

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Слободенюк Роман Володимирович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз сучасних тенденцій побудови систем електропостачання та
релейного захисту і автоматики міських електромереж
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Слободенюк Р.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Савченко Л.Г.

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Слободенюк Р.В. Аналіз сучасних тенденцій побудови систем електропостачання та релейного захисту і автоматики міських електромереж.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Основна мета аналізу сучасних тенденцій в електропостачанні та РЗА міських електромереж дозволяє визначити ключові виклики та можливості для розвитку, а також сприяє розробці та впровадженню інноваційних рішень, які забезпечать надійність, ефективність та безпеку електропостачання в умовах сучасного міста..

Ключові слова: електропостачання, електрична мережа, релейний захист, міські електромережі.

ABSTRACT

Slobodyenyuk R.V. Analysis of current trends in the construction of power supply systems and relay protection and automation of urban power grids.

Qualification work for obtaining a Master's degree in specialty 141 – Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The main goal is to analyze current trends in power supply and relay protection and automation (RPA) of urban power grids, which allows identifying key challenges and opportunities for development, and also contributes to the development and implementation of innovative solutions that will ensure the reliability, efficiency and safety of power supply in a modern city.

Keywords: power supply, electrical grid, relay protection, urban power grids.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРИ, ПРОЕКТУВАННЯ І БУДІВНИЦТВА МІСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	6
1.1 Структури електричних мереж у міській місцевості.	6
1.2 Постачальні електромережі.	7
1.3 Електричні мережі живлення та розподілу 10 кВ	9
1.4 Електричні мережі розподільного типу з напругою 0,4 кВ	10
1.5 Захисне релейне обладнання та автоматизовані системи міських електричних мереж	12
Висновок по першому розділу	15
РОЗДІЛ 2 АКТУАЛЬНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТА ЗАСОБІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ МІСЬКИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ.	17
2.1 Тенденції еволюції та зміни умов роботи електроенергетичної системи України	17
2.2 Необхідність в малих джерелах електроенергії	18
2.3 Структура майбутніх енергетичних систем генерації	19
2.4 Електрична мережа майбутнього	20
2.5 Автоматичне протиаварійне керування виявлення, запобігання розвитку та ліквідації аварійних режимів ЕЕС	21
2.6 Джерела розподіленої генерації	25
2.7 Регіональні електричні мережі та малі генеруючі потужності.	28
Висновки по другому розділу	28
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	30
3.1 Показники системи електропостачання	30
3.2 Розрахунки еквівалентної схеми заміщення електромережі.	30
Висновки по третьому розділу.	33
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35

ВСТУП

Сучасні міста, характеризуючись високою концентрацією споживачів та інтенсивним розвитком інфраструктури, висувають підвищені вимоги до надійності та ефективності систем електропостачання. В умовах зростаючого споживання електроенергії, інтеграції розподіленої генерації та активного впровадження енергоефективних технологій, аналіз сучасних тенденцій побудови систем електропостачання та релейного захисту і автоматики (РЗА) міських електромереж набуває особливої актуальності.

Водночас, складність та розгалуженість міських електромереж робить їх вразливими до різноманітних пошкоджень та аварійних ситуацій. Відмова окремого елемента може призвести до каскадного відключення живлення на значній території, спричиняючи значні економічні збитки та соціальні наслідки. Саме тому, не менш важливою є інтегрована система релейного захисту та автоматики (РЗА), яка забезпечує швидке виявлення та ізоляцію пошкоджених ділянок, запобігаючи поширенню аварії та відновлюючи нормальну роботу мережі.

Система РЗА, завдяки своїй швидкодії та надійності, дозволяє мінімізувати тривалість перерв у електропостачанні, знизити ризик пошкодження обладнання та підвищити загальну безпеку роботи електромережі. Автоматичне перемикання резервного живлення, контроль напруги та частоти, а також інші функції автоматики, забезпечують стабільну роботу системи навіть в умовах значних навантажень та непередбачуваних подій.

Можна стверджувати, що системи електропостачання та релейного захисту і автоматики міських електромереж є невід'ємною складовою забезпечення життєдіяльності міста.

Об'єкт дослідження є сучасні тенденції в побудові систем електропостачання та релейного захисту і автоматики (РЗА) міських електромереж спрямовані на забезпечення надійності.

Основна мета роботи є дослідження сучасних тенденцій побудови систем електропостачання та релейного захисту і автоматики (РЗА) міських електромереж полягає у забезпеченні надійної, ефективної та безпечної передачі електроенергії споживачам в умовах зростаючого попиту та ускладнення інфраструктури.

Основними завданнями даного аналізу є:

1. Визначення ключових тенденцій у розвитку технологій електропостачання, включаючи інтеграцію розподіленої генерації, використання інтелектуальних мереж (Smart Grid) та підвищення пропускної спроможності ліній електропередач.
2. Огляд сучасних технологій РЗА, зосереджуючись на цифрових реле захисту, автоматичній локалізації пошкоджень, а також системах моніторингу та діагностики.
3. Аналіз впливу нових вимог нормативної бази на проектування та експлуатацію систем електропостачання та РЗА.

Методи дослідження. Дослідження були виконані на основі теорії електротехніки, принципів релейного захисту та методів математичного моделювання.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Слободенюк Р. В., Стещенко А. А. ТЕНДЕНЦІЇ В ПОБУДОВІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ. ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року 25 с.

2. Слободенюк Р.В. САМОСТІЙНА ДІАГНОСТИКА ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ. І-й тур Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей 23 квітня 2025 м. Житомир 26с.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРИ, ПРОЕКТУВАННЯ І БУДІВНИЦТВА МІСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Електропостачання міста є складним та багатогранним комплексом інженерних рішень, що забезпечує безперебійне надходження електричної енергії до споживачів різного типу. Від надійності та ефективності цієї системи залежить функціонування промисловості, транспорту, комунального господарства, соціальної інфраструктури та комфортне життя мешканців. [1].

Система електропостачання, як правило, складається з декількох ключових елементів: генеруючі потужності (електростанції), мережі передачі та розподілу електроенергії (високовольтні лінії, трансформаторні підстанції) та, власне, споживачі. Ефективна координація цих елементів є критично важливою для забезпечення стабільної та якісної подачі електроенергії.

Сучасні системи електропостачання міст поступово інтегрують відновлювані джерела енергії (сонячні, вітрові електростанції) та системи накопичення енергії. Це дозволяє знизити залежність від традиційних джерел, зменшити викиди парникових газів та підвищити стійкість системи до зовнішніх впливів.

Оптимізація та модернізація системи електропостачання є постійним процесом, що вимагає значних інвестицій та впровадження новітніх технологій. Автоматизація управління, інтелектуальні мережі (Smart Grids) та використання сучасних матеріалів дозволяють підвищити ефективність, зменшити втрати електроенергії та покращити надійність електропостачання міст, забезпечуючи комфорт та розвиток міської інфраструктури.

1.1 Структури електричних мереж у міській місцевості.

Міські електричні мережі відіграють критичну роль у забезпеченні надійної та безперебійної подачі електроенергії до споживачів у межах населених пунктів. Їхня складна архітектура забезпечує транспортування, розподіл та доставку електричної енергії від джерел генерації до кінцевих

користувачів. Розуміння структури та функціонування міських електричних мереж є важливим для забезпечення їхньої ефективності, надійності та безпеки.

