УДК 621.316.1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВИХ РЕЖИМІВ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

ПАПАЇКА Ю.А. д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: papaika.yu.a@nmu.one, ORCID: 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: 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: 0009-0000-0413-053X;

УДОВИК О.В. аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка НТУ "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна, e-mail: udovyk.o.v@nmu.one, ORCID: 0009-0002-1000-7815.

Мета роботи. *Розробка методичних та технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності та забезпечення надійності систем електропостачання промислових підприємств.*

Методи дослідження. *Використано системний аналіз режимів роботи систем електропостачання, експериментальні вимірювання із застосуванням апаратно-програмних комплексів та аналіз їх впливу на показники надійності й якості електропостачання.*

Отримані результати*. Запропоновано підхід до формування режимів роботи систем електропостачання, що сприяє підвищенню енергоефективності. Проведено дослідження впливу перехідних процесів на якість електроенергії та обґрунтовано практичні рекомендації щодо оптимізації функціонування енергоємних підприємств.*

Наукова новизна. *Розробка методу контролю параметрів ізоляції електричних мереж під робочою напругою 6-10 кВ.*

Практична цінність. *У роботі розроблено комплексний підхід до підвищення енергоефективності та надійності електропостачання, результати можуть бути використані при модернізації енергосистем промислових підприємств.*

Ключові слова*: система електропостачання; ізольована нейтраль; струм замикання на землю; ємнісний струм; захист від однофазних замикань на землю; автоматичне повторне вмикання.*

I. ВСТУП

Ефективне функціонування систем електропостачання в умовах обмеженої потужності вимагає гнучких підходів до планування, модернізації та захисту енергетичних мереж[1]. Зокрема, важливими є використання резервних джерел живлення, впровадження інтелектуальних систем управління мережею, підвищення стійкості до кібератак, а також розвиток локальних автономних систем енергоживлення. Надійність електропостачання напряму впливає не лише на стабільність функціонування промисловості, а й на економіку загалом[2].

Феросплавні підприємства є одними з найбільш енергоємних споживачів у промисловості, оскільки технологічні процеси виробництва феросплавів потребують значних обсягів електроенергії при високій стабільності параметрів живлення. Забезпечення енергетичної ефективності та надійності електропостачання таких підприємств є ключовим фактором їх безперебійної та економічно доцільної роботи. Особливо актуальним це питання стає в умовах обмежених можливостей енергосистеми в наслідок бойових дій — через дефіцит потужності, аварійні ситуації, перебої з постачанням, або необхідність дотримання балансу в об’єднаній енергомережі[3].

В сучасних умовах, коли енергосистема України зазнає значного навантаження та структурних змін внаслідок воєнного стану, відновлення інфраструктури та переходу до більш гнучких і децентралізованих рішень, виникає потреба в адаптації енергоспоживачів до нових викликів. Феросплавні заводи мають забезпечити не лише енергоефективність своїх технологічних процесів, а й відповідність режимам роботи енергосистеми, зберігаючи при цьому стабільність і безпеку виробництва.

Однофазні замикання на землю є найпоширенішими пошкодженнями у внутрішніх мережах електропостачання промислових підприємств. Вони створюють небезпеку як для фазної ізоляції обладнання, так і для персоналу. У мережах із ізольованою нейтраллю пошкодження ізоляції щодо землі однієї з фаз призводить до повного перерозподілу напруг фазних проводів у всій системі,

© Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М., Удовик О.В., 2025
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License **(CC-BY-CA 4.0)**
DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-3-5

а джерелом змін є місце пошкодження [4].

Надійність та стійкість таких мереж значною мірою залежать від вибору схеми живлення, структури мережі, режиму нейтралі та систем захисту. Метою цієї статті є розробка рекомендацій щодо підвищення стійкості мереж внутрішнього електропостачання шляхом оптимального вибору зазначених параметрів.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Під час розробки та обґрунтування варіантів схем електропостачання підприємств, а також вибору структури розподільної мережі, слід враховувати вплив наявності та принцип дії пристроїв захисту від замикань на землю. Враховуючи значну кількість замикань на землю в розподільних мережах, ці пристрої є важливим елементом системи, що визначає її надійність та безпеку[5].

На сьогодні широке застосування отримали радіальні та змішані схеми електропостачання з одним або двома ступенями розподілу. Виконання мереж, їх структура, кількість понижувальних і розподільних підстанцій визначають величину ємнісного струму замикання на землю, режим роботи нейтралі мережі, а також вибір засобів захисту та їх розміщення.

