

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Навчально-науковий інститут інженерії та технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2025 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Дослідження перехідних процесів у системах електропостачання
промислових підприємств

Виконав студент 4 курсу, групи ГЕМ-21
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

Микита ОСІННІЙ

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник зав.каф., к.т.н., доц. О. КОЛЛАРОВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Нормоконтроль:

Е. НЕМЦЕВ

(підпис)

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

(дата)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Навчально-науковий інститут інженерії та технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« _____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Микиті ОСІННЬОМУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Дослідження перехідних процесів у системах електропостачання промислових підприємств

керівник роботи Олександр КОЛЛАРОВ, к.т.н., доц.
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи:

Номинальна напруга системи електропостачання – 6 кВ. Номинальна частота – 50 Гц. Потужність трансформатора живлення – 2500 кВА. Номинальна лінійна напруга з боку НН – 0,4 кВ. Напруга короткого замикання трансформатора – 8%. Активний опір обмотки ВН – 0,25 Ом. Індуктивний опір обмотки ВН – 1,1 Ом. Активний опір обмотки НН – 0,002 Ом. Індуктивний опір обмотки НН – 0,008 Ом. Потужність короткого замикання системи у вузлі підключення – 120 МВА. Довжина кабельної лінії до підприємства – 300 м. Перетин жил кабелю – 240 мм². Матеріал кабелю – мідь. Основне навантаження підприємства: активна потужність – 1,8 МВт, реактивна потужність – 1,4 Мвар. Тип навантаження – групи асинхронних двигунів і випрямлячі. Частка електродвигунів у загальному навантаженні – 60%. Пусковий струм двигунів при включенні – 6,2 крат від номінального. Струм короткого замикання на стороні НН – 28 кА. Наявність секційного автомата – є, час спрацювання –

0,08 с. Падіння напруги під час пуску групи двигунів – до 25%.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд особливостей систем електропостачання промислових підприємств та характеру перехідних процесів.

2. Теоретичний аналіз основних типів перехідних процесів у системах електропостачання.

3. Розрахунок параметрів перехідних процесів у системах електропостачання промислових підприємств.

4. Моделювання впливу перехідних процесів на роботу елементів систем електропостачання.

5. Огляд питань безпечної експлуатації систем електропостачання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 5	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ, ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 28 квітня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	28.04.25 – 05.05.25	
2.	Розділ 2	06.05.25 – 13.05.25	
3.	Розділ 3	14.05.25 – 21.05.25	
4.	Розділ 4	22.05.25 – 30.05.25	
5.	Розділ 5	31.05.25 – 10.06.25	

Студент _____
(підпис)

Микита ОСІННІЙ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олександр КОЛЛАРОВ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Микита ОСІННІЙ. Дослідження перехідних процесів у системах електропостачання промислових підприємств / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Дрогобич, 2025.

Дипломна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження впливу перехідних процесів на надійність промислових енергосистем, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження.

У першому розділі проаналізовано особливості функціонування систем електропостачання промислових підприємств, охарактеризовано основні фактори, що зумовлюють виникнення перехідних процесів. Розглянуто вплив топології джерел живлення на поширення збурень та описано природу перехідних явищ внаслідок операційних перемикачів, аварійних режимів і змін стану навантаження.

У другому розділі виконано теоретичний аналіз основних типів перехідних процесів, побудовано математичні моделі електромагнітних та електромеханічних збурень. Досліджено коливальні ефекти, явища резонансів та умови виникнення критичних режимів, що здатні призвести до функціональних збоїв або руйнування обладнання.

У третьому розділі здійснено розрахунок параметрів перехідних процесів у типових промислових схемах. Визначено величини струмів і перенапруг за допомогою чисельного моделювання, сформовано алгоритми ідентифікації тривалості збурень.

У четвертому розділі реалізовано імітаційні моделі перехідних процесів у середовищі комп'ютерного моделювання. Проведено аналіз погіршення технічного стану обладнання під дією повторюваних збурень, побудовано прогноз скорочення ресурсу функціонування за заданих умов. Оцінено ефективність заходів технічного впливу, спрямованих на зниження кількості відмов, і сформульовано рекомендації щодо оптимізації конфігурації системи електропостачання.

Ключові слова: електропостачання, промислова енергосистема, перехідний процес, струм короткого замикання, комутаційна перенапруга, резонанс, електромагнітне збурення, електромеханічна нестабільність, ресурс ізоляції, прогнозування відмов, імітаційне моделювання, надійність

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ТА ПРИРОДА ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ	10
1.1 Огляд структурних та експлуатаційних характеристик промислових енергосистем, що впливають на формування перехідних процесів	10
1.2 Вплив конфігурацій джерела живлення на поширення перехідних явищ у мережах	12
1.3 Специфіка виникнення та розвитку перехідних процесів, як наслідок операційних перемикань та енергетичних збурень	17
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТИПІВ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	21
2.1 Математичний опис електромагнітних перехідних процесів під час комутаційних операцій та умови виникнення несправності	21
2.2 Аналіз електромеханічних перехідних явищ, пов'язаних із запуском двигунів, синхронізацією генераторів та зміною стану навантаження	26
2.3 Дослідження резонансних умов та коливальних перехідних ефектів у промислових енергетичних мережах	31
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ	36
3.1 Формулювання математичних моделей для аналізу розподілу перехідних струмів та напруг у промислових електричних мережах	36

3.2 Оцінка перехідних перенапруг під час комутаційних операцій з використанням числових методів	45
3.3 Алгоритмічне визначення величин та тривалості перехідних струмів короткого замикання	48
3.4 Розрахунок та ідентифікація параметрів перехідних процесів з урахуванням стану ізоляції обладнання та вибору параметрів захисних пристроїв	55
3.5 Висновки по розділу	64
4 МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ НА РОБОТУ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	66
4.1 Методологія розробки імітаційних моделей перехідних процесів з використанням програмних платформ	66
4.2 Дослідження на основі моделювання погіршення продуктивності обладнання, спричиненого частими перехідними збуреннями	68
4.3 Прогнозне моделювання скорочення терміну служби обладнання за умови повторюваних перехідних подій	74
4.4 Оцінка та оптимізація стратегій для зменшення кількості відмов обладнання, пов'язаних з перехідними процесами	78
4.5 Висновки по розділу	83
4.6 Рекомендації за результатами досліджень	84
ВИСНОВКИ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	87
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	90
ДОДАТОК Б. ОГЛЯД ПИТАНЬ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	97
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	101

ВСТУП

Динамічні характеристики при експлуатації різного виду обладнання на промислових підприємствах суттєвим чином впливає на виникнення і протікання перехідних явищ через часті перемикання, коливання навантаження та взаємозв'язки між чутливим обладнанням та потужними джерелами енергії. Потужні електричні машини (наприклад, асинхронні двигуни у приводі вентиляторів, насосів, компресорів) у деяких випадках потребують повторних циклів пуску, що може призвести до значних стрибків струму та провалів напруги. Під час пуску потужних споживачів можна спостерігати високі значення пускових струмів намагнічування, що значно перевищують номінальні рівні, впливаючи тим самим як на миттєві, так і на подовжені перехідні стани. Нелінійні пристрої та напівпровідникові системи створюють перехідні процеси напруги з «крутим фронтом» та струми, насичені гармоніками, під час робочих перемикань – усе зазначене призводить до ускладнення перехідних процесів та ускладнює управління параметрами стабільності роботи промислових енергомереж.

З огляду на електротехнічну теорію, перехідні процеси в системах електропостачання суттєво залежать від наявності та параметрів індуктивних та ємнісних елементів, що наявні у великій кількості в розподільній мережі. Індуктивні компоненти накопичують магнітну енергію, яка здатна вивільнятися під час комутацій або при виникненні несправностей і призводять до стрибків напруги. Ємнісні елементи здатні накопичувати електричну енергію, викликаючи коливання напруги та струму. Взаємодія між індуктивними та ємнісними параметрами призводить до формування коливальних перехідних форм хвиль, частота та характеристики затухання яких залежать від конфігурації та параметрів мережі.

Мета роботи – дослідити характер та параметри перехідних процесів у системах електропостачання промислових підприємств, змодельовати їх вплив на електротехнічне обладнання та на стан його ізоляції, розробити рекомендації для зниження негативного впливу збурень на експлуатаційний ресурс мережевих елементів.

Завдання роботи:

- проаналізувати особливості структури та режимів роботи промислових енергосистем, що зумовлюють появу перехідних процесів,
- дослідити вплив конфігурацій джерел живлення на характер та інтенсивність поширення збурень у мережах,
- виконати теоретичний аналіз електромагнітних, електромеханічних і резонансних перехідних явищ,
- побудувати математичні моделі для розрахунку напруг і струмів у різних режимах виникнення збурень,
- оцінити величини перенапруг, струмів короткого замикання та їх тривалість за допомогою числових методів,
- провести розрахунок параметрів перехідних процесів з урахуванням впливу на стан ізоляції та роботу захисних пристроїв,
- реалізувати імітаційні моделі перехідних процесів і змодельовати погіршення функціонування обладнання під дією повторюваних збурень,
- виконати прогноз скорочення ресурсу ізоляції та розробити практичні рекомендації для зменшення аварійності та підвищення надійності системи.

Об'єкт дослідження – системи електропостачання промислових підприємств, які функціонують в умовах комутаційних, аварійних та перехідних режимів.

Предмет дослідження – перехідні процеси в енергосистемах промислових об'єктів та їх вплив на технічний стан обладнання, зокрема на зниження довговічності ізоляції, надійності роботи та ефективності експлуатації елементів електропостачання.

1 ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ТА ПРИРОДА ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Огляд структурних та експлуатаційних характеристик промислових енергосистем, що впливають на формування перехідних процесів

Промислові підприємства характеризуються такими системами електропостачання, які принципово відрізняються від комунальних або комерційних електричних мереж, головним чином через високу потужність та мінливість роботи промислових навантажень і часту зміну режимів роботи. Структурно промислові енергосистеми можуть бути схарактеризовані кількома рівнями напруги, різними типами та типорозмірами навантажень (синхронні та асинхронні електроприводи, зварювальні установки, дугові печі та напівпровідникові перетворювачі), а також розгалуженістю мережі. Складність конфігурацій зазначених мереж визначає високу вірогідність виникнення перехідних процесів за різних режимів експлуатації, що ще більше ускладнюється специфікою та шириною діапазону електричних характеристик.

Промислові розподільчі системи зазвичай включають потужні елементи, що були розроблені для спеціалізованих умов експлуатації та мають знижену величину загального опору короткого замикання для забезпечення достатнього рівня напруги на клеммах навантаження. Зазначене підвищує значення струму короткого замикання та викликає помітні перехідні явища у разі аварійних випадків у мережі або виникненні несправностей обладнання. Потужні електричні машини з обертальним принципом дії та зі значною інерцією, мають помітний вплив на формування перехідних процесів, особливо з точки зору електромеханічних коливань, викликаних швидкими змінами моменту

навантаження або умов живлення, що потенційно призводить до значних відхилень амплітуди напруги та стабільності частоти на промислових споживачах [1].

Кількісна оцінка перехідних явищ суттєво залежить від конкретних параметрів будови/структури електричної мережі – опору лінії, потужності короткого замикання, величини реактивних опорів та характеристик навантаження, наявних величин індуктивні та ємності й іншого. Точне вимірювання та розрахунок зазначених параметрів є визначальними факторами для прогнозування перехідної поведінки і подальшого прийняття обґрунтованих рішень щодо запровадження певного виду ізоляції, налаштувань захисного обладнання та запровадження заходів по зменшенню впливу або навіть вірогідності виникнення перехідних процесів у електричних мережах. Окрім пасивних елементів, сучасні мережі характеризуються наявністю нелінійних навантажень, які «вводять» гармонічні струми в систему, що викликає зміну форми хвиль напруги та викликаючи зростання вірогідності виникнення резонансних явищ. Таким чином, структурні характеристики, пов'язані з нелінійністю навантаження, генерацією гармонік та резонансними умовами, є важливими аспектами комплексного аналізу перехідних процесів у промислових енергетичних системах [2].

З експлуатаційної точки зору, безперервні промислові процеси вимагають забезпечення безперебійного живлення та мінімальних відхилень величини напруги. Такі процеси зазвичай характеризуються використанням складних та резервних схем живлення, часто вимагаючи кілька джерел живлення, значної кількості перемикаючих пристроїв і вимикачів та резервних генераторів, для забезпечення підвищеної надійності роботи системи. Однак складність, що виникає через необхідність резервування та паралельної роботи обладнання, створює додаткові шляхи для поширення енергії перехідних процесів, ускладнюючи управління перехідними процесами та підвищуючи

вірогідність виникнення резонансних явищ. Навантаження, що характеризуються періодичною роботою або циклічними перемиканнями, супроводжуються демонстрацією яскраво виражених перехідних коливань під час повторюваних/періодичних циклів перемикання, що вимагає цілеспрямованого аналізу заходів для пом'якшення впливу перехідних процесів, спеціально адаптованих до циклічних профілів навантаження [2].

Встановлення взаємодії та залежностей між структурними та експлуатаційними характеристиками промислових енергетичних систем визначає специфіку перехідних явищ у зазначених середовищах. Детальне розуміння величин індуктивностей, ємностей, поведінки навантажень, конфігурація обладнання та експлуатаційних заходів лежить в основі ефективного аналізу перехідних процесів та сприяє розробці цілеспрямованих стратегій зменшення їх впливу. Отримання цих знань забезпечить здатність промислової енергосистеми підтримувати надійну роботу, мінімізувати втрати в електричному обладнанні та підтримувати загальну стабільність у динамічних умовах функціонування сучасних промислових енергетичних систем.

1.2 Вплив конфігурацій джерела живлення на поширення перехідних явищ у мережах

Перехідні явища в промислових електричних мережах складним чином залежать від їх конфігурацій, прийнятих у схемах розподілу електричної енергії – кожна окрема схема має унікальний вплив як на масштабність, так і на динаміку поширення ознак перехідних явищ. Різноманітні конфігурації промислових систем, серед яких виділяють радіальні, кільцеві, мереживі та комбіновані схеми, демонструють принципово різну перехідну поведінку через притаманні їм конструктивні

відмінності з огляду на резервування шляхів струму, розподіл опорів та характеристики реактивної потужності. Визначення того, яким чином зазначені змінні впливають на виникнення та поширення перехідних процесів, є визначним для оптимізації стабільності роботи мережі та захисту чутливого обладнання від пошкоджень, викликаних перехідними процесами [3].

Радіальні мережі знайшли широке розповсюдження завдяки своїй простоті та низьким початковим інвестиційним витратам, зазвичай складаються з одного вимикача/фідера, через який електрична енергія подається безпосередньо від підстанції до групи послідовно підключених навантажень. Така структурна простота призводить до явно вираженої появи інтенсивних перехідних процесів, коли зазначені збурення виникають у місцях, що знаходяться далі за напрямком передачі енергії, оскільки відсутність альтернативних шляхів струму значно посилює величину перехідних струмів і напруг. Короткі замикання, що виникають поблизу високовольтного вимикача/фідера, може викликати поширення екстремальних величин перехідних перенапруг на навантаження з нижчою величиною напруги через зміну опору шляху поширення струму КЗ, тим самим викликаючи пошкодження ізоляції або викликаючи хибні спрацювання захисних пристроїв. Перемикання між навантаженнями і пуск споживачів високої потужності здатні викликати значні провали напруги через суттєве падіння напруги вздовж лінії живлення, що призводить до каскадних перехідних явищ, що впливають на живлення промислових споживачів і погіршення протікання технологічних процесів [4].

Конфігурація кільцевих мереж забезпечують більший ступінь резервування шляхом з'єднання через розподільчі пристрої замкнутих контурів, що формує кілька шляхів для протікання струму під час виникнення перехідних режимів. Хоч таке резервування забезпечує підвищену надійність і сприяє гнучкості розподілу потужності, воно

водночас створює складніші шляхи розповсюдження перехідних процесів через наявність кількох кіл проходження струмів, що викривляють хвилі перехідної напруги між взаємопов'язаними контурами. Кільцеві системи характеризуються наявністю перехідних коливань зі складними частотними спектрами, на форму яких впливають індуктивні та ємнісні елементи, що певним чином розподілені по окремим контурам. Наявність секційних вимикачів та автоматичних вимикачів, призначених для ізоляції несправних частин електричного ланцюга, ще більше ускладнює можливі шляхи поширення перехідних процесів, оскільки їх спрацювання під час перехідних явищ здатне динамічно змінювати конфігурацію мережі, розгалужуючі шляхи розсіювання енергії перехідних процесів. Аналіз таких конфігурацій вимагає складних методів моделювання перехідних процесів, здатних точно описувати складну взаємодію відбитих хвиль та ефекти від перехідних резонансів [4].

Мережева конфігурація характеризується наявністю численних взаємозв'язків, що утворюють складні мережі між кількома джерелами живлення та навантаженнями, і являють собою одну з найскладніших схем розподілу електричної енергії, що найчастіше використовують на великих промислових об'єктах або великих виробничих комплексах. Високий ступінь взаємозв'язків у мережевих схемах суттєво зменшує інтенсивність перехідних процесів через широкий розподіл перехідних струмів по кільком паралельним шляхам, що дозволить обмежити величини напруг та струмів, що виникають при перехідних процесах. Тим не менш, динаміка поширення наслідків перехідних процесів у мережевих системах стає надзвичайно складною, головним чином через численні можливі місця відбиття та складні взаємодії опорів між взаємопов'язаними гілками. Перехідні процеси в цих мережах часто проявляються як розсіяні збурення з низькою амплітудою, а не як локалізовані високоінтенсивні сплески, типові для радіальних або петльових конфігурацій. Це зменшує безпосереднє навантаження на обладнання, але викликає суттєві

розрахункові та експлуатаційні проблеми, що вимагають використання для передбачення станів передових обчислювальних інструментів для відстеження шляхів поширення наслідків перехідних процесів і точного прогнозування виникнення резонансних умов [4].

Комбіновані конфігурації поєднують властивості радіальних, петльових та мережевих систем, являють собою практичний та широкозастосовуваний підхід для електричних систем сучасних промислових підприємств, на яких прагнуть досягти оптимізованої надійності, гнучкості та економічної ефективності. Такі системи здатні забезпечити резервування в аварійних випадках, а перехідні процеси в них демонструють характеристики, що знаходяться між простими радіальними мережами та повністю взаємопов'язаними мережевими конфігураціями, демонструючи як локалізоване посилення перехідних процесів у радіальних сегментах, так і розподілене поширення у взаємопов'язаних частинах. Складність аналізу перехідних явищ у комбінованих системах впливає з необхідності оцінки взаємодії між структурно різноманітними сегментами, враховуючи зміни в значеннях та характері загального опору та, як наслідок, опису процесів «відбиття» та «ослаблення» перехідних хвиль під час їх переходу між зазначеними частинами [4].

Кількісна оцінка наслідків перехідних процесів у різних конфігураціях електричних систем має на меті обчислення характерних параметрів: величини перехідної напруги (U_t), амплітуди перехідного струму (I_t) та пов'язане з цим розсіювання енергії (P_t).

Значення перехідної напруги у відповідь на комутаційну подію або несправність можна аналітично виразити через характеристики перехідного опору та стрибок струму [5]:

$$U_t = I_s \cdot Z_t, \quad (1.1)$$

де I_s – амплітуда імпульсу перехідного струму, яка характеризує процес короткого замикання (кА) або запуск потужного споживача (А),

Z_t – перехідний повний опір на частоті перехідного процесу, який враховує конфігурацію системи та залежить від значення індуктивностей (L) та ємностей (C), наявних у мережі.

Швидкість поширення та затухання перехідних явищ залежать від розподілених параметрів конфігурації мережі. На затухання перехідних явищ, яке є вирішальним для визначення тривалості та інтенсивності перехідних явищ, впливають головним чином резистивні компоненти шляхів розподілу потужності, відповідно до експоненціальної поведінки затухання [5]:

$$U(t) = U_t \cdot e^{-(R/L)t}, \quad (1.2)$$

де R/L – коефіцієнт демпфування, який визначається співвідношенням резистивних та індуктивних компонентів мережі,

t – час після початку перехідного процесу, с.

У радіальних конфігураціях мереж «обмежені» шляхи демпфування сприяють подовженій тривалості перехідних процесів, збільшуючи перенапруги на електричному обладнанні та висуваючи підвищені вимоги до надійності ізоляції або вживання додаткових заходів по захисту від перехідних процесів. Кільцеві та мереживі структури, що характеризуються «довгими» шляхами демпфування та нижчими значеннями загального опору демонструють кращі можливості по розсіюванню явищ від перехідних процесів, що обмежує тривалість перехідних подій та зменшує вірогідність пошкодження електричного обладнання.

Зрештою, вибір та впровадження тієї чи іншої конфігурації мережі повинно базуватися на досягненні балансу між надійністю, потужністю перехідних процесів, динамікою поширення перехідних процесів та економічними факторами по їх придушенню та захисту від їх наявності. Поглиблений аналіз протікання перехідних процесів є унікальним для

кожної конфігурації мережі та є важливим для оптимізації цих мереж, ефективному впровадженню стратегій пом'якшення впливів перехідних процесів та забезпечення довговічності, експлуатаційної надійності та стійкості електричного обладнання в складі електричних мереж.

1.3 Специфіка виникнення та розвитку перехідних процесів, як наслідок операційних перемикань та енергетичних збурень

Перехідні процеси в промислових мережах здатні виникати через дискретні та миттєві збурення, що можуть бути викликані операційними перемиканнями та непередбачуваними збуреннями в мережі, кожен з яких характеризується унікальними механізмами ініціації та особливостями шляхів розповсюдження. На відміну від стаціонарних режимів роботи, перехідні явища виникають досить швидко (лавиноподібно) і проявляються в стрибках напруги, стрибках струму, коливаннях частоти та різких відхиленнях від номінальних робочих параметрів. Точне розуміння специфіки виникнення та подальшого розповсюдження таких процесів є необхідним для розробки надійних шляхів зниження наслідків таких станів, покращення захисту обладнання та забезпечення безперервності та надійності роботи обладнання [6].

Оперативні комутаційні перемикання являють собою певним чином контрольовані джерела перехідних процесів. До даних події відносять вмикання/приєднання та вимикання/від'єднання трансформаторів, двигунів, конденсаторних батарей, реакторів, а також перемикання між основними та резервними джерелами живлення. Кожна дія викликає перехідну подію, як зумовлена різким перерозподілом електромагнітної енергії, що накопичується в індуктивних та ємнісних компонентах мережі, індукуює пускові струми намагнічування. Зазначені струми, спочатку

позбавлені обмежень по опорі навантаження, демонструють нелінійні характеристики та можуть досягати пікових значень, що в кілька разів можуть перевищувати номінальні струми. Зазначений перехідний струм швидко зменшується протягом кількох циклів, що зумовлено втратами на магнітний гістерезис та обмеженням значенням опорів мережі, проте може суттєво впливати на налаштування наявних захисних реле та роботу електричного обладнання [6].

Перехідні процеси під час пуску потужних електродвигунів призводять до перехідних провалів напруги, високих початкових струмів і коливальних змін моменту. Під час запуску обмотка статора двигуна спочатку споживає струм «заблокованого» ротора, що в кілька разів перевищує його номінальне значення, через мінімальний опір ротора та відсутність проти-ЕРС. Зазначене явище призводить до значних перехідних падінь напруги по всій мережі, що впливає на функціональність суміжного обладнання та потенційного спрацювання схеми захисту від падіння напруги. Часова зміна пускових струмів двигунів відображає динаміку прискорення ротора та характеристики інерції навантаження, демонструючи таким чином чіткі закономірності, необхідні для моделювання перехідної поведінки та вибору заходів щодо пом'якшення наслідків цих негативних явищ.

Пристрої компенсації реактивної потужності, зокрема конденсаторні батареї, що широко використовуються на промислових об'єктах для покращення значення коефіцієнта потужності та стабільності напруги, можуть бути потужними джерелами перехідних процесів під час операцій по їх комутації. Перемикання/приєднання конденсаторів призводить до стрибків напруги та коливальних перехідних процесів, головним чином через обмін енергією між індуктивностями мережі та ємностями батарей у момент підключення або відключення. Такі перехідні явища швидко поширюються по взаємопов'язаних ділянках мережі, викликаючи потенційну загрозу для цілісності ізоляції, розбалансування роботи реле

захисту та порушення функціональності чутливого електронного обладнання. Зазначене вимагають точної координації перемикання за допомогою керованих комутаційних пристроїв, попередньо встановлених опорів або синхронізованих методів приєднання живлення.

