

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА  
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**бакалаврської кваліфікаційної роботи**

Підвищення безвідмовності електричних систем промислових  
підприємств

**Виконав:**

студент 4 курсу, групи ЕТ 2022-1

Владислав МЕЦЕРЯКОВ

**Керівник бакалаврської роботи:**

Анатолій КУЗНЕЦОВ

ХАРКІВ – 2026 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
імені О.М. Бекетова

Навчально-науковий інститут Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури  
Кафедра Електричного транспорту  
Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма – Електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ЕТ

 **Микола ХВОРОСТ**

“ 16 ” червня 2026 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Мещеряков Владислав Станіславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи:** Підвищення безвідмовності електричних систем промислових підприємств

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи **Кузнєцов Анатолій Іванович, к.т.н., доцент**

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від “22” травня 2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 20.06.2026 р.

3. **Вихідні дані до бакалаврської роботи** Матеріали переддипломної практики, Електричні схеми та фізичні моделі електроприводу змінного та постійного струму.

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

4.1. **Стан питання.** Виконати аналіз можливості підвищення безвідмовності електропостачання тимчасовим резервуванням при включенні в коло емнісного накопичувача

4.2. **Розробка технічного завдання.**

Виконати дослідження оцінки відмовистості систем електропостачання промислових підприємств.

### 4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення)

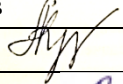
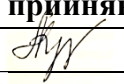
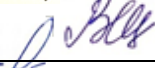

Виконати інформаційно-математичний опис систем електропостачання з комутаційними перенапряженнями.

### 4.4. Охорона праці. Забезпечення охорони праці на законодавчому рівні.

### 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)

Структурна схема розрахункової системи електропостачання; розрахункова крива зміни часу живлення мережі від накопичувача; верогідність відмов електричного обладнання різних рівнів електроживлення; класифікація комутаційних перенапруг; допустима тривалість тимчасових підвищень напруги.

### 6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Олександр ДОНЕЦЬ, доц.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доц.		

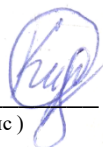
7. Дата видачі завдання 01.05.2026 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	02.05.26-07.05.26	
2.	Розробка технічного завдання	07.05.26-13.05.26	
3.	Розрахункова частина	13.05.26-20.05.26	
4.	Охорона праці	20.05.26-28.05.26	
5.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	28.05.26-10.06.26	
6.	Підготовка доповіді та презентації	12.06.26-19.06.26	

Студент

(підпис)



Владислав МЕЩЕРЯКОВ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)



Анатолій КУЗНЕСЦОВ

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано підвищення безвідмовності електричних систем промислових підприємств.

Виконано підвищення безвідмовності електропостачання тимчасовим резервуванням при включенні в коло ємнісного накопичувача; забезпечення якості та надійності їх структур системи електропостачання; перенапруги систем електропостачання та їх кваліфікація. Дана оцінка відмовистості систем електропостачання промислових підприємств; оцінка впливу засобів та способів підвищення відмовостійкості системи; визначення вихідних даних підвищення ефективності функціонування систем електропостачання; розраховано методи інформаційно-математичного опису систем електропостачання з комутаційними перенапряженнями; розрахунок допустимої тривалості тимчасових підвищень напруги.

Склад бакалаврської роботи:

- листів розрахунково-пояснювальної записки - 55
- рисунків - 11
- таблиць - 1
- формул - 18
- Графічна частина до бакалаврської роботи складається з 10 слайдів.

## ЗМІСТ

	Стор
ВСТУП.....	7
<b>1 ПІДВИЩЕННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТИМЧАСОВИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ ПРИ ВКЛЮЧЕННІ В КОЛО ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА .....</b>	<b>9</b>
1.1 Забезпечення якості та надійності структур системи електропостачання.....	9
1.2 Перенапруги систем електропостачання та їх кваліфікація.....	18
<b>2 ОЦІНКА ВІДМОВИСТОЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....</b>	<b>22</b>
2.1 Оцінка впливу засобів та способів підвищення відмовостійкості системи.....	23
2.2 Визначення вихідних даних підвищення ефективності функціонування систем електропостачання.....	26
2.3 Формування керуючих впливів під час управління багаторівневими системами електропостачання.....	28
<b>3 МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНО-МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З КОМУТАЦІЙНИМИ ПЕРЕНАПРЯЖЕННЯМИ.....</b>	<b>32</b>
3.1 Можливості прогнозу комутаційні перенапруги.....	32
3.2 Вибір обмежувачів перенапруг для захисту від комутаційних перенапруг.....	36
3.3 Розрахунок допустимої тривалості тимчасових підвищень напруги.....	40

