

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент Чепіжний А.В.

ДИПЛОМНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження показників надійності
розподільчих електричних мереж напругою 6(10) – 110 кВ
в умовах Сумської області»

Виконала

_____ (підпис)

Мозгова Т.В.
(прізвище, ініціали)

Група

ЗЕТЕ 2301М

(Науковий) керівник:

_____ (підпис)

Сіренко В.Ф.
(прізвище, ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент _____ Чепіжний А.В.
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 202__ року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мозговій Тетяні Віталіївні

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження показників надійності розподільчих електричних мереж напругою 6(10) – 110 кВ в умовах Сумської області

керівник роботи: Сіренко Віктор Федорович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «10» 10 2024 р. № 3482/ос

2. Термін подання здобувачем закінченої роботи «11» 11 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

1. Теоретична частина

2. Аналітична частина

3. Практична частина

4 Охорона праці

5 Економічне обґрунтування

Висновки та пропозиції

Список використаної літератури

Додатки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point

6. Консультанти розділів роботи:

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата |
|--------|---|--------------|
| | | |
| | | |
| | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК

| № з/п | Назва етапів дипломної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітки |
|-------|--|--------------------------------|----------|
| 1 | Аналіз літературних джерел з обраної тематики | до 15.08.2024 р. | |
| 2 | Складання плану роботи | до 23.08.2024 р. | |
| 3 | Написання вступу | до 26.08.2024 р. | |
| 4 | Підготовка розділу «Розділ 1» | до 28.08.2024 р. | |
| 5 | Підготовка розділу «Розділ 2» | до 16.09.2024 р. | |
| 6 | Підготовка розділу «Розділ 3» | до 14.10.2024 р. | |
| 7 | Підготовка розділу «Розділ 4» та «Розділ 5» | до 21.10.2024 р. | |
| 8 | Написання висновків та пропозицій | до 28.10.2024 р. | |
| 9 | Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету | до 01.11.2024 р. | |
| 10 | Подання роботи на рецензування | до 05.11.2024 р. | |
| 11 | Подання до попереднього захисту | до 12.11.2024 р. | |

Здобувач вищої освіти

(підпис)

(Мозгова Т.В.)
(прізвище, ініціали)

**(Науковий) керівник
дипломної роботи**

(підпис)

(Сіренко В.Ф.)
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Дослідження показників надійності розподільчих електричних мереж напругою 6(10) – 110 кВ в умовах Сумської області: Дипломна робота / Мозгова Тетяна Віталіївна – Суми: СНАУ, 2024 р. – 53 с.

Дипломна робота присвячена аналізу надійності об'єктів електроенергетики, зокрема показників надійності електричних мереж та методичним аспектам їх дослідження.

Об'єкт дослідження – розподільчі електричні мережі напругою 6(10) – 110 кВ.

Мета роботи аналіз ефективності забезпечення надійності розподільчих електричних мереж з подальшим визначенням показників для розробки заходів з підвищення надійності систем електропостачання.

У першому розділі розглянуто основні характеристики надійності, проаналізовано показники надійності електричних мереж та обґрунтовано методи для їх дослідження. Другий розділ містить аналіз кількості та тривалості раптових відключень споживачів, а також надає характеристику об'єкту дослідження. У третьому розділі розглянуто ефективність заходів для підвищення надійності на прикладі фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та «Перелуг», розроблено організаційні, технічні заходи та заходи для підвищення ефективності й безпеки експлуатації. Четвертий розділ присвячений питанням охорони праці, а п'ятий розглядає економічне обґрунтування впроваджених заходів.

Ключові слова: надійність, відмова, тривалість відновлення, навмисні відключення, економічна ефективність.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 6 |
| 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА | 8 |
| 1.1. Ознаки, які характеризують надійність об'єктів енергетики..... | 8 |
| 1.2. Аналіз показників надійності електричних мереж..... | 10 |
| 1.3. Методичні аспекти дослідження надійності..... | 15 |
| 1.4. Висновки до розділу 1..... | 17 |
| 2. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА | 18 |
| 2.1. Коротка характеристика об'єкту дослідження | 18 |
| 2.2. Аналіз кількості раптових відключень споживачів..... | 19 |
| 2.3. Аналіз тривалості раптових відключень споживачів | 20 |
| Ошибка! Закладка не определена. | |
| 2.4. Висновки до розділу 2..... | 21 |
| 3. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА | 22 |
| 3.1. Вибір об'єктів для аналізу ефективності заходів щодо підвищення показників надійності | 22 |
| 3.2. Аналіз показників надійності фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг»..... | 23 |
| 3.3.1. Організаційні заходи | 35 |
| 3.3.2. Технічні заходи..... | 37 |
| 3.3.3. Заходи для підвищення ефективності та безпеки експлуатації | 38 |
| 3.4. Висновки до розділу 3..... | 41 |
| 4. ОХОРОНА ПРАЦІ | 42 |
| 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ | 46 |
| ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ | 49 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 50 |
| ДОДАТКИ | 54 |

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність дослідження надійності розподільчих електричних мереж напругою 6(10) – 110 кВ визначається необхідністю забезпечення стабільного електропостачання в умовах постійного зростання енергетичних потреб населення та промислових підприємств. Сьогодні надійність електропостачання стала ключовим показником ефективності електричних мереж, адже будь-які збої у їхній роботі призводять до фінансових втрат, погіршення якості життя населення, а інколи й до критичних ситуацій у медичних, комунальних та інших важливих сферах.

Сучасні технології та підходи до управління енергетичною інфраструктурою спрямовані на мінімізацію ризиків аварій і переривань електропостачання. Проте в реальних умовах багато мереж продовжують працювати на межі своїх можливостей. Зокрема, в Сумській області, де значний відсоток мереж експлуатується вже тривалий час і часто зазнає впливу складних кліматичних факторів, дослідження надійності таких мереж є надзвичайно важливим. Підвищення надійності розподільчих мереж дозволить запобігти частим аварійним відключенням та скоротити витрати на відновлення систем.

Окремо варто зазначити, що ефективне функціонування мереж напругою 6(10) – 110 кВ прямо впливає на здатність регіону інтегрувати нові виробничі потужності та технологічно розвиватися. Модернізація та підвищення надійності таких мереж сприятиме розширенню енергетичних можливостей області, підтримці інноваційного розвитку економіки, створенню нових робочих місць та поліпшенню інвестиційної привабливості регіону.

Таким чином, дослідження показників надійності розподільчих електричних мереж напругою 6(10) – 110 кВ в умовах Сумської області має важливе значення для забезпечення стабільності енергопостачання, зниження ризиків аварійних ситуацій і підтримки економічного та соціального розвитку регіону.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз ефективності забезпечення надійності розподільних електричних мереж з подальшим визначенням показників для розробки заходів з підвищення надійності систем електропостачання.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- проаналізувати та визначити основні показники надійності систем електропостачання;
- виконати аналіз стану надійності елементів систем електропостачання;
- визначити параметри показників надійності електричної мережі;
- запропонувати заходи щодо підвищення надійності елементів досліджуваної системи електропостачання.

Об'єктом дослідження є розподільчі електричні мережі напругою 6(10) – 110 кВ.

Предметом дослідження є заходи щодо підвищення показників надійності систем електропостачання 6(10) – 110 кВ.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що теоретичні та практичні рекомендації, наведені в випускній кваліфікаційній роботі можуть знайти практичне застосування для підвищення надійності систем електропостачання.

Апробація результатів роботи. Результати роботи висвітлено та обговорено на міжнародній науково-практичній конференції, за результатами роботи якої видано збірник тез доповідей [1].

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Ознаки, які характеризують надійність об'єктів енергетики

Визначення та аналіз ознак, що характеризують надійність об'єктів енергетики, є важливим етапом у створенні ефективних і довговічних інженерних рішень, а також у підвищенні рівня безпеки та економічної ефективності в цій галузі. Тому в першу чергу необхідно розглянути ключові характеристики надійності, що впливають на загальну ефективність енергетичних об'єктів, і описати основні показники, за якими оцінюється їхня надійність у процесі експлуатації.

На рис. 1.1. представлена схема ознак, які характеризують надійність об'єктів енергетики, і ці ознаки розподілені на три основні категорії: властивості, стан і події [2, 3, 4].