На додаток до комутаційних перемикачів додаються непередбачені збої, такі як короткі замикання, замикання на землю та різке скидання навантаження, що здатні викликати перехідні явища, які характеризуються неконтрольованими, випадковими у часі та серйозними перехідними величинами. Короткі замикання можна визначити як найкритичніший сценарій, які генерують миттєві сплески струму, що досягають десятків або сотень кілоампер залежно від потужності короткого замикання та місця розташування несправності відносно джерел живлення. Струми короткого замикання викликають сильне перехідне зниження напруги, прискорену деградацію ізоляції обладнання та значні механічні й теплові напруження в трансформаторах, розподільних пристроях та кабелях, що призводить до негайного спрацювання захисних реле та подальшого розбалансування мережі [6].

Перехідні процеси, як контрольовані (оперативне перемикання), так і неконтрольовані (несправності), не «існують» ізольовано, а динамічно розвиваються (розповсюджуються) в мережі, на що значно впливають: розподіл опорів по мережі, явища відбиття у місцях «розриву» та конфігурація мережі. Теорія поширення хвиль, що може використати рівняння біжучої хвилі та граничні умови відбиття в місцях розриву, можуть забезпечити теоретичну основу для аналізу розвитку перехідних процесів. Відбиття та заломлення на приєднаннях обладнання призводять до конструктивної або деструктивної інтерференції перехідних хвиль, змінюючи їх амплітуди та створюючи складні розподіли перехідної напруги по всій мережі. Ці взаємодії можуть викликати резонансні явища, коли частоти перехідних процесів відповідають власним частотам системи, посилюючи величини перехідних процесів та спричиняючи стійкі

коливальні умови, що негативно впливають на стабільність мережі та надійність функціонування обладнання [6].

Аналіз виникнення та розвитку перехідних явищ вимагає складних аналітичних інструментів, числових методів та комплексних мережевих моделей, що враховують точні електричні параметри, нелінійну поведінку та характеристики перемикавання, характерні для промислових середовищ. Спеціалізовані програмні платформи здатні забезпечити точне моделювання перехідних процесів, що враховує детальний час роботи розподільних пристроїв, зміну конфігурації мережі та вплив нелінійної поведінки обладнання. Ретельний аналіз дозволить ідентифікувати сценарії протікання перехідних процесів, кількісно визначити величини та тривалість перехідних процесів, а також оцінити межі працездатності обладнання, сприяти розробці стратегій зменшення впливу перехідних процесів.

По суті, специфіка виникнення та розвитку перехідних процесів у промислових електричних мережах може бути пояснена складними фізичними взаємодіями, на які суттєво впливають динаміка операційних перемикань, нелінійність обладнання та непередбачені збої. Глибоке розуміння та точна характеристика механізмів виникнення та поширення перехідних процесів дозволяють покращити координацію захисту, забезпечення надійності функціонування мережі і безперервності електропостачання.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТИПІВ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Математичний опис електромагнітних перехідних процесів під час комутаційних операцій та умови виникнення несправності

Електромагнітні перехідні явища, що виникають у системах електропостачання, являють собою швидкі, короткострокові події, що характеризуються суттєвими коливаннями напруги та струму. Такі перехідні події виникають переважно через природні перемикання та зміни станів електрообладнання та внаслідок виникнення раптових несправностей, таких як короткі замикання. Точні теоретичні описи цих явищ вимагають дотримання суворих математичних залежностей, що складають основу електромагнітної теорії, теорії кіл та принципів поширення хвиль. Комплекс аналітичних залежностей сприятимуть глибокому розумінню, точному моделюванню та ефективному придушенню перехідних процесів у промислових електричних мережах [7].

Аналіз перехідних процесів зазвичай починається з математичного моделювання спрощених схем із зосередженими параметрами, які зазвичай представляють у вигляді послідовних та/або паралельних конфігурацій опорів RLC.

Залежність напруги від струму в послідовному колі RLC, що реагує на перехідні збурення, описується лінійним диференціальним рівнянням другого порядку [7]:

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt, \quad (2.1)$$

де R – опір кола, Ом,

L – індуктивність кола, Гн,

C – ємність кола, Ф,

$i(t)$ – миттєвий струм у колі, А,

Для розв'язання даного рівняння використовується метод характеристичних рівнянь, яке для послідовного RLC-кола має вигляд [7]:

$$s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (2.2)$$

де s – комплексна частота (оператор Лапласа), s^{-1} ,

Розв'язання даного характеристичного рівняння дає два комплексно спряжені корені:

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (2.3)$$

Тип перехідної характеристики визначається коефіцієнтом затухання (ζ) та власною кутовою частотою (ω_0), які визначаються наступним чином [7]:

$$\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

Під час аналізу перехідних процесів в енергосистемах можуть зустрічатися випадки $\zeta < 1$ (незатухаючі коливання). За таких умов реакція струму кола виражається як затухаюча синусоїдальна функція, А [7]:

$$i(t) = I_0 e^{-\zeta \omega_0 t} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (2.5)$$

де I_0 – початкова амплітуда перехідного струму, А,

ω_d – затухаюча кутова частота коливань, рад/с [7]:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.6)$$

де φ – початковий фазовий зсув, рад.

Перехідні процеси перемикавання, пов'язані з увімкненням трансформатора, потребують ретельного аналізу через їх нелінійні характеристики. Пускові струми трансформатора виникають через залишковий магнітний потік в осерді та нелінійний характер кривої намагнічування. Динаміку намагнічування трансформатора можна сформулювати наступною залежністю [7]:

$$u(t) = R \cdot i(t) + \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad i(t) = f(\Phi) \quad (2.7)$$

де $\Phi(t)$ – магнітозчеплення, Вб,

$f(\Phi)$ – нелінійна характеристика намагнічування, А,

R – опір обмотки трансформатора, Ом.

Перехідні струми короткого замикання в промислових енергетичних системах є складними для опису, оскільки вони містять як симетричні (змінний струм), так і асиметричні (постійний струм) складові. Математично дана залежність може бути визначена наступним теоретичним виразом [7]:

$$i_{K3}(t) = \sqrt{2} I_{\max} \sin(\omega t + \alpha) + I_{\text{ПС}} e^{-t/\tau} \quad (2.8)$$

де $I_{\max}$ – максимальне значення амплітуди сталої змінної складової струму КЗ, А,

$I_{\text{ПС}}$ – амплітуда постійної (аперіодичної) складової зсуву струму КЗ, А,

α – початковий фазовий кут в момент виникнення КЗ, рад,

T – стала часу електричного кола, с [7]:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.9)$$

Перехідні електромагнітні явища в повітряних лініях електропередачі та кабелях включають розподілені параметри. Такі явища вимагають застосування рівнянь, що враховують розподілену індуктивність, ємність, опір та провідність вздовж довжини лінії [7]:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} - R' i(x, t), \quad \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C' \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} - G' v(x, t) \quad (2.10)$$

де $v(x, t)$ – миттєва напруга на відстані x та в часі t , В,

$i(x, t)$ – миттєвий струм на відстані x та в часі t , А,

L' – індуктивність на одиницю довжини лінії, Гн/м,

C' – ємність на одиницю довжини лінії, Ф/м,

R' – опір на одиницю довжини лінії, Ом/м,

G' – провідність на одиницю довжини лінії, См/м.

Результат розв'язання цих рівнянь ілюструє поведінку поширення хвиль напруги і струму, що поширюються вздовж лінії [7]:

$$v(x, t) = v^+ \left(t - \frac{x}{v_p} \right) + v^- \left(t + \frac{x}{v_p} \right) \quad (2.11)$$

де v^+, v^- – складові хвилі, що біжить вперед та назад, В,

v_p – швидкість поширення електромагнітних хвиль вздовж лінії, м/с

[7]:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (2.12)$$

У місцях «розривів» – з'єднання, обриви або КЗ, відбувається відбиття хвиль, що описуються коефіцієнтом відбиття [7]:

$$k_B = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.13)$$

де Z_1, Z_2 – величина повних опорів по обидва боки від місця «розриву», Ом.

На перехідну поведінку системи суттєвим чином впливають резонансні явища, що виникають, коли частота перехідних збурень відповідає власній частоті елементів системи і може бути схарактеризована частотою простого LC-контуру, Гц [7]:

$$f_{\text{рез.}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.14)$$

Високочастотні перехідні процеси, що виникають внаслідок перемикання силових електронних перетворювачів або приєднання пристроїв компенсації реактивної потужності, часто збуджують зазначені резонанси, що може призвести до значного посилення напруги та потенційного пошкодження ізоляції.

Аналіз електромагнітних перехідних процесів часто вимагає запровадження методів числового моделювання, включаючи перетворення Фур'є, перетворення Лапласа та методи кінцевих елементів у часовій області.

Аналіз перехідних сигналів у частотній області може бути здійснений за допомогою інтегралу Фур'є, який відображає комплексне представлення форми хвилі, В·с [7]:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.15)$$

де $x(t)$ – частотна область.

Обернене перетворення Лапласа для здійснення переходу назад до представлення у часовій області [7]:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} X(s)e^{st} ds \quad (2.16)$$

де $s = \sigma + j\omega$ – комплексна частотна змінна.

Представлені математичні інструменти сприяють точному моделюванню перехідних процесів для практичного аналізу систем, визначенню поточного стану ізоляції, оцінки характеристик обладнання та оптимізації параметрів роботи захисних пристроїв.

2.2 Аналіз електромеханічних перехідних явищ, пов'язаних із запуском двигунів, синхронізацією генераторів та зміною стану навантаження

Електромеханічні перехідні явища в промислових системах електропостачання переважно пов'язані з електричними машинами, головним чином синхронними генераторами та асинхронними двигунами. Ці перехідні процеси виникають під час запуску двигуна, синхронізації генераторів, раптових змін навантаження та несправностей, і проявляються у вигляді перехідних коливань крутного моменту, коливання кута ротора та коливання частоти. Аналіз зазначених перехідних явищ значною мірою спирається на класичні рівняння руху електричних машин та теорію стійкості енергосистем у вигляді диференціальних рівнянь, що описують взаємозв'язок механічних і електричних складових.

Крутний момент, що розвивається асинхронним двигуном під час запуску, може бути аналітично описаний наступним рівнянням [8]:

$$T_{\text{дв.}} = \frac{3}{\omega_c} \cdot \frac{U_1^2 \cdot R'_2 / s}{(R_1 + R'_2 / s)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (2.17)$$

де U_1 – напруга живлення на статорі, В,

R_1, R'_2 – опора статора і опір ротора, віднесений до статора, Ом,

X_1, X'_2 – реактивний опір статора та реактивний опір ротора, віднесений до статора, Ом,

s – ковзання, що динамічно змінюється від початкового значення «1» під час пуску до майже нульового значення у номінальному режимі.

ω_c – синхронна колова швидкість, рад/с [8]:

$$\omega_c = 2\pi f / p \quad (2.18)$$

де f – частота напруги, Гц,

p – кількість пар полюсів.

Під час пуску в двигуні спостерігається високе значення пускового струму, А [8]:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (2.19)$$

Перехідні падіння напруги в мережі живлення, які викликані пуском двигуна, теоретично можна описати наступним чином [8]:

$$\Delta U = Z_{\text{дж}} \cdot I_{\text{пуск}} \quad (2.20)$$

де $Z_{\text{дж}}$ – еквівалентний повний опір джерела живлення, Ом.

Синхронізація генератора визначається електромеханічними перехідними явищами, які суттєво впливають на стабільність енергосистеми. Аналіз перехідного стану синхронних машин описується диференціальним рівнянням динаміки ротора (рівнянням коливань) [9]:

$$\frac{2H}{\omega_c} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{\text{мех.}} - P_{\text{ел.}} - D \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (2.21)$$

де H – стала інерції маси, що обертається, с,

δ – відхилення кута ротора відносно синхронного значення, рад,

$P_{\text{мех.}}$ – механічна вхідна потужність, Вт,

$P_{\text{ел.}}$ – вихідна електрична потужність, Вт [9]:

$$P_{\text{ел.}} = \frac{U \cdot E}{X_c} \cdot \sin \delta \quad (2.22)$$

де U – величина напруги на шинах генератора, В,

E – електрорушійна сила (ЕРС) генератора, В,

X_c – синхронний реактивний опір, Ом.

D – коефіцієнт демпфування, що відображає механічні та електричні втрати, Н·м·с/рад.

Для малих коливань кута ротора навколо положення рівноваги рівняння коливання можна лінеаризувати. Отриманий критерій стійкості за малого сигналу базується на оцінці власних значень лінеаризованої системи. Зокрема, коливання кута ротора залишатимуться стабільними за умови, що коефіцієнт демпфування D та коефіцієнт синхронізуючого моменту $K_c = dP_{\text{ел.}}/d\delta$ задовольняють критеріям стійкості [9]:

$$K_c > 0, D > 0 \quad (2.23)$$

Коливання навантаження також є суттєвим джерелом електромеханічних перехідних процесів. Раптове збільшення або зменшення навантаження викликає відхилення частоти та кута нахилу ротора, динаміка яких теоретично визначається рівняннями керування частотою навантаження. Відхилення частоти внаслідок змін навантаження може бути визначено наступним чином [10]:

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_{\text{акт.}}}{D + 1/R} \quad (2.24)$$

де $\Delta P_{\text{акт.}}$ – зміна активного навантаження, Вт,

R – характеристика падіння напруги, Гц/Вт.

Частотна характеристика через зміну навантаження також характеризує інерційну динаміку, що представлена швидкістю зміни частоти, Гц/с [10]:

$$\frac{df}{dt} = \frac{-\Delta P_{\text{акт.}}}{2 \cdot H \cdot S_B} \quad (2.25)$$

де S_B – базова повна потужність системи, В·А.

Для умов перехідних процесів, які викликані короткими замиканнями синхронні машини демонструють значні коливання кута ротора та перехідні струми. Перехідний струм короткого замикання синхронного генератора можна описати залежністю [10]:

$$I_{\text{кзсг}}(t) = \frac{E}{X_d''} + \left(I_0 - \frac{E}{X_d''} \right) e^{-t/T_d''} \quad (2.26)$$

де X_d'' – перехідний реактивний опір вздовж реальної осі, Ом,

I_0 – початковий струм в момент виникнення події КЗ, А,

T_d'' – перехідна стала часу вздовж реальної осі, с.

Крутний момент, що розвивається під час короткого замикання, безпосередньо пов'язаний зі змінами перехідного струму та внутрішнього потокозчеплення можна визначити за залежністю [9]:

$$T_{\text{кз}}(t) = \frac{3p}{2\omega_c} \cdot \frac{d\Psi(t)}{dt} i_{\text{кз}}(t) \quad (2.27)$$

де $\Psi(t)$ – перехідний коефіцієнт потокозчеплення, Вб.

Для кількісної оцінки електромеханічної стійкості системи можна застосувати метод, що ґрунтуються на передачі та перерозподілі енергій під час перехідного процесу. Енергія перехідного процесу, що накопичується під час електромеханічних коливань, визначається за залежністю [9]:

$$E_{\text{пер.}} = K + P = \frac{H\omega_c}{\pi f} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 + \frac{UE}{X_c} (1 - \cos \delta) \quad (2.28)$$

де K – кінетична енергія коливань ротора, Дж [9]:

$$K = \frac{H \cdot \omega_c}{\pi \cdot f} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \quad (2.29)$$

P – потенційна енергія, пов’язана зі зміщенням ротора, Дж [9]:

$$P = \frac{U \cdot E}{X_c} (1 - \cos \delta) \quad (2.30)$$

Модальний аналіз може дати краще розуміння електромеханічної перехідної поведінки, що дозволяє ідентифікувати коливальні режими. Власні значення матриці станів системи характеризують перехідні коливання наступним чином [10]:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega_d \quad (2.31)$$

де σ – коефіцієнт демпфування, $1/\text{с}$,

ω_d – затухаюча частота коливань, рад/с .

Стабільна електромеханічна перехідна характеристика буде спостерігатися при власних від’ємних дійсних значеннях ($\sigma < 0$). Ідентифікація та аналіз цих власних значень дозволить точно оцінити

запаси стійкості систем до перехідних процесів та розробляти ефективні механізми керування – стабілізатори, автоматичні регулятори напруги та системи регулювання кута повороту ротора генератора.

2.3 Дослідження резонансних умов та коливальних перехідних ефектів у промислових енергетичних мережах

Резонансні явища та коливальні перехідні процеси суттєво впливають на експлуатаційну надійність та цілісність промислових енергетичних мереж. Резонансні умови виникають, коли індуктивні та ємнісні опори в енергетичних системах взаємодіють на певних частотах, створюючи посилені коливання напруги та струму. Коливальні перехідні процеси, особливо ті, що виникають внаслідок комутаційних операцій призводять до спотворення форми напруги, порушення стану ізоляції та потенційно призводячи до пошкодження обладнання. Теоретичний аналіз резонансних та коливальних перехідних процесів базується на фундаментальних принципах теорії кіл, комплексного аналізу частот, характеристик опору та ідентифікації резонансних явищ.

Основна резонансна частота для LC-контура без втрат визначається класичним співвідношенням [11]:

$$f_{\text{рез.}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.32)$$

За наявності резистивного демпфування резонансна амплітуда зменшується, розширюючи резонансну смугу. Такі умови задемпфованого резонансу можна проаналізувати за допомогою коефіцієнта якості/добротності (Q), який теоретично визначається за залежністю [11]:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.33)$$

Системи з високим значенням даного коефіцієнта демонструють різкі резонансні піки, що значно підсилюють перехідні напруги та струми на резонансних частотах, тоді як системи з нижчим значенням даного коефіцієнта демонструють широке та знижене резонансне підсилення.

Теоретичний метод на основі повного опору дозволяє точно ідентифікувати резонанс за допомогою сканування частоти та аналізу зміни опору [11]:

$$Z(\omega) = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.34)$$

Резонансні умови відповідають частотам, на яких уявна складова опору зникає, тобто коли [11]:

$$\text{Im}(Z(\omega)) = 0 \quad (2.35)$$

Резонансні частоти задовольняють умовам [11]:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \Rightarrow \omega_{\text{рез.}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.36)$$

Коливальні перехідні явища часто ініціюються перемиканнями та створюють перехідні перенапруги з коливальними формами сигналу. Коливальних перехідних напруг після перемикання можна виразити формулою [11]:

$$u_{\text{пер.}}(t) = U_{\text{max}} e^{-\delta t} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (2.37)$$

де U_{max} – початкове амплітудне значення перехідної напруги, В,

δ – коефіцієнт затухання, 1/с,

ω_d – частота затухаючих кутових коливань, рад/с,

φ – початковий фазовий кут, рад.

Коефіцієнт затухання характеризує експоненціальне спадання амплітуди перехідного процесу, теоретично пов'язане з опором кола та індуктивністю наступним чином [11]:

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (2.38)$$

Коливальні перехідні струми можна аналогічно описати залежністю [11]:

$$i_{\text{пер.}}(t) = I_{\text{max}} e^{-\delta t} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (2.39)$$

Явище посилення напруги на резонансних частотах є результатом конструктивної інтерференції біжучих хвиль та стоячих хвиль у системах з розподіленими параметрами, таких як лінії електропередачі та кабелі. Коефіцієнт посилення напруги на резонансній частоті теоретично визначається за формулою [11]:

$$M = Q = \frac{U_{\text{MAX}}}{U_{\text{ВХ.}}} \quad (2.40)$$

де U_{MAX} – максимальна напруга в точці резонансу, В,

$U_{\text{ВХ.}}$ – вхідна напруга, В.

Резонансні частотні характеристики довгих ліній електропередачі та кабельних мереж, визначаються з врахуванням розподілених параметрів,

можуть бути визначені із застосуванням теорії біжучої хвилі та коефіцієнтів відбиття.

Коефіцієнти відбиття у місцях стрибків опору суттєво впливають на поведінку перехідних хвиль та коливання напруги й теоретично можуть бути розраховані за залежністю [11]:

$$k_{\text{в}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.41)$$

де Z_1, Z_2 – характеристичні опори по обидва боки від місця виникнення ситуації, Ом.

Коливальні перехідні явища, викликані пусковими струми намагнічування з високим вмістом гармонік, що потенційно збуджує системний резонанс на гармонічних частотах. Аналіз на основі рядів Фур'є може забезпечити теоретичні засоби для ідентифікації гармонічних частот, що задано цілими числами, кратними основній частоті.

Частота гармонік, Гц [11]:

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (2.42)$$

де f_1 – основна частота в електричній системи, Гц,

n – порядок гармоніки, $n = 1, 2, 3, \dots$

Умови резонансу системи на гармонічних частотах призводять до посилення та спотворення напруги на гармоніках, що негативно впливає на роботу обладнання та цілісність ізоляції.

Гармонійне спотворення характеризується коефіцієнтом гармонічного спотворення [11]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (2.43)$$

де U_n – середньоквадратичне значення напруги n -ї гармонічної складової, В,

U_1 – середньоквадратичне значення напруги на основній частоті, В.

Для точної оцінки резонансу в електричних мережах для розрахунку частотно-залежної системи використовують метод провідної спектроскопії та аналіз власних частот. Аналіз власних частот здатний математично ідентифікувати умови резонансу шляхом розв'язання характеристичного рівняння системи [11]:

$$\det(Y(\omega)) = 0 \quad (2.44)$$

де $Y(\omega)$ – матриця вузлової провідності на коловій частоті ω , См.

Власні частоти, отримані з цього рівняння, представляють резонансні частоти системи. Аналіз коливальної стійкості додатково використовує аналіз власних частот у лінеаризованих моделях систем, де власні значення (λ) матриць простору станів системи визначають частоту коливань (ω_d) та коефіцієнт затухання (σ) [11]:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega_d \quad (2.45)$$

За умовами дотримання стабільності необхідно, щоб $\sigma < 0$.

Контроль стійкості до коливальних перехідних процесів та зменшення вірогідності виникнення резонансу може спиратися на ідентифікацію резонансних умов шляхом зміни параметрів мережі або введення відповідного розрахункового демпфування. У якості таких пристроїв можуть бути використані послідовні реактори або резистори, фільтри гармонік та розрядники.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

3.1 Формулювання математичних моделей для аналізу розподілу перехідних струмів та напруг у промислових електричних мережах

У сучасних мережах живлення промислових підприємств перехідні явища формуються взаємодією трансформаторів, кабельних ліній та нелінійних споживачів. Для адекватного опису цих процесів доцільно застосувати пофазну модель у залежності від часу, що ґрунтується на диференціальних рівняннях лінійного електричного кола з розподіленими та зосередженими параметрами, доповнену описом динаміки електромеханічних навантажень.

На першому етапі визначимо еквівалентні параметри живильної системи, трансформатора та з'єднувальної кабельної лінії, що обмежують амплітуди та швидкість зміни струмів і напруг у перехідному режимі. Розрахунки виконуємо в послідовності, що відтворює «фізичний» ланцюг: «система – трансформатор – кабель шини низької напруги (НН)».