4	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	44
4.1	Задачі розділу.....	44
4.2	Аналіз нормативно-правової бази з питань захисту від перенапруг.....	45
4.3	Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів, пов'язаних з перенапругами.....	46
4.4	Організаційні та технічні заходи щодо захисту від перенапруг у промисловому цеху.....	47
4.5	Розрахунок штучного освітлення виробничого приміщення....	49
4.6	Розрахунок електробезпеки та параметрів захисного заземлення.....	50
	ВИСНОВКИ.....	53
	СПИСОК ПОСИЛАНЬ.....	54

## ВСТУП

Згідно з аналітичними даними, в окремих енергосистемах щороку фіксуються десятки аварій, які призводять до недопостачання мільйонів кіловат електроенергії.

Головною причиною цього є деструктивна взаємодія між електрообладнанням підприємств та живильною мережею в процесі роботи, що провокує виникнення критичних перенапруг.

У розподільних мережах фіксується від 55% до 75% усіх порушень, пов'язаних із електропостачанням споживачів. Зокрема, виникнення небезпечних ферорезонансних перенапруг зумовлене неповнофазними режимами живлення та випадками порушення (обриву чи зміщення) нейтралі.

Доведено, що такі перенапруги призводять до пошкодження ізоляції відносно землі, тоді як дугові замикання на землю, у свою чергу, стають причиною виникнення та подальшого розвитку ферорезонансних процесів.

За характером локалізації перенапруги поділяють на фазні, міжфазні, внутрішньообмоткові та міжконтактні. Найбільшу загрозу для ізоляції струмопровідних елементів становлять саме фазні перенапруги. Варто зазначити, що практично будь-які комутаційні процеси в системах електропостачання супроводжуються виникненням комутаційних перенапруг, амплітуда яких може перевищувати номінальні значення у 6–8 разів.

Для захисту обладнання від перенапруг застосовують широкий спектр засобів, серед яких: нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН), вентиляльні розрядники, заземлювальні реактори, захисні іскрові проміжки та спеціалізовані схеми керування. Крім того, використовуються шунтуючі опори у вимикачах, швидкодіючі вимикачі без повторного запалювання дуги з керованим моментом комутації, пристрої для розряду розподільних котушок та RC-кола.

Обґрунтування параметрів захисту має базуватися на строгому техніко-економічному аналізі із застосуванням математичного моделювання. Цей

підхід передбачає як дослідження функціональних процесів безпосередньо у захищеному обладнанні, так і врахування ймовірнісних характеристик надійності елементів системи електропостачання.

**Актуальність даної теми** обумовлена проблемою підвищення енергетичних характеристик тягової підстанції.

**Мета:** підвищення безвідмовності електричних систем промислових підприємств.

**Завдання:**

- огляд тенденції розвитку тягових підстанцій міського електротранспорту;
- розглянути особливості роботи дистанційно – керованих тягових підстанцій;
- провести аналіз електричних схем тягових підстанцій та їх основні елементи;
- розрахувати основні параметри тягових мереж.

**Апробація:** Мещеряков В. С., Глухов А. А. Основні напрями забезпечення надійності систем електропостачання / XIX ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ «СТАЛИЙ РОЗВИТОК МІСТ: ПОСТВОЄННИЙ ПЕРІОД» 18 квітня 2026 р м. Харків.

# **1 ПІДВИЩЕННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТИМЧАСОВИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ ПРИ ВКЛЮЧЕННІ В КОЛО ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА**

## **1.1 Забезпечення якості та надійності структур системи електропостачання**

Одним із ключових завдань при забезпеченні електропостачання об'єктів є оптимізація технічних рішень, спрямованих на підвищення надійності електротехнічного обладнання та систем на всіх етапах їхнього життєвого циклу – від проектування до експлуатації.

Традиційним інструментом для цього є структурне резервування або формування резерву потужностей [3, 4]. Водночас сучасна тенденція до зниження енергоспоживання створює очевидне протиріччя (за відсутності високоефективних технологій): виникає конфлікт між необхідністю мінімізації капітальних і експлуатаційних витрат на придбання та обслуговування дублюючого устаткування та жорсткими вимогами щодо безаварійності роботи системи.