Результати експериментального безперервного моніторингу параметрів електричних режимів промислових підприємств показали, що однофазні замикання на землю виникають досить часто, особливо під час воєнного стану, коли електричні мережі 6-10 кВ перевантажені. Для прикладу наведемо на рис.1 зареєстрований процес однофазного замикання на землю з ємнісним струмом 168 А. Настільки високі значення струмів замикання є нетиповими для даного класу електричних мереж, засоби захисту та компенсації за подібних режимів можуть працювати з перевантаженням та некоректно[6]. Характеристика параметрів електричних режимів (*THD*, I_0, U_0) підтверджує замикання з дуговою природою. У даному аварійному процесі система захисту відпрацювала штатно та ліквідувала це пошкодження.

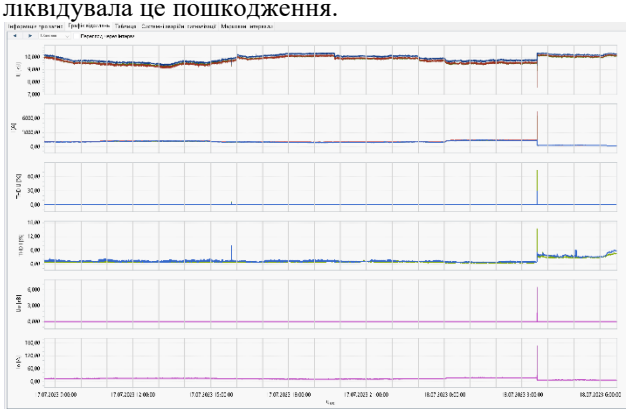


Рисунок 1. Реєстрація однофазного замкнення на землю в енергоємних підприємствах у мережі з ізольованою нейтраллю.

На енергоємних підприємствах переважно використовуються змішані розподільчі мережі з напругою 6, 10 кВ. Для таких умов ПУЕ передбачає ізольований режим роботи нейтралі за значеннями ємнісного струму замикання на землю до 30 А у мережі з напругою 6 кВ і до 20 А у мережі з напругою 10 кВ. В іншому випадку нейтраль мережі повинна заземлюватися через дугогасний реактор. Таким чином, електричні мережі можуть працювати в ізольованому або компенсованому режимі нейтралі]. З двох зазначених режимів роботи нейтралі перевагу слід віддати ізольованому режиму з таких причин: компенсовані мережі потребують додаткових капіталовкладень на дугогасні реактори та пристрої для їх підключення і автоматичного налаштування (без пристроїв автоматичного налаштування індуктивності дугогасних пристроїв використання недоцільне)[7]; для компенсованих мереж лише один вітчизняний виробник «КП Промавтоматіка» виробляє засоби захисту від однофазних замикань на землю, придатні для виконання першого ступеня захисту[8]. Слід також зазначити, що застосування ізольованого режиму роботи нейтралі у чистому вигляді також недоцільне. У цьому випадку бажано накладати на аварійний струм активну складову, тобто перевагу слід віддати режиму роботи мережі з резистором у нейтралі.

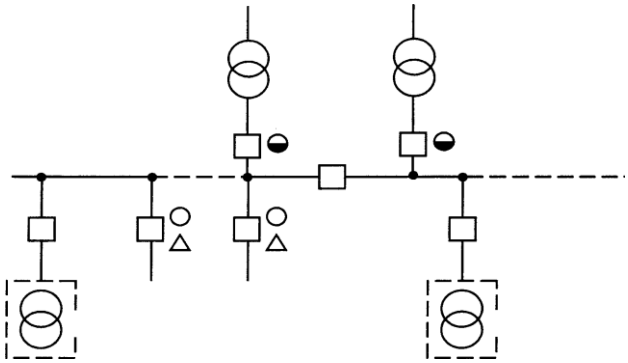
Забезпеченість засобами захисту під час вибору режиму роботи нейтралі має першорядне значення, оскільки експлуатація електричних мереж без захисту від замикань на землю згідно з ПУЕ є неприпустимою[9]. Використання звичайних струмових захистів, що реагують на струм нульової послідовності в компенсованих мережах, ускладнене через неможливість забезпечити їх селективну роботу. У таких мережах залишковий струм замикання на землю є меншим за власний ємнісний струм приєднання, що захищається.

Застосування в компенсованих мережах напрямлених захистів, призначених для мереж з ізольованою нейтраллю, неможливе. Це пояснюється тим, що в таких мережах, порівняно з мережами з ізольованою нейтраллю, змінені фазові співвідношення між векторами струму та напруги нульової послідовності. Крім того, кут між зазначеними величинами не є фіксованим і залежить від режиму налаштування дугогасного реактора[10].