До основних компонентів міських електричних мереж належать, перш за все, підстанції, що забезпечують трансформацію напруги з високої на середню та низьку. Вони є ключовими вузлами розподілу енергії та обладнуються трансформаторами, комутаційним обладнанням, системами захисту та управління. Далі, до складу мереж входять лінії електропередачі різних класів напруги, що поділяються на високовольтні лінії, які передають енергію від підстанцій до розподільчих пунктів, та середньо- і низьковольтні лінії, що забезпечують безпосередню доставку електроенергії до житлових будинків, промислових підприємств та інших споживачів. Важливим елементом є розподільчі пункти, які забезпечують розгалуження мережі та розподіл електроенергії між окремими споживачами. Нарешті, до міських електричних мереж належать кабельні лінії, які все частіше використовуються замість повітряних ліній для покращення естетичного вигляду міста та підвищення надійності електропостачання.

Таким чином, міські електричні мережі є складним комплексом взаємопов'язаних елементів, які разом забезпечують стабільне та надійне електропостачання міських споживачів. Їхня ефективна робота потребує постійного моніторингу, технічного обслуговування та модернізації для задоволення зростаючих потреб у електричній енергії сучасного міста.

1.2 Постачальні електромережі

Постачальна електромережа міста є складною та багаторівневою системою, призначеною для забезпечення надійного та безперебійного електропостачання споживачів. Її ефективне функціонування є критично важливим для економічної діяльності, соціальної інфраструктури та життєдіяльності населення.

Основними складовими постачальної електромережі міста є:

1. **Підстанції високої напруги (ПС):** Це ключові вузли, які отримують електроенергію від магістральних ліній електропередачі та знижують напругу до рівнів, придатних для розподілу. Вони оснащені трансформаторами, розподільними пристроями, засобами захисту та автоматики.
2. **Розподільчі мережі середньої напруги (6-35 кВ):** Ці мережі транспортують електроенергію від підстанцій високої напруги до трансформаторних підстанцій у різних районах міста. Вони можуть бути виконані повітряними лініями, кабельними лініями або комбінованим способом.
3. **Трансформаторні підстанції (ТП) та розподільчі пункти (РП):** Ці об'єкти знижують напругу до рівня низької напруги (0,4 кВ) для безпосереднього живлення споживачів. Вони також забезпечують захист та керування розподілом електроенергії.
4. **Мережі низької напруги (0,4 кВ):** Це остання ланка в ланцюгу постачання, яка з'єднує трансформаторні підстанції з кінцевими споживачами – житловими будинками, промисловими підприємствами, громадськими будівлями тощо.
5. **Засоби обліку електроенергії:** Електричні лічильники, встановлені у споживачів, дозволяють точно визначати обсяг спожитої електроенергії для здійснення розрахунків.
6. **Системи управління та моніторингу:** Сучасні системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) забезпечують дистанційний контроль та керування всіма елементами електромережі, дозволяючи оперативно реагувати на аварійні ситуації та оптимізувати розподіл електроенергії.

Ефективна організація та надійна робота кожної з цих складових є запорукою стабільного електропостачання міста та задоволення потреб його мешканців та підприємств[2].

1.3 Електричні мережі живлення та розподілу 10 кВ

Живильні та розподільчі мережі 10 кВ є ключовою ланкою системи електропостачання, що забезпечує передачу електроенергії від центрів живлення (підстанцій) до споживачів. Їх структура та компоненти визначаються необхідністю надійного, ефективного та безпечного розподілу електроенергії.

Основні складові таких мереж включають:

1. **Підстанції 110/10 кВ (або вищі):** Вони слугують джерелом живлення для мереж 10 кВ, знижуючи напругу та розподіляючи потік електроенергії.
2. **Повітряні та кабельні лінії 10 кВ:** Вони забезпечують фізичне з'єднання між підстанціями та трансформаторними підстанціями, передаючи електроенергію на значні відстані. Вибір типу лінії залежить від багатьох факторів, зокрема, ландшафту, щільності забудови та необхідного рівня надійності.
3. **Трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ:** Ці підстанції знижують напругу до рівня, придатного для безпосереднього використання споживачами, та розподіляють електроенергію по мережах низької напруги.
4. **Комутаційна апаратура:** До неї входять вимикачі, роз'єднувачі, запобіжники та інші пристрої, які забезпечують можливість оперативного перемикання, захисту та відключення окремих ділянок мережі.
5. **Системи захисту та автоматики:** Вони забезпечують швидке виявлення та локалізацію пошкоджень, запобігаючи розповсюдженню аварій та підвищуючи надійність електропостачання.
6. **Системи обліку електроенергії:** Вони дозволяють здійснювати комерційний облік електроенергії, спожитої різними категоріями споживачів.

Ефективне функціонування живильних та розподільчих мереж 10 кВ вимагає ретельного проектування, кваліфікованого обслуговування та постійного контролю за їх станом. Забезпечення надійної та безперебійної подачі електроенергії є критично важливим для нормального функціонування економіки та забезпечення комфорту життя населення.

1.4 Електричні мережі розподільчого типу з напругою 0,4 кВ

Розподільні мережі напругою 0,4 кВ відіграють ключову роль у забезпеченні електропостачання кінцевих споживачів – житлових будинків, комерційних об'єктів та невеликих промислових підприємств. Ефективна та надійна робота цих мереж є критично важливою для стабільного функціонування сучасної інфраструктури.

Основними складовими розподільних мереж 0,4 кВ є:

- **Трансформаторні підстанції (ТП).** Вони знижують напругу з високовольтової лінії до 0,4 кВ та забезпечують необхідний рівень живлення для споживачів. Важливими параметрами ТП є потужність, тип трансформатора (масляний або сухий) та наявність систем захисту.
- **Розподільчі пункти (РП).** РП виконують функцію розподілу електроенергії між окремими лініями, забезпечують захист від перевантажень та коротких замикань, а також дозволяють здійснювати оперативні перемикання в мережі.
- **Повітряні лінії електропередачі (ПЛ).** Представляють собою систему проводів, закріплених на опорах, які транспортують електроенергію від ТП/РП до споживачів. Матеріали проводів (алюміній, мідь) та перетин визначаються навантаженням та допустимими втратами напруги.
- **Кабельні лінії електропередачі (КЛ).** Використовуються для прокладання електромереж під землею, в тунелях або будівлях. Кабелі відрізняються за конструкцією, матеріалами ізоляції та провідників, а також за навантажувальною здатністю.
- **Вступні розподільчі пристрої (ВРП) та щитки (ЩЕ).** Призначені для

прийому електроенергії від зовнішньої мережі, розподілу її по окремих ланцюгах живлення та захисту від аварійних режимів.

Ефективність розподільних мереж 0,4 кВ залежить від якісного проектування, монтажу та експлуатації всіх складових. Регулярне технічне обслуговування, моніторинг параметрів мережі та застосування сучасних технологій дозволяють забезпечити надійне та безперебійне електропостачання споживачів[2].

Для прикладу показана ключова схема електропостачання міста Коростеня.

Ключова схема електропостачання представлена на рисунку 1.