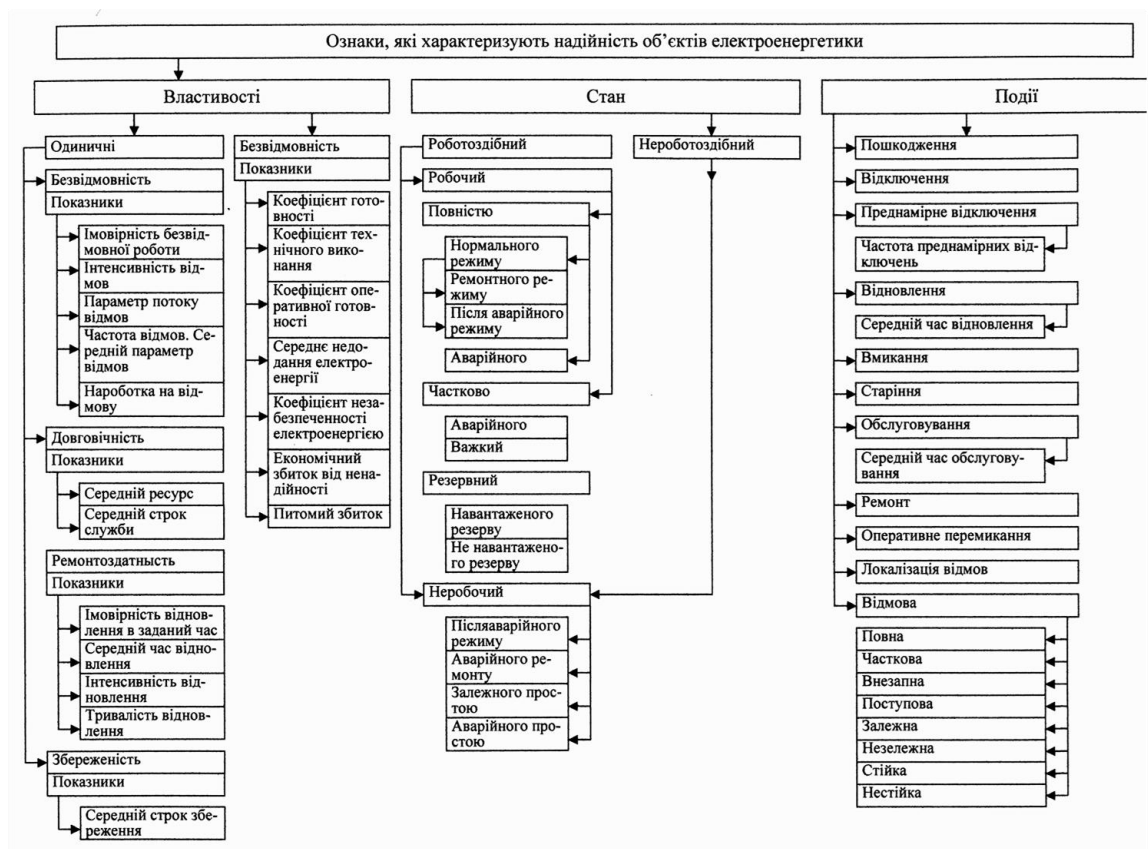


Рис. 1.1. Класифікація ознак, які характеризують надійність об'єктів електроенергетики

Перша категорія, властивості, включає такі параметри, як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність. Безвідмовність відображає ймовірність того, що об'єкт буде працювати без збоїв протягом певного часу, і включає показники ймовірності безвідмовної роботи, інтенсивності відмов, середнього часу безвідмовної роботи, а також інші параметри, що враховують тип навантаження, умови експлуатації та характер зовнішніх впливів. Наприклад, якщо певний об'єкт витримує навантаження без поломок протягом тривалого часу, його рівень безвідмовності можна вважати високим.

Довговічність об'єкта характеризується його середнім ресурсом і середнім строком служби, що показує, як довго обладнання здатне ефективно функціонувати до моменту, коли потрібно провести капітальний ремонт чи заміну. Ремонтпридатність визначає здатність об'єкта до відновлення після відмови або поломки. Вона вимірюється показниками, як-от середній час відновлення, ймовірність успішного відновлення та середня тривалість ремонтних робіт, що дозволяє оцінити, наскільки швидко та ефективно можна повернути обладнання в експлуатаційний стан після відмови.

Збережуваність визначається середнім строком зберігання, тобто терміном, протягом якого об'єкт може зберігати свої експлуатаційні властивості без значного погіршення. Це особливо важливо для об'єктів, які можуть знаходитись у резерві або не використовуватись постійно.

Друга категорія, стан об'єкта, охоплює його роботоздатність та нероботоздатність. Роботоздатність відображає готовність обладнання до виконання своїх функцій у штатному режимі, а також у резервному та аварійному режимах. Наприклад, нормальний стан означає, що об'єкт готовий до негайної експлуатації, резервний стан забезпечує готовність у випадку підвищеного навантаження або виходу з ладу основного обладнання, а аварійний стан свідчить про наявність проблем, які можуть призвести до поломки, але ще не критичні для його функціонування. Нероботоздатний стан може бути викликаний аварією або необхідністю проведення ремонтних робіт.

Аварійний стан означає, що об'єкт вийшов з ладу і потребує негайного втручання, тоді як стан ремонту свідчить про планове чи вимушене технічне обслуговування для відновлення функціонування.

Третя категорія, події, які впливають на надійність, включає різноманітні сценарії, що виникають в процесі експлуатації. Наприклад, події включення й відключення можуть відбуватися з різних причин. Відключення може бути пов'язане з технічними несправностями або зовнішніми чинниками, такими як аварії чи природні катаклізми. Важливо також враховувати показники відмов, які можуть бути повними (коли об'єкт повністю втрачає функціональність) або частковими (коли функціональність лише частково знижується), а також випадковими, залежно від умов експлуатації та впливу зовнішніх факторів. Крім того, експлуатаційні умови, такі як частота використання, сезонні навантаження та режим роботи, також є важливими факторами, що впливають на загальну надійність об'єкта. Ці параметри дозволяють оцінити, як об'єкт витримує регулярну експлуатацію та чи потребує він додаткового обслуговування для забезпечення стабільної роботи.

Таким чином, надійність об'єктів енергетики залежить від багатьох взаємопов'язаних факторів, включаючи їхню конструктивну стійкість, здатність витримувати навантаження, можливість швидкого відновлення після поломок і відповідність до експлуатаційних умов. Кожен із цих аспектів забезпечує цілісне розуміння, наскільки ефективно та безпечно функціонуватиме обладнання протягом усього строку служби.

1.2. Аналіз показників надійності електричних мереж

Надійність електроустановок або систем електропостачання кількісно характеризується показниками, які відображають різні аспекти їхньої надійності, зокрема безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережаність. Залежно від типу обладнання його надійність може визначатися одним або кількома з цих показників [5-8].

Для безвідмовної роботи виділяють такі характеристики: ймовірність безвідмовного функціонування, що виражає ймовірність роботи без відмов протягом певного часу або обсягу роботи; середнє напрацювання до відмови як очікуваний показник напрацювання для невідновлюваних виробів; середнє напрацювання на відмову, яке визначається відношенням загального напрацювання до очікуваної кількості відмов у відновлюваного об'єкта. Ще одним важливим показником є інтенсивність відмов, яка обчислюється для невідновлюваних виробів як відношення середньої кількості відмов за одиницю часу до кількості працездатних об'єктів. Для відновлюваних об'єктів застосовують параметр потоку відмов, що визначає частоту відмов на одиницю напрацювання [9].

До показників довговічності належать ресурс, що характеризує напрацювання до граничного стану, який зазначений у технічній документації; призначений ресурс, що обмежує експлуатацію після досягнення визначеного обсягу напрацювання, незалежно від стану виробу; а також гамма-процентний ресурс, який відображає рівень ресурсу, що в середньому перевищується обумовленим відсотком виробів певного типу. Термін служби визначається як тривалість експлуатації до граничного стану або списання, і включає терміни до різних видів ремонту. Гарантійний термін позначає період, протягом якого виробник гарантує відповідність виробу певним вимогам, за умови дотримання користувачем правил експлуатації, транспортування та зберігання [10, 11].

Показники ремонтпридатності та збережаності визначають здатність обладнання до відновлення та підтримки працездатного стану. Середній час відновлення позначає середню тривалість вимушеного простою, що виникає під час пошуку й усунення несправності. Коефіцієнт готовності відображає ймовірність того, що об'єкт залишатиметься працездатним у будь-який обраний момент між запланованими технічними обслуговуваннями. Ще одним важливим показником є коефіцієнт технічного використання ($K_{ТВ}$), який визначається як відношення напрацювання в годинах за певний період

експлуатації до суми цього напрацювання і загального часу простоїв, зумовлених обслуговуванням і ремонтами за той самий період [11]:

$$K_{ТВ} = \frac{\text{Напрацювання}}{(\text{Напрацювання} + \text{час ремонту})}. \quad (1.1)$$

Для кількісної оцінки надійності ділянок мережі та їхніх компонентів рекомендовано застосовувати декілька ключових показників.

Параметр потоку відмов, позначений як ω , обчислює середню кількість відмов на одиницю часу, зазвичай один рік, з урахуванням одного елемента мережі, а для ліній електропередач може бути виражений відносно 1 км лінії у відмовах на кілометр за рік.

Середній час відновлення або аварійного ремонту, T_v , виражає період, необхідний для відновлення працездатності після кожної відмови. Параметр потоку навмисних або планових відключень, ω_p , вказує на частоту таких відключень за рік. Середня тривалість одного навмисного відключення, T_p , характеризує тривалість кожного планового простою. Коефіцієнт готовності, K_r , показує ймовірність того, що елемент залишатиметься працездатним у проміжках між запланованими ремонтами. Ймовірність вимушеного простою, або K_v , відображає ймовірність непрацездатного стану мережі у ті ж проміжки між запланованими простоями.

Ймовірність безвідмовної роботи, позначена як $P(t)$, визначає ймовірність того, що об'єкт функціонуватиме без відмов протягом певного часу або обсягу роботи. Цей показник використовується переважно для невідновлюваних систем, а в контексті мереж рекомендується розглядати ймовірність безвідмовної роботи до моменту першої відмови, взявши час t , наприклад, рівним одному року.