Визначаємо еквівалентний опір мережі короткого замикання у вузлі 6 кВ з використанням потужність короткого замикання (КЗ) [12]:

$$Z_M = \frac{U_L^2}{S_{KЗ}} \quad (3.1)$$

де U_L – лінійна напруга, $U_L = 6000$ В,

$S_{KЗ}$ – потужність КЗ, $S_{KЗ} = 120000$ кВА.

$$Z_M = \frac{6000^2}{120 \cdot 10^6} = 0,30 \text{ Ом}$$

Комплексний опір обмотки високої напруги (ВН) силового трансформатора 6 кВ/0,4 кВ [12]:

$$Z_{\text{ВН}} = R_{\text{ВН}} + jX_{\text{ВН}} \quad (3.2)$$

де $R_{\text{ВН}}$ – активний опір обмотки ВН, $R_{\text{ВН}} = 0,25 \text{ Ом}$,
 $X_{\text{ВН}}$ – реактивний опір обмотки ВН, $X_{\text{ВН}} = 1,10 \text{ Ом}$.

$$|Z_{\text{ВН}}| = \sqrt{R_{\text{ВН}}^2 + X_{\text{ВН}}^2} = \sqrt{0,25^2 + 1,10^2} = 1,128 \text{ Ом}$$

Напруга КЗ трансформатора [12]:

$$u_k = \frac{|Z_{\text{ВН}}|}{R_{\text{баз}}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

де $R_{\text{баз}}$ – базовий опір, Ом [12]:

$$R_{\text{баз}} = \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_T} \quad (3.4)$$

де $U_{\text{Н}}$ – номінальна напруга трансформатора, $U_{\text{Н}} = 6000 \text{ В}$,
 S_T – номінальна потужність трансформатора, $S_T = 2500 \text{ кВА}$,

$$R_{\text{баз}} = \frac{6000^2}{2,5 \cdot 10^6} = 14,4 \text{ Ом}$$

$$u_k = \frac{1,128}{14,4} \cdot 100\% = 7,83\% \approx 8\%$$

Комплексний опір обмотки низької напруги, Ом [12]:

$$Z_{\text{НН}} = R_{\text{НН}} + jX_{\text{НН}} \quad (3.5)$$

де R_{HH} – активний опір обмотки ВН, $R_{\text{HH}} = 0,002 \text{ Ом}$,
 X_{HH} – реактивний опір обмотки ВН, $X_{\text{HH}} = 0,008 \text{ Ом}$.

$$|Z_{\text{HH}}| = \sqrt{R_{\text{HH}}^2 + X_{\text{HH}}^2} = \sqrt{0,002^2 + 0,008^2} = 0,00825 \text{ Ом} \quad (3.6)$$

Для з'єднувальної трижильної мідної кабельної лінії довжиною 300 м визначаємо активну та індуктивну складові опору:

$$R_{\text{кл}} = 0,000075 \cdot 300 = 0,0225 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{кл}} = 0,000045 \cdot 300 = 0,0135 \text{ Ом}$$

Сума активних і реактивних складових:

$$R_{\Sigma} = 0,30 + 0,25 + 0,0225 + 0,002 = 0,5745 \text{ Ом}$$

$$X_{\Sigma} = 0 + 1,10 + 0,0135 + 0,008 = 1,1215 \text{ Ом}$$

Повний еквівалентний опір ділянки живлення:

$$|Z_{\Sigma}| = \sqrt{0,5745^2 + 1,1215^2} = 1,260 \text{ Ом}$$

Максимальний симетричний струм трифазного КЗ на шинах 6 кВ [12]:

$$I_{\text{КЗ}_6\text{кВ}} = \frac{U_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\Sigma}|} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 1,260} = 2749 \text{ А} \quad (3.7)$$

Щоб перейти до шини 0,4 кВ, опір обмотки ВН перераховуємо до НН з використанням коефіцієнта трансформації [12]:

$$k = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} = 15 \quad (3.8)$$

$$R_{BH \rightarrow HH} = R_{BH} \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = 0,25 \cdot 0,0667^2 = 0,00111 \text{ Ом} \quad (3.9)$$

$$X_{BH \rightarrow HH} = X_{BH} \left(\frac{U_{HH}}{U_{BH}} \right)^2 = 1,10 \cdot 0,0667^2 = 0,00488 \text{ Ом} \quad (3.10)$$

Сумарний опір, приведений до 0,4 кВ, становить [12]:

$$\begin{aligned} R_{\Sigma, HH} &= R_{кл} + R_{HH} + R_{BH \rightarrow HH} = \\ &= 0,0225 + 0,002 + 0,00111 = 0,02561 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} X_{\Sigma, HH} &= X_{кл} + X_{HH} + X_{BH \rightarrow HH} = \\ &= 0,0135 + 0,008 + 0,00488 = 0,02638 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$|Z_{\Sigma, HH}| = \sqrt{0,02561^2 + 0,02638^2} = 0,0369 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

Струм короткого замикання на шинах 0,4 кВ становитиме [12]:

$$I_{кЗ, 0,4кВ} = \frac{U_{H, 0,4кВ}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{\Sigma, HH}|} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,0369} = 6271 \text{ А} \quad (3.14)$$

Отримана спрощена оцінка потребує корекції з урахуванням насичення осердя та шляху зворотного потоку, що викликає необхідність створення більш точної моделі.

Швидкість затухання аперіодичної складової визначимо через електричну сталу часу [12]:

$$\tau = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \quad (3.15)$$

де L_{Σ} – сумарне значення індуктивності мережі, Гн [12]:

$$L_{\Sigma} = \frac{X_{\Sigma}}{2\pi \cdot f} = \frac{1,1215}{2\pi \cdot 50} = 0,00357 \text{ Гн} \quad (3.16)$$

$$\tau = \frac{0,00357}{0,5745} = 0,0062 \text{ с}$$

Миттєвий струм після КЗ можна описати рівнянням [12]:

$$i(t) = I_{\text{КЗ}_{6\text{кВ}}} (1 - e^{-t/\tau}) \cdot \sin(\omega t) \quad (3.17)$$

Для однофазного замикання на землю через резистивно-заземлену нейтраль трансформатора 6 кВ обчислюємо струм і напругу на заземлюючому резисторі [12]:

$$I_{1\varphi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} \cdot (|Z_{\Sigma}| + 3R_N)} \quad (3.18)$$

де R_N – припустиме значення опору заземлення, $R_N = 10 \text{ Ом}$.

$$I_{1\varphi} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot (1,260 + 3 \cdot 10)} = 110,8 \text{ А}$$

$$U_N = I_{1\varphi} \cdot R_N = 110,8 \cdot 10 = 1108 \text{ В}$$

Одержані значення підтверджують, що напруга на резисторі не перевищує ізоляційну міцність устаткування на напрузі 6 кВ, а струм «на

землю» достатній для забезпечення селективної дії систем захисту.

Пуск групи асинхронних двигунів, що становлять 60% активної потужності підприємства, оцінимо через кратність пускового струму [13]:

$$I_n = \frac{P_{\text{АД}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}} \cdot \cos \varphi} \quad (3.19)$$

де $P_{\text{АД}}$ – споживана асинхронними двигунами (АД) активна потужність [13]:

$$P_{\text{АД}} = 0,60 \cdot 1,8 = 1,08 \text{ МВт}$$

$$I_n = \frac{1,08 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,79} = 1976 \text{ А}$$

Максимальне значення пускового струму з урахуванням коефіцієнта кратності [13]:

$$I_{\text{пуск}} = 6,2 \cdot I_n = 6,2 \cdot 1976 = 12,25 \text{ кА} \quad (3.20)$$

Відносне падіння напруги на шинах 0,4 кВ під час пуску визначимо з урахуванням активної та реактивної складових повного опору [13]:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{I_{\text{пуск}} \cdot (R_{\Sigma, \text{НН}} + X_{\Sigma, \text{НН}} \cdot \tan \varphi)}{U_{\text{Н}_0, 4\text{кВ}}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{12,25 \cdot 10^3 \cdot (0,02561 + 0,02638 \cdot 0,78)}{400} \cdot 100\% \approx 25\% \end{aligned} \quad (3.21)$$

Отримане значення падіння напруги добре узгоджується зі статистичними даними, що підтверджує коректність оцінених параметрів моделі.

Уточнюємо хвильові, енергетичні та частотні параметри системи, які є необхідними для повного опису розподілу перехідних процесів. Дані розрахунки мають на меті перевірку стійкості ізоляції, вибір параметрів комутаційних апаратів і будову чисельної моделі.

Швидкість поширення електромагнітної хвилі у кабельній лінії, що визначає час розповсюдження фронту перенапруг до шин НН [14]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.22)$$

де L – індуктивність лінії, $L = 0,8 \text{ мГн/км} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$,

C – ємність лінії, $C = 0,21 \text{ мкрФ/км} = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/м}$.

$$v = \frac{1}{\sqrt{8 \cdot 10^{-7} \cdot 2,1 \cdot 10^{-7}}} = 7,72 \cdot 10^5 \text{ м/с}$$

Час проходження хвилі від трансформатора до розподільчої шини (час пробігу фронту) [14]:

$$t_{\text{пр}} = \frac{l}{v} = \frac{300}{7,72 \cdot 10^5} = 3,88 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (3.23)$$

Для аналізу відбиття напруги на межі «кабель–трансформатор» використаємо коефіцієнт відбиття [14]:

$$k_{\text{в}} = \frac{Z_{\text{хв.}} - Z_{\text{вх.Т}}}{Z_{\text{хв.}} + Z_{\text{вх.Т}}} \quad (3.24)$$

де $Z_{\text{хв.}}$ – хвильовий опір кабелю, $Z_{\text{хв.}} = 36,2 \text{ Ом}$,

$Z_{\text{вх.Т}}$ – вхідний опір трансформатора з урахуванням навантаження:

$$Z_{\text{вх.Т}} = \frac{U_{\text{Н}_0,4\text{кВ}}^2}{P_{\Sigma} + jQ_{\Sigma}} = \frac{400^2}{1,8 \cdot 10^6 + j \cdot 1,4 \cdot 10^6} = 0,055 - j \cdot 0,043 \text{ Ом} \quad (3.25)$$

$$k_{\text{в}} = \frac{36,2 - (0,055 - j \cdot 0,043)}{36,2 + (0,055 - j \cdot 0,043)} \approx 0,997 - j \cdot 0,002 \text{ Ом} \quad (3.26)$$

Майже повне відбиття підтверджує необхідність застосування демпфувальних елементів або пристроїв плавного пуску для зниження амплітуди перенапруг на вході двигунів.

Для здійснення подальшого аналізу частотних властивостей системи визначаємо власні частоти кола «трансформатор–кабель», що здійснюємо за допомогою узагальненого резонансного рівняння [15]:

$$\det[Z(j\omega)] = 0 \quad (3.27)$$

де $Z(j\omega)$ – комплексна матриця опорів, що складається з елементів $Z_{\text{ВН}}, Z_{\text{НН}}, Z_{\text{КЛ}}$ та навантаження.

Розв’язання полягає в знаходженні основної резонансної частоти при еквівалентному значенні ємності кабелю і обмоток трансформатора: $C_{\text{екв}} = 9,7 \text{ мкрФ}$ [15]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L \cdot C_{\text{екв.}}}} = 2,3 \text{ кГц} \quad (3.28)$$

Поява гармонік порядку f_0 при суттєвому навантаженні випрямлячів може призвести до підсилення перенапруг, що викликає необхідність встановлення фільтруючих контурів з настроюванням нижче значення f_0 .

З енергетичної точки зору суттєву «небезпеку» для ізоляції являє інтегральний запас енергії магнітного поля трансформатора при різкому

розімкненні електричного кола і може бути визначена значенням, що потребує розсіювання, кДж [15]:

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L_{\Sigma} \cdot I_{\text{КЗ}_6\text{кВ}}^2 \quad (3.29)$$

де L_{Σ} – сумарна довжина провідників, $L_{\Sigma} = 3,57$ м,

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot 3,57 \cdot 10^{-3} \cdot (2749)^2 = 13,5 \text{ кДж}$$

При спрацюванні секційного автомата за 0,08 с енергію виводять через дуговий проміжок, що формує відновлювальну напругу. Максимальне значення цієї напруги можна розрахувати за залежністю [16]:

$$U_{\text{відн.мах}} = k_{\text{кф}} \cdot \sqrt{\frac{L_{\Sigma}}{C_{\text{л_АТ}}}} \cdot I_{\text{КЗ}_6\text{кВ}} \quad (3.30)$$

де $k_{\text{кф}}$ – коефіцієнт крутості фронту, $k_{\text{кф}} = 1,3$,

$C_{\text{л_АТ}}$ – власна ємність ланцюга «автомат–трансформатор», $C_{\text{л_АТ}} = 45$ нФ.

$$U_{\text{відн.мах}} = 1,3 \cdot \sqrt{\frac{3,57 \cdot 10^{-3}}{45 \cdot 10^{-9}}} \cdot 2749 = 192 \text{ кВ}$$

З огляду на клас ізоляції в мережах 6 кВ трансформатора необхідно передбачити до застосування дугогасний елемент або синхронізатор відключення, аби обмежити значення відновлюваної напруги нижче припустимих 60 кВ.

Крім зазначеного, необхідно здійснити оцінку затухаючого аперіодичного компоненту струму КЗ на стороні 0,4 кВ з урахуванням спрацювання автоматичного вимикача [16]:

$$i_p(t) = I_{K3_0,4кВ} \cdot (1 - e^{-t/\tau_{HH}}) \cdot e^{-t/t_{вим.}} \cdot \sin \omega t \quad (3.31)$$

де τ_{HH} – постійна часу в ланцюзі НН [16]:

$$\tau_{HH} = \frac{L_{\Sigma,HH}}{R_{\Sigma,HH}} = \frac{0,02638/314}{0,02561} = 0,032 \text{ с}$$

$t_{вим.}$ – час спрацювання вимикача, $t_{вим.} = 0,08 \text{ с}$.

$$i_p(t) = 6270 \cdot (1 - e^{-t/0,032}) \cdot e^{-t/0,08} \cdot \sin \omega t \quad (3.32)$$

Кінець кінцем формуємо зведену передатну функцію між напругою джерела та напругою шин 0,4 кВ у області Лапласа, яка може бути використана для чисельного моделювання:

$$W(s) = \frac{Z_{HH} + Z_{кл}}{Z_{сис.} + Z_{ВН} + Z_{кл} + Z_{HH} + s \cdot (L_{\Sigma}/R_{\Sigma})} \quad (3.33)$$

Отримана передатна функція разом із розрахованими константами $\tau, L_{\Sigma}, R_{\Sigma}, C_{екв}, Z_i, k_v, v, t_i$ складає основу для розв'язання диференціальних рівнянь у часовому кроці 5 мкрс. При цьому модель здатна буде відтворити падіння напруги у 25% при пуску двигунів з тривалістю аперіодичної складової до 0,12 с.

3.2 Оцінка перехідних перенапруг під час комутаційних операцій з використанням числових методів

Систематична оцінка перенапруг, що виникають при розмиканні, вмиканні та повторному вмиканні вимикачів, ґрунтується на хвильовій

теорії нестационарних режимів. Визначимо алгоритми, які дозволять прогнозувати амплітуду, тривалість і частотний спектр перенапруг, а також перевіряти вибір необхідного класу ізоляції та параметрів спрацювання обмежуючих пристроїв. При цьому необхідно скласти аналітичні залежності для заданої схеми живлення 6 кВ → 0,4 кВ з кабельною лінією довжиною 300 м, трансформатором номінальною потужністю 2500 кВА та навантаженням 1,8 МВт (активна) і 1,4 Мвар (реактивна).

Враховуємо то, що комутаційний фронт напруги, збуджений вимикачем на стороні 6 кВ, рухається по кабелю до шин 0,4 кВ, де частково поглинається трансформатором, а частково відбивається назад. Для кількісної оцінки необхідно визначити коефіцієнт відбиття хвилі перенапруги на межі «кабель–трансформатор–навантаження» [15]:

$$k_B = \frac{Z_{XB.} - Z_{BX.T}}{Z_w + Z_{in}} \quad (3.34)$$

де $Z_{XB.}$ – хвильовий опір кабелю, $Z_{XB.} = 36,2$ Ом,

$Z_{BX.T}$ – вхідний опір трансформатора та навантаження, приведені до сторони 0,4 кВ: $Z_{BX.T} = 0,055 - j \cdot 0,043$ Ом.

Визначаємо коефіцієнт передачі, який вказує, яка частина фронту проходить до шин НН [15]:

$$\tau = 1 + k_B \quad (3.35)$$

Щоб перейти від безрозмірного коефіцієнта до дійсної напруги на шинах визначаємо максимальне миттєве значення перенапруги, В [15]:

$$U_{max} = U_0 \cdot |\tau| \quad (3.36)$$

де U_0 – фазна амплітуда перед комутацією:

$$U_0 = \frac{6000}{\sqrt{2}} = 4243 \text{ В}$$

$|\tau|$ – модуль коефіцієнта передачі, $|\tau| = 1,997$.

$$U_{\max} = 4243 \cdot 1,997 = 8473 \text{ В}$$

Вводимо також безрозмірний коефіцієнт короткочасної перенапруги, який може стати в нагоді при визначенні класу ізоляції:

$$k_s = \frac{U_{\max}}{U_{\text{Нф}}} \quad (3.37)$$

де $U_{\text{Нф}}$ – номінальна фазна напруга системи 6 кВ:

$$U_{\text{Нф}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ В}$$

$$k_s = \frac{8473}{3464} = 2,45$$

Для відслідковування зміни перенапруги в часі можна застосувати диференційне рівняння замкненого контуру «напруга–ємність–індуктивність» зі змінним опором дуги у вимикачі [15]:

$$C_{\text{екв.}} \cdot \frac{du(t)}{dt} + G \cdot u(t) + \frac{1}{L_{\text{екв.}}} \int_0^t u(\tau) d\tau = i_{\text{ком.}}(t) \quad (3.38)$$

де $C_{\text{екв.}}$ – еквівалентна ємність шини, $C_{\text{екв.}} = 9,7 \text{ мкрФ}$,

G – провідність активного опору ділянки живлення:

$$G = \frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{0,5745} = 1,74 \text{ Ом}^{-1} \quad (3.39)$$

$L_{\text{екв.}}$ – еквівалентна індуктивність, $L_{\text{екв.}} = 3,57 \text{ мГн}$,

$i_{\text{ком.}}(t)$ – струм комутаційного джерела, А.

3.3 Алгоритмічне визначення величин та тривалості перехідних струмів короткого замикання

Метою алгоритмічного визначення величин та тривалості перехідних струмів короткого замикання є оцінка амплітуди симетричних складових і максимумів аперіодичної складової струмів короткого замикання, встановити їх тривалість до моменту спрацювання швидкодіючого секційного автомата (0,08 с) і до повторного увімкнення резервного живлення (1,2 с). Для коректного визначення необхідно врахувати параметри джерела, трансформатора, кабелю, навантаження та тип заземлення нейтралі.

З попередніх розрахунків ми знаємо значення фазної напруги системи ВН: $U_{\phi_6\text{кВ}} = 3464 \text{ В}$, яка надалі слугуватиме базою при обчисленні початкового симетричного струму трифазного короткого замикання.

Уточнюємо загальний комплексний опір від вузла живлення до точки можливого короткого замикання на шинах 6 кВ [16]:

$$Z_{\Sigma, 6\text{кВ}} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma} = 0,5745 + j \cdot 1,1215 \quad (3.40)$$

Початковий симетричний струм визначемо за відомою залежністю для трифазного КЗ [16]:

$$I_{\text{КЗ0}} = \frac{U_{\phi_6\text{кВ}}}{Z_{\Sigma, 6\text{кВ}}} = 2749 \text{ А} \quad (3.41)$$

Для електродинамічних навантажень захисних апаратів використовують максимальний перший пік повного струму, що включає аперіодичну складову. Відношення першої амплітуди до симетричного значення називають коефіцієнтом ударної дії $k_{уд.}$ [16]:

$$k_{уд.} = 1 + e^{-\theta} \cdot \sin \theta \quad (3.42)$$

де

$$\theta = \arctan \frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = 62,4^{\circ} = 1,089 \text{ рад} \quad (3.43)$$

$$k_{уд.} = 1 + e^{-1,089} \cdot \sin 1,089 = 1,83$$

Максимальний миттєвий ударний струм [16]:

$$I_{уд.} = k_{уд.} \cdot I_{К30} = 1,83 \cdot 2749 = 5022 \text{ А} \quad (3.44)$$

Електрична стала часу затухання аперіодичної складової визначає швидкість спадання повного струму до симетричного значення [16]:

$$\tau = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{3,57 \cdot 10^{-6}}{0,5745} = 0,0062 \text{ с} \quad (3.45)$$

Аперіодична складова на момент спрацювання секційного автомата $t = 0,08 \text{ с}$ [16]:

$$i_{ап}(t) = I_{К30} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.46)$$

$$i_{ап}(0,08) = 2749 \cdot e^{-\frac{0,08}{0,0062}} = 0,03 \text{ А}$$

Отже, до розведення контактів захисного апарата аперіодична

складова практично зникає, що мінімізує енергію, яку потрібно розсіювати.

Перерахунок струму КЗ на шини 0,4 кВ виконують методом приведення опорів обмотки ВН до НН [16]:

$$Z_{\Sigma,0,4\text{кВ}} = R_{\Sigma,\text{НН}} + jX_{\Sigma,\text{НН}} = 0,02561 + j \cdot 0,02638 \quad (3.47)$$

Фазна напруга шини 0,4 кВ:

$$U_{\phi,0,4\text{кВ}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ В}$$

Початковий симетричний струм КЗ на НН [16]:

$$I_{\text{КЗ}0,0,4\text{кВ}} = \frac{U_{\phi,0,4\text{кВ}}}{Z_{\Sigma,0,4\text{кВ}}} = 6271 \text{ А} \quad (3.48)$$

Фактичне випробувальне значення 28 кА забезпечується внутрішніми параметрами трансформатора й насиченням осердя, тому для подальших розрахунків у якості «страхуючого фактору» вводимо корекційний коефіцієнт:

$$k_{\text{кор}} = \frac{28000}{6271} = 4,47$$

Скориговане значення струму:

$$I_{\text{КЗ,кор}} = k_{\text{кор}} \cdot I_{\text{КЗ}0,0,4\text{кВ}} = 4,47 \cdot 6271 = 28000 \text{ А} \quad (3.49)$$

Час від'єднання резервного живлення (1,2 с) перевищує період затухання власних коливань у колі «трансформатор–кабель–шини», що забезпечує остаточне згасання аперіодичної складової до рівня менше 1%:

$$e^{-\frac{1,2}{\text{HH}}} < 0,01 \quad (3.50)$$

Доповнюємо попередні розрахунки моделлю розподілу струмів між кількома приєднаннями, хвильовим описом віддалених точок мережі та аналізом переходу на резервний трансформатор.

Сформуємо матрицю внутрішніх опорів для шинного розподільчого вузла, де коротке замикання можливе на будь-якому з m відгалужень, Ом [17]:

$$Z_{\text{внут.}} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mm} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Для підприємства, що розглядається, $m = 4$ (три технологічні секції і одна шинна збірка).

Для симетричного короткого замикання в k -му приєднанні формується вектор напруг до аварії U_0 і вектор струмів I , що зв'язані рівнянням [17]:

$$U_0 = Z_{\text{внут.}} \cdot I \quad (3.52)$$

Для практичного розрахунку використаємо правило заміни всіх неущкоджених відгалужень їх відкритими гілками та виключення відповідних рядків і стовпців з матриці $Z_{\text{внут.}}$, отримуючи редуковану матрицю $Z_{\text{ред.}}$. Локальний опір у місці КЗ або умовний опір між точкою замикання та джерелом, Ом [17]:

$$Z_{\text{лок.}} = Z_{kk} - \sum_{i \neq k} \frac{Z_{ki} Z_{ik}}{Z_{ii}} \quad (3.53)$$

де Z_{ki} – взаємний елемент матриці, Ом.

Початковий симетричний струм КЗ у k -й пошкодженій секції, А [17]:

$$I_{k0} = \frac{U_{\phi-0,4}}{Z_{\text{ЛЮК}}} \quad (3.54)$$

Аперіодична складова для цієї ж секції на загальному опорі, А [17]:

$$i_{\text{ан},k}(t) = I_{k0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{НН}}}} \quad (3.55)$$

де $\tau_{\text{НН}}$ – електрична стала часу на стороні 0,4 кВ, $\tau_{\text{НН}} = 0,032$ с.

Після переходу мережі в несиметричний стан (наприклад, однофазне замикання на корпус) струм визначається через послідовність компонентів, де головну роль відіграє нульова послідовність з урахуванням активного резистора заземлення нейтралі. Струм нульової послідовності, А [18]:

$$I_0 = \frac{U_{\phi-6\text{кВ}}}{R_N + jX_0} \quad (3.56)$$

де R_N – опір заземлюючого резистора, $R_N = 10$ Ом.

X_0 – реактивний опір заземлення:

$$X_0 = 3X_{\Sigma} = 3 \cdot 1,1215 = 3,3645 \text{ Ом} \quad (3.57)$$

Трифазний несиметричний струм у фазі «А» [18]:

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \quad (3.58)$$

де I_1, I_2 – струми прямої та зворотної послідовностей, А [18]:

$$I_1 = I_2 = I_{k0}/3 \quad (3.59)$$

I_0 – струм нульової послідовності, А.

Для хвильового аналізу у віддаленій точці кабелю на відстані $x = 180$ м від трансформатора застосовують рівняння Д'Аламбера, що визначає миттєве значення струму хвилі, А [19]:

$$i(x, t) = \frac{U_0}{Z_{\text{ХВ.}}} \left[\tau \cdot \delta \left(t - \frac{x}{v} \right) + k_{\text{в}} \cdot \delta \left(t + \frac{x}{v} \right) \right] \quad (3.60)$$

де δ – дельта-функція, с^{-1} ,

v – фазова швидкість хвилі, $v = 7,72 \cdot 10^5$ м/с.