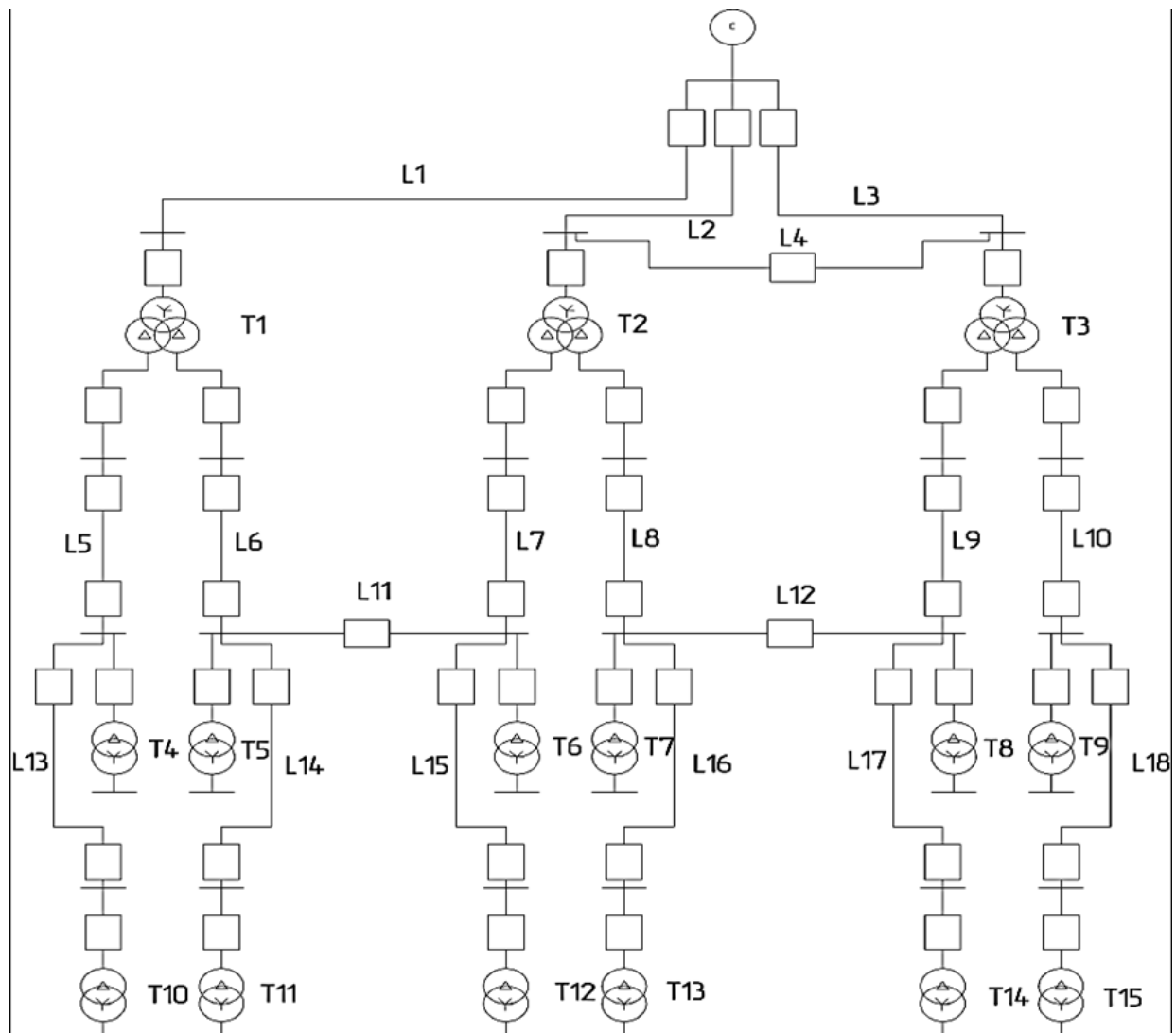


Рисунок 1 – Ключова схема електропостачання в міській електричній мережі.

1.5 Захисне релейне обладнання та автоматизовані системи міських електричних мереж

Міські електричні мережі характеризуються розгалуженою структурою та високою концентрацією споживачів, що вимагає надійного та оперативного захисту від аварійних режимів. Пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА) відіграють ключову роль у забезпеченні безперебійного електропостачання, локалізації пошкоджень та запобіганні їх поширенню.

До основних складових пристроїв РЗА, що застосовуються в міських мережах, належать:

1. Трансформатори струму (ТС) та напруги (ТН): Забезпечують гальванічну розв'язку та перетворення первинних значень струму та напруги до рівнів, придатних для вимірювання релейними пристроями.

2. Реле захисту: Аналізують значення електричних параметрів, що надходять від ТС та ТН, та реагують на відхилення від заданих значень, генеруючи сигнали на відключення пошкодженого елемента. В міських мережах широко застосовуються реле максимального струмового захисту, реле диференційного захисту та реле захисту від замикань на землю.

3. Комутаційні апарати: Включають вимикачі, роз'єднувачі та відсікачі, які використовуються для відключення пошкоджених ділянок мережі на основі сигналів, отриманих від реле захисту.

4. Автоматичні пристрої: Реалізують функції автоматичного повторного ввімкнення (АПВ), автоматичного введення резерву (АВР) та інші функції, спрямовані на відновлення електропостачання після короточасних перерв.

5. Системи збору та передачі даних (SCADA): Забезпечують моніторинг стану мережі, дистанційне керування обладнанням та збір інформації про аварійні режими, що сприяє швидкому реагуванню та аналізу причин виникнення пошкоджень.

Ефективне функціонування пристроїв РЗА є критично важливим для забезпечення надійного та безпечного електропостачання міських споживачів.

Постійне вдосконалення пристроїв та алгоритмів РЗА, впровадження сучасних цифрових технологій, а також кваліфіковане обслуговування є запорукою безперебійної роботи міських електричних мереж[3].

1.5.1 Автоматика

Пристрої автоматики переважно використовуються для відновлення живлення споживачів у разі виникнення порушень нормального режиму роботи мережі. Слід зазначити необхідність узгодження вибіркості захисту на всіх ступенях, а також узгодження дій захисту з роботою автоматичних пристроїв. Виникає необхідність в узгодженні автоматичних пристроїв, що використовуються на різних ступенях міської мережі. Наприклад, робота пристроїв АВР у ТП повинна бути узгоджена з роботою пристроїв АВР в РП за наявності останніх; пристрої АВР в мережі 0,4 кВ з АВР в мережі 6-10 кВ і т. д. У зв'язку з цим можуть виникати певні труднощі.

Розташування пристроїв автоматичного резервування в міській мережі слід координувати з розміщенням пристроїв автоматичного частотного розвантаження (АЧР), які передбачаються на ЦП (центральної підстанції). Їх призначення зводиться до відключення в аварійних випадках частини ліній 6-10 кВ при зниженні частоти в енергосистемі, викликаному нестачею потужності. Ефективність АЧР може бути забезпечена тільки в тому випадку, коли дія пристроїв АВР не ліквідує зниження загального навантаження мережі, що здійснюється АЧР. Для виконання цієї умови необхідно, щоб паралельно працюючі лінії 6-10 кВ були підключені на ЦП до АЧР однієї черги, а лінії, що резервуються за допомогою АВР, мали б АЧР однієї і тієї ж або наступної черги, ніж лінії, що їх резервують.

Пристрої АВР, що використовуються в міських мережах, можна поділити на дві групи за можливістю самовідновлення схеми пристрою після ліквідації наслідків порушення нормального режиму мережі та подачі напруги з боку

джерела живлення. Усі пристрої, що базуються на застосуванні контактних станцій, мають властивість самовідновлення. Використання в автоматичних пристроях вимикачів навантаження типу ВН16 вимагає втручання обслуговуючого персоналу для повернення пристрою АВР у вихідне положення. Зазначимо, що властивість самовідновлення вносить в експлуатацію мережі ряд безсумнівних переваг[4].

З впровадженням пристроїв автоматики значно зростає роль контролю за режимом мережі, оскільки за наявності в мережі таких пристроїв порушення нормального режиму можуть залишитися непоміченими. У зв'язку з цим в автоматизованих мережах застосовуються телемеханічні пристрої для сигналізації про порушення нормального режиму, а також для вимірювання навантаження та напруги різних елементів мережі.

1.5.2 Телемеханіка

Усі споруди міських розподільних мереж не мають постійного обслуговуючого персоналу. Управління режимом роботи мережі здійснюється виїзними черговими бригадами, загальне керівництво якими здійснюється з диспетчерського пункту (ДП).