Наведені показники є технічними характеристиками, які дозволяють оцінювати та порівнювати надійність різних варіантів проєктування мережі, а також перевіряти, чи відповідає рівень надійності обраного варіанта

встановленим вимогам технічного завдання. Далі в таблицях 1.1–1.4 наводяться усереднені значення показників надійності для різних компонентів електричної мережі, таких як лінії електропередачі, трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі тощо.

Таблиця 1.1. Одиничні показники надійності ліній електропередачі [11-15]

| Тип лінії | Номінальна напруга, кВ | Матеріал опор | Число ланцюгів | | Середня частота стійких відмов, 1/100 км·рік | Середній час відновлення, год | Середня частота планових простоїв, 1/рік | Середній час планового простою год |
|---------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|--|-------------------------------|--|------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | | 5 | 6 | 7 | 8 |
| повітряні | до 1 | | | | 25 | 2,0 | 0,17 | 5 |
| | 6 - 10 | | | | 7,6 | 5,0 | 0,17 | 6 |
| | 35 | сталь | однотраншегові | | 0,9 | 9,0 | 2,1 | 16,0 |
| | | | дво - ланцюг. | Відкл.1 коло | 1,1 | 6,0 | 1,0 | 13,0 |
| | | | | Відкл.2 кола | 0,5 | 8,0 | 0,3 | 9,0 |
| | | залізо - бетон | однотраншегові | | 0,7 | 10,0 | 1,2 | 15,0 |
| | | | дво - ланцюг. | Відкл.1 коло | 0,8 | 10,0 | 1,3 | 14,0 |
| | | | | Відкл.2 кола | 0,1 | 12,0 | 0,2 | 13,0 |
| | дерево | однотраншегові | | 1,5 | 13,0 | 2,5 | 16,0 | |
| | 110 | сталь | однотраншегові | | 1,3 | 9,0 | 2,1 | 15,0 |
| | | | дво - ланцюг. | Відкл.1 коло | 1,7 | 7,0 | 3,8 | 15,0 |
| | | | | Відкл.2 кола | 0,2 | 10,0 | 0,4 | 19,0 |
| | | залізо - бетон | однотраншегові | | 0,7 | 11,0 | 1,6 | 16,0 |
| | | | дво - ланцюг. | Відкл.1 коло | 1,0 | 9,0 | 2,4 | 12,0 |
| | | | | Відкл.2 кола | 0,2 | 15,0 | 0,4 | 13,0 |
| | дерево | однотраншегові | | 1,5 | 10,0 | 3,6 | 14,0 | |
| | 220 | сталь | однотраншегові | | 0,5 | 11,0 | 2,8 | 17,0 |
| | | | дво - ланцюг. | Відкл.1 коло | 0,6 | 11,0 | 3,3 | 14,0 |
| | | | | Відкл.2 кола | 0,1 | 15,0 | 0,5 | 24,0 |
| | | залізо - бетон | однотраншегові | | 0,4 | 9,0 | 1,8 | 24,0 |
| дво - ланцюг. | | | Відкл.1 коло | 0,5 | 9,0 | 1,1 | 17,0 | |
| | | | | | | | | |
| повітряні | 220 | залізо - бетон | дво - ланцюг. | Відкл.2 коло | 0,1 | 8,0 | 0,3 | 10,0 |
| | | дерево | однотраншегові | | 0,6 | 11,0 | 5,4 | 18,0 |
| | 330 | сталь | однотраншегові | | 0,6 | 11,0 | 3,0 | 21,0 |
| | | | дво - ланцюг. | Відкл.1 коло | 0,9 | 10,0 | 7,3 | 15,0 |
| | | залізо - бетон | | однотраншегові | Відкл.2 кола | 0,1 | 2,0 | 0,3 |
| | | | | | | | | |
| | 550 | сталь | однотраншегові | | 0,2 | 14,0 | 3,1 | 18,0 |
| | | залізо - бетон | однотраншегові | | 0,2 | 13,0 | 3,5 | 23,0 |
| 750 | сталь | однотраншегові | | 0,2 | 20 | 0,17 | 25,0 | |
| кабельні | до 1 | | | | 10,0 | 2,0 | 1,0 | 2,0 |
| | 6 – 10 | | | | 7,5 | 16,0 | 1,0 | 2,0 |
| | 20 – 35 | | | | 3,2 | 16,0 | 1,0 | 2,0 |

Таблиця 1.2. Одиничні показники надійності трансформаторів

| Номинальна мощность, МВА | Номинальна напряга, кВ | Середня частота відмов 1/рік | Середній час відновлення, год | Середня частота поточних ремонтів, 1/рік | Середня тривалість поточного ремонту год | Середня частота капітальних ремонтів, 1/рік | Середня тривалість кап. ремонтів, год |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|---|--|---|
| до 2,5 | 6 - 20 | 0,016 | 50 | 0,25 | 6 | 0,166 | 150 |
| | 35 | 0,010 | 40 | 0,25 | 6 | 0,166 | 200 |
| 2,5 – 7,5 | 6 - 20 | 0,008 | 120 | 0,25 | 8 | 0,166 | 150 |
| | 35 | 0,007 | 65 | 0,25 | 26 | 0,166 | 200 |
| | 110 | 0,018 | 40 | 0,25 | 28 | 0,166 | 250 |
| 10 – 80 | 35 та нижче | 0,012 | 70 | 0,75 | 26 | 0,166 | 200 |
| | 110 | 0,014 | 70 | 0,75 | 28 | 0,166 | 280 |
| | 220 | 0,035 | 60 | 0,75 | 28 | 0,166 | 300 |
| більше 80 | 110 | 0,075 | 95 | 1,0 | 30 | 0,166 | 300 |
| | 220 | 0,025 | 60 | 1,0 | 30 | 0,166 | 330 |
| | 330 | 0,053 | 45 | 1,0 | 30 | 0,166 | 380 |
| | 500 - 750 | 0,024 | 220 | 1,0 | 50 | 0,166 | 400 |

Таблиця 1.3. Одиничні показники надійності вимикачів

| Вид вимикачів | Номинальна напряга кВ | Середня частота відмов, КЗ / обрив кола | Середній час відновлення, год | Імовірність відмов на відмов на комутаційну операцію | Імовірність відмови при відключенні КЗ | Середня частота капітальних ремонтів, 1/рік | Середня тривалість кап. ремонтів, год | Середня частота поточних ремонтів, 1/рік | Середня тривалість поточного ремонтів, год |
|-----------------|--------------------------|---|----------------------------------|--|---|---|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| автоматичні | до 1 | 0,02 /0,03 | 4 | | | 0,33 | 10 | 0,67 | 8 |
| електромагнітні | 6 – 10 | 0,01 /0,01 | 11 | 0,002 | 0,027 | 0,2 | 24 | 0,8 | 16 |
| маломасляні | 10 | 0,003 /0,007 | 20 | 0,003 | 0,005 | 0,14 | 8 | 0,86 | 8 |
| | 20 | 0,002 /0,008 | 26 | 0,003 | 0,005 | 0,14 | 10 | 0,86 | 8 |
| маломасляні | 35 | 0,014 /0,016 | 25 | 0,005 | 0,005 | 0,14 | 9 | 0,86 | 8 |
| | 110 - 150 | 0,02 /0,04 | 20 | 0,006 | 0,013 | 0,14 | 30 | 0,86 | 8 |
| масляні бакові | 35 | 0,002 /0,007 | 30 | 0,006 | 0,006 | 0,14 | 12 | 0,86 | 8 |
| | 110 | 0,005 /0,011 | 40 | 0,004 | 0,006 | 0,14 | 23 | 0,86 | 8 |
| | 220 | 0,015 /0,040 | 50 | 0,011 | 0,009 | 0,14 | 43 | 0,86 | 8 |
| повітряні | 35 | 0,004 /0,016 | 40 | 0,013 | 0,012 | 0,2 | 29 | 0,8 | 8 |
| | 110 | 0,003 /0,017 | 20 | 0,004 | 0,004 | 0,2 | 45 | 0,8 | 12 |
| | 220 | 0,004 /0,016 | 55 | 0,004 | 0,006 | 0,2 | 122 | 0,8 | 15 |
| | 330 | 0,005 /0,026 | 48 | 0,002 | 0,006 | 0,2 | 160 | 0,8 | 16 |
| | 500 | 0,025 /0,125 | 60 | 0,007 | 0,003 | 0,2 | 130 | 0,8 | 20 |
| | 750 | 0,050 /0,200 | 75 | 0,009 | 0,003 | 0,2 | 270 | 0,8 | 30 |
| | 1150 | 0,060 /0,240 | 90 | 0,010 | 0,004 | 0,2 | 350 | 0,8 | 40 |