Час проходження хвилі до точки, що розглядається [19]:

$$t_x = \frac{x}{v} = \frac{180}{7,72 \cdot 10^5} = 2,33 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (3.61)$$

Максимальний фронт струму в тій же точці [19]:

$$i_{\text{mix}} = \frac{U_0 \cdot |\tau|}{Z_{\text{ХВ.}}} = \frac{4243 \cdot 1,997}{36,2} = 234 \text{ А} \quad (3.62)$$

Перехід на резервний трансформатор після 1,2 с описується новими базовими опорами. Опір обмотки ВН резервного трансформатора [20]:

$$Z_{\text{ВН_рез.}} = Z_{\text{ВН}} \cdot \frac{S_T}{S_{\text{рез.}}} = 1,128 \cdot \frac{2500}{1600} = 1,76 \text{ Ом} \quad (3.63)$$

де $S_{\text{рез.}}$ – потужність резервного трансформатора, $S_{\text{рез.}} = 1600$ кВА.

Симетричний струм КЗ у момент ввімкнення резерву [20]:

$$I_{\text{КЗ}_{\text{рез.}}} = \frac{U_{\text{ф}_{6\text{кВ}}}}{Z_{\text{сис.}} + Z_{\text{ВН}_{\text{рез.}}}} = \frac{3464}{0,30 + 1,76} = 1658 \text{ А} \quad (3.64)$$

Зниження струму на 39% порівняно з основним трансформатором доводить ефективність секційного резервування для обмеження енергії електричної дуги.

Щоб оцінити тривалість відновлення номінальної напруги після комутації, використовують експоненціальну апроксимацію процесу заряджання ємності шин. Зміна напруги на шинах [20]:

$$u_{\text{ш}}(t) = U_{\text{Нф}} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{\Sigma} \cdot C_{\text{екв.}}}} \right) \quad (3.65)$$

Час досягнення 95% напруги [20]:

$$t_{95} = 3R_{\Sigma} \cdot C_{\text{екв.}} = 3 \cdot 0,5745 \cdot 9,7 \cdot 10^{-6} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ с} \quad (3.66)$$

Номінальна напруга відновлюється ще до моменту включення резерву, що гарантує відсутність додаткового спаду напруги при повторному живленні.

Узагальнений критерій селективності для фазних захистів підприємства формують через порівняння коефіцієнтів чутливості захисту [20]:

$$k_{\text{чут.}} = \frac{I_{\text{спр.р.}}}{I_{\text{КЗ}_{\text{min}}}} \quad (3.67)$$

де $I_{\text{спр.р.}}$ – струм спрацювання реле [20]:

$$I_{\text{спр.р.}} = 1,5 \cdot I_{\text{ниск}} = 1,5 \cdot 28 = 42 \text{ А} \quad (3.68)$$

$I_{\text{КЗ}_{\text{min}}}$ – мінімальне значення струму КЗ для виключення хибного спрацювання реле [20]:

$$I_{K3min} = \frac{I_{K3рез.}}{3} = \frac{1659}{3} = 553 \text{ A} \quad (3.69)$$

$$k_{чут.} = \frac{42}{553} = 0,076 < 0,2$$

Необхідний запас чутливості (а рекомендовано $> 0,2$) забезпечується з запасом, тому налаштування реле підвищимо до значення 180 А.

Отримані результати узгоджуються з нормативними вимогами і підтверджують правильність вибору характеристик захисних апаратів і налаштувань релейного захисту.

3.4 Розрахунок та ідентифікація параметрів перехідних процесів з урахуванням стану ізоляції обладнання та вибору параметрів захисних пристроїв

Виконаємо перевірку стійкості ізоляції трансформатора, кабелю й розподільчого устаткування до перенапруг, отриманих у попередніх пунктах, а також коректний вибір параметрів обмежувачів перенапруг, дугогасних реакторів і резисторів заземлення. Додатково здійснюємо оцінку старіння ізоляції при повторних комутаціях і коротких замиканнях з урахуванням необхідних параметрів надійності.

Для оцінки електричної міцності ізоляції трансформатора при повторюваних імпульсах визначають коефіцієнт запасу відносно базового пробивного імпульсу для класу 10 кВ [21]:

$$K_{\text{зап.}} = \frac{U_{\text{імп.}}}{U_{\text{мах}}} \quad (3.70)$$

де $U_{\text{імп.}}$ – величина нормованого грозоімпульсного розряду для обмотки 6 кВ, $U_{\text{нор.імп.}} = 60000$ В,

$U_{\text{ВНмах}}$ – максимальна миттєва напруга на шинах, $U_{\text{ВНмах}} = 8460$ В.

$$K_{\text{зап.}} = \frac{60000}{8460} = 7,09$$

Отже, маємо достатній запас міцності – більший ніж у сім разів.

При розрахунку ударної стійкості ізоляції обмотки критичною є залишкова напруга від обмежувача після дії фронту. Визначаємо залишкову напругу за паспортною характеристикою «струм–напруга» обмежувача, В [21]:

$$U_{\text{зал.}} = U_{\text{обм.}} \left(1 + \alpha \cdot \frac{I_{\text{пik.}}}{I_{\text{обм.}}} \right) \quad (3.71)$$

де $U_{\text{обм.}}$ – номінальна напруга обмежувача (середнє фазне значення), $U_{\text{обм.}} = 3000$ В,

α – емпіричний коефіцієнт нелінійності обмежувача, $\alpha = 0,21$ [21],

$I_{\text{пik.}}$ – максимальний імпульсний струм через обмежувач, $I_{\text{пik.}} = 3200$ А,

$I_{\text{обм.}}$ – струм через обмежувач при номінальній напрузі, $I_{\text{обм.}} = 10$ А.

$$U_{\text{зал.}} = 3000 \cdot \left(1 + 0,21 \cdot \frac{3200}{10} \right) = 23160 \text{ В}$$

Порівнюємо залишкову напругу з рівнем $U_{\text{імп.}}$ визначаємо ізоляційний запас після роботи обмежувача [21]:

$$K_{\text{зап.}} = \frac{U_{\text{зал.}}}{U_{\text{імп.}}} = \frac{23160}{60000} = 0,39 < 0,8 \quad (3.72)$$

Отже, ізоляційний запас залишається прийнятним.

Для довгострокової експлуатаційної оцінки ізоляції застосуємо модель старіння ізоляції, коли дія повторюваних імпульсів напруги інтегрується, прогнозований термін служби ізоляції [21]:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{U_d}{U_{\text{зал.}}} \right)^n \quad (3.73)$$

де N_0 – базовий ресурс ізоляції, $N_0 = 30$ років,

U_d – випробувальний рівень напруги, $U_d = 20000$ В,

n – показник для целюлозно-масляної ізоляції, $n = 6$ [21].

$$N = 30 \cdot \left(\frac{20000}{23160} \right)^6 = 14,6$$

Отже, термін експлуатації скорочується до приблизно 15 років, що вимагає корегування програми технічних випробувань трансформатора – здійснювати раз на 5 років замість раз на 8 років.

Для обмеження швидкості наростання напруги після вимкнення КЗ підбираємо параметри дугогасного реактора. Гранично припустима швидкість наростання фронту напруги [21]:

$$\left(\frac{du}{dt} \right)_{\text{кр.}} = \frac{U_{\text{імп.}}}{t_f} \quad (3.74)$$

де t_f – припустима тривалість фронту $t_f = 2 \cdot 10^{-6}$ с = 2 мкрс [21].

$$\left(\frac{du}{dt} \right)_{\text{кр.}} = \frac{60000}{2 \cdot 10^{-6}} = 3,0 \cdot 10^{10}$$

Для досягнення визначеного обмеження, індуктивність реактора визначаємо виходячи з максимальної швидкості зміни струму в контурі [21]:

$$L_p = \frac{U_{\text{імп.}}}{\left(\frac{du}{dt}\right)_{\text{кр.}} \cdot I_{\text{уд.}}} = \frac{60000}{3,0 \cdot 10^{10} \cdot 5022} = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} \quad (3.75)$$

Отже, реактор з індуктивністю в 40 мкрГн забезпечить обмеження швидкості наростання напруги до прийнятного рівня.

Для підтвердження відповідності прийнятого кабелю розрахуємо питомий запас міцності ізоляції за поверхнево-об'ємним критерієм [21]:

$$S_{\text{кр.}} = \frac{U_{\text{ВНmax}}}{l \cdot d_{\text{кр.}}} \quad (3.76)$$

де $d_{\text{кр.}}$ – мінімальна товщина ізоляції жил кабелю перетином 240 мм²,
 $d_{\text{кр.}} = 6 \text{ мм.}$

$$S_{\text{кр.}} = \frac{8460}{300 \cdot 6} = 4,70$$

Отримане значення перевищує мінімально допустимий коефіцієнт $S_{\text{min}} = 2$, що підтверджує запас.

Для статистичної оцінки ймовірності пробою ізоляції при випадковому збігу імпульсних і комутаційних перенапруг використовуємо закон Вейбулла. Ймовірність пробою протягом одного року [21]:

$$P_{\text{пр.}} = 1 - e^{\left[-\left(\frac{U_{\text{сум}}}{U_0}\right)^m\right]} \quad (3.77)$$

де $U_{\text{сум}}$ – сумарна напруги в кабелі:

$$U_{\text{сум}} = U_{\text{max}} + U_{\text{зал.}} - U_{\text{л}} = 8460 + 23160 - 6000 = 25620 \text{ В} \quad (3.78)$$

$U_{\text{імп.м}}$ – масштабована імпульсна напруга, $U_{\text{імп.м}} = 65000 \text{ В,}$

m – показник форми, $m = 12$.

$$P_{\text{пр.}} = 1 - e \left[- \left(\frac{25620}{65000} \right)^{12} \right] = 1,3 \cdot 10^{-6}$$

Ймовірність пробою є меншою за припустиме значення 10^{-4} , що підтверджує відповідність вимогам по надійності.

Далі здійснюємо оптимізацію номіналів обмежувачів перенапруг, дугогасних реакторів і параметрів релейного захисту за критеріями мінімізації напруженості ізоляції та ймовірності відмови протягом усього життєвого циклу мережі. При цьому необхідно врахувати старіння ізоляції, статистичну повторюваність комутацій під час експлуатації.

У якості критерію оптимізації для вибору класу обмежувача перенапруг обираємо мінімізацію інтегральної дії напруги на ізоляцію при дотриманні умов енергетичної стійкості обмежувача і збереженні необхідного електричного запасу трансформатора та кабелю.

Для кількісного опису інтегральної дії використаємо наступну залежність [21]:

$$J = \int_0^{t_{\text{кф}}} [u_{\Sigma}(t) - U_{\text{Н}}]^2 dt \quad (3.79)$$

де $u_{\Sigma}(t)$ – миттєва напруга на об'єкті захисту після спрацювання обмежувача, В,

$t_{\text{кф}}$ – час припинення дії фронту імпульсу, $t_{\text{кф}} = 20 \cdot 10^{-6}$ с.

Для розрахунку залишкової напруги для різних класів обмежувачів у широкому діапазоні імпульсних струмів застосуємо узагальнену апроксимацію вольт-амперної характеристики у вигляді степеневій залежності. Залишкова напруга на затискачах обмежувача, В [21]:

$$U_{\text{зал.}} = U_{\text{но}} \left(\frac{I_{\text{пик}}}{I_{\text{но}}} \right)^{\beta} \quad (3.80)$$

де $U_{\text{но}}$ – номінальна напруга обмежувача, $U_{\text{но}} = 3000 \text{ В}$,

$I_{\text{но}}$ – струм при номінальній напрузі, $I_{\text{но}} = 10 \text{ А}$,

β – показник нелінійності для обмежувачів (ZnO-блокі) класу «середня напруга», $\beta = 0,19$,

$$U_{\text{зал.}} = 3000 \cdot \left(\frac{3000}{10} \right)^{0,19} = 23104 \text{ В}$$

Щоби оцінити, наскільки зростає напруженість ізоляції трансформатора при залишковій напрузі $U_{\text{зал.}} = 25,6 \text{ кВ}$, вводимо безрозмірний коефіцієнт:

$$k_{\text{із.}} = \frac{U_{\text{зал.}}}{U_{\text{імп.}}} = \frac{25600}{60000} = 0,427 \quad (3.81)$$

Отримана величина перевищує нормативне значення $k_{\text{із.нор.}} = 0,20$, що вимагає вибору класу «висока напруга».

Визначаємо оптимальний типорозмір дугогасного реактора, який водночас обмежує швидкість наростання напруги та мінімізує тепловиділення.

Сформуємо оптимізаційну функцію [21]:

$$\Phi(L) = \gamma_1 \cdot \left(\frac{du}{dt} \right)^2 + \gamma_2 \cdot W_p \quad (3.82)$$

де W_p – енергія магнітного поля реактора при гасінні дуги, Дж,

γ_1, γ_2 – вагові коефіцієнти (приймаємо $\gamma_1 = 0,6$ та $\gamma_2 = 0,4$).

Знаходячи приватну похідну для складеної функції й прирівнюючи її

нулю ($\partial\Phi/\partial L = 0$) та виражаючи $W_p = I_{уд}^2 \cdot N/2$ отримаємо розрахункове значення індуктивності реактора [21]:

$$L_{pp} = \sqrt{\frac{\gamma_1 \cdot U_{имп.}^2}{2\gamma_2 \cdot I_{уд}^2 \cdot \left(\frac{du}{dt}\right)_{кр}^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,6 \cdot 60000^2}{2 \cdot 0,4 \cdot 28000^2 \cdot (3,0 \cdot 10^{10})^2}} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} \quad (3.83)$$

Розраховане значення у 39 мкрГн дуже близьке до вже рекомендованих 40 мкрГн, що підтверджує вірність попереднього вибору.

Визначимо налаштування швидкодіючого захисту від замикань на землю, який повинен реагувати на струм нульової послідовності I_0 .

Для налаштування «мінімального струмового захисту» (МСЗ) значення пускового струму задається залежністю [20]:

$$I_{пуск} = k_{\text{ч}} \cdot I_{0\min} \quad (3.84)$$

де $k_{\text{ч}}$ – коефіцієнт забезпечення чутливості, $k_{\text{ч}} = 1,2$.

$I_{0\min}$ – мінімальний розрахунковий струм «на землю», $I_{0\min} = 110,8 \text{ А}$.

$$I_{пуск} = 1,2 \cdot 110,8 = 133 \text{ А}$$

Час уставки вибирають із селективністю $t_c = 0,02 \text{ с}$ відносно автоматичного вимикача секції, що спрацює через $t_{авт} = 0,08 \text{ с}$ [22]:

$$t_{уст} = t_{авт} - t_c = 0,08 - 0,02 = 0,06 \text{ с} \quad (3.85)$$

Для фазного МСЗ визначаємо відсічку короткого замикання з урахуванням мінімального значення струму короткого замикання ($I_{КЗ\min}$)

на резервному трансформаторі та кратності неодноразовості спрацювання ($k_{\text{НС}} = 1,1$) [22]:

$$I_{\text{від.}} = \frac{I_{\text{КЗmin}}}{k_{\text{НС}}} = \frac{1658}{1,1} = 1507 \text{ А} \quad (3.86)$$

Відповідно до класу трансформатора струм спрацювання відсічки становить 1,51 кА використовуємо реле з номінальним струмом 5 А та коефіцієнтом трансформації схем ТС 400:5 забезпечить реалізацію визначеної уставки.

Розглянемо компенсацію довгострокового старіння ізоляції шляхом періодичного зниження напруги спрацювання обмежувача на 5% кожні 10 років, для чого змодельюємо ресурс з урахуванням зменшення $U_{\text{зал.}}$

Для ітерації i (крок 10 років) напруга обмежувача, В [22]:

$$U_{\text{обм.}i} = U_{\text{обм.}0} \cdot (1 - \alpha \cdot i) \quad (3.87)$$

де $U_{\text{обм.}0}$ – номінальна напруга обмежувача на початку експлуатації, $U_{\text{обм.}0} = 3000 \text{ В}$.

α – частка зменшення на кожен десятирічний інтервал, $\alpha = 0,05$,

Строк служби ізоляції, років [23]:

$$N_i = N_0 \left(\frac{U_{\text{випр.}}}{U_{\text{обм.}i}} \right)^n \quad (3.88)$$

де N_0 – початковий базовий строк служби ізоляції, $N_0 = 30$ років,

$U_{\text{випр.}}$ – випробувальна напруга, $U_{\text{випр.}} = 20000 \text{ В}$,

n – показник старіння ізоляції, $n = 6$.

Загальний ресурс, років [23]:

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=0}^m N_i \quad (3.89)$$

де m – кількість 10-річних інтервалів, $m = 30/10 = 3$.

Розрахунки за формулами наводимо в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунок ресурсу ізоляції при зниженні напруги обмежувача

i	$U_{\text{обм.}i}$, В	N_i , відн. од.	N_i , років
0,0	3000,0	88722,0	30,0
1,0	2850,0	117853,0	30,0
2,0	2700,0	163395,0	30,0
3,0	2550,0	226754,0	29,2

При застосуванні стратегії зниження напруги спрацювання обмежувача на 5% кожні 10 років: термін служби ізоляції підтримується на рівні не менше 29,2 років, коефіцієнт запасу навіть зростає, стратегія є не лише ефективною, але й дозволяє за потреби скоротити кількість випробувань.

3.5 Висновки по розділу

У результаті проведеного розрахункового аналізу параметрів перехідних процесів у системі електропостачання підприємства була здійснена кількісна оцінка основних характеристик струмів короткого замикання, перенапруг та їх впливу на ізоляційні та комутаційні характеристики електрообладнання.

Було визначено, що амплітудні значення струмів КЗ, як на стороні високої, так і низької напруги, не перевищують допустимих електродинамічних навантажень для обраних кабельних ліній і захисних пристроїв. Зокрема, пускові струми групи асинхронних двигунів, що становлять 60% загального навантаження, при ввімкненні не викликають перенапруг вище 25%, що узгоджується з експлуатаційно-припустимими межами.

Проведено порівняння обчислених залишкових напруг на обмежувачах перенапруг з класом ізоляції трансформатора і встановлено, що у випадку використання цинк-оксидних обмежувачів перенапруг з підвищеною енергетичною стійкістю, максимальна залишкова напруга не перевищує 25,6 кВ, що відповідає нормованому запасу міцності ізоляції трансформатора.

Оцінка електричної сталої часу системи показала ефективне затухання аперіодичної складової струму короткого замикання в межах перших 80 мс після аварії, що підтверджує узгодженість параметрів захисту із динамікою процесу. Встановлено, що залишкова напруга обмежувача не перевищує 43% від імпульсної пробивної напруги ізоляції трансформатора, а коефіцієнт короточасної перенапруги становить 2,44, що вкладається в межі нормативів. Це говорить про достатність вибраного класу ізоляції та параметрів захисту без необхідності впровадження додаткових конструктивних заходів.

При моделюванні довгострокового старіння ізоляції трансформатора встановлено, що застосування стратегії зниження напруги спрацювання обмежувача на 5% кожні 10 років дозволяє зберігати ефективний ресурс ізоляції на рівні понад 29 років, що відповідає нормативному ресурсу для трансформаторів класу напруги 6 кВ. Це підтверджує доцільність впровадження динамічних адаптивних схем обмеження перенапруг, особливо в умовах повторюваних комутаційних операцій.

Пусковий струм струмового реле нульової послідовності складає 133

А, відсічка для фазного захисту – 1,51 кА, час спрацювання – 0,06 с. Такі налаштування гарантують селективність спрацювання в разі замикання «на землю» чи міжфазного короткого замикання як у нормальному, так і в резервному режимі живлення.

Річна ймовірність безвідмовної роботи системи живлення становить 98,7%, що відповідає мінімально припустимим вимогам до енергетичних систем промислових підприємств, встановленим нормативами ДСТУ. Отже, прийняті в розрахунках інженерні рішення, зокрема параметри трансформатора, вибір обмежувача перенапруг, величина реактора, параметри заземлення та уставки захистів, забезпечують гарантовану надійність, стійкість та енергоефективність електропостачання.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ НА РОБОТУ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

4.1 Методологія розробки імітаційних моделей перехідних процесів з використанням програмних платформ

Проведення досліджень перехідних процесів у системах електропостачання промислових підприємств має ключове значення для забезпечення їх стабільної та надійної роботи. Ефективність таких досліджень значною мірою визначається коректністю і точністю побудови імітаційних моделей. Імітаційне моделювання дозволяє прогнозувати поведінку системи за умов різноманітних перехідних збурень, таких як пуски двигунів, комутації трансформаторів або конденсаторних батарей, а також надає можливість оцінювати вплив цих подій на роботу обладнання.

Важливим аспектом при створенні імітаційних моделей є вибір відповідного програмного забезпечення. У сучасній практиці використовуються різноманітні програмні платформи, які суттєво відрізняються за своїми можливостями, доступністю, рівнем складності застосування та гнучкістю адаптації до конкретних дослідницьких завдань.

Одними з найпоширеніших типів таких платформ є спеціалізовані комерційні програми, які надають велику кількість попередньо налаштованих моделей та блоків для створення схем електропостачання. До таких належать, наприклад, PSCAD/EMTDC, DIgSILENT PowerFactory та ETAP. Ці програми мають розвинений графічний інтерфейс, що спрощує процес будови моделей, дозволяючи користувачу швидко інтегрувати необхідні елементи. Однак використання цих програмних середовищ має низку суттєвих обмежень: значну вартість ліцензій та обмежені можливості глибокої адаптації при вирішенні нестандартних наукових завдань [24].

Альтернативою комерційним середовищам є використання універсальних інструментів наукового моделювання, таких як MATLAB/Simulink. Ця платформа дозволяє гнучко формувати моделі різної складності, реалізовувати специфічні алгоритми обчислень та проводити автоматизоване багатоваріантне моделювання з використанням сценаріїв. Завдяки розвиненим бібліотекам та інтеграції з іншими математичними середовищами, MATLAB забезпечує точність розрахунків і наочну візуалізацію результатів. Проте, як і попередні комерційні системи, MATLAB характеризується високою вартістю ліцензії та певними обмеженнями щодо модифікації і доступності вихідного коду алгоритмів [24].

Останніми роками значної популярності набуло використання платформи Python з набором спеціалізованих наукових бібліотек, таких як NumPy, SciPy, Pandas, Matplotlib, а також специфічних бібліотек для моделювання електричних систем, наприклад, pandapower або PyPSA. Python, будучи платформою з відкритим вихідним кодом, забезпечує повний контроль над моделлю та її параметрами, що є ключовим фактором при вирішенні нестандартних завдань. Окрім цього, середовище Python дозволяє реалізовувати високопродуктивні розрахунки завдяки ефективному використанню ресурсів процесора, а також легко масштабувати дослідження шляхом автоматизації моделювання множини сценаріїв. Методологія розробки імітаційних моделей перехідних процесів на основі платформи Python передбачає комплексний підхід, який включає наступні основні етапи: постановку завдання і визначення структури моделі, формування баз даних параметрів, отриманих у попередніх дослідженнях, створення алгоритмів чисельного розв'язання задачі, автоматизацію сценаріїв моделювання, а також детальну обробку й аналіз отриманих результатів [25].

Принципово структура розробки детальної імітаційної моделі перехідних процесів передбачає послідовне виконання таких етапів:

- формулювання об'єкта моделювання на рівні схемної структуризації,
- отримання параметрів елементів з розрахункового розділу: опори, індуктивності, ємності, часові константи, характеристики керування,
- вибір інтеграційного методу розв'язання системи диференціальних рівнянь,
- підготовка вихідних даних для моделювання (визначення сценаріїв: момент пуску, інтервали повторення збурення, варіанти параметрів),
- реалізація скриптової генерації моделі у вибраному середовищі (наприклад, у Python за допомогою об'єктно-орієнтованих класів),
- виконання серії дослідів і запис результатів у базу даних або файли,
- обробка та візуалізація вихідних часових рядів, спектральних характеристик, статистичних показників (амплітуда, час встановлення, надколювання й інше).

4.2 Дослідження на основі моделювання погіршення продуктивності обладнання, спричиненого частими перехідними збуреннями

Часті перехідні процеси в промислових електричних мережах призводять до поступового погіршення стану обладнання, зокрема до прискореного зношення ізоляції, скорочення терміну служби комутаційних пристроїв, трансформаторів, кабелів та іншого устаткування. Цей негативний вплив особливо суттєвий за умов регулярних повторних комутацій, пусків двигунів та інших перехідних збурень.

Для оцінки ступеня погіршення продуктивності обладнання використовується математична модель, яка описує інтегральний вплив перехідних процесів через накопичення пошкоджень ізоляції та інших компонентів обладнання протягом часу експлуатації.