Виходячи з викладеного, а також враховуючи необхідність забезпечення селективної дії пристроїв захисту від однофазних замикань на землю, надамо певні рекомендації щодо вибору структури розподільчих мереж.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи э розробка методичних та технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності та забезпечення надійності систем електропостачання промислових підприємств.



○,●-відповідно перша і друга ступінь захисту від ЗНЗ; Δ- орган АПВ з контролем ізоляції під напругою.

Рисунок 2. Одноступенева (класична) схема розподілу електроенергії.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розрахунок ємнісного струму та кількості приєднань.

З метою забезпечення ізольованого режиму роботи нейтралі електричні мережі слід, по можливості, виконувати повітряно-кабельними[11]. Кількість понижувальних підстанцій для підприємства визначається виходячи з максимально допустимого ємнісного струму замикання на землю, який для реальних параметрів розподільної мережі може бути визначений за виразом:

$$\boldsymbol{I_c = 3U_{\Phi}\omega(\sum C_{\Pi i}I_{\Pi i} + \sum C_{Ki}I_{Ki} + \sum C_{Di}N_{Di} + \sum C_{Ti}N_{Ti})} \quad (1)$$

де UФ— фазна напруга мережі, кВ; ω— кутова частота мережі; СПi, СКi — ємності на фазу відносно землі струмопровідних жил (мкФ/км) відповідно одного кілометра повітряної та кабельної лінії певного перерізу; lПi, lКi — сумарні довжини відповідно повітряних та кабельних ліній заданого перерізу, км; CDi, CTi — ємності на фазу відповідно електродвигунів та силових трансформаторів відносно корпусу обладнання, мкФ; NDi, NTi — відповідно кількість електродвигунів та трансформаторів заданої потужності, підключених до мережі.

Ємнісний струм однофазного замкнення на землю в мережі 6 кВ Нікопольського заводу феросплавів склав 130А.

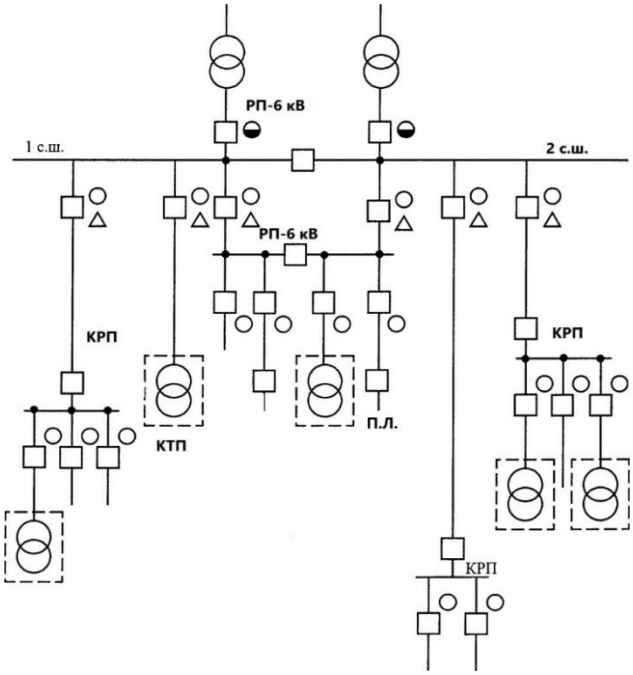


Рисунок 3. Двоступенева схема розподілу електроенергії.

Власний ємнісний струм ліній визначається за цим самим виразом, але при цьому враховуються лише ємності елементів, підключених до захищеного приєднання[12].

Рекомендовані схеми та засоби захисту

Кількість ступенів розподілу електроенергії на напрузі 6 (10) кВ має бути одна або дві (Рисунок 2-3). У другому випадку для виправлення подовжньої неселективності пристроїв захисту ЛЕП від замикань на землю, які виконуються без витримки часу, на верхньому ступені розподілу електроенергії рекомендується встановлювати пристрої автоматичного повторного вмикання (АПВ). Дозволяється додатково встановлювати пристрої АПВ і на нижньому ступені розподілу для виправлення можливої хибної роботи захисту від замикань на землю, а також у одноступеневих мережі.