Таблиця 1.4. Одиничні показники надійності комутаційних апаратів

| Вид апарату | Номинальна напруга, кВ | Середня частота відмов /рік | Середній час відновлення, год | Середня частота кап. ремонтів, /рік | Середня тривалість кап. ремонту, год | Середня частота поточних ремонтів, /рік | Середня тривалість поточного ремонту, год |
|-----------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Роз'єднувачі | 6 – 10 | 0,01 | 7 | 0,166 | 4 | 0,834 | 3 |
| | 35 | 0,01 | 6 | 0,166 | 6 | 0,834 | 4 |
| | 110 | 0,01 | 11 | 0,166 | 8 | 0,834 | 5 |
| | 220 | 0,01 | 7 | 0,166 | 13 | 0,834 | 6 |
| | 330 | 0,01 | 10 | 0,166 | 18 | 0,834 | 7 |
| | 500 | 0,01 | 14 | 0,166 | 31 | 0,834 | 8 |
| | 750 | 0,01 | 14 | 0,166 | 81 | 0,834 | 16 |
| Віддільники | 1150 | 0,01 | 20 | 0,166 | 100 | 0,834 | 16 |
| | 35 | 0,015 | 3 | 0,33 | 7 | 0,667 | 4 |
| | 110 | 0,01 | 3,5 | 0,33 | 10 | 0,667 | 5 |
| Короткозамикачі | 220 | 0,01 | 3,5 | 0,33 | 16 | 0,667 | 6 |
| | 35 | 0,01 | 4 | 0,33 | 8 | 0,667 | 4 |
| | 110 | 0,01 | 6 | 0,33 | 6 | 0,667 | 5 |
| | 220 | 0,01 | 6 | 0,33 | 8 | 0,667 | 6 |

1.3. Методичні аспекти дослідження надійності

При аналізі надійності функціонування електричної мережі важливо розглядати її ієрархічні рівні, які включають нижній, середній і вищий рівні. Нижній рівень охоплює обладнання та апаратуру, такі як силове електромережне обладнання, комутаційні пристрої, елементи ліній електропередач (ЛЕП) і підстанцій (ПС), а також системи автоматики, релейного захисту та управління. Зазвичай ці компоненти є серійними виробами, виготовленими на заводах [16, 17].

Середній рівень представлений електромережними об'єктами, фрагментами та вузлами, що містять типові технічні рішення, які можуть повторюватися під час проектування, такі як вузли ПС (збірні шини, системи власних потреб, трансформаторні блоки) та комплекси релейного захисту і автоматики.

Вищий рівень стосується електричної мережі в цілому, яка розглядається як унікальний об'єкт. Кожен із цих рівнів має свої специфічні особливості, критерії та показники, що характеризують поведінку системи. Важливо

зазначити, що критерії та показники, що використовуються для оцінки надійності на одному рівні, можуть не бути застосованими на інших. Таким чином, підходи до оцінювання надійного функціонування електричної мережі можуть варіюватися залежно від ієрархічного рівня.

Крім того, важливим аспектом при дослідженні надійності електричної мережі є поняття відмови. Відмови в електричній мережі часто виникають через пошкодження обладнання, апаратури або конструкцій, а також через появу неприпустимих режимних параметрів у мережевих елементах. Це вимагає термінового втручання для усунення проблем. Усі випадки технологічних порушень підлягають розслідуванню та реєстрації, що дозволяє створити базу даних аварійності електричних мереж протягом тривалого часу експлуатації.

На основі вищесказаного можна зробити висновок, що для адекватної оцінки надійності електричної мережі необхідно встановити критерії, які дозволяють класифікувати мережу в стані відмови на відповідному ієрархічному рівні. Ці критерії визначають допустимі межі для показників, які характеризують виконання функцій об'єкта в потрібному обсязі. Якщо ці межі перевищуються, то об'єкт переходить у стан відмови на неприйнятний для експлуатації період.

Аналіз досвіду вітчизняних і закордонних дослідників у вирішенні задач оцінки надійності електроенергетичних систем свідчить, що показники надійності в загальному випадку поділяються на три основні категорії: ймовірність виникнення певних подій та середня тривалість цих подій, що визначається як математичне сподівання.

Ще одним ключовим аспектом, який впливає на підхід до оцінювання надійності електричної мережі, є те, що всі технологічні порушення та відповідні відмови утворюють часовий потік подій. Під потоком подій розуміється послідовність однорідних подій, які виникають одна за одною у випадкові моменти часу. Для аналізу цього потоку важливим є поняття

інтенсивності потоку, $\lambda(t)$, яке визначає середню кількість подій, що відбуваються за одиницю часу [18-21].

1.4. Висновки до розділу 1

У розділі проаналізовано основні аспекти, що характеризують надійність об'єктів енергетики, зокрема електричних мереж. Розглянуто ознаки, які відображають надійність енергетичних об'єктів, включаючи технічні, експлуатаційні та економічні параметри, які впливають на безперебійне постачання електроенергії.

Аналіз показників надійності електричних мереж дав змогу виокремити ключові критерії оцінки, такі як частота та тривалість відмов, середній час відновлення, а також коефіцієнти готовності та використання. Порівняння цих показників дає змогу не лише оцінити поточний стан мереж, але й визначити слабкі місця, які потребують покращення.

Проведений аналіз сприяє розумінню основних підходів до забезпечення надійності об'єктів електроенергетики та формуванню стратегій покращення їхніх показників. Це стане важливим етапом для подальших досліджень та розробки заходів, спрямованих на підвищення стабільності та безперебійності роботи електричних мереж.

2. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Коротка характеристика об'єкту дослідження

Дослідження надійності проводили для електричних мереж філії «Охтирський район електричних мереж (РЕМ)» АТ «Сумиобленерго».

Основна діяльність філії «Охтирський РЕМ» АТ «Сумиобленерго» полягає в забезпеченні електроенергією за регульованим тарифом. Крім того, компанія надає широкий спектр додаткових послуг як для населення, так і для юридичних осіб, серед яких:

- проведення перевірки, встановлення, ремонту та заміни електролічильників;
- підключення об'єктів до електричних мереж;
- виконання будівельно-монтажних і електромонтажних робіт, таких як: будівництво та реконструкція електричних установок, облаштування введів у житлові будинки, встановлення шаф обліку електроенергії, ремонт кабельних і повітряних ліній;
- надання технічних умов для приєднання електроустановок;
- проведення проектно-вишукувальних робіт і погодження проектною документації;
- допуск електроустановок до експлуатації;
- контроль і оформлення дозволів для робіт в охоронних зонах електромереж;
- технічне обслуговування електроустановок абонентів;
- проведення лабораторних робіт, включно з пошуком та визначенням місця пошкоджень кабельних ліній, вимірюванням опору контуру заземлення, перевіркою опору ізоляції, випробуванням обладнання підвищеною напругою та інші спеціалізовані вимірювання.

Це дозволяє філії «Охтирський РЕМ» АТ «Сумиобленерго» забезпечувати якісне обслуговування і надійну роботу електричних мереж для своїх клієнтів.

Схема виробничої структури підприємства філії «Охтирський РЕМ» показано на рис. 2.1.

Рис. 2.1. Схема виробничої структури підприємства філії «Охтирський РЕМ» АТ «Сумиобленерго»

Метою діяльності Охтирського РЕМ є здійснення технічного та оперативного обслуговування повітряних і кабельних ліній (ВЛ і КЛ) напругою 0,4–110 (220) кВ, трансформаторних підстанцій 6–10/0,4 кВ, розподільчих пунктів і підстанцій 35–110 (220) кВ, а також їх ремонт. Крім того, Охтирський РЕМ виконує технічне та оперативне обслуговування підстанцій напругою 35–110 (220) кВ з метою підтримання обладнання, будівель і споруд у стані, що відповідає вимогам експлуатаційної готовності згідно з нормативно-технічною документацією. Завдання також включають підтримання необхідного режиму роботи мереж, які забезпечують транспортування та розподіл електроенергії в межах зони обслуговування РЕМ за оптимальних трудових та матеріальних витрат.

2.2. Аналіз кількості раптових відключень споживачів

Для проведення аналізу використовуються дані про кількість аварійних відключень у період з 2021 по 2023 роки для таких видів обладнання:

- ПЛ-110 кВ, ПЛ-35 кВ, ПЛ(ПЛІ)-10 кВ, КЛ-10 кВ;
- силові трансформатори 110/35/10 кВ та 35/10 кВ;
- трансформатори власних потреб 10/0,4 кВ;
- трансформаторні підстанції (ТП) 10/0,4 кВ та 6/0,4 кВ;

- роз'єднувачі напругою 110 кВ, 35 кВ, 10 кВ;
- віддільники 35 кВ;
- вимикачі 110 кВ, 35 кВ, 10 кВ.

Дані для аналізу були отримані з оперативного журналу та журналу обліку раптових аварійних відключень. При реєстрації аварійних відключень зазначаються тип обладнання, дата та час початку несправності, причина аварії, пошкоджені компоненти, тривалість простою, дата і час завершення ремонту, відновлення роботи обладнання, а також інформація про відключених споживачів. Аналіз проводили без врахування відключень, спричинених воєнним станом у країні.