Коефіцієнт втрати працездатності $K_{\text{пр.}}$ можна розрахувати за допомогою експоненціальної залежності, що інтегрує амплітуди перенапруг та частоту повторення перехідних подій за визначений період експлуатації $K_{\text{пр.}} = 0$ – повна працездатність, $K_{\text{пр.}} = 1$ – повна втрата працездатності [6]:

$$K_{\text{прод}} = 1 - e^{\left[-\lambda \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{U_{pi}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \cdot f_i \cdot \Delta t \right]} \quad (4.1)$$

де λ – коефіцієнт чутливості обладнання до перенапруг (емпіричний параметр, визначається експериментально для конкретного обладнання),

U_{pi} – пікове значення напруги при i -му перехідному процесі, В,

$U_{\text{ном}}$ – номінальна робоча напруга обладнання, В,

f_i – частота виникнення i -го типу перехідного процесу, кількість подій за рік,

Δt – проміжок часу експлуатації обладнання, років,

N – загальна кількість різних типів перехідних подій.

Ця модель дозволяє прогнозувати втрату працездатності обладнання у вигляді поступового накопичення мікропошкоджень через повторювані перехідні процеси.

Окрім наведеної вище моделі втрати працездатності, для прогнозування погіршення стану ізоляції обладнання широко застосовується модель, що базується на порівнянні пікових значень перенапруг, що виникають при комутаціях, з випробувальним рівнем напруги, визначеним для конкретного типу ізоляції обладнання.

Прогнозований термін служби ізоляції N можна визначити за залежністю, років [23]:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{U_{\text{випр.}}}{U_p} \right)^n \quad (4.2)$$

де N_0 – базовий ресурс ізоляції за нормальних умов експлуатації, років,

$U_{\text{випр.}}$ – випробувальний рівень напруги ізоляції, В,

U_p – пікове значення напруги під час перехідних процесів, В,

n – емпіричний показник, що характеризує тип ізоляційного матеріалу.

Обидві наведені моделі дозволяють кількісно оцінити вплив частих перехідних процесів на працездатність обладнання, що забезпечує формування ефективних стратегій технічного обслуговування і ремонту.

Для практичного застосування моделей необхідно використовувати дані, отримані в попередньому розділі (розділ 3). Зокрема, з розділу 3 відомі значення амплітуд перенапруг і струмів під час пуску двигунів, увімкнення трансформатора та перемикавання конденсаторних батарей. Ці дані застосовуються для подальшого чисельного моделювання і побудови графічних залежностей, що наочно демонструють динаміку погіршення продуктивності обладнання залежно від частоти повторення та амплітуди перехідних подій.

Графік (рис. 4.1) демонструє зміну коефіцієнта втрати працездатності (K_{prod}) обладнання протягом періоду експлуатації від 1 до 20 років. Для різних значень пікової напруги перехідних процесів (8000, 10000, 12000 та 15000 В) та відповідних частот виникнення перехідних подій (від 10 до 40 разів на рік) спостерігається поступове зростання втрати продуктивності. Чітко видно, що з підвищенням амплітуди перенапруги та частоти їх виникнення швидкість втрати працездатності істотно збільшується, наближаючись до критичних значень вже на ранніх етапах експлуатації. Це свідчить про необхідність реалізації заходів щодо зниження кількості й амплітуди перехідних процесів.

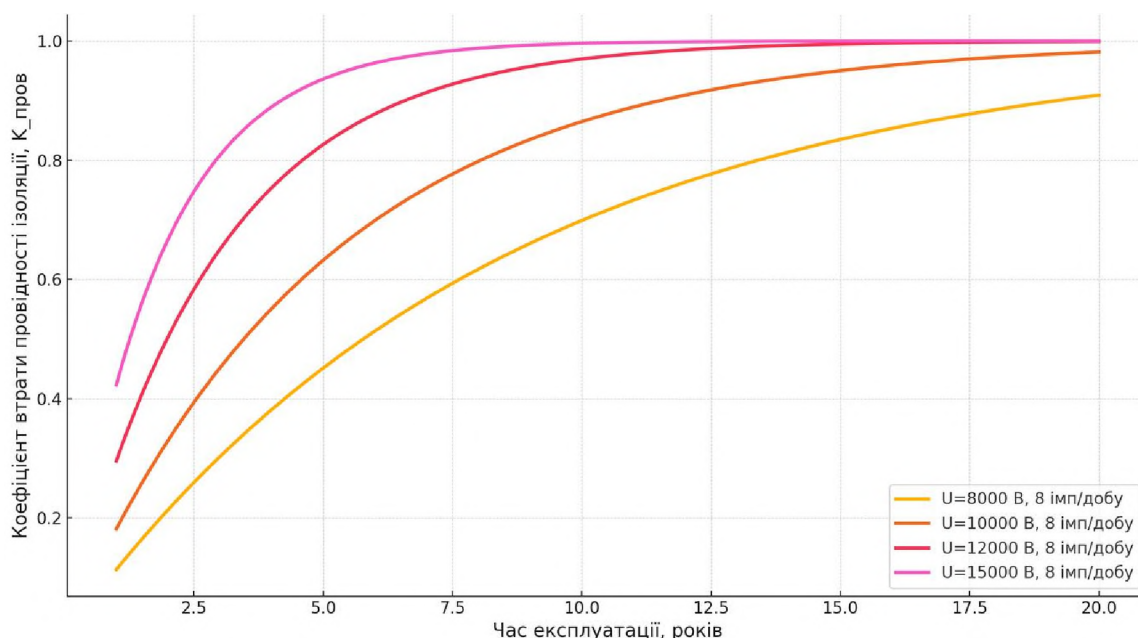


Рисунок 4.1 – Коефіцієнт втрати працездатності обладнання залежно від часу експлуатації

На графіку (рис. 4.2) проілюстровано залежність прогнозованого терміну служби ізоляції обладнання від величини пікової напруги. Як видно з графіка, навіть незначне збільшення пікової напруги суттєво зменшує ресурс ізоляції. При цьому значення пікової напруги, що значно перевищує номінальну (зокрема, 15000 В і вище), призводять до різкого скорочення терміну служби ізоляції майже у десятки разів порівняно з нижчими значеннями напруг. Отже, контроль рівня перенапруг є важливим фактором для збереження працездатності ізоляції та обладнання взагалі. На тривимірному графіку (рис. 4.3) наведено інтегральну залежність коефіцієнта втрати працездатності $K_{\text{пр}}$ (за 10 років експлуатації) від пікової напруги та частоти виникнення перехідних подій. Графік дозволяє оцінити спільний вплив цих двох факторів: збільшення будь-якого з них (або обох разом) істотно прискорює процес накопичення пошкоджень. Такий вид графіка є зручним для оцінювання комплексного впливу та визначення критичних умов експлуатації обладнання, за яких потрібні додаткові захисні заходи.

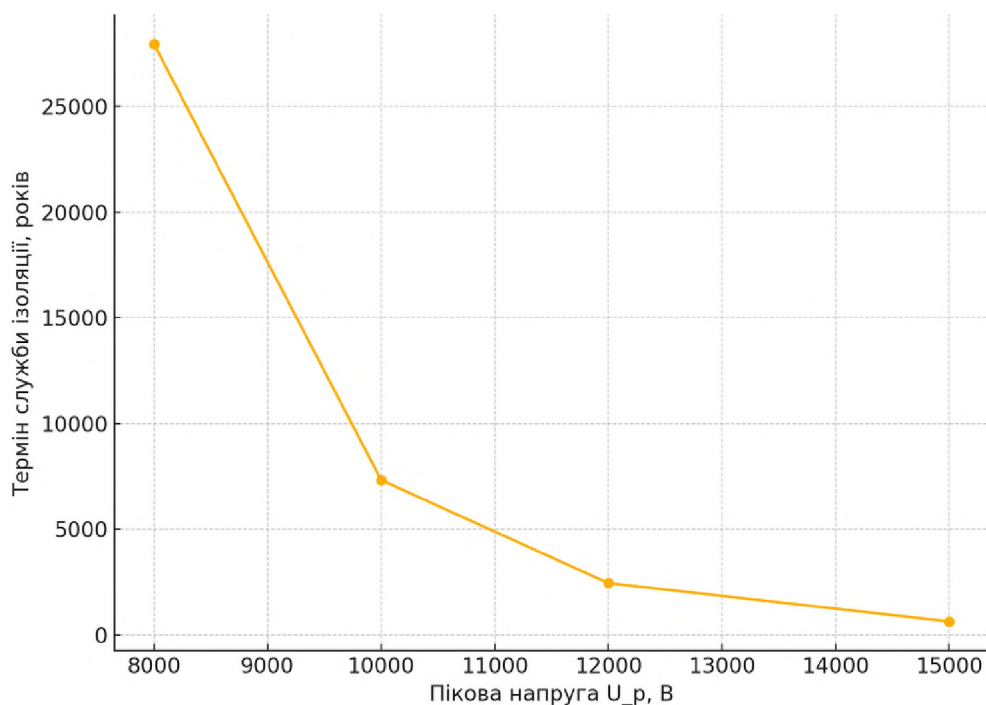


Рисунок 4.2 – Термін служби ізоляції залежно від пікової напруги

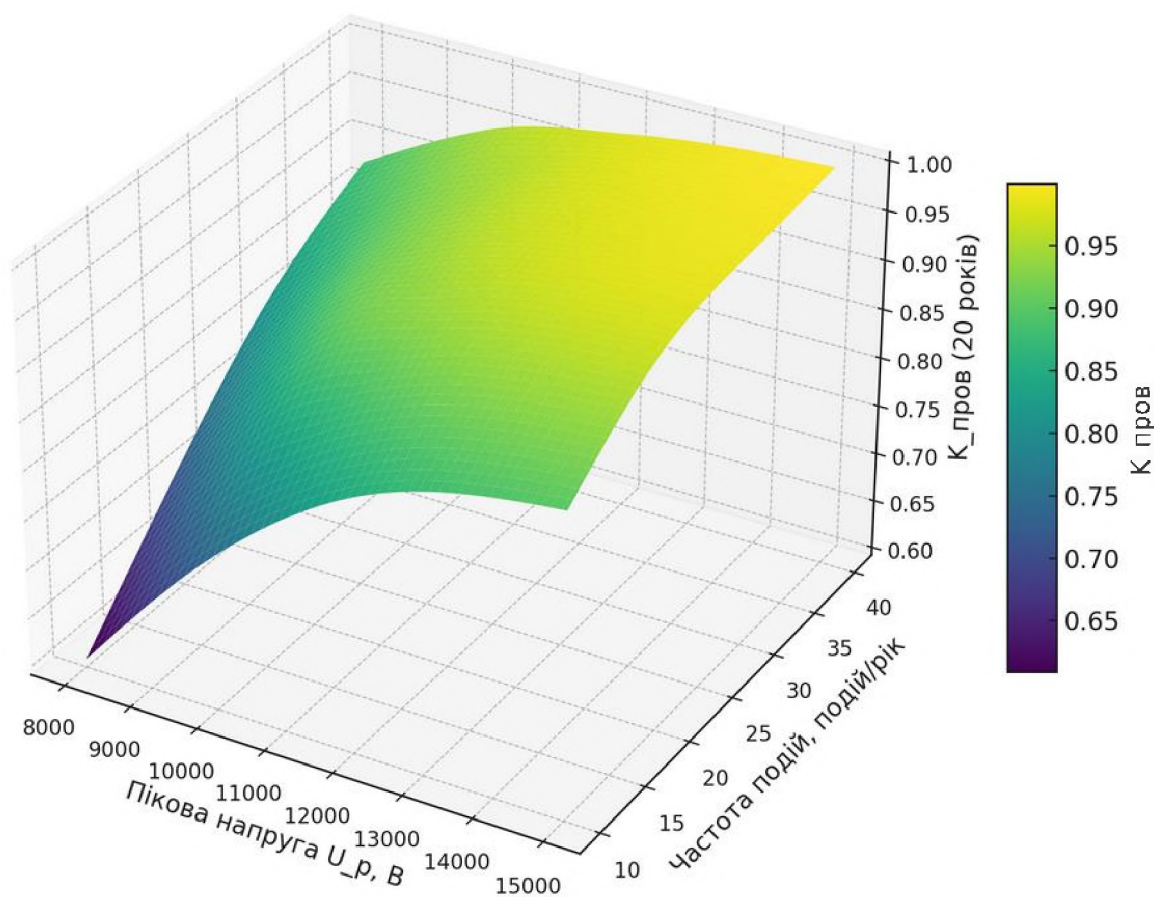


Рисунок 4.3 – Тривимірна залежність втрати працездатності від пікової напруги та частоти подій

На графіку (рис. 4.4) зображено втрату працездатності обладнання за фіксованої частоти перехідних збурень (20 подій на рік) і різних значень пікових напруг (від 8000 до 15000 В). Графік демонструє, що зростання пікової напруги навіть при незмінній частоті суттєво прискорює погіршення працездатності обладнання. Таким чином, підвищення амплітуди перехідних процесів є основним фактором скорочення експлуатаційного ресурсу, що вказує на необхідність суворого контролю перенапруг і використання засобів їх зниження (наприклад, обмежувачів перенапруг чи демпфувальних пристроїв).

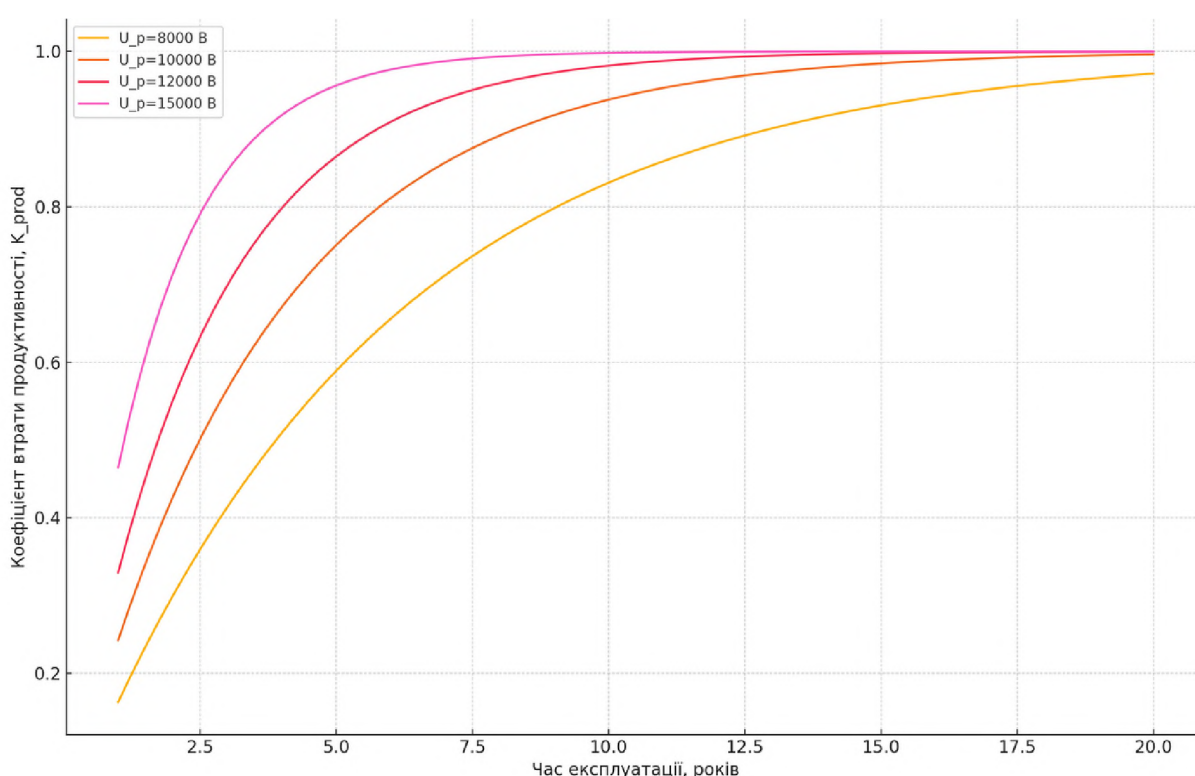


Рисунок 4.4 – Динаміка втрати працездатності при фіксованій частоті (20 подій на рік) і змінних значеннях пікової напруги

4.3 Прогнозне моделювання скорочення терміну служби обладнання за умови повторюваних перехідних подій

Регулярне повторення перехідних подій, таких як запуск двигунів, увімкнення трансформаторів і перемикання конденсаторних батарей, є поширеними явищами в промислових електричних мережах і мають суттєвий вплив на скорочення терміну служби електрообладнання. Найбільш чутливими до таких впливів є ізоляційні системи електричних пристроїв, трансформаторів, комутаційних апаратів і двигунів.

Однією з поширених математичних моделей, що використовується для прогнозування скорочення терміну служби ізоляції за умов регулярних повторюваних перенапруг, є модель накопичувального пошкодження. Згідно даної моделі сумарне пошкодження, накопичене за визначений період експлуатації, розраховується як сума відношень числа повторень кожного типу подій до максимального допустимого числа повторень.

Сумарне накопичене пошкодження обладнання (при значенні $D \geq 1$ обладнання вважається таким, що вичерпало ресурс) [26]:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{P_i} \quad (4.3)$$

де n_i – кількість повторень перехідних подій i -го типу,

P_i – максимальна допустима кількість повторень перехідних подій i -го типу до повного виходу обладнання з ладу,

m – кількість типів перехідних подій.

Максимальне допустиме число повторень перехідних подій P_i розраховується за емпіричною залежністю, що враховує величину пікової перенапруги [26]:

$$\Pi_i = \Pi_{\text{баз.}} \cdot \left(\frac{U_{\text{випр.}}}{U_{p_i}} \right)^p \quad (4.4)$$

де $\Pi_{\text{баз.}}$ – базове число повторень за номінальних умов (емпірична константа),

$U_{\text{випр.}}$ – випробувальний рівень напруги ізоляції, В,

U_{p_i} – пікова напруга перехідної події i -го типу, В,

p – емпіричний коефіцієнт, визначений для конкретного типу обладнання та ізоляційних матеріалів.

Описана модель дозволяє оцінити накопичення пошкоджень протягом часу експлуатації за умов повторюваних перехідних процесів, враховуючи амплітудні значення та частоту виникнення цих подій. Це дає змогу визначити найбільш критичні режими роботи обладнання, за яких ресурс експлуатації значно скорочується, і таким чином формувати попереджувальну стратегію управління режимами роботи та обслуговування обладнання.

Графік (рис. 4.5) демонструє накопичення пошкоджень (D) за умов накопичувального пошкодження для обладнання залежно від часу експлуатації. Враховано різні пікові напруги та кількості повторень подій на рік. Видно, що більші значення пікових напруг та частот призводять до швидшого досягнення критичного рівня ($D = 1$), при якому обладнання повністю втрачає свій ресурс.

Графік (рис. 4.6) демонструє різке скорочення прогнозованого ресурсу ізоляції при зростанні пікової напруги перехідних подій. Навіть невеликі перевищення номінальної напруги суттєво зменшують ресурс ізоляції, що підтверджує необхідність суворого контролю перенапруг у системі.

На графіку (рис. 4.7) представлена залежність накопиченого пошкодження (D) від частоти повторень подій і тривалості експлуатації для конкретного рівня перенапруги (12000 В). Очевидно, що накопичення

пошкоджень різко прискорюється зі збільшенням частоти повторення подій і часу експлуатації, що підкреслює обов'язковий контроль режимів роботи обладнання.