У неавтоматизованих мережах сигналізація про порушення режиму надходить або з боку ЦП при відключенні живлячих ліній 6 - 10 кВ, або з боку споживача при виникненні порушень його електропостачання.

У повністю автоматизованих мережах останнє джерело інформації відсутнє, оскільки при виникненні пошкодження відбувається не тільки автоматичне відключення пошкодженої ділянки, але й автоматичне відновлення живлення споживачів. Тому при живленні автоматизованих мереж від РП порушення їхнього режиму можуть бути встановлені тільки в процесі огляду мережевих споруд[5].

Між тим, про всі зміни в режимі мережі черговий персонал повинен дізнаватися якомога швидше, щоб своєчасно вжити необхідних заходів до ліквідації виниклої зміни та уникнути накладання пошкоджень у мережі.

В сучасних умовах відповідна інформація про стан мережі може бути отримана за допомогою засобів телемеханіки. У зв'язку з цим, рекомендують в автоматизованих мережах передбачати телемеханічні пристрої для сигналізації про порушення нормального режиму.

Необхідність та обсяг телемеханізації повинні обґрунтовуватися в кожному конкретному випадку та враховувати рівень автоматизації мережі.

У зв'язку з останнім можна відзначити, що доцільність телемеханізації автоматизованих мереж при їх живленні від РП (розподільчого пункту) або ЦП (центрального пункту) без постійного обслуговуючого персоналу є безперечною. Необхідно лише правильно вибрати обсяг телемеханізації, оскільки за допомогою таких пристроїв є можливість здійснювати не тільки сигналізацію про порушення режиму, але й вести контроль за навантаженням окремих елементів мережі, проводити перемикання в мережі. Число операцій, що виконуються засобами телемеханіки, визначається технічними можливостями прийнятої системи пристрою. Обсяг телемеханізації міських мереж повинен прийматися най мінімальним з метою використання найбільш дешевих засобів телемеханіки[6].

Висновок по першому розділу

Міські електричні мережі, ключова складова інфраструктури сучасного міста, характеризуються складною архітектурою, що зумовлена високою щільністю споживання та необхідністю забезпечення надійного та безперебійного електропостачання. Їх структура зазвичай включає підстанції високої та середньої напруги, розподільчі пристрої, кабельні та повітряні лінії, а також кінцеве обладнання споживачів. Специфіка міських умов, як-от обмежений простір та підвищені вимоги до екологічної безпеки, визначає переважне використання кабельних ліній та компактних підстанцій.

Релейний захист, невід'ємна частина міських електричних мереж, виконує функцію автоматичного виявлення та відключення пошкоджених ділянок мережі. Його завдання полягає у мінімізації впливу аварійних

ситуацій на якість електропостачання та запобіганні розвитку катастрофічних наслідків. Особливості релейного захисту в міських умовах полягають у його адаптації до змінної конфігурації мережі, зумовленої постійним зростанням навантаження та переключеннями з метою оптимізації роботи. Використання мікропроцесорних реле, що забезпечують високу точність та швидкодію, дозволяє реалізувати складні алгоритми захисту, враховуючи специфічні характеристики міської електромережі.

Таким чином, ефективне функціонування міських електричних мереж залежить від оптимальної структури та надійності релейного захисту.

Подальший розвиток цих систем передбачає впровадження інтелектуальних технологій, що дозволяють більш ефективно управляти енергетичними потоками, прогнозувати виникнення аварійних ситуацій та оперативно реагувати на них, забезпечуючи високий рівень надійності та якості електропостачання міського населення.

РОЗДІЛ 2

АКТУАЛЬНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТА ЗАСОБІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ МІСЬКИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ.

Створення інтелектуальних систем енергопостачання та впровадження сучасних засобів релейного захисту й автоматизації в міських електромережах є критично важливим для забезпечення їхньої надійності, ефективності та адаптивності до зростаючих потреб споживачів. Розробка таких систем вимагає комплексного підходу, що враховує ряд ключових аспектів.

2.1 Тенденції еволюції та зміни умов роботи електроенергетичної системи України

Електроенергетична система України переживає період глибоких трансформацій, зумовлених як глобальними тенденціями розвитку енергетики, так і специфічними внутрішніми викликами. Еволюція системи характеризується кількома ключовими напрямками.

Насамперед, відбувається поступова декарбонізація енергетичного сектору. Прагнення до зменшення викидів парникових газів стимулює розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема сонячної та вітрової генерації. Це, в свою чергу, вимагає модернізації існуючої інфраструктури для забезпечення стабільної та надійної роботи системи з урахуванням нестабільності ВДЕ.

Другою важливою тенденцією є інтеграція української електроенергетичної системи до європейської мережі ENTSO-E. Цей процес передбачає виконання низки технічних умов, включаючи синхронізацію частоти, забезпечення відповідного рівня надійності та адаптацію нормативної бази. Інтеграція з ENTSO-E відкриває нові можливості для експорту електроенергії та підвищує енергетичну безпеку країни[6].

Зміни умов роботи електроенергетичної системи пов'язані також з військовою агресією росії. Обстріли енергетичної інфраструктури призвели до

значних пошкоджень і дестабілізації системи. Це вимагає швидкої відбудови та відновлення пошкоджених об'єктів, диверсифікації джерел енергії та посилення захисту енергетичної інфраструктури.

Насамкінець, цифровізація та автоматизація стають ключовими факторами підвищення ефективності управління електроенергетичною системою. Впровадження smart grid технологій, автоматизованих систем управління та обліку дозволяє оптимізувати виробництво, передачу та розподіл електроенергії, а також забезпечити більш гнучке реагування на зміни попиту.

Отже, електроенергетична система України перебуває на шляху до інтеграції з європейськими стандартами, переходу до більш екологічно чистих джерел енергії та підвищення стійкості до зовнішніх впливів. Успішна реалізація цих тенденцій вимагає значних інвестицій, впровадження інноваційних технологій та тісної співпраці між усіма учасниками енергетичного ринку[6].

2.2 Необхідність в малих джерелах електроенергії

У сучасному світі, де електрична енергія є критично важливим ресурсом для повсякденного життя, важливість малих джерел електроенергії постійно зростає. Відмінним від централізованих мереж, малі джерела пропонують гнучкість, надійність та екологічну стійкість, які стають вирішальними у певних ситуаціях та для забезпечення сталого розвитку.

Перш за все, малі джерела електроенергії, такі як сонячні панелі, вітрові турбіни або мікро-гідроелектростанції, забезпечують енергетичну незалежність для віддалених районів, де підключення до централізованої мережі є економічно невигідним або фізично неможливим. Це дає можливість покращити якість життя та стимулювати економічний розвиток у цих регіонах.

Крім того, малі джерела енергії відіграють важливу роль у підвищенні стійкості енергетичної системи. Вони можуть функціонувати як резервні системи живлення під час надзвичайних ситуацій, коли централізовані мережі

виходять з ладу. Це критично важливо для забезпечення безперебійного функціонування критичної інфраструктури, такої як лікарні, телекомунікаційні мережі та служби порятунку.

Нарешті, малі джерела енергії, особливо ті, що базуються на відновлюваних джерелах, сприяють зниженню викидів парникових газів та зменшенню залежності від викопного палива. Це важливий крок на шляху до більш екологічно чистої та сталої енергетичної системи.

Таким чином, необхідність у малих джерелах електроенергії є незаперечною. Вони не лише розширюють доступ до енергії, а й підвищують надійність, стійкість та екологічність енергетичної системи, сприяючи стабільному та збалансованому розвитку суспільства. [7].