Одним із перспективних шляхів зниження експлуатаційних витрат за одночасного забезпечення безаварійності є формування часового резерву (запасу часу) для об'єкта електропостачання. Цей інтервал необхідний або для відновлення працездатності системи після аварійної відмови, або для підтримання технологічних функцій об'єкта в разі знеструмлення основної лінії живлення.

Практична реалізація такого часового резервування досягається за допомогою послідовного або паралельного з'єднання акумуляторних батарей, енергоемність та ресурс яких визначаються експлуатаційними параметрами резервованої схеми [4].

Технічне рішення, спрямоване на підвищення надійності шляхом послідовного підключення кількох акумуляторів, має низку суттєвих недоліків.

По-перше, тривале перебування резервного джерела живлення в режимі холостого ходу призводить до зниження його загальної енергоефективності. По-друге, такий тип з'єднання зменшує ймовірність безвідмовного функціонування системи: оскільки за послідовного сполучення відмова навіть одного елемента (наприклад, обрив кола) неминуче призводить до відмови всього електричного кола.

$$P_{\Sigma\text{посл}} = \prod_{i=1}^n p_i \quad (1.1)$$

де:  $P_{\Sigma\text{посл}}$  – загальна ймовірність роботи системи;

$p_i$  – ймовірність роботи елемента;

$n$  - число послідовно з'єднаних елементів.

При цьому завжди матимемо, що  $P_{\Sigma\text{посл}} \leq p_{\text{мін}}$ .

У загальному випадку модель надійності схеми, що резервується, у вигляді змішаного з'єднання елементів, що забезпечують харчування споживача рисунок 1.1.

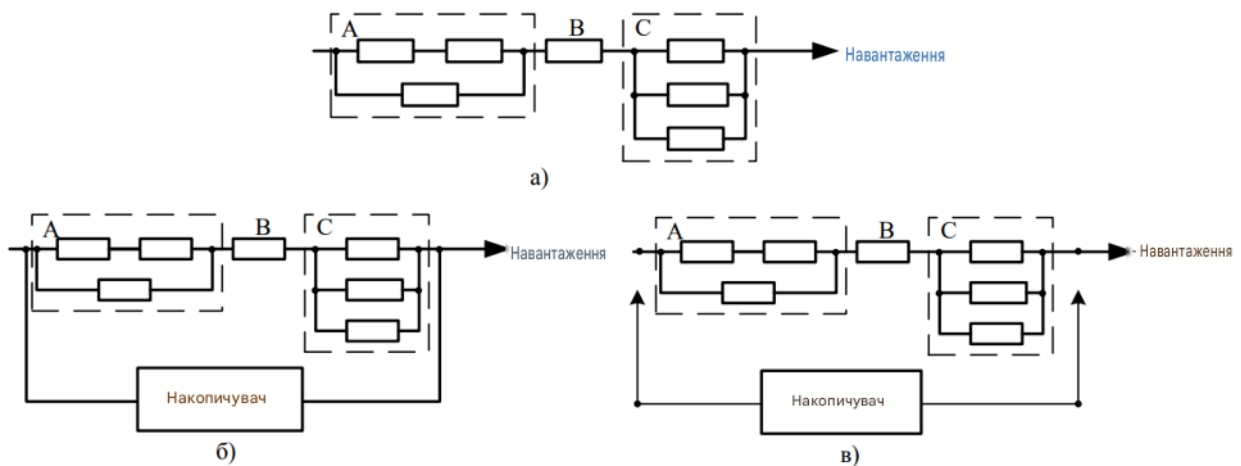


Рисунок 1.1 – Структурна схема розрахункової системи електропостачання: а) до запровадження надмірності; б) постійне резервування; в) резервування заміщенням

Припускаємо відомими такі вихідні параметри: час напрацювання на відмову для кожної гілки блоків мішаного з'єднання А та С, час відновлення

кожного окремого елемента, а також імовірність безвідмовної роботи елементів В та D.

Математичний опис взаємодії елементів електричної системи в умовах часової надмірності виконано з використанням апарату теорії випадкових імпульсних потоків.

Вважатимемо, що в системах із часовим резервуванням відмови обладнання, тривалість яких є меншою за час повного розряду накопичувача  $t_n$ , не порушують нормального функціонування комплексу.