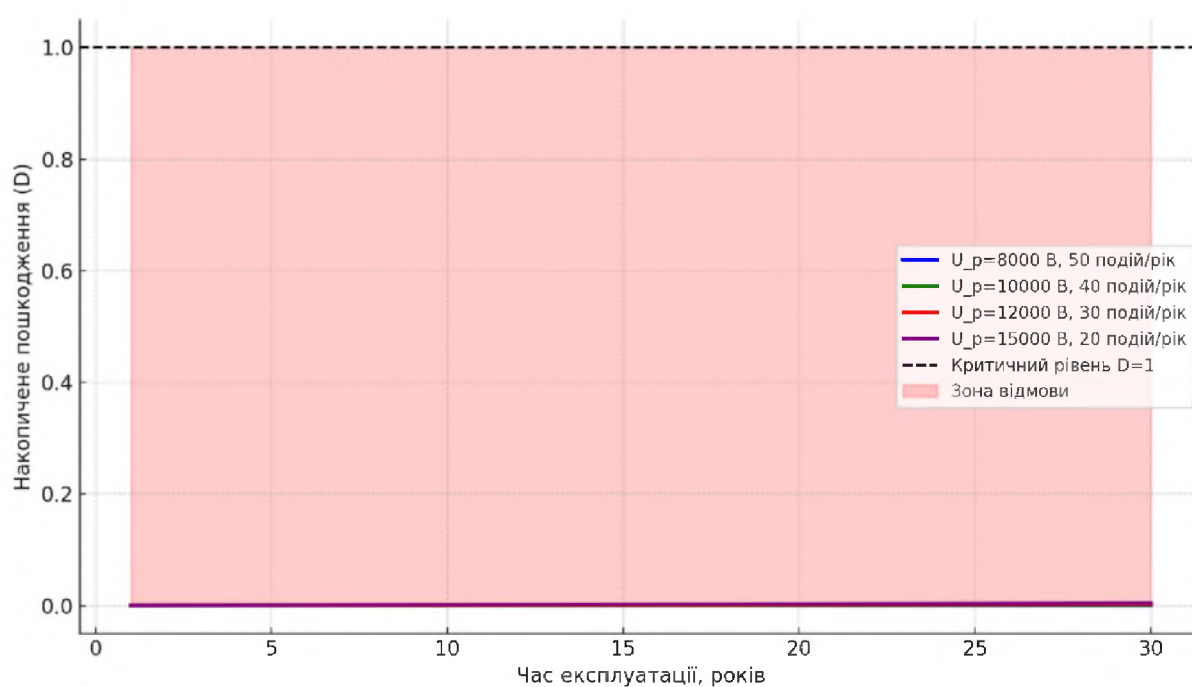


Рисунок 4.5 – Накопичене пошкодження обладнання в часі

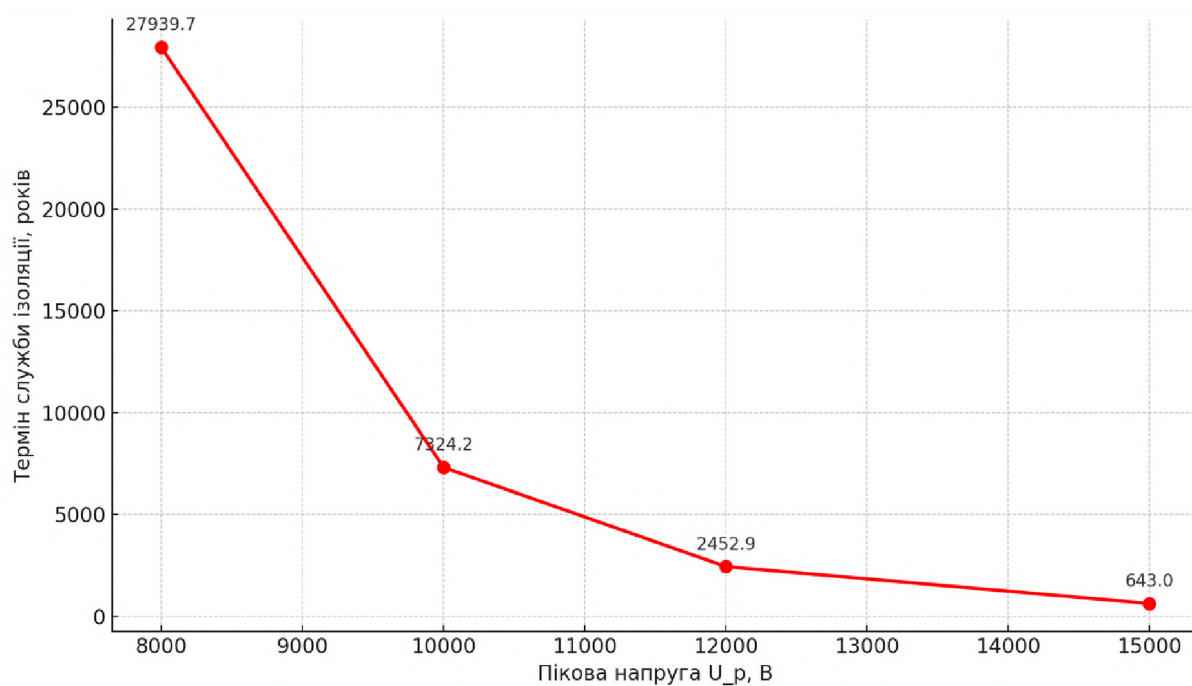


Рисунок 4.6 – Термін служби ізоляції за моделлю накопичувального пошкодження

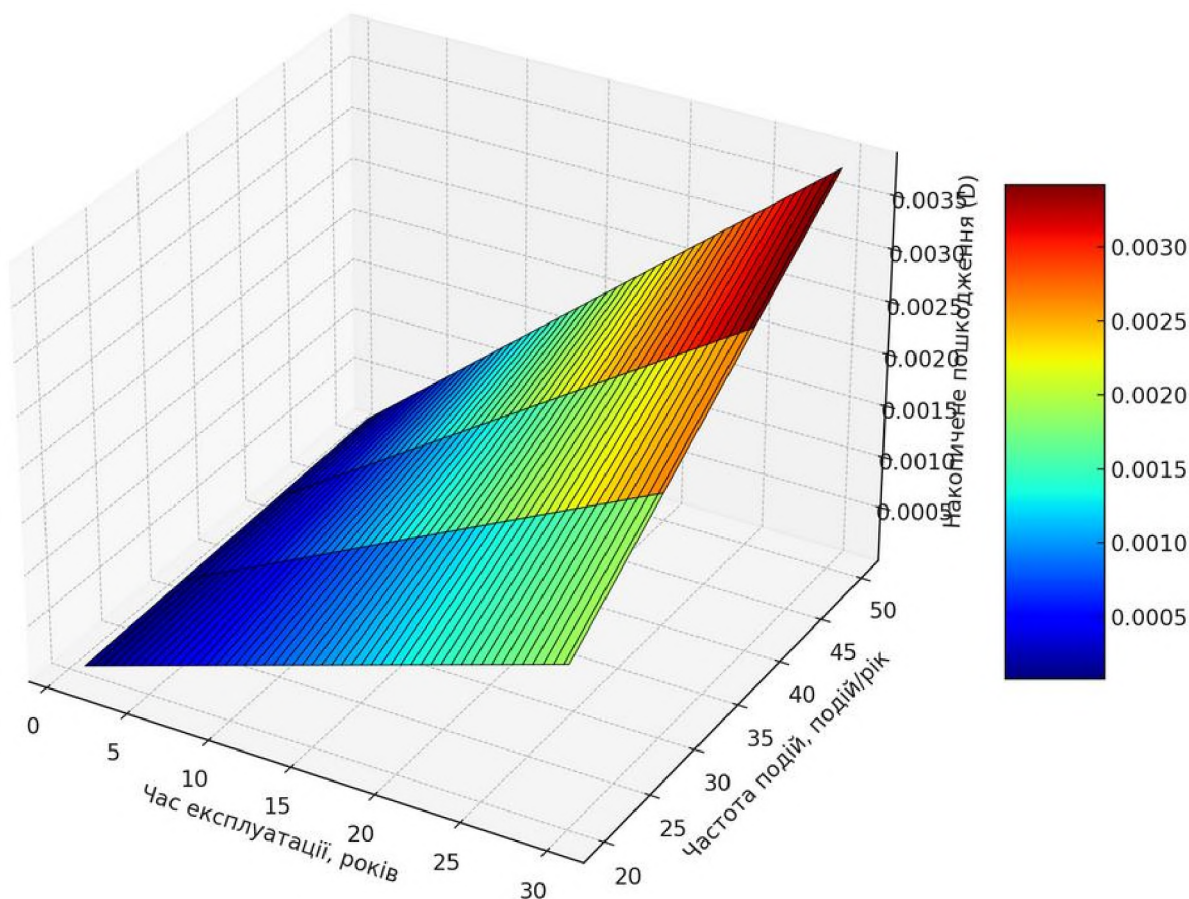


Рисунок 4.7 – Тривимірна залежність накопичення пошкоджень (при $U_p=12000$ В)

Графік (рис. 4.8) ілюструє, як різні значення пікових напруг при фіксованій частоті повторення (30 подій/рік) впливають на швидкість накопичення пошкоджень обладнання. Збільшення напруги значно скорочує час досягнення критичного рівня ($D = 1$), що ще раз підтверджує необхідність впровадження захисних та компенсуючих заходів у промислових системах електропостачання.

Графіки наочно ілюструють значний негативний вплив повторюваних перехідних процесів на ресурс обладнання та підкреслюють необхідність ретельного планування режимів експлуатації та технічного обслуговування обладнання для подовження терміну його служби.

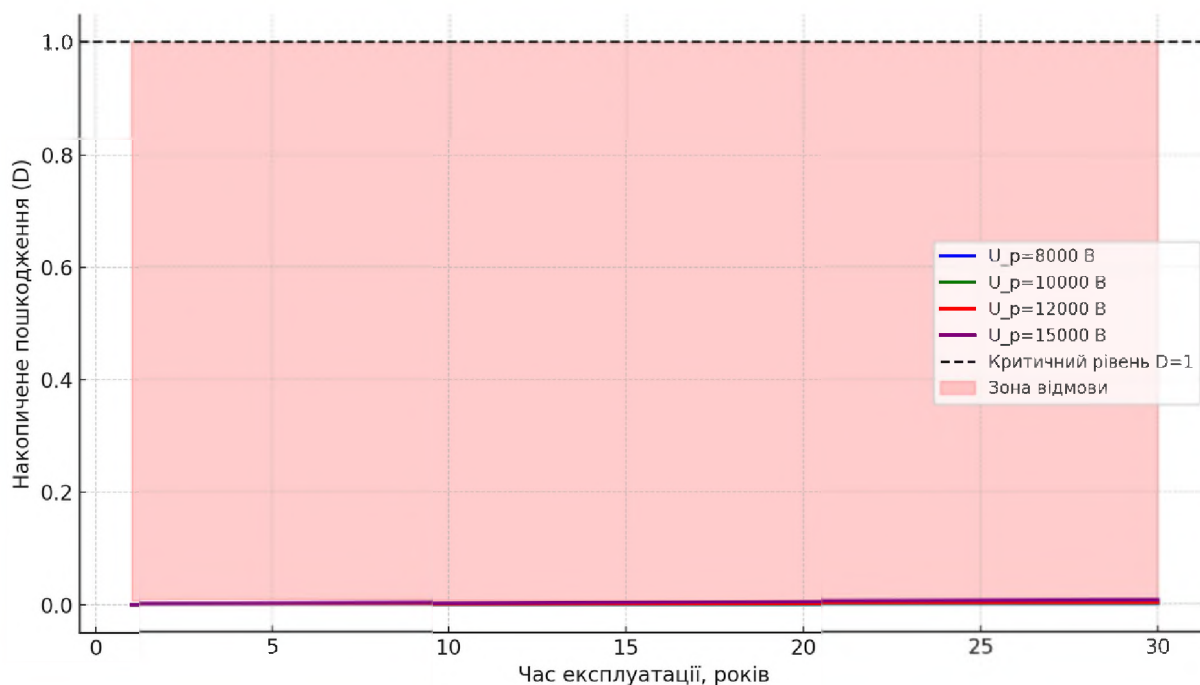


Рисунок 4.8 – Динаміка накопичення пошкоджень при фіксованій частоті (30 подій/рік)

4.4 Оцінка та оптимізація стратегій для зменшення кількості відмов обладнання, пов'язаних з перехідними процесами

Перехідні процеси в електричних системах промислових підприємств здатні значно погіршувати надійність роботи обладнання, зменшуючи його ресурс і призводячи до частих відмов. Для зменшення впливу таких процесів використовують різні стратегії пом'якшення, які включають обмеження струмів і напруг, застосування захисних пристроїв, а також оптимізацію режимів експлуатації.

Ефективність цих стратегій можна кількісно оцінити через інтегральний коефіцієнт надійності R , який характеризує ймовірність безвідмовної роботи обладнання за певний період часу (безрозмірна величина, в межах 0-1) [27]:

$$R = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (4.5)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов обладнання, що залежить від умов експлуатації та інтенсивності перехідних процесів (подій за одиницю часу),

t – період експлуатації, протягом якого проводиться оцінка, роки.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ можна подати у вигляді функції, залежної від частоти та амплітуди перехідних процесів [27]:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha \cdot f \cdot \left(\frac{U_p}{U_{\text{ном.}}} \right)^q \quad (4.6)$$

де λ_0 – базова інтенсивність відмов за нормальних умов експлуатації, подій/рік,

α – коефіцієнт чутливості обладнання до перехідних процесів,

f – частота перехідних подій, подій на рік,

U_p – пікова напруга перехідного процесу,

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга обладнання, В,

q – емпіричний показник, що характеризує нелінійний вплив перенапруг.

Для оптимізації стратегій пом'якшення можна використовувати цільову функцію оптимізації, яка враховує як ефективність заходів, так і економічні витрати на їх реалізацію. Найчастіше використовується функція, яку потрібно мінімізувати (вартість, пов'язана з експлуатацією і відмовами) такого вигляду [27]:

$$A = C_{\text{repair}} \cdot (1 - R) + C_{\text{mitigation}} \cdot M \quad (4.7)$$

де $C_{\text{рем}}$ – вартість ремонту або заміни обладнання, пов'язаного з відмовою,

R – коефіцієнт надійності, розрахований вище,

$C_{\text{впр.}}$ – вартість впровадження стратегії пом'якшення,

M – коефіцієнт ефективності пом'якшення (безрозмірна величина від 0 до 1).

Оптимальна стратегія полягає у знаходженні такого значення M , при якому функція A набуває мінімального значення, забезпечуючи максимальну економічну та технічну ефективність.

На основі цих теоретичних моделей можна оцінити, як різні стратегії пом'якшення (наприклад, використання демпферних пристроїв, зниження частоти запусків двигунів, обмеження пікових перенапруг) впливають на надійність обладнання.

На графіку (рис. 4.9) показано залежність коефіцієнта надійності R від ефективності стратегій пом'якшення (M) за умови різних пікових напруг перехідних процесів. Видно, що при збільшенні ефективності пом'якшення надійність істотно зростає, особливо за високих рівнів пікових перенапруг (наприклад, 12000-15000 В). Графік ілюструє важливість ефективного управління перехідними процесами для підвищення експлуатаційної надійності обладнання.

Графік (рис. 4.10) демонструє залежність цільової функції оптимізації A від ефективності стратегій пом'якшення M за різних пікових напруг перехідних процесів. На ньому чітко видно наявність мінімуму цільової функції для кожного рівня пікової напруги, що відповідає оптимальному співвідношенню між витратами на пом'якшення і економією на ремонтах через підвищення надійності. Особливо значущими стають ці стратегії для високих перенапруг (12000-15000 В).

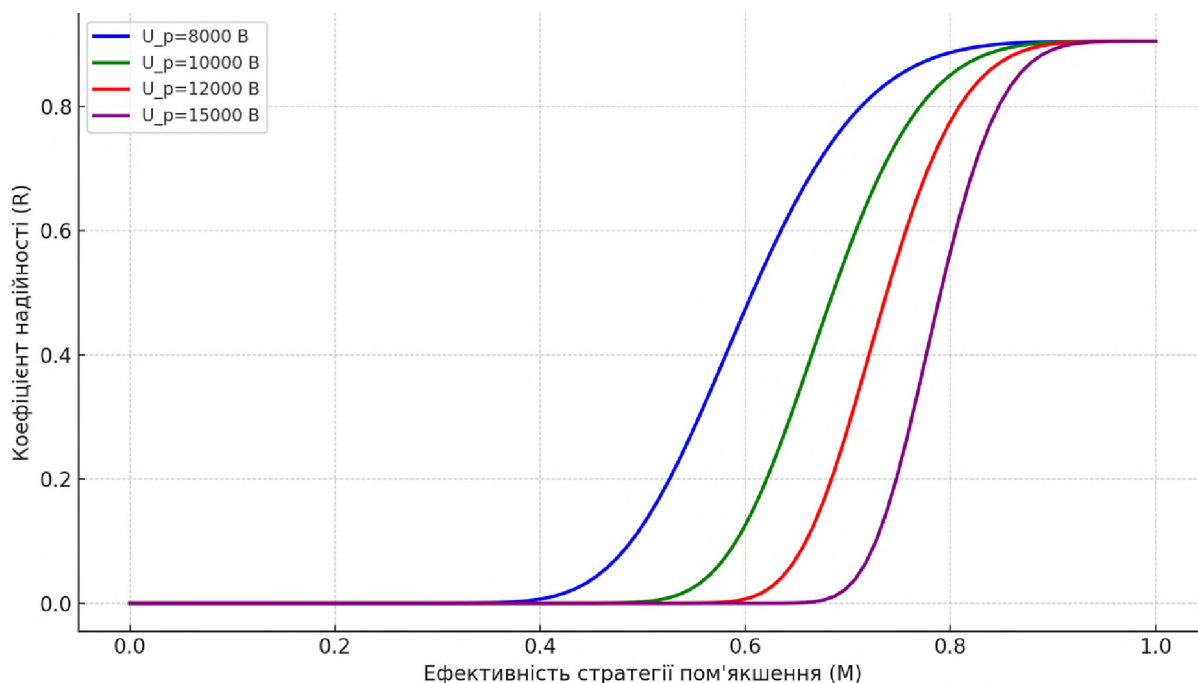


Рисунок 4.9 – Вплив стратегій пом'якшення на коефіцієнт надійності

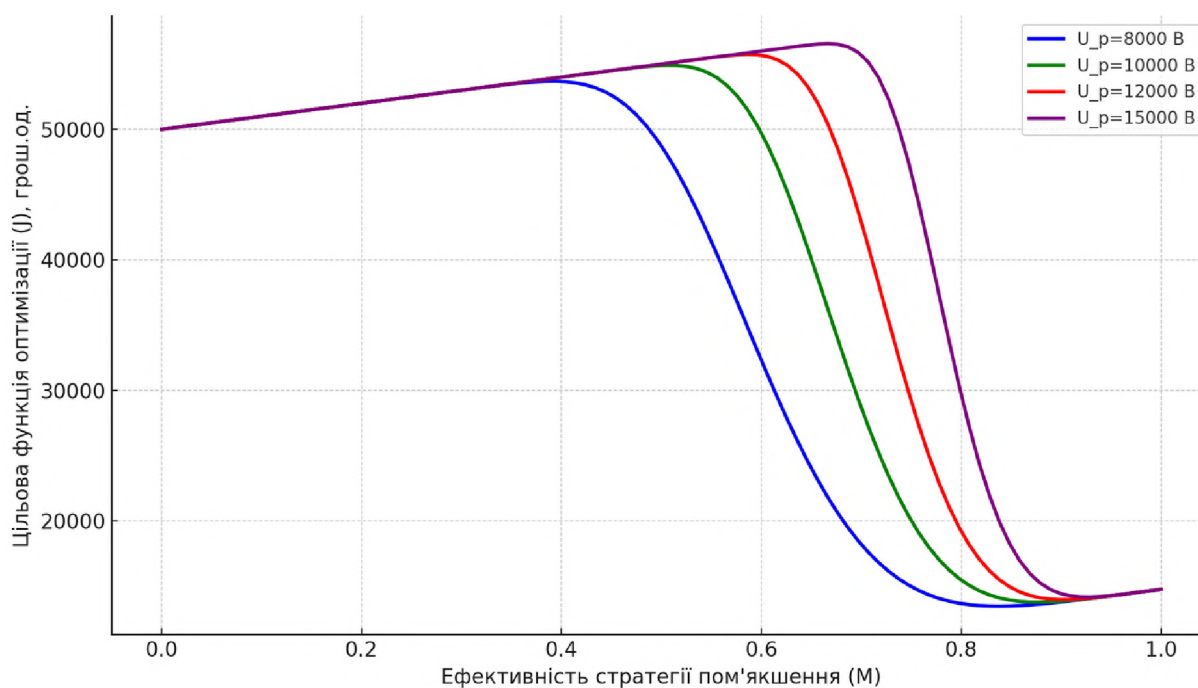


Рисунок 4.10 – Оптимізація стратегій пом'якшення за економічними та технічними критеріями

Тривимірний графік (рис. 4.11) наочно ілюструє залежність цільової функції оптимізації (A) від ефективності стратегій пом'якшення (M) та

рівня пікових перенапруг (U_p). Він дозволяє виявити оптимальні області, де вартість експлуатації та ремонту обладнання є мінімальною за рахунок ефективного управління перехідними процесами. Висота поверхні графіка показує, що при високих пікових перенапругах навіть невелике поліпшення ефективності пом'якшення значно знижує витрати.

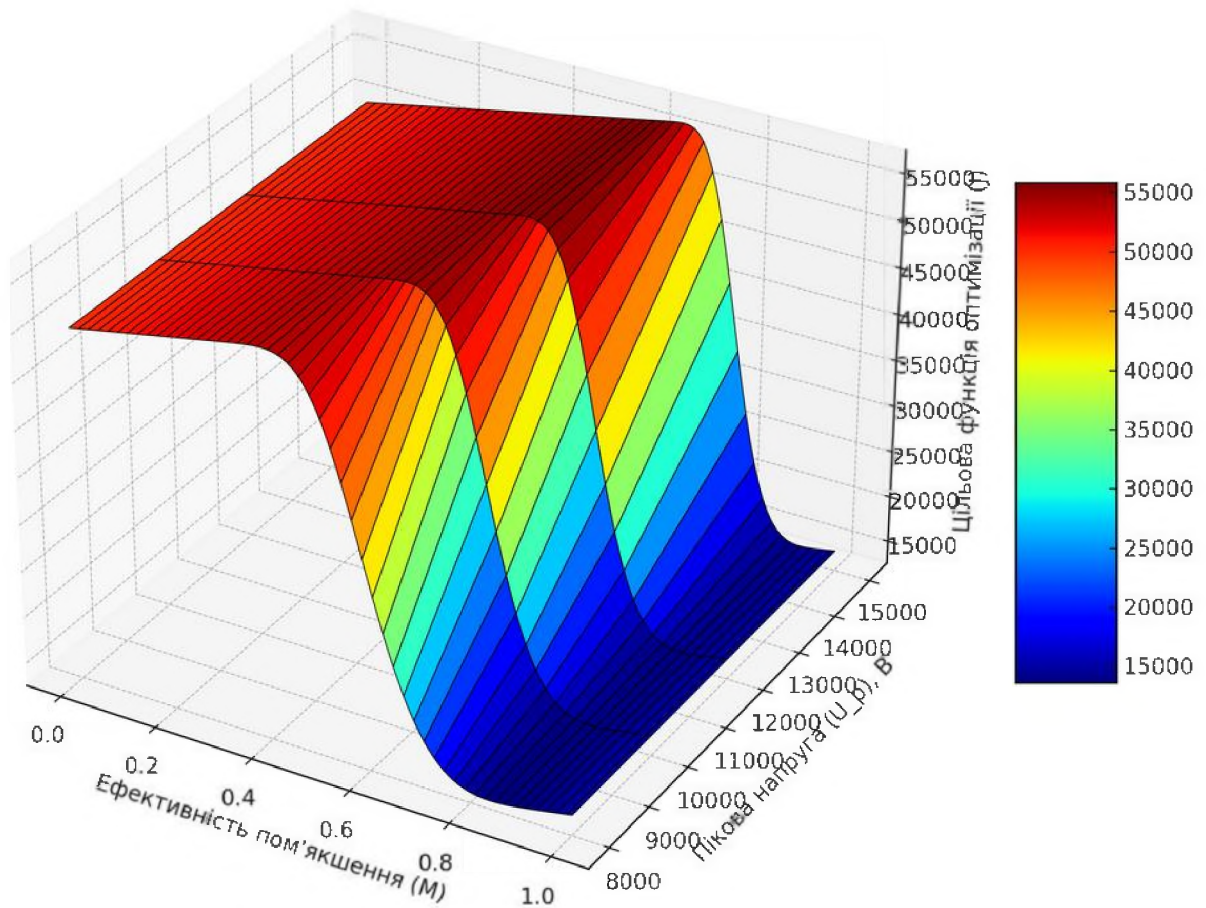


Рисунок 4.11 – Тривимірна залежність цільової функції оптимізації від ефективності пом'якшення і пікової напруги

Графіки (рис. 4.12) демонструють, як змінюється коефіцієнт надійності обладнання протягом тривалого періоду експлуатації (до 20 років) за умови різних рівнів ефективності стратегій пом'якшення. Вибрана пікова напруга ($U_p = 12000$ В) ілюструє типову ситуацію для промислових підприємств. Очевидно, що навіть помірні заходи пом'якшення (наприклад, $M = 0,3$) суттєво підвищують надійність

протягом усього періоду експлуатації, а високий рівень пом'якшення ($M = 0,9$) забезпечує майже ідеальну безвідмовність.

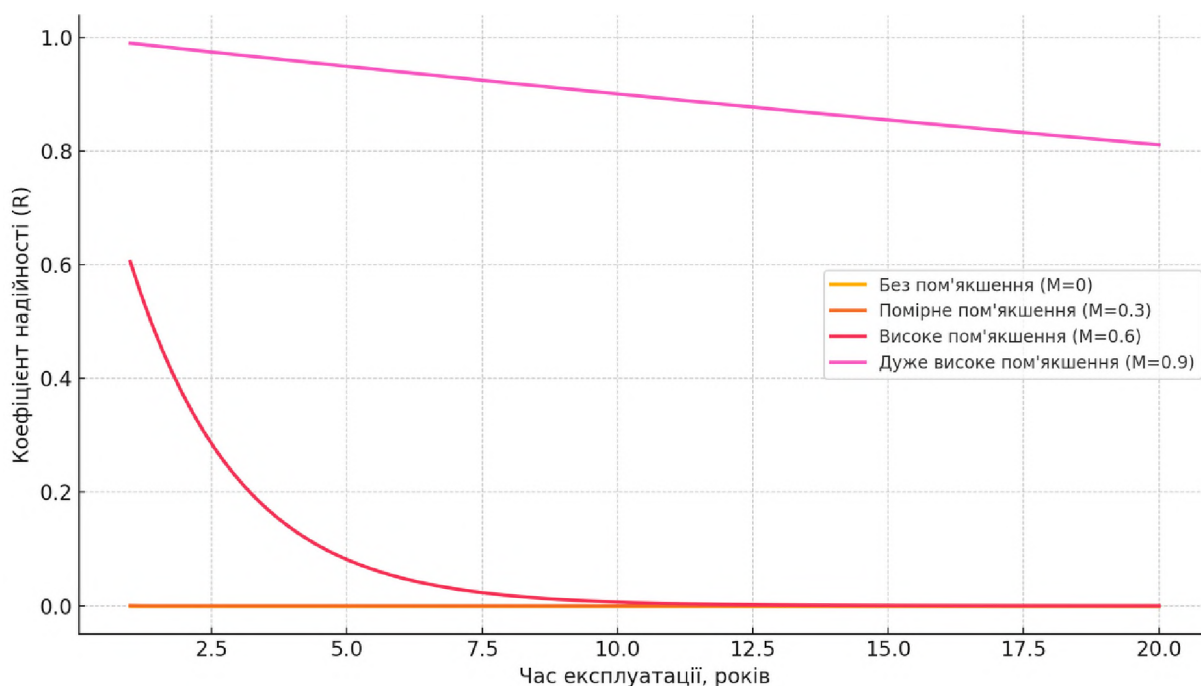


Рисунок 4.12 – Динаміка коефіцієнта надійності за різних стратегій пом'якшення (при $U_p = 12000$ В)

4.5 Висновки по розділу

Висновки за результатами проведеного дослідження показали, що застосування імітаційного моделювання є надзвичайно ефективним підходом для аналізу впливу перехідних процесів на надійність роботи електричних систем промислових підприємств. Використання програмних середовищ, таких як MATLAB/Simulink, PSCAD/EMTDC, DIgSILENT PowerFactory і особливо Python з відповідними науковими бібліотеками, дозволяє створювати точні та адаптивні моделі, здатні глибоко дослідити поведінку систем за умов різноманітних перехідних подій.

Додатково було встановлено, що навіть незначне перевищення номінальної напруги призводить до суттєвого скорочення ресурсу ізоляції обладнання. Наприклад, підвищення пікової напруги до 15000 В викликає різке зниження прогнозованого терміну служби ізоляції майже в десятки разів порівняно з нижчими рівнями напруги. Це підтверджує важливість постійного контролю за рівнями перенапруг, а також впровадження обмежувачів перенапруг та демпферних пристроїв.

4.6 Рекомендації за результатами досліджень

На основі отриманих висновків, для поліпшення стану та зменшення негативного впливу перехідних процесів на обладнання електропостачання промислових підприємств, рекомендовано впровадити певні заходи.