2.3 Структура майбутніх енергетичних систем генерації

Майбутні енергетичні системи генерації зазнають значних трансформацій, обумовлених глобальними викликами зміни клімату та зростаючим попитом на енергію. Центральним елементом цих систем стане диверсифікація джерел, з акцентом на відновлювальні енергоресурси.

Традиційні викопні палива, хоча й залишаться в енергетичному балансі, поступово втрачатимуть свою домінуючу роль. Їхню нішу займатимуть сонячна, вітрова, гідро- та геотермальна енергія. Розвиток технологій накопичення енергії, таких як акумулятори та системи водневої енергетики, стане ключовим фактором для інтеграції цих непостійних джерел у стабільну енергетичну мережу.

Структура майбутніх енергосистем передбачає децентралізацію виробництва. Локальні енергетичні спільноти, що генерують енергію за допомогою малих сонячних електростанцій або вітрових турбін, інтегровані у велику мережу, забезпечать більшу гнучкість та стійкість системи. Інтелектуальні мережі (Smart Grids), використовуючи сучасні цифрові технології, оптимізуватимуть розподіл енергії та реагуватимуть на потреби в реальному часі[8].

Ядерна енергетика, зокрема новітні реактори малого масштабу (SMR), може відігравати важливу роль як стабільне джерело енергії, особливо в умовах обмеженості простору та ресурсів. Проте, безпека та поводження з відходами залишаються ключовими аспектами для її подальшого розвитку.

Отже, структура майбутніх енергетичних систем генерації базуватиметься на диверсифікації, децентралізації, інтелектуальному управлінні та широкому використанні відновлювальних джерел енергії. Це дозволить забезпечити стале та надійне енергопостачання, одночасно мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. [9].

2.4 Електрична мережа майбутнього

Енергетичні системи майбутнього, відомі як Smart Grid, передбачають радикальну трансформацію традиційних мереж електропостачання. Їхня структура базується на інтеграції цифрових технологій та двостороннього обміну інформацією між постачальниками та споживачами, забезпечуючи ефективніше, надійніше та екологічно чисте виробництво та розподіл енергії.

Основою Smart Grid є децентралізація генерації. Відхід від великих централізованих електростанцій передбачає широке використання розподілених джерел, таких як сонячні панелі, вітрові турбіни та мікро-ТЕЦ, що розташовані безпосередньо у споживачів або поблизу них. Це сприяє зменшенню втрат при передачі електроенергії та підвищує стійкість системи до збоїв.

Інтелектуальні лічильники та сенсорні мережі відіграють ключову роль у моніторингу та управлінні енергетичними потоками. Вони забезпечують збір даних про споживання та виробництво енергії в реальному часі, що дозволяє оптимізувати розподіл навантаження, виявляти та усувати проблеми в мережі, а також реалізовувати гнучкі тарифні плани.

Системи управління енергією (EMS) використовують отримані дані для прийняття оптимальних рішень щодо генерації, зберігання та розподілу

електроенергії. Вони враховують різні фактори, включаючи погодні умови, попит на енергію та вартість різних джерел генерації[8].

Ефективна інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є ключовим аспектом Smart Grid. Для компенсації їхньої нестабільності передбачається використання систем накопичення енергії, таких як акумулятори та гідроакумулюючі електростанції.

Таким чином, структура майбутніх енергетичних систем характеризується децентралізацією генерації, широким застосуванням цифрових технологій та інтелектуальних систем управління, а також активною інтеграцією ВДЕ. Це дозволить створити більш ефективну, надійну та екологічно чисту енергетичну систему, що здатна задовольнити потреби майбутнього.

Суть роботи Smart Grid показана на рисунку 2.



Рисунок 2. Система інтелектуальних мереж Smart Grid

2.5 Автоматичне протиаварійне керування для явлення, запобігання розвитку та ліквідації аварійних режимів ЄЕС.

В ЄЕС України має бути організовано автоматичне протиаварійне керування для виявлення, запобігання розвитку та ліквідації аварійних режимів ЄЕС. Діюча система протиаварійної автоматики являє собою ешелоновану багатоступеневу структуру, що включає: релейний захист; комплекси та пристрої автоматики запобігання порушенню стійкості, включно з централізованою ієрархічною її складовою; пристрої децентралізованої автоматики: обмеження перевантаження обладнання, обмеження підвищення частоти, обмеження підвищення напруги, обмеження зниження частоти та напруги, ліквідації асинхронного режиму[10].

Системи режимної автоматики в ЄЕС України, що включають автоматики регулювання частоти та перетоків активної потужності, автоматики регулювання напруги, автоматики регулювання збудження синхронних машин, системи управління потужністю турбін, пристрої групового регулювання активної та реактивної потужності електричних станцій, забезпечують підтримання параметрів частоти та напруги електричного струму відповідно до вимог НТД та стійку роботу генеруючого обладнання та електроустановок споживачів. Діюча система РЗА в ЄЕС України постійно вдосконалюється за рахунок використання нових більш ефективних алгоритмів та сучасних технічних засобів з урахуванням особливостей розвитку об'єкта управління та вимог до вдосконалення систем автоматичного управління. Великі електростанції та передавальна електрична мережа (супер-підсистема). Система релейного захисту в ЄЕС України достатньо розвинена та ефективна. Серйозні зміни системи РЗ очікуються у зв'язку з широким застосуванням в техніці РЗА інформаційних технологій, що дозволяють реалізувати взаємодоповнюючі процеси розподілу та централізації обчислювальних ресурсів.

Централізації сприяють розвиток апаратних засобів і можливостей мікропроцесорів, збільшення числа взаємозв'язку між функціональними

блоками РЗА, розвиток алгоритмів з «широкою інформаційною базою», зміна вимог до обслуговування та супроводу технічних систем. Перерозподіл функцій між фізичними пристроями відбувається і, як наслідок, розвитку технологій вимірювання (перехід до цифрових перетворювачів на підстанції), інтеграції систем управління та первинного комутаційного обладнання. У програмному забезпеченні вірогідний перехід до коду прикладних функцій, універсального відносно використовуваної платформи (апаратного забезпечення), з можливістю автоматизованого та стандартизованого інжинірингу пристроїв у рамках процесу проектування підстанції. Очікується також поява віртуального розподіленого програмного забезпечення[11].

У довгостроковій перспективі може виникнути необхідність у модернізації принципів побудови та розрахунку уставок системи релейного захисту у зв'язку з масовим використанням пристроїв FACTS, накопичувачів електричної енергії, електропередачі і вставок постійного струму. Така модернізація може бути пов'язана не лише зі змінами в електричній мережі, але й з еволюцією інформаційних технологій, насамперед в частині інтелектуалізації алгоритмів роботи конкретних типів захистів. Важливими факторами модернізації системи релейного захисту РЗА є поширення технології цифрових підстанцій і використання міжнародного стандарту ІЕС 61850.

Діюча ієрархічна система є унікальною за принципами побудови та ефективності роботи і забезпечує високий рівень протидії розвитку важких аварійних ситуацій (ПА). Існуюча система ПА, що має головною метою забезпечення стійкості та живучості окремих ЕЕС та ОЕС в цілому, в частині керуючих впливів зачіпає не лише розглядуваний рівень супер-підсистеми, а й поширює їх певною мірою на рівні міні- та мікро-підсистем – розподільчу електричну мережу і конкретних споживачів. Система ПА вже зараз багато в чому має властивості робастності та адаптивності управління, селективності та оптимальності керуючих впливів.