Таблиця 2.1. Загальна кількість аварійних відключень за типами обладнання

| Найменування обладнання | 2021 рік | 2022 рік | 2023 рік |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| ПЛ 110 кВ | | | |
| ПЛ 35 кВ | | | |
| ПЛ 10 кВ | | | |
| Трансформатори 110/35/10 кВ | | | |
| Трансформатори власних потреб 10 кВ | | | |
| Трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ | | | |
| Вимикачі 110, 35, 10 кВ | | | |
| Роз'єднувачі 110, 35 кВ | | | |
| Роз'єднувачі 10 кВ | | | |

На основі даних про кількість раптових відключень (табл. 2.1.) для наочності побудуємо діаграми розподілу кількості відключень однотипного обладнання по кожному року. Ці діаграми будуть представлені на рисунках 2.2–2.4.

Рис. 2.1. Розподіл раптових (аварійних) відключень за 2021 рік

Рис. 2.2. Розподіл раптових (аварійних) відключень за 2022 рік

Рис. 2.3. Розподіл раптових (аварійних) відключень за 2023 рік

2.4. Висновки до розділу 2

Проведений аналіз показує, що основними джерелами аварійних відключень за 2021-2023 роки залишаються ПЛ 10 кВ і трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ.

3. ПРАКТИЧНА ЧАТСИНА

3.1. Вибір об'єктів для аналізу ефективності заходів щодо підвищення показників надійності

Щоб оцінити рівень надійності в розподільчих електромережах Охтирського РЕМ, на основі аналізу частоти та тривалості раптових відключень споживачів у період з 2021 по 2023 роки, необхідно визначити елементи СЕП, де спостерігалася максимальна кількість відмов та найдовший час на відновлення серед обладнання аналогічного типу.

До таких елементів належить ВЛ–10 кВ. Вибір цього обладнання обумовлений його відповідністю умовам подальшого аналізу. При виборі було враховано вплив раптових відмов обладнання на:

- недопоставку електроенергії;
- кількість відключених споживачів;
- кількість відключених соціально важливих об'єктів (СЗО);
- вартість матеріалів та запчастин, використаних для відновлення працездатності;
- фінансові витрати на роботу персоналу (чисельність працівників, фактичний робочий час) та витрати на техніку (кількість одиниць техніки, амортизація, вартість палива і матеріалів).

На основі аналізу виконаних ремонтних робіт на ВЛ–10 кВ і дослідження частоти та тривалості раптових відключень на цьому обладнанні за період з 2021 по 2023 роки було обрано два фідери з найбільшою кількістю та тривалістю відключень у 2021 році, які показали значне зменшення цих показників у 2023 році. Вибір фідерів базувався на наявності проведених робіт із реконструкції та заміни обладнання протягом 2021–2023 років. Такий аналіз дозволить визначити ефективність та доцільність проведених заходів щодо підвищення надійності СЕП.

Аналіз даних щодо частоти та тривалості раптових відключень на ПЛ-10 кВ, а також виконаних ремонтних робіт за період з 2021 по 2023 роки свідчить про те, що фідери ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг» від РТП 35/10 кВ «Комиші» мали одні з найвищих показників аварійних відключень. Однак до 2023 року кількість раптових відключень на цих фідерах значно зменшилася. Суттєве зниження частоти відключень на фідерах ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг» стало можливим завдяки реконструкції та заміні обладнання, які були проведені в період з 2021 по 2023 роки.

Схема первинних кіл комутації РТП 35/10 кВ «Комиші», а також поопорні схеми фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг» показані на рис. 3.1-3.3 відповідно.

3.2. Аналіз показників надійності фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг»

Відомості про кількість та тривалість раптових відключень фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг» за 2021-2023 роки наведені в таблиці 3.1 та 3.2 відповідно.

Таблиця 3.1. Кількість та тривалість відключень фідера ПЛ-10 кВ «Карпилівка»

| Параметр | 2021 рік | 2022 рік | 2023 рік |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| К-ть раптових відключень, шт | | | |
| Тривалість відключень, хв | | | |

Таблиця 3.2. Кількість та тривалість відключень фідера ПЛ-10 кВ «Перелуг»

| Параметр | 2021 рік | 2022 рік | 2023 рік |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| К-ть раптових відключень, шт | | | |
| Тривалість відключень, хв | | | |

Рис. 3.1. Схема кіл первинної комутації РТП 35/10 кВ «Комиші»

Рис. 3.2. Попорна схема фідера ПЛ-10 кВ «Перелуг» від РТП 35/10 кВ «Комиші»

Рис. 3.3. Попорна схема фідера ПЛ-10 кВ «Карпилівка» від РТП 35/10 кВ «Комиші»

Аналіз даних таблиць 3.1 та 3.2 показує, що щорічне зниження кількості та тривалості відключень фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг» відображає зростання надійності повітряних ліній. За інформацією з оперативного та аварійного журналів, можна визначити основні причини несподіваних відключень досліджуваних фідерів.

Основними причинами аварійних відключень є:

- сильні вітрові навантаження;
- механічні пошкодження проводу (зокрема, розриви);
- невідновлені причини, що супроводжувалися автоматичним повторним включенням (АПВ) без виявлених пошкоджень при огляді;
- знос або пошкодження ізоляції;
- атмосферні перенапруги (грози);
- взаємодія з тваринами та птахами.

За досліджуваний період не було зафіксовано відключень через недостатність обслуговування, пошкодження на електроустановках споживачів, людський фактор або дорожньо-транспортні пригоди. Проведемо розрахунок частки кожної причини у відсотках, а результати подамо на діаграмі, яка буде зображена на рисунку 3.4.

Рис. 3.4. Основні причини відключень фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг» (у відсотках)

Пошкодження, такі як знос в'язки проводу, пошкодження самого проводу та ізоляції, відбуваються через фізичне старіння внаслідок тривалої експлуатації обладнання. Основну частину ПЛ-10 кВ було побудовано ще в 1980-х роках, а нормативний термін служби ключових елементів ПЛ становить:

- для проводів, грозозахисних тросів, відтяжок опор, лінійної арматури, ізоляторів, системи плавлення ожеледі – 25 років;
- для обмежувачів перенапруги (ОПН) – 25 або 30 років;

- для дерев'яних опор – 30 років;
- для фундаментів і залізобетонних опор – 35 років;
- для сталевих опор – 50 років [19].

Крім того, наявність застарілих захисних пристроїв від перенапруг не завжди забезпечує повний захист ліній електропередачі, а іноді вони взагалі не спрацьовують.

Аналіз надійності електричних мереж підприємства, зокрема ВЛ–10 кВ фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг», вказує на те, що основною причиною зниженого рівня надійності є фізично і морально застарілі розподільчі мережі.

3.3. Обґрунтування заходів щодо підвищення надійності систем електропостачання

Електричні мережі напругою 6–10 кВ відрізняються нижчою надійністю порівняно з мережами іншого призначення та напруги. В цих умовах актуальним є підвищення надійності з мінімальними витратами під час розвитку, реконструкції та технічного переоснащення електричних мереж [5–7].

Електричні мережі напругою 6–10 кВ являють собою складні розгалужені, здебільшого повітряні лінії, до яких на глухих відгалуженнях підключені ТП 10/0,4 кВ. Лінії 6–10 кВ секціонують та резервують за допомогою лінійних роз'єднувачів, а також автоматичних секційних апаратів (вимикачів) і пунктів автоматичного резервування (вимикачів з АВР).

Електричні мережі забезпечують електропостачання великої кількості різних споживачів (за потужністю, вимогами до безперебійності електропостачання, графіками зміни споживаної потужності в часі тощо), підключених у різних точках. Відмова в електропостачанні хоча б одного споживача, підключеного до системи електропостачання, призводить до невиконання системного завдання щодо забезпечення споживачів

електроенергією у потрібному обсязі, тобто до недопостачання електроенергії [10, 11].

Для підвищення надійності електропостачання споживачів Охтирського РЕМ, зокрема фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг», можна застосувати організаційні та технічні заходи, спрямовані на зменшення раптових відключень і тривалості відключень споживачів.

3.3.1. Організаційні заходи

Організаційні заходи щодо підвищення надійності систем електропостачання є комплексом стратегій та рішень, які сприяють зменшенню ризику аварій та забезпеченню безперервності електропостачання. Вони охоплюють різні аспекти, що стосуються технічного обслуговування, діагностики, запасів та ліквідації пошкоджень [11].

По-перше, раціональна організація технічного обслуговування та ремонту обладнання є основою для підтримки його справності. Це включає розробку графіків планового обслуговування, які базуються на рекомендаціях виробників і аналізі історії роботи обладнання. Регулярні перевірки і обслуговування дозволяють виявляти зношені деталі та можливі несправності до того, як вони призведуть до серйозних проблем. Важливо також впроваджувати системи моніторингу, які дозволяють в реальному часі відстежувати стан обладнання та своєчасно реагувати на відхилення від нормальних параметрів.

Діагностика стану обладнання є невід'ємною складовою цих заходів. Використання сучасних діагностичних методів, таких як термографія, ультразвукова діагностика та аналіз вібрацій, дозволяє виявити потенційні проблеми, які не завжди помітні при візуальному огляді. Ці технології допомагають оперативно оцінювати стан обладнання, визначати причини його несправностей та планувати необхідні ремонтні роботи.

Забезпечення аварійними запасами має величезне значення для підвищення надійності системи електропостачання. Наявність критично важливих запасних частин і матеріалів на складах дозволяє зменшити час простою в разі аварійних ситуацій. Організації повинні вести облік та аналізувати витрати запасів, а також прогнозувати потреби у запасах на основі даних про експлуатацію обладнання, що дозволяє підтримувати оптимальний рівень запасів і уникати дефіциту.