У такому наближенні критичними (значущими) вважаються лише ті відмови, тривалість ліквідації яких перевищує час розряду накопичувального елемента [9]. За умови експоненційного закону розподілу часу відновлення системи, імовірність виникнення таких критичних відмов оцінюється за виразом:

$$\bar{p}_{\text{ви}} = \bar{\mu}_{\text{ви}} \int_{t_n}^{\infty} \theta_{\text{ви}} \beta_{\text{ви}}(\theta) d\theta \quad (1.2)$$

де  $\bar{\mu}_{\text{ви}}$  и  $\beta_{\text{ви}}(\theta)$  – середня частота і щільність ймовірності розподілу тривалості не надходження заряду в накопичувач, відповідні відмови обладнання, що зазнало тимчасового резервування;

$\beta_{\text{ви}}$  – тривалість часу відновлення за наявності тимчасового резервування.

Тоді зміну ймовірності відмови системи, що резервується, зручно оцінити:

$$\Delta p = \frac{(p_{\text{ви}} - p)}{p_{\text{ви}} * 100\%} \quad (1.3)$$

де  $p$  і  $p_{\text{ви}}$  – ймовірність роботи системи без тимчасової надмірності та з її використанням відповідно.

Розрахунок зміни показників безвідмовності системи внаслідок інтеграції накопичувача виконано для двох типових конфігурацій:

Постійне резервування (рис. 1.1, б) – режим навантаженого резерву, за якого основний і резервний ланцюги функціонують одночасно, проте в штатному режимі робота забезпечується переважно основним ланцюгом.

Резервування заміщенням (рис. 1.1, в) – режим ненавантаженого резерву, що передбачає введення накопичувача в роботу (вручну або за допомогою засобів автоматики) виключно після фіксації відмови в основному колі.

Під час математичного моделювання прийнято, що ймовірність безвідмовної роботи накопичувача є фіксованою і становить  $p_n = 0,95$ , тоді як ймовірність справного стану інших елементів системи варіюється в діапазоні від  $p_{ел} = 0,95$  до  $p_{л} = 0,8$ .

Припускаємо, що комутація здійснюється за допомогою «ідеальних» перемикачів (тобто ймовірність їхньої безвідмовної роботи дорівнює одиниці), а сам резерв є навантаженим. За таких умов для конфігурації з постійним резервуванням ймовірність безвідмовної роботи системи визначається згідно з [4] за виразом:

$$p_{\text{пост}} = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n \quad (1.4)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов системи,

$t$  – напрацювання на відмову,

$n$  – кратність резервування,  $n=2$ .

При резервуванні заміщенням у разі, якщо інтенсивність відмов основного ланцюга та резервного елемента різні,

$$p_{\text{заміщ}} = e^{-\lambda t} + \frac{\lambda}{\lambda_n - \lambda} (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda_n t}) \quad (1.5)$$

де  $\lambda_n$  – інтенсивність відмов накопичувача.

Якщо ж інтенсивності відмов однакові, то

$$p_{\text{заміщ}} = e^{-\lambda t}(1 + \lambda t) \quad (1.6)$$

Ризик виникнення відмови в досліджуваній системі електропостачання після інтеграції накопичувача значною мірою залежить від надійності елементів резервованої схеми. Характерно, що зі зменшенням надійності компонентів мережі живлення ефективність резервування зростає. Зокрема, у разі зниження ймовірності безвідмовної роботи елементів до рівня  $0\{,\}8\{,\}$  (за незмінних параметрів самого накопичувача) ймовірність відмови системи зменшується майже вдвічі. Результати відповідних розрахунків наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вплив тимчасового резерву зміну надійності роботи системи щодо системи, не оснащеної резервним елементом

Зміна ймовірності роботи системи щодо системи без резерву, %				
середнє напрацювання на відмову системи $t$	постійне резервування, $p_n=0,95$		резервування заміщенням, $p_n=0,95$	
	рел 0,95	рел-0,8	рел 0,95	рел 0,8
$1,5\bar{\tau}_{\text{осн}}^*$	17,2	51,9	17,6	52,5
$3T_{\text{осн}}$	31,5	77,2	32,1	77,6
$4,5\bar{\tau}_{\text{осн}}$	43,4	89,3	44,0	89,5
$6\bar{\tau}_{\text{осн}}$	53,3	94,9	54,0	95,0
$7,5\bar{\tau}_{\text{осн}}$	61,5	97,6	62,1	97,7
$9\bar{\tau}_{\text{осн}}$	68,3	98,9	68,8	98,9
$10,5T_{\text{осн}}$	73,9	99,5	74,3	99,5
$12\bar{\tau}_{\text{осн}}$	78,5	99,8	78,9	99,8

Водночас найбільша ефективність застосування резервного накопичувача виявляється в міру збільшення тривалості напрацювання системи. Ця закономірність є справедливою і для схеми резервування заміщенням. Проте варто підкреслити, що за умов невеликого напрацювання резервування заміщенням демонструє вищу ефективність порівняно з постійним резервуванням.