Необхідність вдосконалення системи ПА у зв'язку з розвитком і ускладненням ОЕС та ЕЕС як об'єктів управління узгоджується з відомим принципом необхідної або достатньої складності, при дотриманні якого складність системи управління повинна відповідати складності керованої системи та процесів, що в ній відбуваються. До доцільності врахування цього постулату час від часу звертаються закордонні фахівці, обговорюючи проблеми протидії розвитку важких системних аварій, в тому числі шляхом реалізації ієрархічної системи ПАУ, що є прийнятою ідеологією ПАУ в ОЕС та ЕЕС України. При цьому принцип необхідної (або достатньої) складності системи ПА забезпечується її розвитком за рахунок модернізації підходів, алгоритмів та апаратних засобів, розширення використання сучасних інформаційно-комунікаційних технологій та методів штучного інтелекту, систем моніторингу перехідних режимів, розширення координації системи ПА та SCADA/EMS, залучення до реалізації керуючих впливів широкого кола пристроїв безперервної дії, насамперед регуляторів пристроїв FACTS та накопичувачів електричної енергії. Інтеграція перелічених принципів і засобів забезпечує наявність властивостей активності та адаптивності електричної мережі в ІЕС ААС та ефективного їх використання при управлінні режимами ЕЕС[12].

Окремий напрямок розвитку системи ПА визначається зміною структури ЄЕС України та появою нової проблеми, пов'язаної із системною нестійкістю за напругою в концентрованих підсистемах, що забезпечують електропостачання мегаполісів. Основна ідея запропонованого підходу для протидії системній лавині напруги полягає у доповненні діючих підсистем оперативного та автоматичного протиаварійного управління новою підсистемою предаварійного управління для раннього попередження небезпечних станів режиму шляхом оцінки прийнятих індексів режимної надійності ЕЕС та візуалізації станів системи з використанням карт Кохонена, а також вироблення ефективних керуючих впливів, що виводять ЕЕС з небезпечного стану та реалізуються мультиагентною підсистемою ПА.

Вже зараз потрібне суттєве коригування принципів реалізації деяких видів ПА, що використовують як керуючі впливи відключення навантаження, у зв'язку зі зростаючими вимогами споживачів до надійності електропостачання. Насамперед це стосується спеціальної автоматики відключення навантаження. Необхідне перенесення керуючих впливів ПА, необхідних для запобігання порушенню стійкості та перевантажень обладнання в передавальній частині ЕЕС, з великих живильних підстанцій на фідери конкретних невідповідальних електроспоживачів на низьких напругах у розподільчій електричній мережі. Тим самим відбувається розширення зазначеного вище охоплення сферою дії ПО не лише супер-підсистеми, а й міні- та мікро-підсистем. Одночасно виникає додаткова проблема запобігання перевантаженням у розподільчій електричній мережі [11].

2.6 Джерела розподіленої генерації

Основні проблеми розвитку систем РЗА у розподільній електричній мережі пов'язані з появою в ній джерел розподіленої генерації та накопичувачів електричної енергії, при масовому використанні яких ці мережі набувають окремих рис системо утворюючих електричних мереж, зберігаючи водночас певну структурну та режимну специфіку, що зумовлює особливості побудови і налаштування майбутніх систем РЗА та в умовах війни (рисунк 3)

На відміну від традиційного підходу з орієнтацією на ступінчасті максимальні струмові захисти як основні, склад захистів для майбутніх розподільних електричних мереж стає порівнянним із набором захистів у передавальних електричних мережах. При цьому вимагатимуть змін і принципи розрахунку уставок пристроїв релейного захисту з метою забезпечення необхідної чутливості та вибіркової цих пристроїв. Аналогічно до прогнозованих змін у передавальній електричній мережі для систем релейного захисту в розподільній мережі слід очікувати у частині апаратних засобів — реалізацію нових можливостей мікропроцесорів, у частині програмних засобів — розвиток віртуального розподіленого програмного

забезпечення та використання об'єктно-орієнтованих мов. Цими положеннями не обмежується потенційний прогрес у розглянутій сфері: певний внесок у модернізацію відповідних принципів, систем і засобів має зробити вплив широкого поширення у розподільній електричній мережі пристроїв FACTS, електронних перетворювачів різного призначення на основі силової електроніки, сучасних багатофункціональних комутаційних апаратів (реклоузерів), нових інформаційно-комунікаційних технологій, методів штучного інтелекту тощо.



Рисунок 3. Значення розподіленої генерації в умовах війни

Масове використання джерел розподіленої генерації в розподільчих електричних мережах майбутніх ЕЕС і виникнення на цьому рівні проблем стійкості потребуватиме перенесення з необхідним коригуванням принципів ПАУ та засобів їх реалізації, які використовуються в супер-підсистемі, в розподільчу електричну мережу. Зазначене коригування знадобиться у зв'язку зі структурною специфікою розподільчої мережі порівняно з транспортною електричною мережею. Як і на рівні супер-підсистеми, в міні-підсистемі

певний внесок у коригування принципів і засобів АВК несе широке застосування нових елементів і технологій, таких як накопичувачі електричної енергії, пристрої FACTS, реклоузери, технології штучного інтелекту та інші. Буде потрібна розробка для цього рівня систем SCADA/DMS при використанні в розподільчих електричних мережах технології WAMS - СМІР з метою ефективного вирішення багатьох задач моніторингу стану обладнання та мережі й управління режимами[12].

Активна розподільча електрична мережа є сучасним концептом, що значно відрізняється від традиційних, пасивних мереж. Її ключова характеристика полягає в інтеграції розподіленої генерації (ДГ), систем накопичення енергії та активного управління напругою та потоками потужності. На відміну від пасивних мереж, де енергія транспортується виключно від централізованих електростанцій до споживачів, активні мережі дозволяють двосторонній потік потужності, тобто ДГ можуть постачати енергію безпосередньо в розподільчу мережу.

Інтеграція ДГ, зокрема відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) таких як сонячні та вітрові електростанції, привносить в мережу мінливість та невизначеність. Тому активне управління є критично важливим для забезпечення стабільності та надійності. Це включає в себе використання сучасних інформаційних та комунікаційних технологій, таких як сенсори, smart meters та алгоритми управління, що дозволяють в реальному часі моніторити стан мережі та оперативно реагувати на зміни.

Ключовими перевагами активної розподільчої мережі є підвищення енергетичної ефективності, зниження викидів вуглецю, покращення надійності електропостачання та забезпечення більшої гнучкості мережі. Реалізація концепції активної мережі вимагає значних інвестицій в інфраструктуру, розробку нових регуляторних рамок та підготовку кваліфікованого персоналу. Однак, потенційні вигоди, зокрема більш стійка та екологічна енергетична система, роблять цей напрямок надзвичайно перспективним.

2.7 Регіональні електричні мережі та малі генеруючі потужності.

В умовах зростаючого попиту на електроенергію та усвідомлення екологічних проблем, локальні електричні мережі (ЛЕМ) та мікро-генерація стають все більш актуальними. ЛЕМ, як децентралізовані системи розподілу електроенергії, здатні підвищити енергетичну незалежність споживачів та забезпечити більш надійне електропостачання. Мікро-генерація, що передбачає виробництво електроенергії безпосередньо у місцях споживання, сприяє зниженню втрат при передачі та розподілі енергії, а також інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Інтеграція ВДЕ, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни, у ЛЕМ дозволяє значно зменшити залежність від традиційних джерел енергії та знизити викиди парникових газів. Однак, впровадження мікро-генерації та ЛЕМ стикається з рядом викликів. До них належать необхідність модернізації існуючої інфраструктури, забезпечення стабільності та надійності мережі при змінній генерації від ВДЕ, а також розробка відповідної нормативно-правової бази[13].