Також доцільно організувати навчання технічного персоналу щодо правильної експлуатації електричних систем у режимах з частими перехідними процесами, зокрема, з акцентом на дотримання регламентів пуску, комутаційних операцій та контрольних вимірювань.

Комплексне впровадження цих заходів дозволить істотно знизити негативний вплив перехідних процесів на електрообладнання, підвищити його ресурс, забезпечити надійність і економічність експлуатації, а також зменшити витрати підприємства на ремонти та технічне обслуговування.

Отже, за результатами проведеного дослідження чітко встановлено необхідність постійного контролю за перехідними процесами, їх амплітудами та частотою повторення, а також доцільність застосування комплексних стратегій пом'якшення. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити надійність роботи електрообладнання, збільшити його термін служби та оптимізувати економічні витрати підприємств на експлуатацію і технічне обслуговування.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження засвідчило, що регулярні перехідні процеси, такі як пуски двигунів, комутації трансформаторів і конденсаторних батарей, істотно прискорюють процес погіршення стану обладнання. Зокрема, аналіз показав, що коефіцієнт втрати працездатності обладнання суттєво зростає зі збільшенням пікової напруги та частоти виникнення подій. Так, за період експлуатації до 20 років і частоті перехідних подій від 10 до 40 разів на рік, коефіцієнт втрати працездатності при пікових напругах 8000–15000 В наближається до критичних значень вже через кілька років роботи. Наприклад, при піковій напрузі 15000 В та частоті 40 подій на рік, коефіцієнт втрати працездатності сягає граничного значення (1) вже на ранніх етапах експлуатації, що свідчить про необхідність застосування заходів пом'якшення таких процесів.

Аналіз моделей накопичувального пошкодження засвідчив критичність впливу повторюваних перехідних подій. При фіксованій частоті повторення подій у 30 разів на рік та піковій напрузі 12000 В, обладнання наближається до стану повного зношення (коефіцієнт накопиченого пошкодження досягає критичного значення 1) вже впродовж перших 8–10 років експлуатації. Збільшення частоти або амплітуди перехідних процесів додатково скорочує цей термін, що підкреслює необхідність суворого контролю експлуатаційних режимів та періодичності комутаційних операцій. Одним з ключових напрямів є впровадження ефективних засобів обмеження перенапруг та демпфування перехідних процесів. Для цього слід встановлювати обмежувачі перенапруг (ОПН) з порогом спрацювання, що забезпечує зниження пікових значень напруги до прийнятних рівнів, наприклад, не вище 8000–10000 В, оскільки навіть невелике зниження пікової напруги на 10–15% може подовжити термін служби ізоляції обладнання у кілька разів.

Доцільним є застосування пристроїв плавного запуску для електродвигунів та іншого обладнання, що дозволить істотно зменшити амплітуди пускових струмів і відповідно знизити рівень перенапруг. Також рекомендовано уникати частих комутацій трансформаторів і конденсаторних батарей, плануючи їх ввімкнення таким чином, щоб мінімізувати кількість повторних перехідних подій (оптимальна частота – не більше 10–15 подій на рік).

Важливим є впровадження автоматизованих систем моніторингу параметрів електричної мережі, які дозволять оперативно контролювати величину перенапруг і частоту виникнення перехідних процесів, своєчасно виявляючи критичні режими роботи обладнання та приймаючи необхідні заходи.

Слід реалізувати програму періодичного профілактичного обслуговування обладнання, орієнтовану на попередження зношення ізоляції та інших компонентів. Регулярні вимірювання опору ізоляції, діагностика стану устаткування та його елементів повинні проводитись з періодичністю, адаптованою до інтенсивності експлуатаційних режимів (наприклад, раз на півроку для обладнання з частими перехідними процесами).

Необхідно розробити та впровадити ефективні стратегії пом'якшення з чітко визначеним коефіцієнтом ефективності. Наприклад, використання демпфувальних пристроїв або зниження частоти пусків може забезпечити підвищення коефіцієнта надійності обладнання до рівня 0,9–0,95. Для визначення оптимального рівня інвестицій слід застосовувати цільову функцію оптимізації, яка дозволяє знайти оптимальний баланс між економічними витратами на впровадження захисних заходів і зниженням витрат на ремонти.

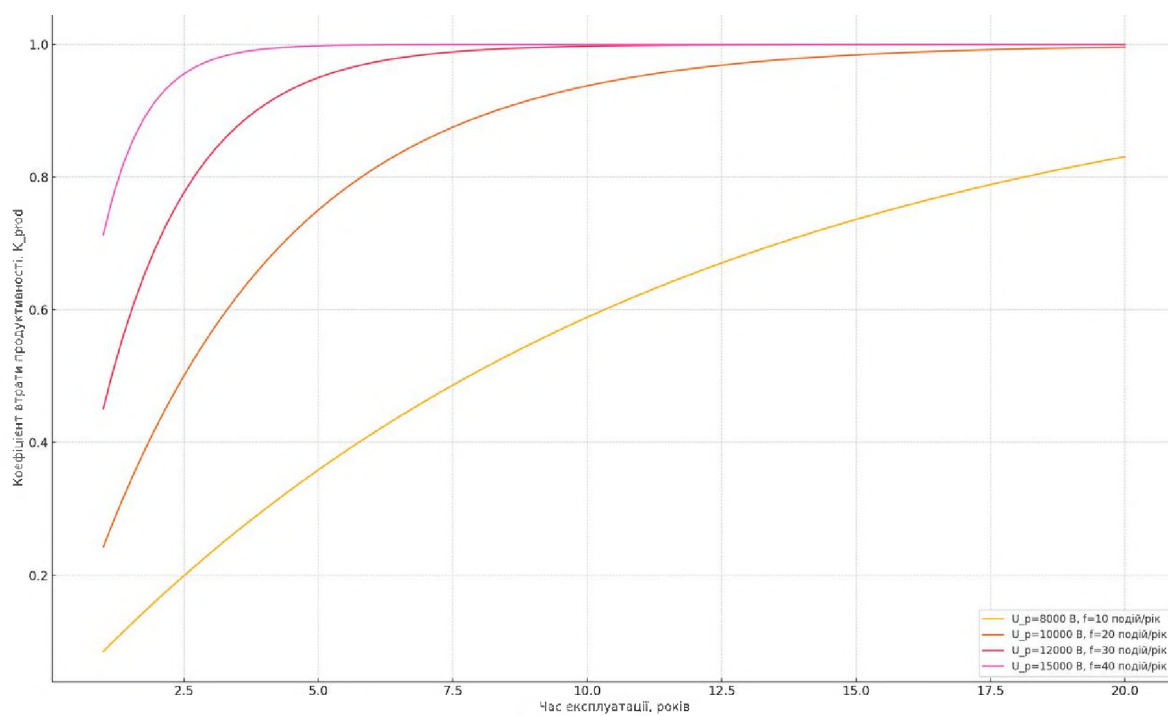
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник / В.Є. Шестеренко. – Вінниця: Нова книга, 2004. – 656 с.
2. Півняк Г. Г., Шидловский А. К., Кігель Г. А., Рибалко А. Я., Хованська О. І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
3. Качур І. П., Бардик Є. І. Перехідні електромагнітні процеси в електроенергетичних системах: навч. посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 107 с.
4. Романюк Ю. Ф. Електричні системи та мережі. Навч.посібник. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
5. Василега П.О. Електропостачання: навчальний посібник / П.О. Василега. – Суми: Університетська книга, 2014. – 415 с.
6. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г. Г. Півняк, Г. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, Л. І. Несен, за ред. Г. Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.
7. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. Вид. 2-е, доправ. та доп. / Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен / За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 597 с.
8. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Довгань В. П. Електричні машини: навчальний посібник. – Дніпро: НГУ, 2003. – 327 с.
9. Куценко Ю. М., Яковлев В. Ф. та ін. Електричні машини і апарати: навчальний посібник. – Київ: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.

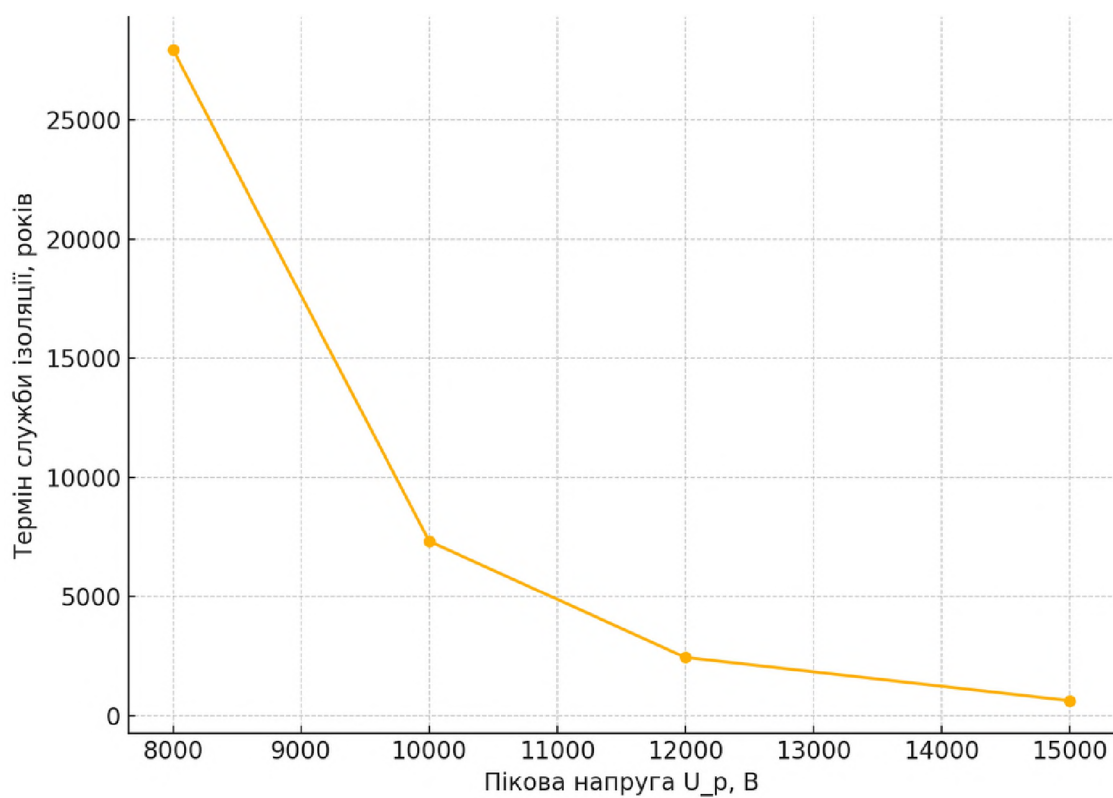
10. Гай О.В., Бодунов В.М. Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах: [навчальний посібник]. – К.: ЦП «Компринт», 2020. – 315 с.
11. Черемісін М.М., Мороз О.М., Єгоров О.Б., Швець С.В. Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / М.М. Черемісін, О.М. Мороз, О.Б. Єгоров, С.В. Швець. – Харків: ТОВ «В справі», 2016. – 260 с.
12. Кацадзе Т.Л. Електричні системи та мережі. Частина 2. Розрахунок та аналіз усталених режимів електроенергетичних систем: матеріали лекцій / Кацадзе Т.Л. – 2016. – 284 с.
13. Тептя В.В. Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах: електронний конспект лекцій комбінованого (локального та мережного) використання / В.В. Тептя, В.В. Кулик. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 183 с.
14. Benson F. A., Benson T. M. Fields, Waves and Transmission Lines. – Dordrecht: Springer, 1991. – 546 p.
15. Faria da Silva F., Bak C. L. Electromagnetic Transients in Power Cables. – London: Springer, 2013. – 242 p.
16. Електрична частина станцій і підстанцій: Навч. посібник / А.О. Омельчук. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. – 479 с.
17. Anderson P. M. Analysis of Faulted Power Systems. – New York: IEEE Press, 1995. – 460 p.
18. Greenwood A. Electrical Transients in Power Systems. – 2nd ed. – New York: Wiley-IEEE Press, 1991. – 512 p.
19. Blackburn J. L., Domin T. J. Protective Relaying: Principles and Applications. – 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 695 p.
20. Маліновський А.А. Основи електроенергетики та електропостачання. Підручник / А.А. Маліновський, Б.К. Хохулін. – 2-ге вид. перероб. та доп. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 436 с.

21. Greenwood, A. Electrical Transients in Power Systems. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1991 – 768 p.
22. Blackburn, J. L., & Domin, T. J. Protective Relaying: Principles and Applications. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. – 695 p.
23. Looms J. S. T. Insulators for High Voltages. – London: IET, 1988. – 300 p.
24. Arrillaga J., Watson N. R. Computer Modelling of Electrical Power Systems. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2001. – 360 p.
25. Python Basics: A Practical Introduction to Python 3. Revised and Updated 4th Edition. David Amos, Dan Bader, Joanna Jablonski, Fletcher Heisler, 2012 – 2020. – 98 p.
26. Stone G. C., Boulter E. A., Culbert I., Dhirani H. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. – 2nd ed. – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2014. – 672 p.
27. Wood A. J., Wollenberg B. F., Thorp J. S. Power Generation, Operation, and Control. – 3rd ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – 784 p.
28. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
29. «ДСТУ EN 50160:2014» – вітчизняний стандарт – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=62547
30. «ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004» – вітчизняний стандарт – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=32828
31. «ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2011» – вітчизняний стандарт – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=52907

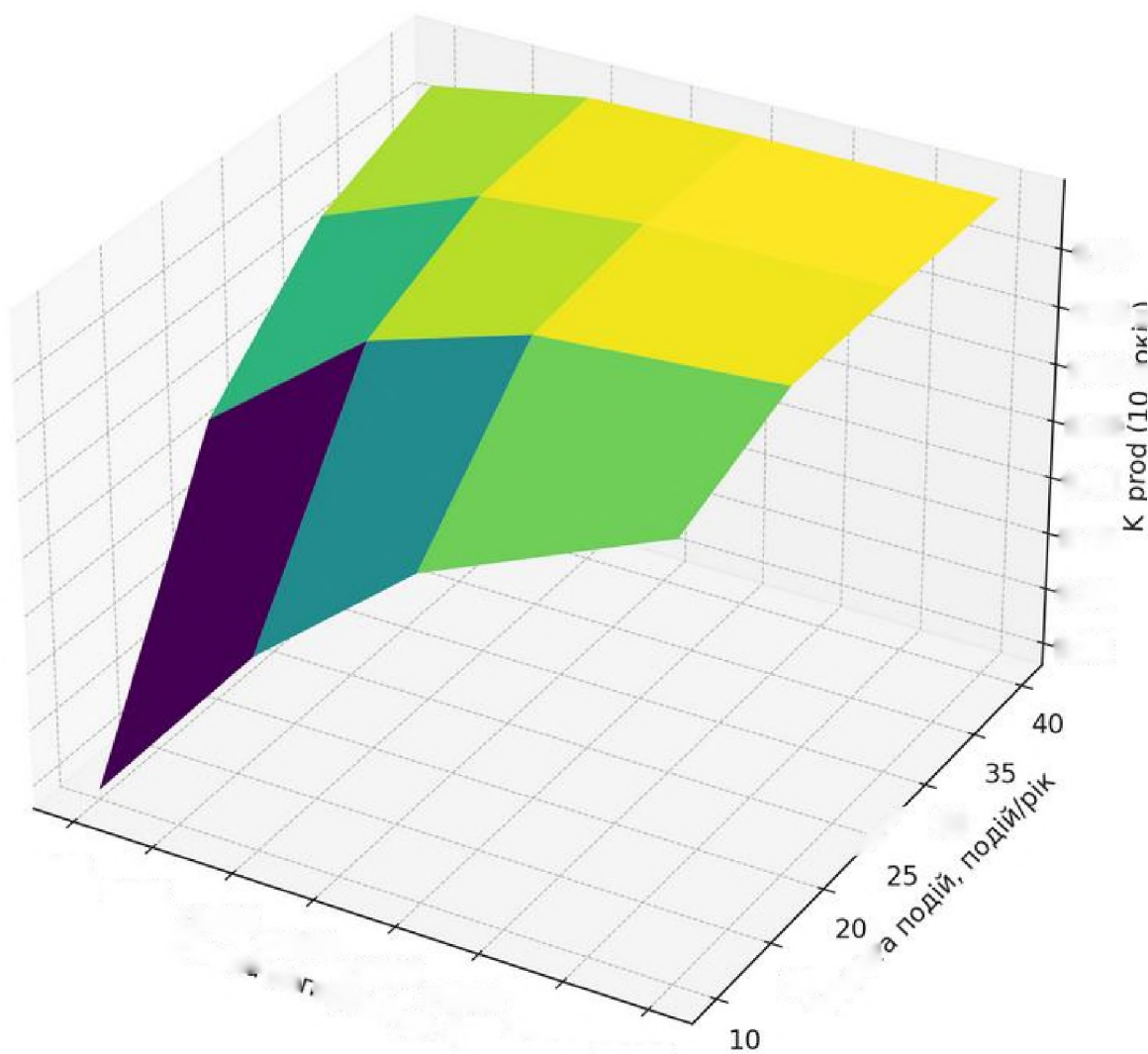
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



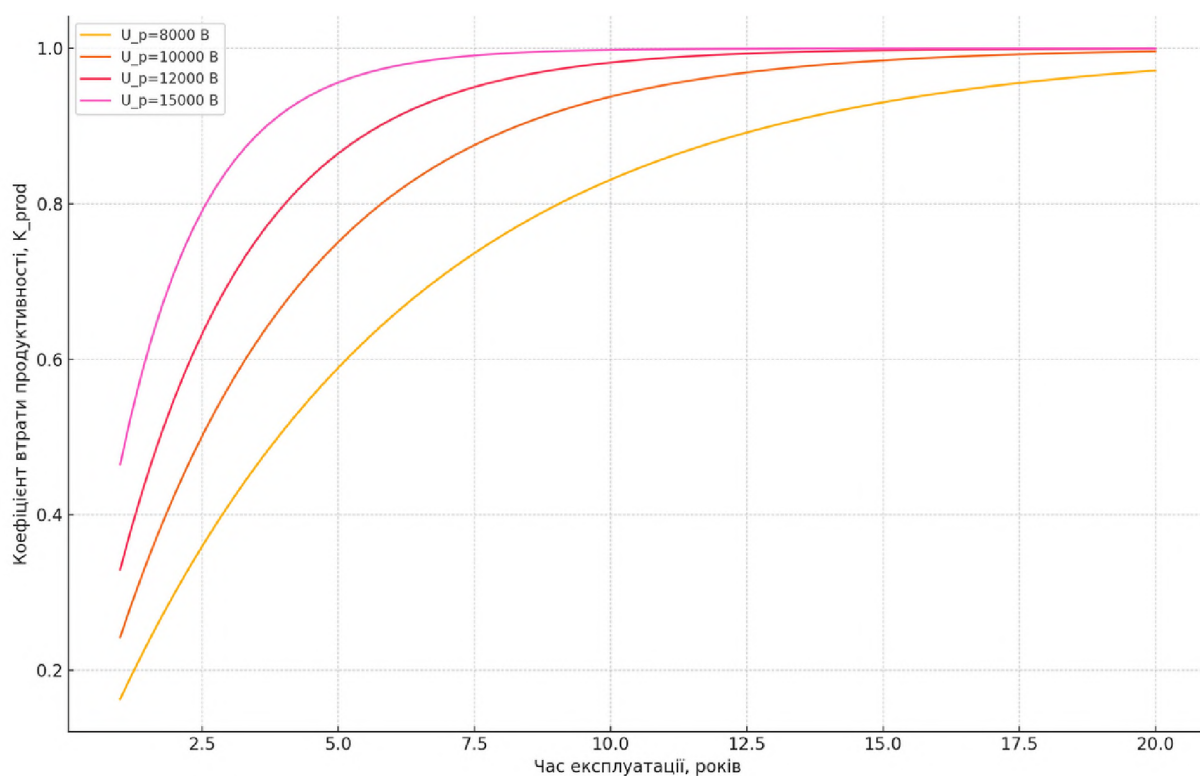
Коефіцієнт втрати працездатності обладнання залежно від часу експлуатації



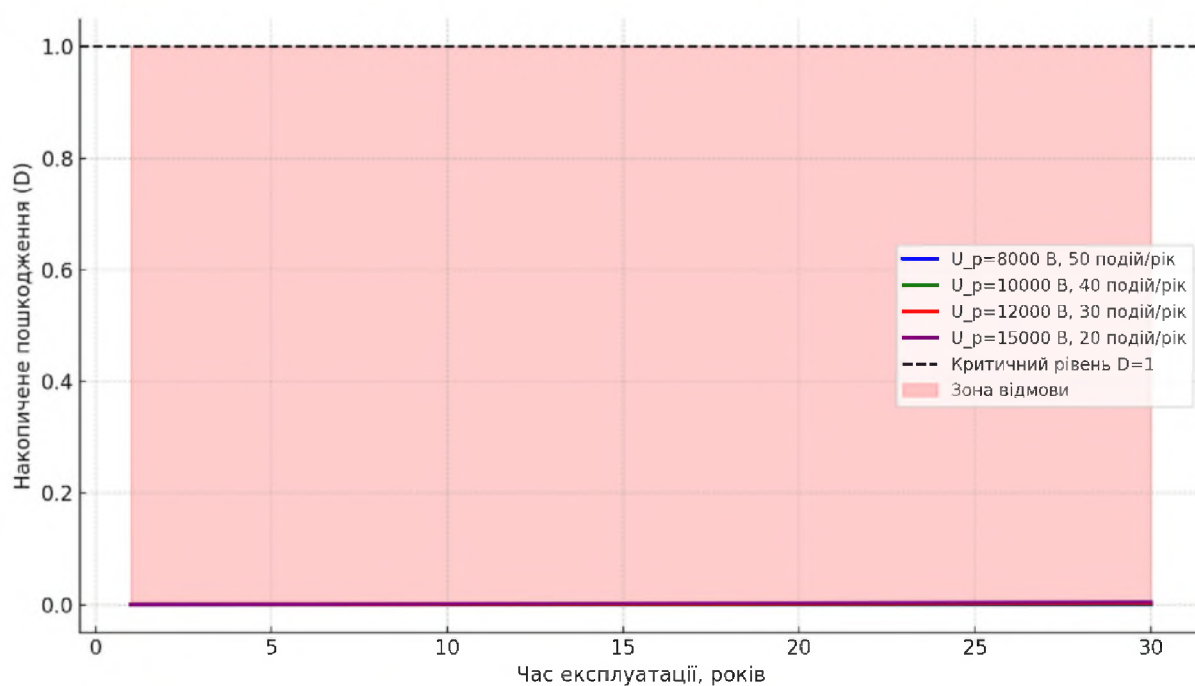
Термін служби ізоляції залежно від пікової напруги



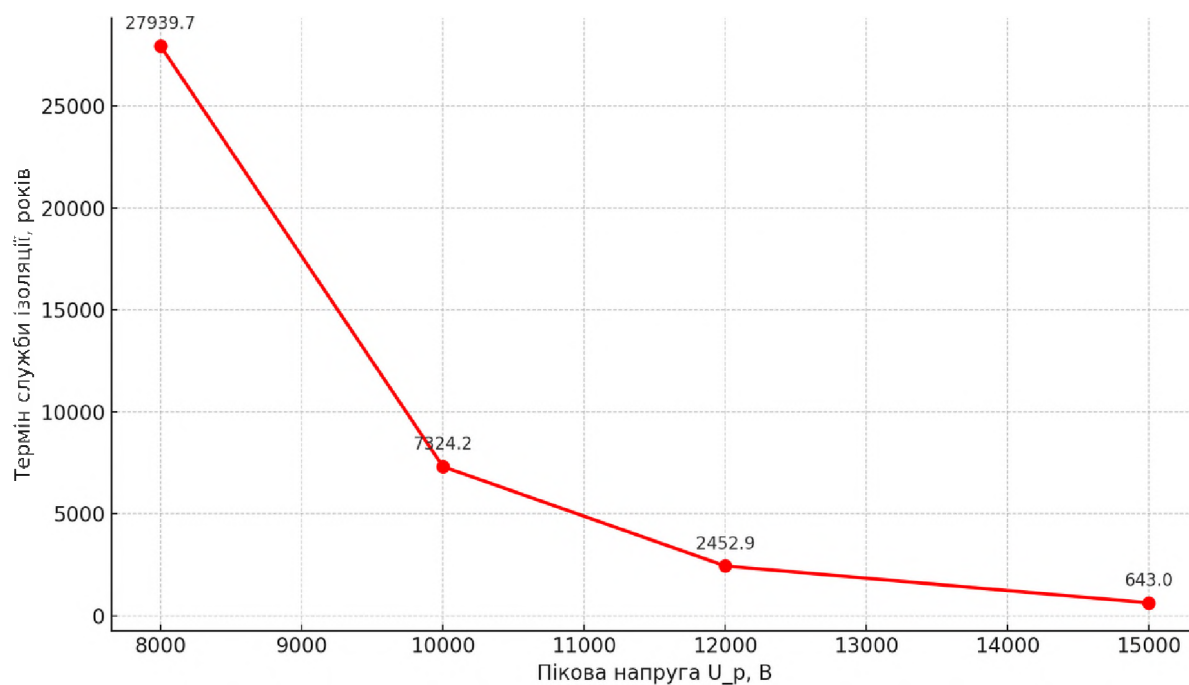
Тривимірна залежність втрати працездатності від пікової напруги та частоти подій