Для одноступеневої схеми розподілу електроенергії (Рисунок 2) при використанні для захисту від замикань на землю струмових (ненаправлених) пристроїв кількість відгалужених приєднань за умови приблизної рівності їх фізичних параметрів визначається за виразом[13]:

$$\boldsymbol{n \geq \frac{I_{сз}}{I_{oc}} \geq k_{ч}k_{к} = 1,5(4 \dots 5) \geq 6 \dots 7} \quad (2)$$

де **Iсз** — струм спрацювання захисту; **Iос**— власний ємнісний струм захищеного приєднання; **kч** = 1,5 — коефіцієнт чутливості; **kк** = (4...5) — коефіцієнт, що враховує кидки ємнісного струму в момент замикання.

За значних відмінностей власних ємнісних струмів ліній кількість приєднань визначається таким чином

$$n \geq I_{oc.max} k_ч k_k / I_{oc.min} \quad (3)$$

де Ioc.max— максимальний власний ємнісний струм із усіх приєднань, підключених до секції шин; Ioc.min— власний ємнісний струм приєднання з найменшою ємністю щодо землі тієї ж секції шин.

Обгрунтування резистивних способів заземлення нейтралі.

У разі заземлення нейтралі мережі через високоомний резистор (режим накладення активної складової струму замикання на землю), його значення визначається за виразом:

$$R_H = (\frac{1}{3} \dots \frac{2}{3}) X_c \quad (4)$$

Мінімальна кількість відгалужених приєднань зменшується до 3-5 за рахунок зменшення коефіцієнта $k_к$, який у таких умовах знаходиться в межах 2–3 (X_C - ємнісний опір однієї фази мережі щодо землі).

При використанні зх пристроїв захисту від замикань на землю кількість відгалужених приєднань від підстанції для системи електропостачання повинна становити не менше трьох, за умови, що два з них будуть постійно перебувати в роботі[14].

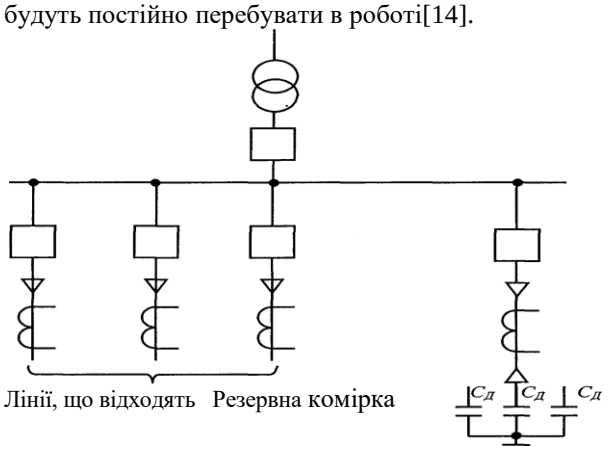


Рисунок 4. Приєднання додаткової ємності для забезпечення працездатності пристроїв захисту від замикань на землю в нерозгалужених мережах.

У разі необхідності використання нерозгалужених мереж (трансформатор і один розподільний пункт, для живлення трансформатору 6/10 кВ), якщо кількість приєднань три або менше, до шин слід приєднати конденсаторну установку, включену в зірку із заземленою нульовою точкою, з ємністю не більше 0,2 мкФ на фазу (Рисунок 4).

В особливих умовах (пусковий перехідний процес на конденсаторах) виникає імпульсний струм заряду конденсатора, який залежить від початкової напруги на конденсаторах, напруги мережі в момент вмикання, імпедансу ланцюга *LR*, який може тривати до 10 періодів[15,16]. Кратність коливання струму зазвичай в два рази перевищує коливання напруги (Рисунок 5). Слід враховувати ці коливання при розрахуванні карти уставок направленого захисту.

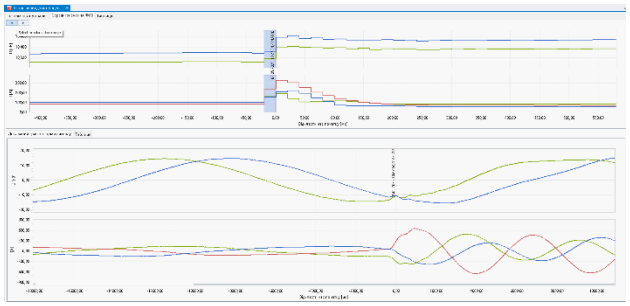


Рисунок 5. Перехідний процес включення конденсаторної батареї

Приєднання ємності забезпечить надійність і селективність роботи захистів, а відповідно, і надійність та стійкість електропостачання споживачів у цілому, за рахунок зменшення тривалості необґрунтованих простоїв.

Розробка методу контролю параметрів ізоляції електричних мереж під робочою напругою 6-10 кВ.