Попри виклики, потенційні переваги ЛЕМ та мікро-генерації, включаючи енергетичну безпеку, економічну ефективність та екологічну стійкість, роблять їх перспективним напрямком розвитку енергетичної системи України. Подальша підтримка досліджень, розробка стимулюючих механізмів та вдосконалення законодавства є ключовими факторами для успішної інтеграції ЛЕМ та мікро-генерації в енергетичний ландшафт країни.

Висновок по другому розділу

Розвиток міської інфраструктури тісно пов'язаний з надійним та ефективним енергопостачанням. Сучасні міські електромережі, з їх зростаючим навантаженням та децентралізацією виробництва енергії, потребують впровадження інтелектуальних систем, що забезпечують оптимальне управління та захист. Тому, актуальність створення

інтелектуальних систем енергопостачання, а також вдосконалення засобів релейного захисту та автоматизації міських електромереж є беззаперечною.

Одним з ключових аспектів є розробка та впровадження Smart Grid технологій, що дозволяють в реальному часі здійснювати моніторинг та аналіз стану електромережі, оптимізувати розподіл енергії та оперативно реагувати на аварійні ситуації. Інтелектуальні системи, інтегровані з сучасними засобами релейного захисту, забезпечують швидке виявлення та локалізацію пошкоджень, мінімізуючи перерви в енергопостачанні.

Важливим напрямком є також інтеграція відновлюваних джерел енергії в міські електромережі. Це вимагає розробки адаптивних систем керування, що враховують нестабільність генерації енергії з альтернативних джерел та забезпечують стабільність мережі.

Автоматизація процесів управління та захисту, включаючи використання інтелектуальних електронних пристроїв та сучасних алгоритмів, дозволяє підвищити надійність та ефективність роботи електромережі. Важливим аспектом є забезпечення кібербезпеки інтелектуальних систем енергопостачання, захист від несанкціонованого доступу та кібератак.

Таким чином, розробка та впровадження інтелектуальних систем енергопостачання, а також вдосконалення засобів релейного захисту та автоматизації міських електромереж є критично важливим для забезпечення стабільного та надійного енергопостачання, оптимізації споживання енергії та підвищення ефективності роботи енергетичної інфраструктури міста.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Щоб аргументувати можливість застосовування вибраних пристроїв релейного захисту в розподільних мережах, слід здійснити аналітичні розрахунки, які включають:

- аналіз нормальних режимів визначеної мережі;
- розрахунок струмів короткого замикання;
- аналіз роботи мережі після аварії.

Для аналізу мережі необхідно визначитись з її параметрами та розрахувати еквівалентну схему заміщення[14].

3.1 Показники системи електропостачання

Характеристики силових трансформаторів та ліній електропередачі показані в таблицях.

Таблиця 1- Характеристики силових трансформаторів

Значення	Силові трансформатори														
Потужність трансформатора, МВ·А	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9	T.10	T.11	T.12	T.13	T.14	T.15
	40000	40000	25000	0.63	0.63	0.63	0.63	0.4	0.4	0.63	0.4	0.25	0.63	0.4	0.25

Таблиця 2 - Характеристики ліній електропередачі

Значення	лінії електропередачі																
Довжина лінії, км	L.1	L.2	L.3	L.4	L.5	L.6	L.7	L.8	L.9	L.10	L.11	L.12	L.13	L.14	L.15	L.16	L.17
	40.	40.	45.	15.	2.14	2.14	3.23	3.23	2.47	2.47	0.87	1.12	1.32	1.23	0.97	2.16	1.52
																	8
																	1.96

3.2. Розрахунки еквівалентної схеми заміщення електромережі.

Потрібно визначити діючі значення струмів короткого замикання у всіх точках (відповідно до схеми), де розташовано захисти, тобто у місцях

контролю струму захистів, як у максимальному, так і у мінімальному режимах роботи електричної системи під час пошкоджень у розрахункових точках.

Розрахунковими точками вважаються шини всіх підстанцій, місця підключення трансформаторів і виводи обмоток 0,4 кВ цих трансформаторів. Розрахунок струмів короткого замикання для шин з номінальною напругою понад 1000 В проводиться у відносних одиницях, а для сторони з напругою нижче 1000 В – в конкретних одиницях. Схему, яка містить трансформаторні зв'язки, замінюють еквівалентною, електрично зв'язаною схемою з параметрами, приведеними до єдиного рівня напруги та однакової базисної потужності. До розрахунку струмів короткого замикання треба скласти еквівалентну схему заміщення і визначити її параметри за визначеними формулами [15].

Значення елементів схеми розраховують за стандартними формулами, що відповідають типу кожного елемента кола. Для цього розрахунку береться базисна потужність $S_б$, яка дорівнює 1000 МВА.

Формула для розрахунку параметрів системи.

$$X_c = \frac{S_б}{S_{кз}}; \quad (1)$$

Для розрахунку параметрів трансформатора Т1 використовується формула:

$$X_{Т1} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H}; \quad (2)$$

Для розрахунку параметрів лінії електропередачі береться формула:

$$X_{Л1} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_б}{U_H^2}; \quad (3)$$

За вище показаним формулам знайдемо параметри схеми заміщення.

Системи:

$$X_c = \frac{1000}{8000} = 0.125 \text{ о. е}$$

Силових трансформаторів:

$$X_{T1} = \frac{20}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 5 \text{ о.е}$$

ЛЕП:

$$X_{Л1} = 0.38 \cdot 640 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1.167 \text{ о.е};$$

Результати розрахунків еквівалентного опору ліній вставимо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Показники еквівалентного опору ліній

	С.	Т.1	Т.2	Т.3	Л.1	Л.2	Л.3	Л.4	Л.5	Л.6	Л.7	Л.8	Л.9	Л.10	Л.11	Л.12	Л.13	Л.14	Л.15	Л.16	Л.17	Л.18
X	0.125	5	5	8	1.167	1.167	1.313	0.438	1.5	1.5	2.259	2.259	1.731	1.731	0.613	0.784	0.952	0.884	0.699	1.553	1.094	1.411

Визначимо еквівалентний опір для всіх точок короткого замкнення згідно рисунку 2.

Отримаємо еквівалентний опір короткого замкнення:

$$X_1 = X_C + X_{Л1} = 0.125 + 1.167 = 1.292 \text{ о.е};$$

Інші результати вставимо в таблицю 4.