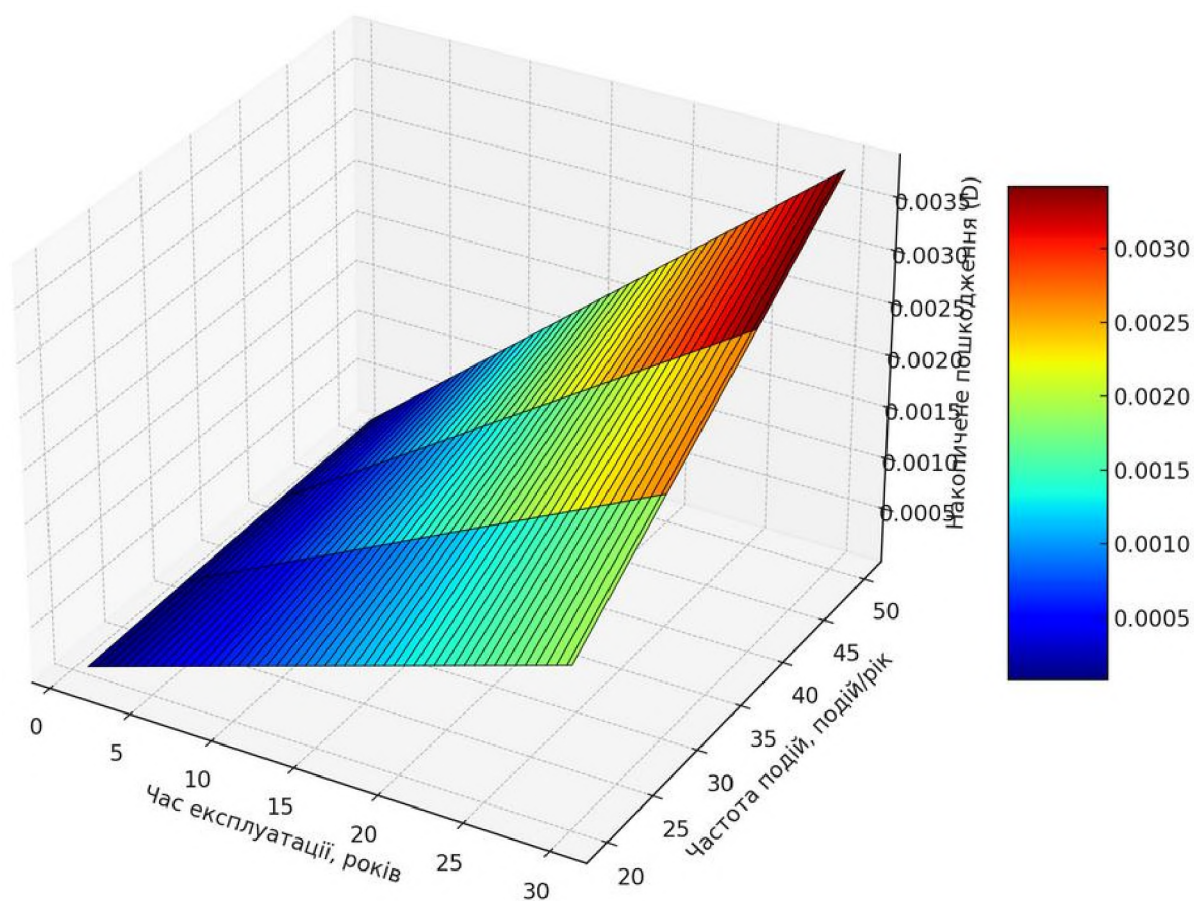
Динаміка втрати працездатності при фіксованій частоті (20 подій на рік) і змінних значеннях пікової напруги



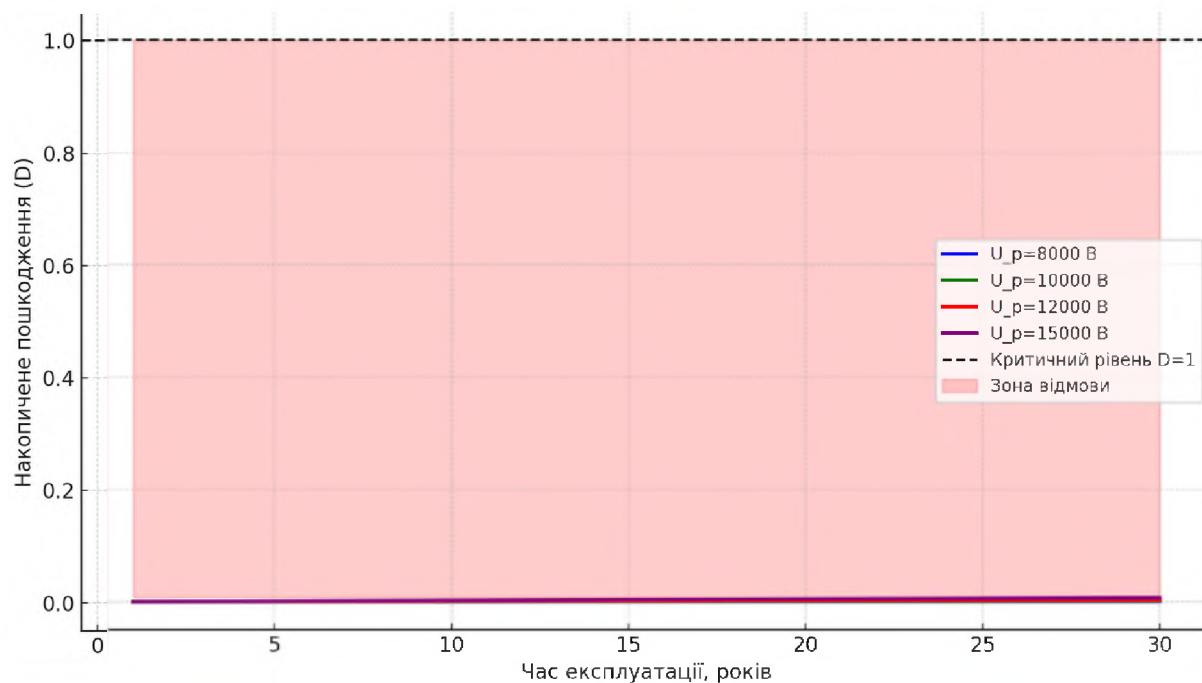
Накопичене пошкодження обладнання в часі



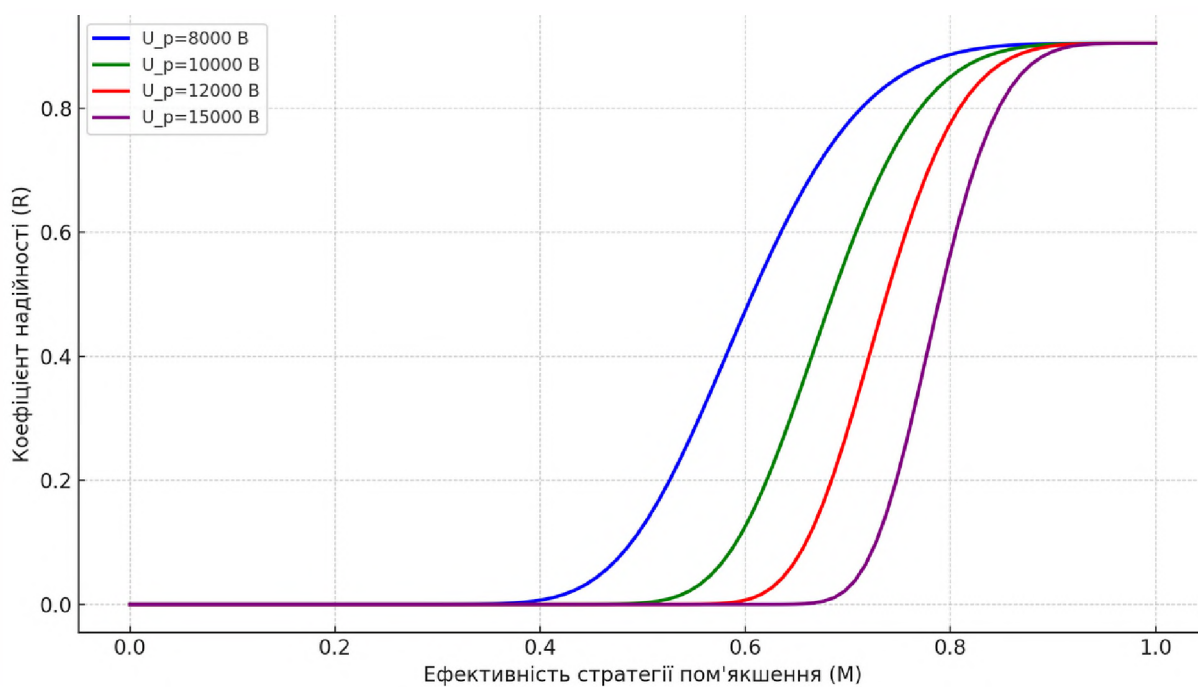
Термін служби ізоляції за моделлю накопичувального пошкодження



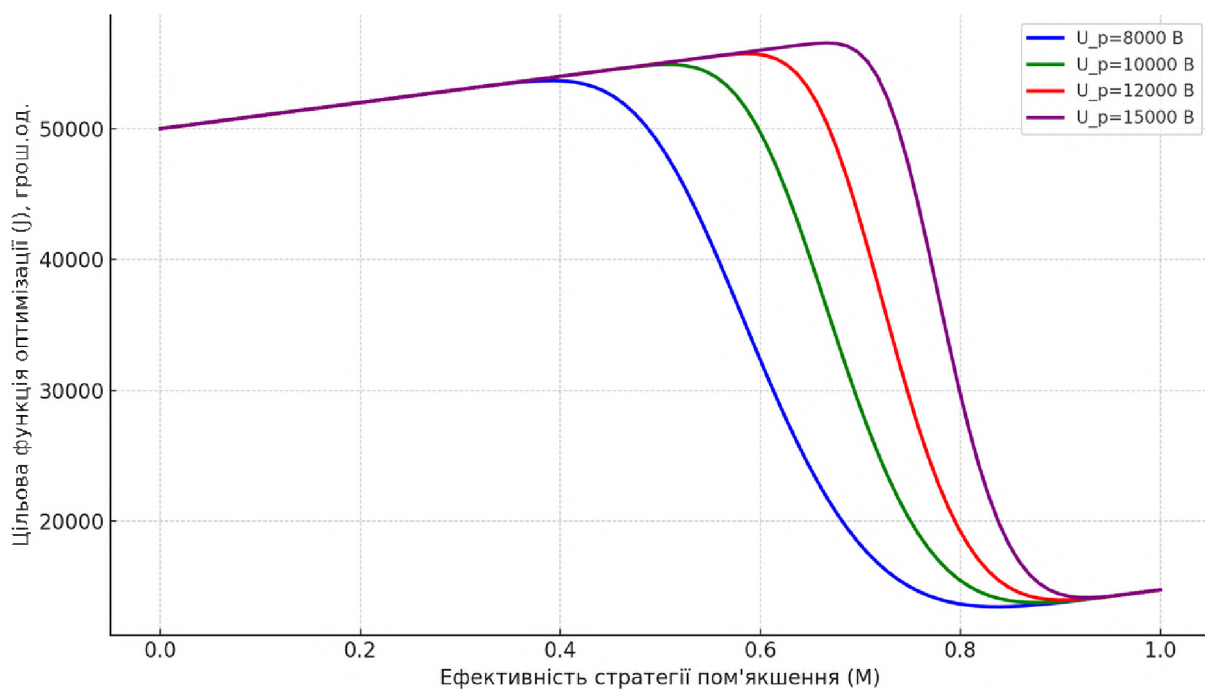
Тривимірна залежність накопичення пошкоджень (при $U_p=12000$ В)



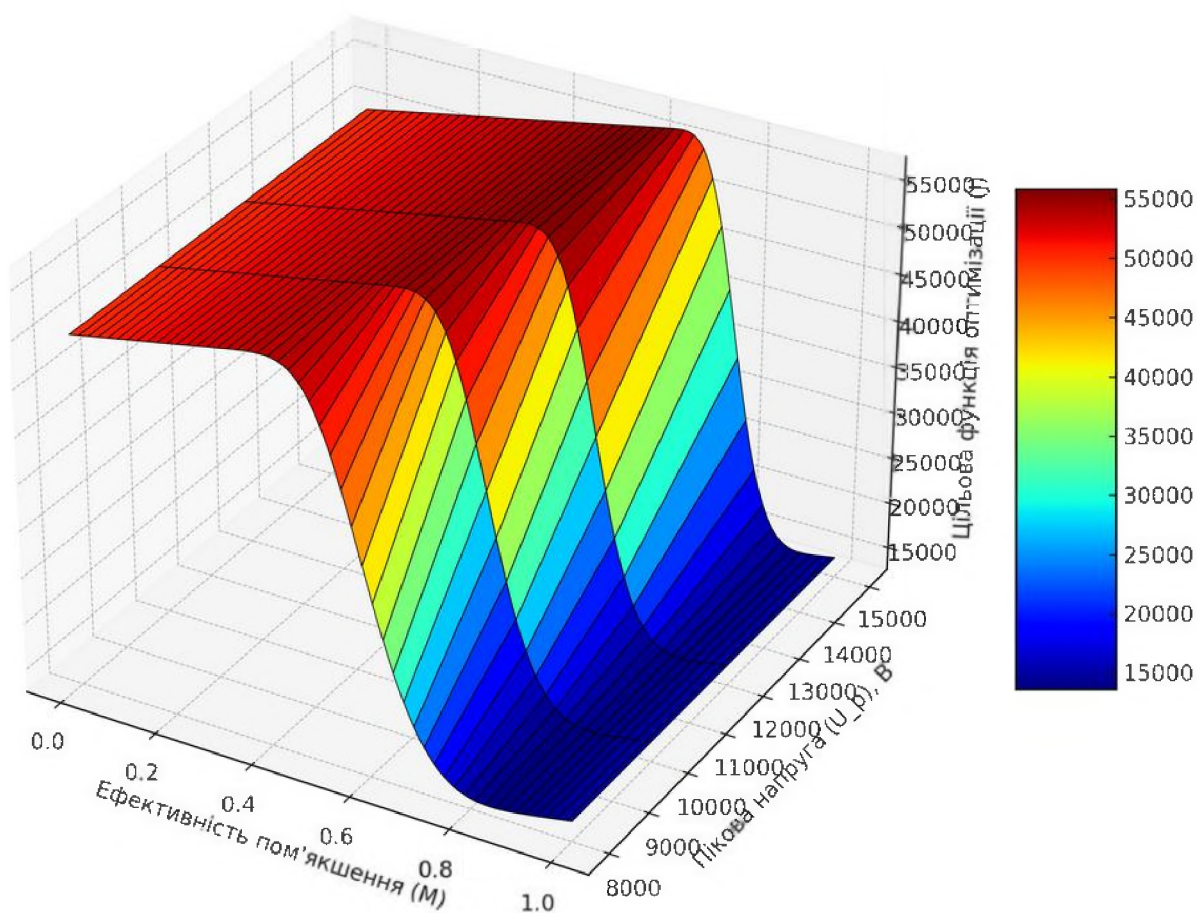
Динаміка накопичення пошкоджень при фіксованій частоті (30 подій/рік)



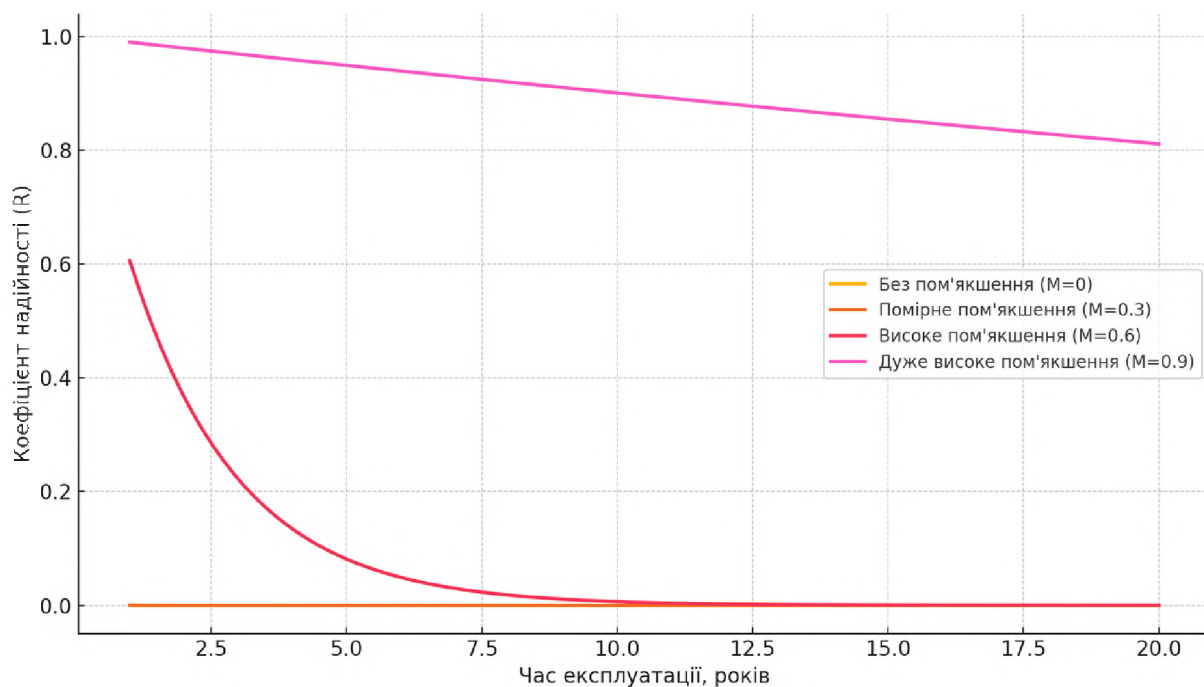
Вплив стратегій пом'якшення на коефіцієнт надійності



Оптимізація стратегій пом'якшення за економічними та технічними критеріями



Тривимірна залежність цільової функції оптимізації від ефективності пом'якшення і пікової напруги



Динаміка коефіцієнта надійності за різних стратегій пом'якшення
(при $U_p = 12000$ В)

ДОДАТОК Б

ОГЛЯД ПИТАНЬ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Системи електропостачання на промислових підприємствах відіграють ключову роль у забезпеченні безперервності виробничих процесів, однак вони також є джерелом потенційної небезпеки як для персоналу, так і для технологічного обладнання. З огляду на наявність високої напруги, великих струмів, можливість виникнення коротких замикань, перенапруг, резонансних явищ, а також вплив несприятливих зовнішніх умов, експлуатація електроустановок повинна здійснюватися відповідно до чітко визначених норм і правил.

Забезпечення безпечної експлуатації – це не лише технічна задача, а й питання професійної відповідальності інженера з охорони праці, який має здійснювати системний нагляд, координацію заходів безпеки, підготовку персоналу, перевірку засобів захисту, а також аналіз і попередження аварійних ситуацій.

Б1 Ідентифікація небезпечних виробничих факторів

У процесі експлуатації систем електропостачання проявляється комплекс електричних, термічних, механічних і хімічних чинників, дія яких безпосередньо або опосередковано може призвести до виробничого травматизму або виходу з ладу обладнання. До основних небезпек, які повинен враховувати інженер з охорони праці, належать:

- ураження електричним струмом у разі прямого чи непрямого контакту з частинами, що перебувають під напругою, або з елементами, на

яких з'являється потенціал через порушення ізоляції чи відсутність заземлення,

- утворення електричної дуги при комутації під навантаженням або при короткому замиканні, що супроводжується виділенням великої кількості теплоти, випромінюванням, можливістю займання ізоляції, одягу, поранень обличчя та рук,

- нагрів струмопровідних частин унаслідок тривалих перевантажень, який викликає старіння ізоляційних матеріалів, втрату контактного тиску, появу міжвиткових замикань,

- перенапруги атмосферного або комутаційного походження, здатні викликати пробій ізоляції, пошкодження вводів, руйнування обмоток трансформаторів,

- відсутність або неефективність захисного заземлення, що спричиняє появу небезпечної напруги дотику на корпусах обладнання.

До вторинних, але не менш важливих чинників безпеки належать:

- несприятливі метеорологічні умови: висока вологість, утворення конденсату, різкі коливання температури, що суттєво знижують електричну міцність ізоляції,

- агресивні середовища (кислоти, луги, пилові аерозолі), що руйнують ізоляцію та контактні з'єднання,

- недостатня освітленість в електрощитових, комутаційних пунктах, яка призводить до помилкових дій,

- людський фактор, зокрема порушення інструкцій, відсутність групи допуску, необізнаність персоналу з реальним станом елементів мережі.

Особливої уваги потребує виявлення зон підвищеної безпеки: ділянок з підвищеною вологістю, відкритих струмоведучих частин, місць прокладання кабелів через металоконструкції без ізоляційних вставок тощо. Робота в таких зонах має супроводжуватись обов'язковим інструктажем, огороженням, візуальним маркуванням і постійним наглядом.

Б2 Вимоги нормативних документів

Система організації безпечної експлуатації електроустановок регламентується комплексом нормативних документів, серед яких основними є:

- Закон України «Про охорону праці»;
- НПАОП 40.1-1.32-01 — Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів;
- НПАОП 0.00-1.21-98 — Правила охорони праці під час експлуатації електроустановок;
- ДБН В.2.5-23:2010 — Електрообладнання;
- Типове положення про навчання з питань охорони праці.

Згідно з цими нормативами, інженер з охорони праці повинен:

- забезпечити наявність і актуальність інструкцій з охорони праці для кожного типу робіт в електроустановках,
- контролювати проведення періодичних і позапланових інструктажів, фіксуючи результати у відповідному журналі,
- ініціювати перевірку знань персоналу щонайменше один раз на рік (або частіше при роботі з установками понад 1000 В),
- перевіряти наявність нарядів-допусків перед виконанням робіт, де чітко зазначені склад бригади, характер і межі робіт, захисні заходи,
- вести журнали обліку допусків, ЗІЗ, випробувань засобів захисту.

Особливу увагу слід приділяти організації робіт у діючих електроустановках, де заборонено допуск осіб без оформленої групи, без цільового інструктажу, без перевірки відсутності напруги на всіх фазах.

БЗ Засоби захисту та контроль їх застосування

Усі роботи в електроустановках повинні виконуватись із застосуванням засобів колективного та індивідуального захисту, що відповідають чинним вимогам:

Засоби колективного захисту (ЗКЗ):

- переносні заземлення, блокування, попереджувальні таблички, плакати;
- бар'єрні огороження;
- ізолювальні платформи або килимки;
- освітлення робочого місця відповідно до норм.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

- діелектричні рукавички, калоші, ізолювальне взуття;
- каски, щитки, захисні окуляри;
- штанги (вимірювальні, оперативні, розрядні);
- покажчики напруги.

Інженер з охорони праці зобов'язаний контролювати справність кожного виду захисту, перевіряти бірки з датами випробувань (рукавички — кожні 6 міс., штанги — щороку), вести журнал обліку і стану ЗІЗ, а також фіксувати факт ознайомлення персоналу з правилами користування цими засобами.

У разі виявлення несправного або протермінованого засобу захисту, він має бути негайно вилучений з обігу, а особа, яка видала чи допустила до роботи без нього, несе персональну відповідальність.

Таким чином, безпечна експлуатація систем електропостачання — це результат злагодженої взаємодії всіх ланок: від розробників електротехнічної документації до інженерів з охорони праці та виконавців робіт. Вона передбачає постійну ідентифікацію ризиків, впровадження превентивних заходів і дотримання нормативних регламентів.

ДОДАТОК В

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____