Зі збільшенням часу розряду накопичувача надійність системи зростає за нелінійною залежністю. Водночас у разі застосування акумуляторних батарей (АКБ) як накопичувальних елементів їхня надійність і термін служби суттєво залежать від номінальної ємності.

Використання АКБ надмірної ємності не лише збільшує тривалість її розряду на навантаження, а й посилює вимоги до режимів заряду й перезаряду (зокрема, щодо величини зарядних струмів і часу відновлення енергії). Це зумовлено тим, що тривала експлуатація акумулятора в режимі систематичного недозаряду критично скорочує його робочий ресурс.

Тому задля продовження терміну служби АКБ їхню ємність доцільно обирати, виходячи з критерію мінімально допустимого часу розряду. Крім того, слід враховувати, що паралельне підключення акумуляторної батареї як джерела електричної ємності може впливати на зміну коефіцієнта потужності всієї системи.

Результати розрахунку наведено на рисунку 1.2.

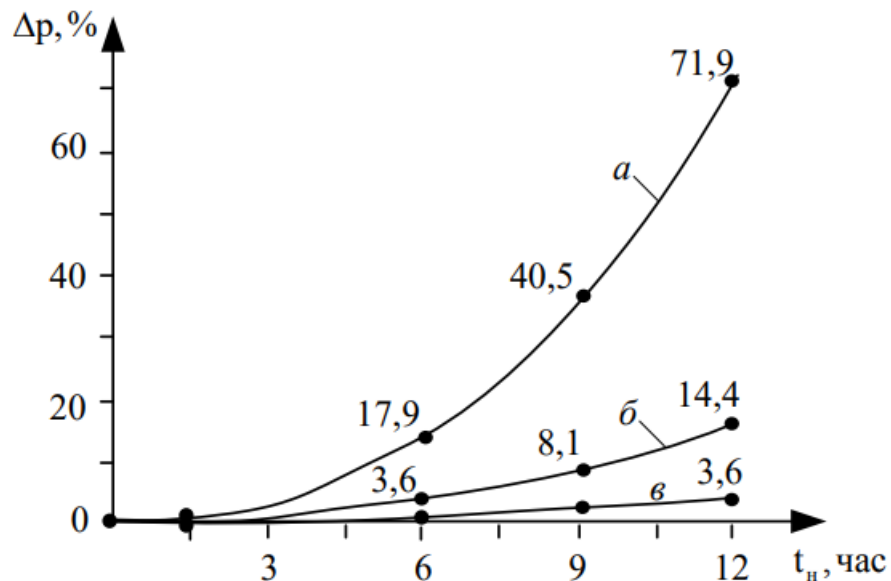


Рисунок 1.2 – Взаємозв'язок ймовірності роботи системи та часу розрядки накопичувача: а)  $\lambda=10^{-5}$ ; б)  $\lambda=10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4}$ ; в)  $\lambda=10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-4}$

Припустимо, що для реалізації часового резервування та мінімізації непродуктивних втрат в енергонакопичувачі час його розряду має дорівнювати часу відновлення системи.

Розглянемо, як зміниться ефективність часового резервування, якщо з міркувань забезпечення мінімально необхідної ємності акумулятора час розряду накопичувача відрізнятиметься від часу, потрібного для відновлення працездатності системи. Під час аналізу прийнято, що накопичувач має одиничну продуктивність, а втрати в електричній мережі відсутні.

Тоді:

$$\bar{\tau}_{\text{вих}}(\tau) = \frac{p_{\text{вих}}}{\bar{\mu}_{\text{вих}}} = \frac{(p_{\text{вих}} \bar{\lambda}_{\text{вих}} - I) * \bar{\theta}_{\text{вих}}}{\psi(1 - p_{\text{вих}})} \quad (1.7)$$

де  $p_{\text{вих}}$ ,  $\lambda_{\text{вих}}$ ,  $\theta_{\text{вих}}$  – ймовірність роботи, частота відмов та час відновлення системи на вході накопичувача;

$I$  – інтенсивність втрат мережі;

$\Psi$  – продуктивністю накопичувача;

$p_{\text{вих}}$  – ймовірність здійснення живлення електроустаткування на виході накопичувача.