Раціональна організація пошуку та ліквідації пошкоджень є критично важливою складовою стратегії підвищення надійності. Це включає впровадження новітніх технологій, які допомагають у швидкому виявленні місць пошкоджень. Використання спеціалізованих апаратів для виявлення несправностей, таких як переносні детектори та системи геолокації, дозволяє зменшити час на пошук проблемних ділянок. Такі технології забезпечують точність та ефективність у виявленні дефектів, що сприяє швидшій ліквідації аварій.

Крім того, забезпечення засобами механізації робіт з технічного обслуговування та ремонту є важливим елементом раціональної організації пошуку та ліквідації пошкоджень. Сучасні механізми та обладнання, такі як автопідйомники, спеціалізовані вантажівки та інші механізми, сприяють підвищенню ефективності виконання робіт та забезпечують безпеку працівників під час виконання ремонтних робіт.

Також важливим аспектом є застосування організаційних заходів для ліквідації відмов. Це включає створення чітких процедур реагування на аварії, навчання персоналу для дій у критичних ситуаціях, а також розвиток системи зв'язку між усіма учасниками процесу. Чітке розуміння дій, які потрібно виконати у разі аварії, а також забезпечення належної комунікації між різними підрозділами, дозволяє значно зменшити час реагування та підвищити ефективність ліквідації наслідків.

Таким чином, організаційні заходи, спрямовані на підвищення надійності систем електропостачання, формують комплексний підхід, що

охоплює всі етапи – від технічного обслуговування та діагностики до ліквідації пошкоджень. Завдяки цьому вдається не лише забезпечити безперервність електропостачання, але й підвищити загальний рівень безпеки та ефективності роботи системи.

3.3.2. Технічні заходи

Технічні заходи щодо підвищення надійності систем електропостачання є багатограними і охоплюють різні аспекти функціонування електричних мереж. Основним завданням таких заходів є забезпечення стабільності, безпеки та ефективності електропостачання, що вимагає інтеграції новітніх технологій, удосконалення існуючих систем і постійного моніторингу [11, 19].

Автоматизація електричних мереж є ключовим напрямком, що дозволяє реалізувати концепцію "розумних мереж" (Smart Grid). Впровадження автоматизованих систем управління на базі технологій SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) надає можливість здійснювати моніторинг параметрів роботи мереж у реальному часі, аналізувати дані та прогнозувати можливі відмови. Завдяки цьому оператори можуть оперативно реагувати на зміни в стані мережі, що знижує ризик виникнення аварійних ситуацій. Автоматизація також дозволяє інтегрувати відновлювальні джерела енергії, що є важливим кроком у напрямку енергетичної незалежності та сталого розвитку.

Удосконалення пристроїв релейного захисту є ще одним важливим аспектом підвищення надійності електричних мереж. Сучасні цифрові реле забезпечують швидке та точне спрацьовування при виникненні коротких замикань або перевантажень, що дозволяє швидко відключати несправні ділянки мережі і запобігати їх пошкодженню. Цифрові реле можуть бути інтегровані в системи автоматизації, що дозволяє здійснювати дистанційне управління і моніторинг їх стану. Регулярна перевірка та оновлення

програмного забезпечення релейних пристроїв є критично важливими для забезпечення їх ефективності.

Підвищення надійності основного обладнання мереж є ще одним невід'ємним компонентом. Модернізація трансформаторів, вимикачів, кабельних ліній і іншого обладнання, з використанням новітніх матеріалів та технологій, забезпечує їх стійкість до зовнішніх факторів, таких як механічні навантаження, корозія і температурні коливання. Впровадження регулярного технічного обслуговування і діагностики обладнання дозволяє своєчасно виявляти потенційні проблеми і проводити їх усунення до виникнення серйозних аварій.

Створення структур із найбільшою надійністю в електричних мережах включає реалізацію концепції розподілених систем електропостачання. Це може передбачати формування мережі з резервними джерелами живлення, такими як сонячні батареї або вітрові електростанції, що дозволяє забезпечити високу ступінь автономності системи. Інтеграція відновлювальних джерел енергії не лише знижує навантаження на основну мережу, але й підвищує її стійкість до зовнішніх впливів, таких як стихійні лиха.

Важливою частиною заходів є також навчання та підготовка персоналу, який працює з новими технологіями. Регулярні тренінги і семінари для технічного персоналу забезпечують високий рівень кваліфікації, що є запорукою ефективного управління електричними мережами.

У підсумку, реалізація цих технічних заходів не тільки забезпечує підвищення надійності систем електропостачання, але й сприяє поліпшенню якості електричної енергії, що має безпосередній вплив на економіку, безпеку споживачів і якість життя населення. Сталі системи електропостачання створюють основу для розвитку нових технологій, енергозбереження та підвищення енергоефективності, що є ключовими аспектами у сучасному світі.

3.3.3. Заходи для підвищення ефективності та безпеки експлуатації

Планування технічного обслуговування та проведення робіт має базуватися на принципах, які враховують технічний стан обладнання та мінімізацію часу відключення споживачів. Це передбачає [11, 13, 14]:

- наявність достатньої кількості обладнання та матеріалів для організації оперативного ремонту та швидкого виконання аварійно-відновлювальних робіт;

- регулярні перевірки технічного стану повітряних ліній електропередачі (ЛЕП);

- активне використання авторизованого ремонтного та випробувального обладнання;

- підвищення кваліфікації персоналу та регулярні тренінги, включаючи симуляцію аварійних ситуацій;

- гнучкість у зміні схеми електропостачання.

Ефективність експлуатації досягається за рахунок:

- впровадження надійних діагностичних методів для оцінки технічного стану ліній без їх зупинки;

- механізації робіт на повітряних лініях та ремонту під напругою;

- оптимізації аварійного запасу обладнання, конструкцій і матеріалів для забезпечення підготовки та ремонту електропередач;

- ефективної організації ліквідації аварійних ситуацій.

Обсяг технічного обслуговування та планового ремонту має визначатися необхідністю підтримки обладнання у справному стані, з урахуванням їх фактичного технічного стану.

Періодичність і тривалість усіх видів ремонту регламентуються відповідними нормативними документами.

Організації, що займаються експлуатацією електричних мереж, а також ремонтні підприємства повинні систематично вести облік техніко-економічних показників ремонту та обслуговування обладнання.

Для якісного та своєчасного проведення ремонту, організації, що експлуатують електричні мережі, а також ремонтні компанії мають бути забезпечені необхідною документацією, інструментами та засобами для виконання ремонтних робіт.

Згідно з даними, представленими на діаграмі на рис. 3.4, основною причиною раптових відключень повітряних ліній фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг», є вплив вітрових навантажень.

Детальніший аналіз відключень вказує на те, що вітрові навантаження викликають коливання та схлестування проводів. У випадку проводів марки СП-3 схлестування не призводить до раптового відключення, тоді як для проводів марки АС(А) (незольовані) це неминуче викликає відключення лінії, причому автоматичне відновлення живлення (АПВ) не завжди спрацьовує успішно.

Крім того, багаторазове схлестування та коливання проводів марки АС(А) врешті-решт призводять до їх пошкодження.

Також важливо відзначити, що вітрові навантаження можуть пошкоджувати дерев'яні опори або їх елементи, особливо ті, які не мають залізобетонних приставок.

Для підвищення надійності розподільчих мереж, зокрема ВЛ-10 кВ, доцільно замінити оголені проводи на самонесучі ізольовані проводи марки СП-3; такі технічні заходи значно підвищують надійність електричних мереж.

Проте економічно недоцільно замінювати застарілі проводи на СП-3 на старих опорах, особливо дерев'яних, оскільки термін служби проводів СП-3 є досить довгим, тоді як залишковий термін експлуатації старих опор є мінімальним, а в багатьох випадках вже минув. В результаті, незабаром знадобиться заміна старих опор, що вимагатиме демонтажу та повторного монтажу проводів СП-3, що негативно вплине на технічні характеристики та призведе до значних фінансових витрат для підприємства.

3.4. Висновки до розділу 3.

Для впровадження запропонованих заходів потрібні досить великі інвестиції; проте виконання цих заходів дозволить суттєво знизити кількість раптових відключень, а можливо, й зведе їх до нульового значення.

Більш того, зменшення раптових відключень дозволить виключити або значно зменшити фінансові витрати на усунення аварій та ліквідацію їх наслідків.

В цілому запропоновані заходи не є вичерпними; існують і інші ефективні заходи, спрямовані на забезпечення надійності ВЛ–10 кВ та її елементів. Проте в цій роботі були розглянуті та запропоновані ті заходи, виконання яких на різних етапах вже здійснюється і дає позитивні результати; більше того, запропоновані заходи цілком реальні та посильні для підприємства за певний час.