Надійність і безпека роботи систем електропостачання значною мірою залежать від значень активних і реактивних опорів ізоляції електричної мережі відносно землі. Безперервний та автоматичний контроль значень складових ізоляції електричної мережі (активних і ємнісних опорів ізоляції фаз мережі відносно землі) дозволить прогнозувати виникнення небезпечних станів системи[17]. За допомогою програмно-апаратного комплексу SCADA вводяться випереджаючі керуючі команди, які дозволяють мінімізувати можливі втрати.

Для підвищення надійності систем електропостачання, зниження ймовірності аварій через неаварійне поступове зниження рівня активного опору ізоляції, підвищення рівня електробезпеки мереж необхідна система безперервного контролю ізоляції.

Існуючі на даний час пристрої мають складні непрямі налаштування та розраховані на контроль ємнісного опору ізоляції мережі, але не здатні вибірково контролювати параметри ізоляції окремих приєднань[18].

Запропонований метод безперервного вимірювання значень складових опору ізоляції мережі відносно землі під робочою напругою заснований на використанні накладених на мережу оперативних струмів непромислової частоти. Даний метод на основі SCADA може бути використаний для:

- оперативної оцінки рівня активного опору ізоляції мережі в цілому, та кожного з приєднань розподільчої мережі;
- оперативної оцінки рівня ємнісного опору ізоляції мережі в цілому, та кожного з приєднань розподільчої мережі;
- організація вибіркової сигналізації або захисту від замикань на землю в системах електропостачання незалежно від

конфігурації та режиму роботи нейтралі мережі;

Суть запропонованого методу безперервного та оперативного контролю параметрів ізоляції відносно землі електричної мережі та її елементів полягає у накладанні двох оперативних сигналів, частоти яких не рівні між собою і відрізняються від промислової. На контрольованих ділянках (лінії або приєднанні), а також у місці приєднання оперативного джерела встановлюються пристрої, призначені для зняття та обробки відповідних сигналів. Після виконання обчислень заздалегідь запрограмованих у SCADA, видаються сигнали, що відповідають значенням параметрів ізоляції на контрольованих ділянках системи електропостачання.

Значення оперативного стуму в підконтрольній мережі

$$\boldsymbol{I} = \frac{\boldsymbol{U}}{\boldsymbol{Z}} \qquad (5)$$

де I – струм накладеного сигналу, U – напруга оперативного джерела, $\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{R} + \boldsymbol{j}\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{\omega c}}$ - повний опір ізоляції мережі для оперативній частоти ω.

Після виконання перетворення, отримаємо:

$$\boldsymbol{I} = \frac{\boldsymbol{U}}{\boldsymbol{R}+\boldsymbol{j}\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{\omega c}}} \qquad (6)$$

Якщо на мережу накладено два високочастотних струма, тоді до кожного сигналу:

$$\boldsymbol{I_1} = \frac{\boldsymbol{U_1}}{\boldsymbol{R}+\boldsymbol{j}\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{\omega_1 c}}}, \boldsymbol{I_2} = \frac{\boldsymbol{U_2}}{\boldsymbol{R}+\boldsymbol{j}\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{\omega_2 c}}} \qquad (7)$$

Припустимо, що ємність контрольованої ділянки не змінюється протягом вимірювання, тобто *C=const*. Прирівнявши вирази за ємністю та вирішивши їх відносно активного опору ізоляції, отримаємо:

$$\boldsymbol{R} = \frac{\boldsymbol{\omega_2 U_2 I_1 - \omega_1 U_1 I_2}}{\boldsymbol{I_1 I_2(\omega_2 - \omega_1)}} \qquad (8)$$

Аналогічним чином, припустивши, що значення активного опору ізоляції контрольованої ділянки не змінюється (*R=const*), отримаємо вираз для відповідної ємності:

$$C = \frac{\boldsymbol{I_1 I_2(\omega_2 - \omega_1)}}{\boldsymbol{\omega_2 \omega_1(U_1 I_2 - U_2 I_1)}} \qquad (9)$$

Оптимальною конфігурацією схеми будь-якої системи SCADA є схема з модульним принципом компонування, оскільки така модель передбачає можливість подальшого розширення і модернізації системи при найменших конструктивних змінах. SCADA, що реалізує метод безперервного контролю під робочою напругою значень складових ізоляції в розподільних мережах напругою 6 - 10 кВ, складається з функціональних блоків:

- блок накладення на мережу оперативних струмів непромислової частоти;
- блок зняття та перетворення оперативних сигналів;
- блок з'єднання та зовнішніх комутацій;
- контролер нижнього рівня системи SCADA;
- контролер верхнього рівня системи SCADA.