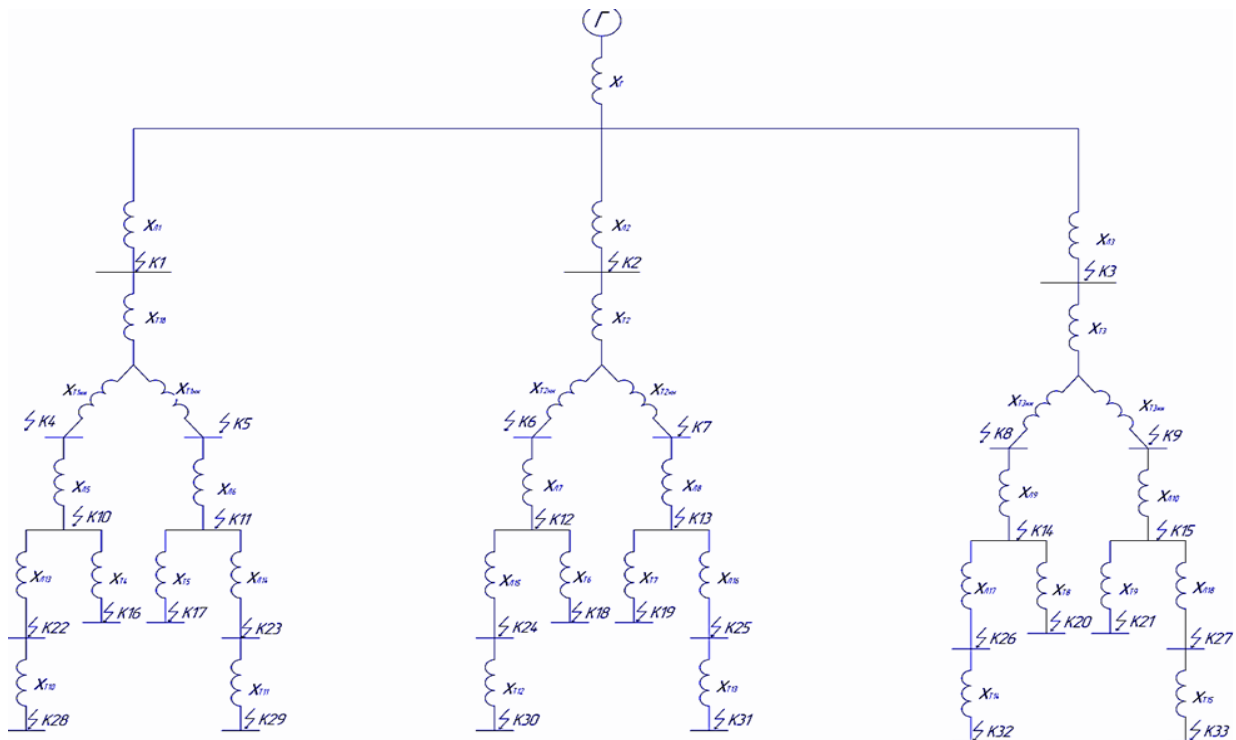


Рисунок 4. – Зображення еквівалентної схеми електричної мережі з позначенням точок короткого замикання.

Таблиця 4 – Результати розрахунків еквівалентного опору

X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	22	23	24	25	26	27
	1.292	1.292	1.438	6.292	6.292	6.292	6.292	9.434	9.434	7.793	7.793	8.551	8.551	11.169	11.169	8.744	8.677	9.251	10.104	12.263	12.580

Точки короткого замикання (КЗ) з номерами 16 по 21 та 28 по 33 розташовані на стороні 0,4 кВ. На цьому етапі розрахунків струмів КЗ проводяться в іменованих одиницях за стандартними формулами. Для силових трансформаторів потрібно знайти повний, активний та реактивний опори.

$$Z_r = \frac{U_{\text{КЗ}}}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{\text{НТ}}}; \quad (4)$$

$$R_r = \frac{P_{\text{КЗ}} \cdot U_6}{S_{\text{НТ}}}; \quad (5)$$

$$Z_r = \sqrt{Z_r^2 + R_r^2}; \quad (6)$$

де U_6 береться для ступеня 0.4 кВ.

Розрахуємо опори трансформаторів 0,4 кВ і занесемо результати до таблиці 5.

№	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Z_T	0.014	0.014	0.014	0.014	0.018	0.018	0.014	0.018	0.029	0.014	0.018	0.029
R_T	0.0076	0.0076	0.0076	0.0076	0.014	0.014	0.0076	0.014	0.024	0.0076	0.014	0.024
X_T	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.016	0.012	0.012	0.016

№	16	17	18	19	20	21	28	29	30	31	32	33
Z	0.027	0.027	0.027	0.027	0.032	0.032	0.027	0.032	0.043	0.027	0.032	0.043
R	0.023	0.023	0.023	0.023	0.029	0.029	0.023	0.029	0.039	0.023	0.029	0.039
X	0.013	0.013	0.013	0.013	0.014	0.014	0.013	0.013	0.018	0.014	0.014	0.019

Висновок по третьому розділу

В результаті розрахунків були визначені параметри еквівалентної схеми заміщення електромережі, що дозволять здійснити подальший аналіз нормальних режимів та режимів короткого замикання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Вході роботи над кваліфікаційною роботою проведено аналіз структури та особливостей будівництва та проектування міських електричних мереж де розглянуто схеми міських мереж, постачальні електромережі, живильні та розподільчі мережі 10 кВ та 0,4 кВ, обладнання релейного захисту та автоматизації, застосовуване в електричних мережах міста.

Актуальні аспекти створення інтелектуальних систем енергопостачання та засобів релейного захисту та автоматизації міських електромереж розглянуто у другому розділі. Основні проведені дослідження:

1. Тенденції розвитку та зміни умов функціонування ЕЕС.
2. Необхідність у малих джерелах електроенергії.
3. Структура майбутніх енергетичних систем генерації.
4. Електрична мережа майбутнього.
5. Автоматичне протиаварійне керування виявлення, запобігання, розвитку та ліквідації аварійних режимів ЕЕС.
6. Джерела розподіленої генерації.
7. Локальні електричні мережі та мікро-генерація.

Визначення еквівалентної схеми заміщення електричної мережі та розрахунок її параметрів дозволять здійснити подальший аналіз нормальних режимів та режимів короткого замикання.

Таким чином, ефективне функціонування міських електричних мереж залежить від оптимальної структури та надійності релейного захисту. Подальший розвиток цих систем передбачає впровадження інтелектуальних технологій, що дозволяють більш ефективно управляти енергопотоками, прогнозувати виникнення аварійних ситуацій та оперативно реагувати на них, забезпечуючи високий рівень надійності та якості електропостачання міського населення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Системи електропостачання міст - Основні засади побудови міської розподільчої мережі. <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/sistemy-elektrosnabzheniya-gorodov/Page-13.html>
2. Загальні відомості про системи електропостачання. https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/451310/mod_resource/content/
3. Федосєєв А. М., Федосєєв М. А. Релейний захист електроенергетичних систем. Енергоатоміздат. 1992. – 528 с.
4. РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b8fca9a1-371c-435a-afe7-9f4291e3cd2c/content>
5. Hasan Can Kılıçkiran, İbrahim Şengör, Hüseyin Akdemir, Bedri Kekezoğlu. Optimal Overcurrent Relay Coordination Using Hybrid Genetic Algorithm and Linear Programming Method // Fourth International Conference on
6. СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ПОТЕНЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ІНТЕГРУВАННЯ ЇЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ https://slsjournal.com.ua/web/uploads/pdf/S&LS_2018_Vol.%201,%20No.%201_121-127.pdf
7. Small Power Producers (SPP) Framework – Policies <https://www.google.com/search>
8. Технології SMART GRID. Нинішній стан та перспективи розвитку релейного захисту і протиаварійної автоматики. Розробки вітчизняних та зарубіжних виробників <https://ntseu.net.ua/%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97-smart-grid>
9. https://soncedim.com.ua/blog/alternativni-dzherela-energiyi?srsId=AfmBOoo49VcjBAJJKRQ7hmDV70u-csFGuoqm2TNhk-vAeI3sikJtSc_z
10. Короткевич, М. А. Основи експлуатації електричних мереж: навч.

посібник. Мн.: 1999. – 267 с. (Вища школа).

11. О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9fe8b977-13b6-4c3a-82bf-dcad5db59a34/content>

12. М.П. Болотний, Р.В. Вожаков, О.Л. Бондаренко НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ПРОТИАВАРІЙНА АВТОМАТИКА І РОЗРАХУНКИ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/27b95ece-ca3c-4416-829f-8ca93588f4dd/content>

13. МЕТОДИ ОРГАНІЗАЦІЇ ГНУЧКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b1a98173-666d-4064-a07c-7cde7cdc6504/content>

14. <https://pekibu.malevaro.cx.ua/articles/ekvivalentuvannja-shemi.html>

15. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ https://se.nmu.org.ua/en/kafedra/vydanya/Mg_031.php