Всі вище розглянуті, вже виконані та запропоновані заходи щодо забезпечення надійності дійсно суттєво скорочують кількість раптових відключень та забезпечують практично безперервне електропостачання споживачів електричної енергії.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці при роботі в електричних мережах 110–35–10 (6) кВ. Організація охорони праці при роботі в електричних мережах напругою 110–35–10 (6) кВ є критично важливим аспектом для забезпечення безпеки працівників і ефективності виробничих процесів. Одним з ключових елементів організації роботи є планування заходів з охорони праці. Це передбачає розробку детальних планів, які враховують специфіку роботи в електричних мережах, потенційні ризики та необхідні заходи для їх мінімізації. Фінансування цих заходів має бути достатнім і цільовим, щоб забезпечити реалізацію всіх запланованих заходів, включаючи модернізацію обладнання, навчання працівників та закупівлю засобів індивідуального захисту [22, 23].

Умови колективного договору також мають важливе значення, оскільки розділ «Охорона праці» визначає зобов'язання роботодавця і працівників щодо забезпечення безпечних умов праці. Це включає відповідальність за дотримання норм охорони праці, проведення регулярних медичних оглядів та моніторинг стану охорони праці на підприємстві.

Організація навчання працівників є наступним важливим аспектом. Наявність програм навчання, інструкцій з охорони праці та журналів реєстрації інструктажів дозволяє забезпечити високий рівень підготовки працівників до виконання своїх обов'язків у небезпечних умовах. Протоколи атестації повинні підтверджувати знання працівників про безпечні методи роботи та дії в надзвичайних ситуаціях.

Забезпечення працівників спеціальним одягом і засобами індивідуального захисту є важливою частиною охорони праці. Роботодавець зобов'язаний надавати відповідний спецодяг, що відповідає вимогам безпеки, а також забезпечувати доступ до засобів захисту, таких як каски, рукавиці та інші засоби, необхідні для захисту під час роботи в електричних мережах.

Також важливим є забезпечення санітарно-побутових умов, що включає наявність комфортних приміщень для відпочинку та харчування працівників.

Відповідальність посадових осіб за роботу з охорони праці має бути чітко визначена. Кожен керівник повинен нести відповідальність за виконання вимог законодавства та внутрішніх нормативних документів, що регулюють охорону праці, а також за створення безпечних умов праці на своєму робочому місці. Це передбачає проведення регулярних перевірок, моніторинг стану охорони праці та вжиття необхідних заходів у разі виявлення порушень..

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при роботі в електричних мережах 110–35–10 (6) кВ. Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при роботі в електричних мережах напругою 110–35–10 (6) кВ є важливим етапом для забезпечення безпеки працівників. Основною небезпекою є високий рівень електричної напруги, який може призвести до електротравм. Контакт з живими частинами або коротке замикання можуть викликати не тільки ураження електричним струмом, але й серйозні травми, такі як опіки або зупинка серця.

Іншим шкідливим фактором є електромагнітні поля, які виникають внаслідок роботи електричних установок. Вони можуть впливати на здоров'я працівників, викликаючи головні болі, втому та інші порушення. Проблеми з освітленням на робочих місцях також можуть сприяти нещасним випадкам, адже недостатнє освітлення збільшує ймовірність помилок під час виконання робіт.

Крім того, небезпечними можуть бути умови навколишнього середовища, такі як погані погодні умови, які можуть призвести до ковзання або падіння працівників. Робота на висоті, зокрема при обслуговуванні ліній електропередачі, підвищує ризик падінь, що може призвести до серйозних травм. Також варто врахувати ризики, пов'язані з використанням спеціального обладнання, яке потребує чітких знань і навичок для безпечного користування.

Важливим аспектом є також психологічний фактор, оскільки стрес, пов'язаний з роботою в небезпечних умовах, може негативно впливати на

концентрацію уваги і, як наслідок, на безпеку праці. Неправильна організація роботи, недотримання інструкцій і відсутність належного навчання також підвищують ризики виникнення аварійних ситуацій.

Загалом, для зниження впливу шкідливих та небезпечних факторів необхідно впроваджувати системи управління безпекою праці, проводити регулярні навчання та інструктажі, а також забезпечувати працівників належними засобами індивідуального захисту і комфортними умовами роботи.

Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при роботі в електричних мережах 110–35–10 (6) кВ. Перш за все, необхідно розробити та впровадити детальні інструкції з охорони праці, які повинні охоплювати всі аспекти роботи з електричним обладнанням. Такі інструкції повинні бути адаптовані до конкретних умов роботи та включати інформацію про потенційні небезпеки, способи їх уникнення, а також дії в разі виникнення аварійних ситуацій. Важливо, щоб ці документи були доступними для всіх працівників, і щоб вони проходили регулярні перевірки на актуальність і відповідність новим стандартам.

Проведення регулярних навчань і інструктажів є ключовим елементом у підвищенні рівня безпеки. Працівники повинні проходити навчання не лише щодо загальних принципів охорони праці, а й отримувати специфічні знання про роботу з електричним обладнанням. Практичні заняття, які симулюють реальні умови роботи, допоможуть працівникам набути необхідних навичок та впевненості в своїх діях. Атестація знань після завершення навчання також є важливим етапом, оскільки дозволяє оцінити готовність працівників до виконання своїх обов'язків у небезпечних умовах.

Забезпечення працівників спеціальним одягом і засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) є ще однією важливою складовою безпечних умов праці. Усі засоби захисту повинні відповідати вимогам стандартів безпеки, проходити регулярні перевірки на придатність та своєчасно замінюватися у разі зношення. Правильний вибір спецодягу, касок, рукавиць

та інших ЗІЗ має суттєве значення для запобігання травмування працівників. Крім того, важливо забезпечити комфортні санітарно-побутові умови, включаючи приміщення для відпочинку, чисті туалети, зону для прийому їжі, що вплине на загальне самопочуття працівників.

Система моніторингу і контролю за умовами праці повинна стати невід'ємною частиною управлінської структури. Регулярні перевірки стану охорони праці, виявлення небезпечних факторів та оперативне усунення їх є важливими заходами для підтримки безпеки. Керівники повинні активно аналізувати нещасні випадки та інциденти, вивчати їх причини і на основі цього розробляти ефективні заходи для їх уникнення в майбутньому.

Крім того, важливо забезпечити належну комунікацію між працівниками та керівництвом з питань охорони праці. Працівники повинні мати можливість вільно висловлювати свої зауваження та пропозиції, пов'язані з поліпшенням умов праці. Це створює атмосферу відкритості та довіри, де кожен співробітник відчуває свою відповідальність за власну безпеку та безпеку колег. Створення робочих груп або комітетів з охорони праці може стати ефективним інструментом для обговорення важливих питань і прийняття колективних рішень.

Окрім цього, впровадження сучасних технологій та інноваційних рішень може суттєво підвищити рівень безпеки. Використання автоматизованих систем моніторингу, дистанційного управління та засобів дистанційної діагностики може зменшити ризик для працівників під час виконання небезпечних робіт. Інвестиції в нові технології можуть суттєво знизити ймовірність аварій і забезпечити більш ефективне використання ресурсів.

Висновки. Комплексний підхід до впровадження безпечних умов праці в електричних мережах, що включає розробку чітких інструкцій, навчання, забезпечення ЗІЗ, контроль за умовами праці та активну комунікацію, сприятиме зниженню ризиків, підвищить рівень безпеки працівників і загальну ефективність роботи підприємства.

5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Економічне обґрунтування організаційних та технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності систем електропостачання, є ключовим аспектом для забезпечення стабільної та ефективної роботи енергетичних мереж. В умовах зростаючого попиту на електроенергію та підвищення вимог до її якості, необхідність інвестицій у модернізацію і вдосконалення існуючих систем стає очевидною [24, 25].

По-перше, надійність електропостачання безпосередньо впливає на економічні показники підприємств і споживачів. Часті перебої в електропостачанні призводять до фінансових втрат, зниження продуктивності праці та зростання витрат на аварійні відновлювальні роботи. Тому, реалізація заходів, які підвищують надійність систем, може суттєво знизити ці витрати.

По-друге, організаційні заходи, такі як покращення управління електромережами, оптимізація режимів роботи та впровадження нових технологій моніторингу, можуть сприяти своєчасному виявленню та усуненню потенційних проблем. Це зменшить ризик виникнення аварій і збільшить загальну надійність системи. Інвестиції в такі рішення часто виправдовують себе в короткі терміни завдяки зменшенню обсягів ремонтних робіт і витрат на електроенергію.

Технічні заходи, включаючи модернізацію обладнання, встановлення сучасних автоматизованих систем управління та використання новітніх матеріалів для будівництва мереж, також сприяють підвищенню надійності. Витрати на ці інвестиції можуть бути значними, проте вони компенсуються за рахунок зниження витрат на обслуговування, зменшення кількості аварій та покращення загальної якості електропостачання. Підвищення надійності систем електропостачання також позитивно вплине на споживачів, що підвищить їх задоволеність і лояльність [24].

Виконаємо розрахунок недовідпуску електричної енергії по фідерам ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг» по кожному року за

досліджуваний період з 2021-2023 роки (табл. 5.1 та табл. 5.2). Для розрахунку використано дані щодо фактичної кількості відпущеної електричної енергії за рік для досліджуваних ліній електропередачі.