Блок накладення на мережу оперативних струмів непромислової частоти може бути реалізований за допомогою спеціальних трансформаторів, приєднаних до нейтралі мережі. До вторинних обмоток цих трансформаторів приєднують генератори з заданими оперативними частотами.

Блок зняття та перетворення оперативних сигналів у найпростішому варіанті реалізується за допомогою вимірювальних трансформаторів струму.

Блок з'єднання та зовнішніх комутацій складається з:

1. Пристрою з'єднання з лінією електропередачі та перетворення сигналу на низьку напругу.
2. Фільтра виділення сигналу оперативної частоти.
3. Цифро-аналогового перетворювача типу ПАВ-3.

Елемент перетворення сигналу складається з двох кіл, які відрізняються частотою виділеного сигналу.

Контролер UCD SCADA реалізує функції:

1. Збору, первинної обробки, зберігання інформації про стан контрольованих параметрів.
2. Програмно-апаратного та логічного управління.
3. Регулювання технологічних параметрів.
4. Відображення інформації.
5. З'єднання з UMD SCADA вищого рівня, включаючи роботу в мережах.

Блок управління та сигналізації на базі UMD виконує функції: візуального та звукового оповіщення, видачі керуючих сигналів на нижчий рівень UCD. Контролер передає сигнал на виконуючі пристрої.

Безвідмовність роботи сучасного обладнання в значній мірі визначається надійністю ізоляції, яка піддається постійному впливу численних факторів. До них належать: механічні пошкодження, електромагнітні поля, хімічно активні речовини, кліматичні фактори тощо.

Зміни, що відбуваються під впливом перелічених факторів, призводять до погіршення параметрів ізоляції. Це веде до виникнення аварій з важкими наслідками.

Запропонована система безперервного контролю ізоляції та захисту від витоків у розподільчих мережах металургійних підприємств напругою 6, 10кВ функціонує за принципом порівняння сигналів. Після виконання обчислень за заздалегідь заданим алгоритмом, видається сигнал

(блінкер), якщо параметри контрольованої ділянки виходять за межі допустимого. Параметри нормальної роботи ділянки задаються заздалегідь.

Схема функціонує наступним чином: сигнал від пристрою виділення напруги нульової послідовності надходить на пристрій виділення сигналів накладеної частоти. Пристрій виділення сигналів накладеної частоти складається з загороджувального фільтра для промислової частоти та фільтрів для виділення робочих частот. Виділені сигнали надходять на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). У АЦП відбувається перетворення аналогових сигналів у цифрові та передача їх на UCD для подальшої обробки. Перевага методу - невисокі вимоги до SCADA, оскільки не потрібні великі обчислення.

Недоліки методу:
- висока вартість (фільтри, два аналого-цифрових перетворювачі);
- неможливість чистого виділення робочих сигналів на частотах, близьких до промислової, що призводить до великої похибки;
- тимчасова похибка виділених значень сигналів при перетворенні двома аналого-цифровими перетворювачами.

Другий можливий метод реалізації системи моніторингу дозволяє відмовитися від використання фільтрів. Аналоговий сигнал з трансформатора нульової послідовності при цьому надходить на АЦП, де перетворюється у цифровий. Цифровий сигнал потрапляє в UCD, де програмним способом здійснюється виділення сигналів робочих частот. Потім на основі значень цих сигналів проводяться подальші обчислення.

Переваги системи:
- можливість роботи з частотами, близькими до промислової;
- зменшення похибки при виділенні робочих частот;
- відсутність тимчасової похибки.

Недоліком є збільшення навантаження на контролер UCD, оскільки він повинен виділяти частоти і лише потім приступати до основних обчислень. При аналізі витрат на побудування систем за першим та другим методом було виявлено, що витрати на виготовлення та експлуатацію у другому випадку менші. Оскільки частоти опорних сигналів близькі до промислової частоти, перевага надається другому методу.

V. ВИСНОВКИ

Інформація, наведена у статті, щодо проведеного дослідження стосується актуальної науково-технічної проблеми забезпечення надійності та безпеки експлуатації високовольтних електродвигунів у промислових умовах, зокрема на підприємствах феросплавної галузі. Враховуючи значні масштаби енергоспоживання та безперервний характер виробничих процесів, виникає необхідність у впровадженні сучасних методів діагностики, які здатні в реальному часі відстежувати параметри роботи обладнання, своєчасно виявляти дефекти та прогнозувати можливі аварійні ситуації.

