad N. A. ‘Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network’, vol. 23, no. 2, pp. 621–632, 2021, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632>.

Надійшла (Received) 10.03.2025;  
Прийнята (Accepted) 05.04.2025;  
Опублікована (Published) 30.04.2025.

## STUDY OF THE NATURE OF EMERGENCY TRANSIENT PROCESSES IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF ENTERPRISES

- PAPAİKA YU.A. Sci.D, Professor, head of department of Electrical Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [papaika.yu.a@nmu.one](mailto:papaika.yu.a@nmu.one), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6953-1705>;
- LYSENKO O.G. Ph.D, Associate professor, Department of Electrical Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [lysenko.o.g@nmu.one](mailto:lysenko.o.g@nmu.one), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7041-671X>;
- MALYSHKO M.M. Postgraduate student of specialty 141 Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [malyshko.m.m@nmu.one](mailto:malyshko.m.m@nmu.one), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-0903>;
- BURTNYI D.I. Master of specialty 141 Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [dmitriyivanov5862@gmail.com](mailto:dmitriyivanov5862@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7758-8566>;
- UDOVYK O.V. Postgraduate student of specialty 141 Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [udovyk.o.v@nmu.one](mailto:udovyk.o.v@nmu.one), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1000-7815>.

**Purpose.** To investigate the nature of emergency transient processes in power supply systems of enterprises in order to identify the main causes of emergency situations, identify the features of the processes, and assess their impact on the reliability of power supply systems. The article aims to study the impact of neutral modes on human safety and to study methods for controlling the insulation of networks with a voltage of 6–10 kV to improve the safety of operation of electrical networks of enterprises.

**Methodology.** The study of the nature of emergency transient processes was carried out through statistical analysis of data processing on the occurrence of emergency situations at operating enterprises of Ukraine and analysis of existing calculation methods given in the scientific and technical literature. The main causes and patterns of process development were determined by analyzing emergency processes that occur in networks with an isolated neutral during a single-phase "metal" ground fault at the initial stages of the emergency mode and in the post-emergency mode.

**Findings.** The result of the analysis of the main patterns of the course of emergency transient processes in the power supply systems of enterprises is the determination of the initial nature of the processes in networks with an isolated neutral during a single-phase ground fault and the nature of the processes in the post-emergency operating mode. The article also derives formulas for calculating the neutral mode impact on human electrical safety during the operation of distribution networks. In order to increase the reliability of power supply systems and reduce the likelihood of emergency situations, the article proposes a method for controlling the insulation parameters of electrical networks with a voltage of 6 - 10 kV.

**Originality.** Determination of the modern equipment impact on the nature of emergency transients, including nonlinear load and higher harmonics. Evaluation of the relationship between the transient process parameters and the power supply reliability, the impact of emergency modes on the technological processes of the enterprise.

**Practical value.** The result of the study makes it possible to assess the consequences of emergency transients in the power supply systems of enterprises, which leads to an increase in the reliability of power supply systems and improvement of labor safety conditions at energy facilities. Study of the influence of the neutral mode on electrical safety during the operation of distribution networks.

**Keywords:** emergency transient processes; energy security; power supply systems; industrial energy supply; mode analysis; patterns of emergency processes.

## REFERENCES

- [1] Pivnyak G.G., Zhezhelenko I.V., Papaika Y.A. (2016), Transients in Electric Power Supply Systems, Trans Tech Publications LTD, Switzerland. <http://trove.nla.gov.au/version/232262440>.
- [2] Stepanenko Y.V. (2024). Study of unbalance voltage in three-phase networks with different neutral modes. *Electrical Engineering & Power Engineering* (2), 27–35. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-2-3>
- [3] Papaika Y. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality / Yurii Papaika, Oleksandra Lysenko, Yevgenij Koshelenko, Illa Olishevskiy // *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, - 2021 (2), p.97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>.
- [4] Lowczowski K, Lorenc J, Andruszkiewicz J, Nadolny Z, Zawodniak J. Novel Earth Fault Protection Algorithm Based on MV Cable Screen Zero Sequence Current Filter. *Energies*. 2019; 12(16):3190. <https://doi.org/10.3390/en12163190>.
- [5] Pivnyak G. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion / Gennadiy Pivnyak, Oleksandr Azukovskiy, Yurii Papaika, Careres Cabana Edgar, Olczak Pawel, Artur Dyczko // *Rynek Energii*. - 2021 № 4(155). p. 75-84. ISSN 14255960.
- [6] IEEE 1547:2003-Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System.
- [7] Pivniak H. Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration / H. Pivniak, O. Aziukovskiy, Yu. Papaika, I. Lutsenko, N. Neuberger // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. - 2022 (5), 89-103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089>.
- [8] Shcherba M. Mathematical Modeling of Electric Current Distribution in Water Trees Branches in XLPE Power Cables Insulation / M. Shcherba, A. Shcherba, Y. Peretyatko // *Proc. IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems. ESS 2020*. Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. p. 353–356. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160293>.
- [9] Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. London, Springer, 2017, 198 pp.
- [10] Babak S. Analysis of UAVs and Their Technical Parameters for Overhead Power Lines Monitoring / S. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. 454, p. 181–193 [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_10).
- [11] Sokol Y. Theoretical Basis of Determination of Corona Discharge Coordinates by Acoustic Radiation / Y. Sokol, V. Babak, A. Zaporozhets, O. Gryb, I. Karpaliuk, R. Demianenko // *Studies in Systems, Decision and Control*, – 2024. 509, p. 137–153. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_7).
- [12] Nikander A.; Järventausta P. Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2017, 32, 1187–1195. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183>.
- [13] Papaika Yu., Lysenko O., Rogoza M., Stepanenko Yu., Tokar L., Yakimets S. (2019). Energy losses within the electric equipment in terms of poor voltage quality. *Bulletin of Mykhailo Ostrohradskiy KrNU 1/2019* (114), 9–13. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13>.
- [14] Abbas A. K., Hamad S., and Hamad N. A. ‘Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network’, vol. 23, no. 2, pp. 621–632, 2021, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632>.