Таблиця 5.1. Визначення недовідпуску електроенергії по фідеру ПЛ-10 кВ «Карпилівка» за 2021-2023 роки

| Рік | Надходження у фідер за рік, тис. кВт·год | Середнє значення відпуску за годину, кВт·год | Тривалість відключення, хв | Недовідпуск електроенергії за рік, кВт·год |
|------|--|--|----------------------------|--|
| 2021 | | | | |
| 2022 | | | | |
| 2023 | | | | |

Таблиця 5.2. Визначення недовідпуску електроенергії по фідеру ПЛ-10 кВ «Перелуг» за 2021-2023 роки

| Рік | Надходження у фідер за рік, тис. кВт·год | Середнє значення відпуску за годину, кВт·год | Тривалість відключення, хв | Недовідпуск електроенергії за рік, кВт·год |
|------|--|--|----------------------------|--|
| 2021 | | | | |
| 2022 | | | | |
| 2023 | | | | |

У разі раптового стійкого відключення повітряної лінії 10 кВ чи іншого обладнання, необхідно оперативно визначити місце пошкодження, виявити несправні елементи та вжити всіх необхідних заходів для відновлення електропостачання споживачам. Встановлення місця аварії також потребує фінансових витрат, зокрема на оплату робочих годин персоналу, що бере

участь в огляді та усуненні наслідків аварії, витрати на автотранспорт для бригад та спецтехніку, а також витрати на матеріали.

Крім того, через раптові відключення персонал відволікається від основних чи запланованих завдань. До роботи можуть залучатися працівники оперативно-виїзних бригад у цілодобовому режимі, ремонтний персонал у робочий час, а також адміністративно-технічний персонал, відповідальний за координацію дій, підключення резервних джерел живлення та інші заходи для ліквідації аварії.

Висновок. Впровадження запропонованих в роботі заходів щодо підвищення надійності, зокрема заміна неізольованих проводів на СПП-3, дозволить значно зменшити недовідпуск електричної енергії. Оскільки основними причинами перерв в електропостачанні були вітрові навантаження, що призводили до обриву та схлестування проводів.

Таким чином, забезпечення рівня надійності в розподільчих електричних мережах 110–35–10 (6) кВ Охтирського РЕМ шляхом виконання організаційних та технічних заходів, спрямованих на реконструкцію елементів СЕП, є перспективним та ефективним.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Випускна кваліфікаційна робота присвячена вирішенню практичної задачі аналізу ефективності забезпечення надійності розподільчих електричних мереж та подальшому визначенні показників для розробки заходів з підвищення надійності елементів систем електропостачання.

Аналіз показників надійності електричних мереж дав змогу виокремити ключові критерії оцінки, такі як частота та тривалість відмов, середній час відновлення, а також коефіцієнти готовності та використання. Порівняння цих показників дає змогу не лише оцінити поточний стан мереж, але й визначити слабкі місця, які потребують покращення.

В ході виконання роботи були використані й проаналізовані дані оперативних журналів для фіксування всіх раптових (аварійних) відключень, а також кошториси на реконструкцію за період з 2021 по 2022 роки. Проведено аналіз ефективності прийнятих заходів для забезпечення надійності в розподільчих мережах та запропоновано заходи для підвищення і забезпечення надійності електричних мереж у процесі їх експлуатації.

Виявлено елементи систем електропостачання з найбільшою кількістю та тривалістю раптових відключень споживачів електроенергії за зазначений період, серед яких виявилися такі елементи, як фідерів ПЛ-10 кВ «Карпилівка» та ПЛ-10 кВ «Перелуг» від РТП 35/10 кВ «Комиші».

У ході аналізу побудовано діаграми кількості та тривалості раптових відключень, визначено основні причини їх виникнення, а також ефективність заходів, спрямованих на підвищення ефективності забезпечення надійності розподільчих електричних мереж.

Результатом випускної кваліфікаційної роботи є запропоновані технічні заходи щодо підвищення рівня надійності розподільчих мереж, спрямовані, зокрема, на зменшення кількості раптових відключень або їх повне усунення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мозгова, Т. В., Савойський, О. Ю., Лисенко, В. В. (2024). Аналіз причин відмов елементів розподільчих електричних мереж напругою 6(10) – 110 кВ. *Інноваційні технології в Індустрії 5.0: Збірник тез за матеріалами 30-ої міжнародної науково-практичної конференції. Ч.2.*, Суми: СНАУ, 68.
2. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. липень 2017.
3. ДСТУ EN 50160:2014. *Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT)*. Інститут електродинаміки Національної Академії наук України. Чинний від 01.10.2014.
4. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-54:2011. *Визначення технологічних втрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання*. Київ. Міністерства енергетики та вугільної промисловості України № 399 від 21.06.2013.
5. Wang, K., & Li, W. (2019). Research on Reliability of Relaying Protection in Smart Substation. *World Journal of Engineering and Technology*, 07(02), 333–338. <https://doi.org/10.4236/wjet.2019.72024>.
6. Wang, J., Kirtley, J. L., & Carvalho, P. (2013). Improving transformer's utilization under customer reliability requirements. *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*. <https://doi.org/10.1109/pesmg.2013.6672530>.
7. Zhan, M., Li, H., Zhang, C., Chen, M., & Chen, Q. (2019). Research on the reliability of capacitor voltage transformers calibration results. *Measurement*, 146, 770–779. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.011>.
8. Bouchaoui, L., Hemsas, K. E., Mellah, H., & Benlahneche, S. (2021). Power transformer faults diagnosis using undestructive methods (Roger and IEC) and artificial neural network for dissolved gas analysis applied on the functional

transformer in the Algerian north-eastern: a comparative study. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 3–11. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.01>.

9. Demirci, M., Gözde, H., & Taplamacıoğlu, M. C. (2023). Improvement of power transformer fault diagnosis by using sequential Kalman filter sensor fusion. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 149, 109038. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109038>.

10. Lata, P., & Vadhera, S. (2017b). Case Study: Reliability Enhancement of Power Transformer using DGA. *ICIDE 2017: Proceedings of the 2017 International Conference on Industrial Design Engineering*. <https://doi.org/10.1145/3178264.3178271>.

11. Журахівський, А. В., Казанський, С. В., Матєєнко, Ю. П., & Пастух, О. Р. (2017). *Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка».

12. Koksal, A., & Özdemir, A. (2016). Improved transformer maintenance plan for reliability centred asset management of power transmission system. *Iet Generation Transmission & Distribution*, 10(8), 1976–1983. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1286/>

13. Patekar, K. D., & Chaudhry, B. (2019). DGA analysis of transformer using Artificial neural network to improve reliability in Power Transformers. *2019 IEEE 4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. <https://doi.org/10.1109/catcon47128.2019.pid6178475/>

14. Sucita, T., & Mulyadi, Y. (2017). Contingency Analysis of Electric Power Systems Sub-System 150 KV West Java Area II. *IOP Conference Series*, 180, 012290. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/180/1/012290>.

15. Cho, W. C., & Ahn, T. H. (2019b). A classification of electrical component failures and their human error types in South Korean NPPs during last 10 years. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(3), 709–718. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.12.011>.

16. Bernardino, J., Bevanger, K., Barrientos, R., Dwyer, J. F., Marques, A. T., Martins, R. C., Shaw, J. M., Silva, J., & Moreira, F. (2018). Bird collisions with power lines: State of the art and priority areas for research. *Biological Conservation*, 222, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.029>.
17. Chevallier, C., Hernández-Matías, A., Real, J., Vincent-Martin, N., Ravayrol, A., & Besnard, A. (2015). Retrofitting of power lines effectively reduces mortality by electrocution in large birds: an example with the endangered Bonelli's eagle. *Journal of Applied Ecology*, 52(6), 1465–1473. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12476>.
18. D'Amico, M., Catry, I., Martins, R. C., Ascensão, F., Barrientos, R., & Moreira, F. (2018). Bird on the wire: Landscape planning considering costs and benefits for bird populations coexisting with power lines. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 47(6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1025-z>.
19. Martín, J. M., Barrios, V., Sousa, H. C., & López, J. R. G. (2019). *Les oiseaux et les réseaux électriques en Afrique du Nord: guide pratique pour l'identification et la prévention des lignes électriques dangereuses*. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2019.09.fr>.
20. Silva, J., Palmeirim, J. M., Alcazar, R., Correia, R. A., Delgado, A., & Moreira, F. (2014). A spatially explicit approach to assess the collision risk between birds and overhead power lines: A case study with the little bustard. *Biological Conservation*, 170, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.026>
21. Durocher, D. B. (2010). Considerations in unit substation design to optimize reliability and electrical workplace safety. Conference: Cement Industry Technical Conference, 2010 IEEE-IAS/PCA 52nd. <https://doi.org/10.1109/citcon.2010.5470066>.
22. Закон України "Про охорону праці" від 14 жовтня 1992 р. (Редакція станом на 20.01.2018).
23. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНПАОП 0.00–1-1.21-98. К.: АТ «Київська книжкова фабрика».

24. Журило, І. В., & Полтавець, М. М. (2017). *Економіка та організація виробництва: Методичні вказівки до вивчення курсу для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*. Кропивницький: ЦНТУ.

25. Tian-Qing, S., Xiao-Hua, W., & Ma, X. (2009). Relationship between the economic cost and the reliability of the electric power supply system in city: A case in Shanghai of China. *Applied Energy*, 86(10), 2262–2267. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.008>.

ДОДАТКИ