У роботі проведено аналіз існуючих підходів до контролю технічного стану електричних машин, зокрема методів діагностики ізоляції, контролю струмів і напруг. Встановлено, що традиційні методи діагностики часто мають низьку оперативність, потребують значних трудових ресурсів і не завжди дозволяють своєчасно попередити відмови. Саме тому обґрунтовано доцільність використання інтелектуальних систем моніторингу на базі SCADA, які забезпечують автоматизоване збирання, обробку та зберігання великих масивів даних.

Запропонований у статті метод ґрунтується на поєднанні математичних моделей електромеханічних процесів у високовольтному обладнанні з алгоритмами аналізу, реалізованими в SCADA-системі. Такий підхід дозволяє не лише контролювати поточний стан ізоляції та навантаження, а й здійснювати прогнози деградації, визначати тенденції зміни параметрів та формувати рекомендації для обслуговуючого персоналу. Важливим є те, що система функціонує у режимі реального часу, що значно знижує ймовірність раптових аварій і сприяє підвищенню загальної надійності електроприводних установок.

Практичне значення отриманих результатів виражається в можливості інтеграції SCADA-методу в існуючі системи управління енергетичним обладнанням без суттєвих додаткових витрат, що робить його привабливим для промислових підприємств різних галузей.

Перспективи подальших досліджень пов’язані з удосконаленням алгоритмів діагностики шляхом використання методів машинного навчання та штучного інтелекту, що дозволить підвищити точність прогнозування та адаптивність системи до зміни умов експлуатації. Крім того, доцільним є розширення функціональних можливостей SCADA-систем шляхом інтеграції з цифровими двійниками електромеханічних комплексів та створення єдиних платформ для управління енергетичними об’єктами в умовах індустрії.

Подальший розвиток у цьому напрямку сприятиме підвищенню енергоефективності, зниженню експлуатаційних витрат і забезпеченню стабільної роботи енергетичної інфраструктури підприємств.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Pivniak, H., Aziukovskyi, O., Papaika, Yu., Lutsenko, I., Neuberger, N. Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2022, no. 5, pp. 89–103. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089.

[2] Papaika, Yu., Lysenko, O., Koshelenko, Ye., Olishevskyi, I. Mathematical modeling of power

supply reliability at low voltage quality. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2021, no. 2, pp. 97–103. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097.

[3] Pivnyak, G., Azukovskiy, O., Papaika, Yu., Cabana, E. C., Olczak, P., Dyczko, A. Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. Rynek Energii, 2021, no. 4(155), pp. 75–84. ISSN 1425-5960.

[4] Nikander, A., Järventausta, P. Identification of high-impedance earth faults in neutral isolated or compensated MV networks. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, vol. 32, pp. 1187–1195. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183.

[5] Lahutin, V. M., Zelinskyi, V. Ts., Burykin, O. B. Testing of electrical machines and transformers in power systems. Vinnytsia: VNTU, 2010. 115 p.

[6] Papaika, Yu., Lysenko, O., Rogoza, M., Stepanenko, Yu., Tokar, L., Yakimets, S. Energy losses within the electric equipment in terms of poor voltage quality. Bulletin of Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University, 2019, no. 1(114), pp. 9–13. DOI: https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13.

[7] Vovk, Yu. M., Sydorenko, V. V. Neutral operating modes in networks up to 35 kV. Lviv: LNTU, 2019.

[8] Promavtomatyka. Technical documentation. Kyiv. URL: https://promautomatika.kiev.ua (дата звернення: 30.08.2025).

[9] Rules for Electrical Installations (PUE). Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2006.

[10] Bieliaiev, B. M. Compensation of ground fault currents. Kyiv: Tekhnika, 2007.

[11] Stepanenko, Y. V. Study of unbalance voltage in three-phase networks with different neutral modes. Electrical Engineering & Power Engineering, 2024, no. 2, pp. 27–35. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-2-3.

[12] Khrapach, S. P. Fundamentals of relay protection. Dnipro: NMetAU, 2020.

[13] DSTU 31348:2005. Calculation of short-circuit currents.

[14] 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, vol. 12, no. 16, p. 3190. DOI: https://doi.org/10.3390/en12163190.

[15] Pivnyak, G. G., Zhezhelenko, I. V., Papaika, Yu. A. Transients in Electric Power Supply Systems. Switzerland : Trans Tech Publications LTD, 2016. URL: http://trove.nla.gov.au/version/232262440 (дата звернення: 30.08.2025).