Результати розрахунку за виразом (1.7) представлено на рисунку 1.3 (крива а). З наведених залежностей видно, що в міру збільшення часу відновлення системи зростає розбіжність між реальними та теоретичними значеннями часу живлення мережі від автономного джерела. Така тенденція пояснюється зниженням імовірності безвідмовної роботи системи зі зростанням тривалості ремонту її елементів в умовах часової надмірності.

Віднявши отриману величину від 100% (що прийнято за повне забезпечення безвідмовності), було визначено відсотковий рівень надійності функціонування системи для різної тривалості її відновлення рисунок 1.3, крива б.

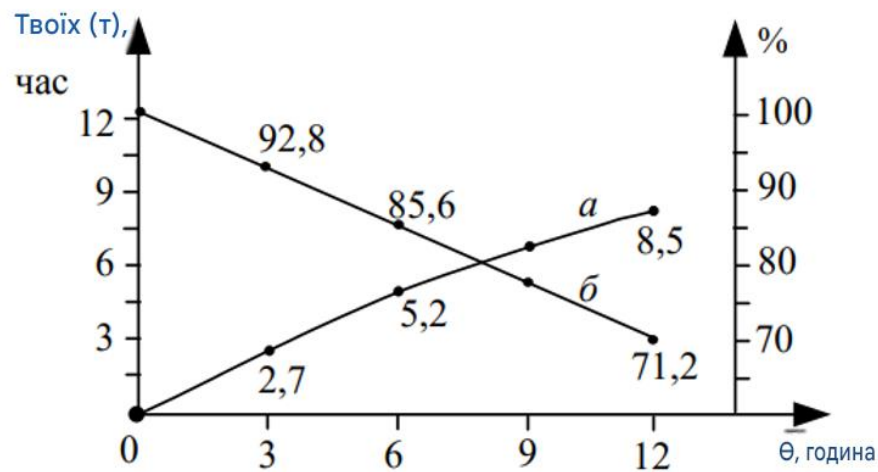


Рисунок 1.3 – а) Розрахункова крива зміни часу живлення мережі від накопичувача залежно від часу відновлення; б) частка забезпечення необхідного рівня безвідмовності аналізованої системи щодо різних значень часу її відновлення

Для оцінки ефективності застосування резервування заміщенням як реальний об'єкт дослідження обрано відхідні лінії 6 кВ типової схеми підстанції. У межах розрахункової ділянки виділено такі базові елементи: шини 6 кВ, шинний роз'єднувач, оливний вимикач, лінійний роз'єднувач, кабельна лінія 6 кВ, а також комплекси пристроїв захисту (рис. 4). Показники надійності зазначеного обладнання визначено на основі реальних статистичних даних.

На основі розрахунку імовірностей безвідмовної роботи та відмови за виразом (3) можна оцінити, якою мірою впровадження надмірності в досліджуваній схемі дозволяє знизити імовірність її відмови порівняно з базовою конфігурацією системи без резервування.

З отриманих результатів випливає, що попри збільшення сумарної інтенсивності відмов (на 31,9% через більшу кількість елементів у схемі), підсумкова імовірність відмови системи знижується на 98,1%. Це свідчить про те, що застосування надмірності практично повністю нівелює деструктивний вплив відмов як основного обладнання, так і самого резервного джерела на функціонування всього комплексу в цілому.

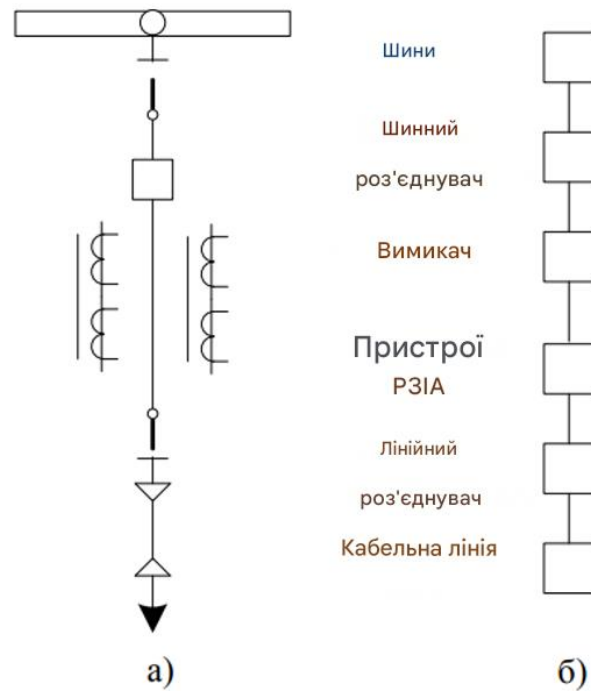


Рисунок 1.4 – Електрична схема (а) і блок-схема (б) ділянки мережі, що розглядається (розроблено автором)

Впровадження часової надмірності дозволяє суттєво знизити імовірність відмови системи електропостачання. Зокрема, для розглядової схеми відхідної лінії 6 кВ застосування резервування заміщенням забезпечує зменшення імовірності виникнення аварійної відмови на 98,1% порівняно з аналогічною конфігурацією без резервування.

Доведено, що вплив часового резервування на імовірність безвідмовної роботи системи описується нелінійною залежністю і визначається як частотою (інтенсивністю) відмов основного обладнання, так і технічними параметрами самого накопичувача енергії.

Таким чином, для досягнення необхідного рівня надійності системи шляхом впровадження часового резервування можна варіювати як параметри самої системи, так і час розряду накопичувача.

З'ясовано, що фактичний час живлення системи від накопичувача відрізняється від теоретично необхідного значення. При цьому в міру зростання часу відновлення системи рівень забезпечення необхідного

показника безвідмовності знижується, що суттєво впливає на критерії вибору та обґрунтування параметрів резервного джерела живлення.

## **1.2 Перенапруги систем електропостачання та їх кваліфікація**

Аналіз аварійності та узагальнення досвіду експлуатації розподільних мереж напругою 6–110 кВ на основі експериментальних даних діючих енергооб'єктів дозволили виявити небезпечні ферорезонансні перенапруги.

Встановлено причинно-наслідковий зв'язок між цими процесами: ферорезонансні перенапруги призводять до пошкодження ізоляції відносно землі, тоді як дугові замикання на землю, у свою чергу, стають тригером для виникнення та розвитку ферорезонансу.

Статистика аварійних ситуацій у розподільних мережах 6–35 кВ свідчить, що переростання однофазних замикань у міжфазні короткі замикання внаслідок перенапруг становить до 65%, тоді як через безпосередній вплив заземлювальних дуг – близько 35%.

Зазначена пропорційність чинників формування міжфазних коротких замикань залишається незмінною як для повітряних, так і для кабельних ліній електропередачі. Сучасний розвиток систем релейного захисту та автоматики (РЗА) й обмежувачів перенапруг дозволяє проектувати високоефективні комплекси захисту.

При цьому амплітуда перенапруг і коефіцієнти координації ізоляції безпосередньо залежать від вольт-секундних характеристик діелектрика, що визначають затримку розвитку пробою в умовах короткочасних імпульсних процесів. Подальше підвищення номінальної напруги мереж у поєднанні з трендом на компактність ліній робить проблему обмеження комутаційних перенапруг критично важливою

Аналогічна закономірність є характерною і для кабельних ліній різного конструктивного виконання. Характерні причини виникнення перенапруг представлено на рисунку 1.5.

За місцем виникнення перенапруги класифікують на фазні, міжфазні, внутрішньообмотувальні та міжконтактні. Найбільшу небезпеку становлять фазні перенапруги, які безпосередньо впливають на ізоляцію струмовідних елементів відносно землі.

Практично кожне комутаційне перемикання в системі електропостачання супроводжується появою комутаційних перенапруг. Їхня природа зумовлена зміною структури та параметрів мережі внаслідок інтенсивного перезаряджання ємностей під час переходу системи з одного стану в інший. На практиці основним способом обмеження комутаційних перенапруг є зниження їхньої вимушеної складової.