[16] Balasmekh, F. K. Transient processes in ground faults. In: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern Technologies for Economic and Safe Use of Electric Power", Dnipropetrovsk, 1997, pp. 163–168.

[17] Fedosieiev, S. V. Protection against earth faults. Kharkiv: Energoatom, 2012.

[18] 18. Abbas, A. K., Hamad, S., Hamad, N. A. Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network. International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 621–632. DOI: https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632.

Надійшла (Received) 12.08.2025;
Прийнята (Accepted) 18.09.2025;
Опублікована (Published) 22.10.2025;

ANALYSIS OF SPECIAL OPERATING MODES OF INDUSTRIAL ELECTRICAL NETWORKS WITH AN ISOLATED NEUTRAL

PAPAIKA 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, ORCID: 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, ORCID: 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, ORCID: 0009-0000-0413-053X;

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, ORCID: 0009-0002-1000-7815.

Purpose. *Development of methodological and technical solutions aimed at improving energy efficiency and ensuring the reliability of power supply systems of industrial enterprises.*
Methodology. *System analysis of operating modes of power supply systems, experimental measurements using hardware–software complexes, and assessment of their impact on reliability and power quality indicators.*

Results obtained. *An approach to the formation of operating modes of power supply systems that contributes to improving energy efficiency has been proposed. The influence of transient processes on power quality has been investigated, and practical recommendations for optimizing the operation of energy-intensive enterprises have been substantiated.*
Scientific Novelty. *An innovative methodology for monitoring the insulation parameters of electrical networks operating at 6–10 kV has been developed, enabling diagnostics under real operating conditions.*
Practical Value. *The study proposes a comprehensive framework aimed at enhancing the energy efficiency and reliability of power supply systems. The obtained results are applicable to the modernization and optimization of industrial power networks.*
Keywords: *power supply system, isolated neutral, ground fault current, capacitive current, single-phase-to-ground fault protection, automatic reclosing.*

REFERENCES

[1] Pivniak, H., Aziukovskyi, O., Papaika, Y., Lutsenko, I., & Neuberger, N. (2022). Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 89–103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089

[2] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y., & Olishevskyi, I. (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 97–103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097

[3] Pivnyak, G., Azukovskiy, O., Papaika, Y., Cabana, E. C., Olczak, P., & Dyczko, A. (2021). Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*, 4(155), 75–84.

[4] Nikander, A., & Järventausta, P. (2017). Identification of high-impedance earth faults in neutral isolated or compensated MV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *32*, 1187–1195. https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183

[5] Lahutin, V. M., Zelinskyi, V. T., & Burykin, O. B. (2010). *Testing of electrical machines and transformers in power systems*. Vinnytsia: VNTU.

[6] Papaika, Y., Lysenko, O., Rogoza, M., Stepanenko, Y., Tokar, L., & Yakimets, S. (2019). Energy losses within the electric equipment in terms of poor voltage quality. *Bulletin of Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University*, 1(114), 9–13. https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13

[7] Vovk, Y. M., & Sydorenko, V. V. (2019). *Neutral operating modes in networks up to 35 kV*. Lviv: LNTU.

[8] Promavtomatyka. (n.d.). *Technical documentation*. Kyiv. https://promautomatika.kiev.ua

[9] *Rules for Electrical Installations (PUE)*. (2006). Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.

[10] Bieliaiev, B. M. (2007). *Compensation of ground fault currents*. Kyiv: Tekhnika.

[11] 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

[12] Khrapach, S. P. (2020). *Fundamentals of relay protection*. Dnipro: NMetAU.

[13] DSTU 31348:2005. (2005). *Calculation of short-circuit currents*.

[14] Lowczowski, K., Lorenc, J., Andruszkiewicz, J., Nadolny, Z., & Zawodniak, J. (2019). Novel earth fault protection algorithm based on MV cable screen zero sequence current filter. *Energies*, *12*(16), 3190. https://doi.org/10.3390/en12163190

[15] Pivnyak, G. G., Zhezhelenko, I. V., & Papaika, Y. A. (2016). *Transients in electric power supply systems*. Switzerland: Trans Tech Publications LTD. http://trove.nla.gov.au/version/232262440

[16] Balasmekh, F. K. (1997). Transient processes in ground faults. In *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern Technologies for Economic and Safe Use of Electric Power"* (pp. 163–168). Dnipropetrovsk.

[17] Fedosieiev, S. V. (2012). *Protection against earth faults*. Kharkiv: Energoatom.

[18] Abbas, A. K., Hamad, S., & Hamad, N. A. (2021). Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, *23*(2), 621–632. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23.i2.pp621-632