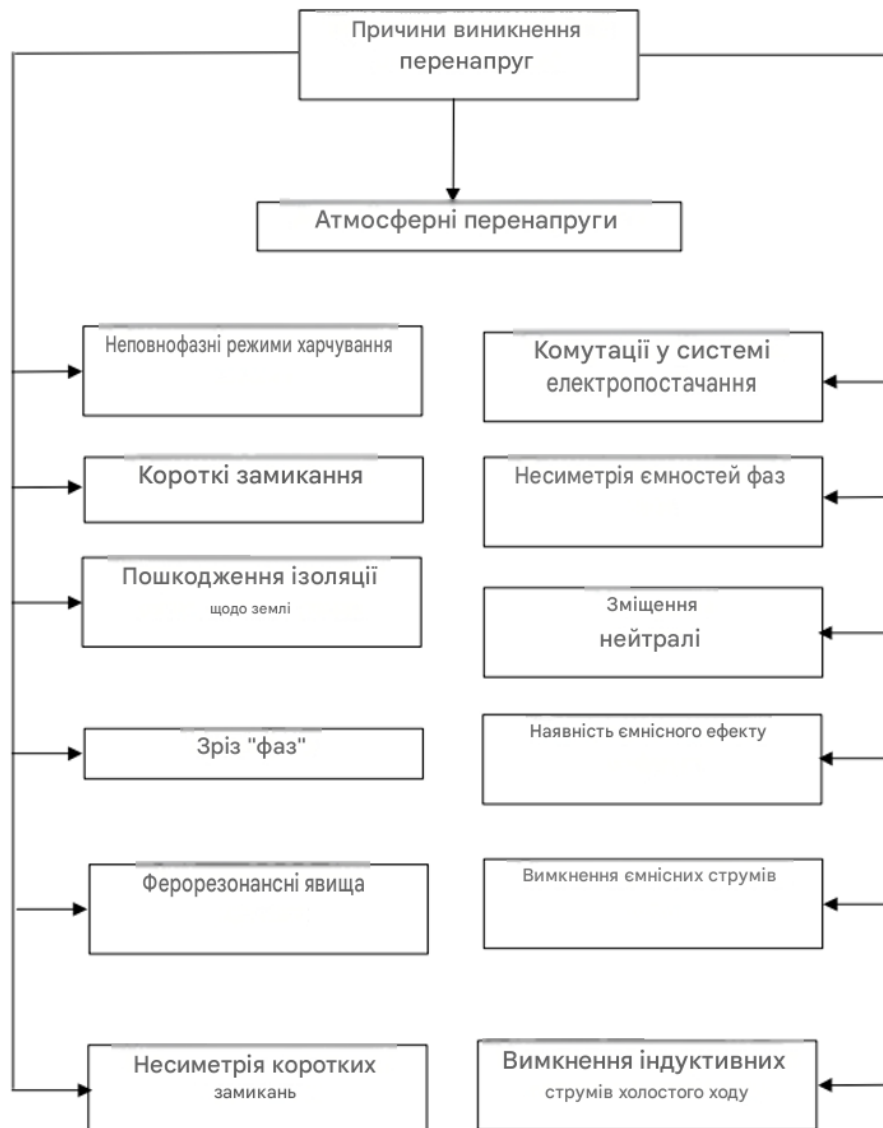


Рисунок 1.5 – Причини виникнення перенапруг

Вона (вимушена складова) зумовлюється безпосередньо умовами передачі енергії в системах електропостачання. Самі ж комутаційні перенапруги можуть виникати в будь-якій частині електричної мережі. При цьому досить часто спостерігається характерне співвідношення, за якого приєднана ємність є меншою за ємність лінії, що відключається, у 2,0–3,5 рази.

У такому разі в мережах з ізолюваною нейтраллю внаслідок вимкнення ненавантаженої кабельної лінії можлива поява комутаційних перенапруг з боку збірних шин із кратністю 2,3–3,5.

Якщо довжина кабельної лінії перевищує 300 м, то такі перенапруги можуть спричинити пробій ізоляції електрообладнання, наприклад, електродвигунів. Варто враховувати, що перенапруги виникають не лише під час аварійних чи планових вимкнень ліній і трансформаторів, а й внаслідок міжфазних коротких замикань та замикань на землю.

У перехідному процесі внаслідок накладання коливальної складової на усталену комутаційні перенапруги можуть удвічі перевищувати значення номінальної напруги. Крім того, наявність ємнісного ефекту в симетричних лінійних схемах призводить до підвищення напруги навіть в усталеному режимі роботи.

Нестійкий характер горіння дуги у вимикачі під час відключення малих індуктивних струмів зумовлює перехід електромагнітної енергії в електростатичну. Цей процес супроводжується виникненням значних перенапруг на індуктивному елементі, що вимикається [4, 5].

Під час комутації малих індуктивних струмів рівень іонізації дугового проміжку вимикача є незначним. Ще до природного переходу струму через нульове значення опір дуги різко зростає, а її струм стрімко падає до нуля, тобто спостерігається так званий «зріз» струму. Через це вивільняється значна енергія, накопичена в індуктивності системи, що призводить до виникнення високих комутаційних перенапруг [6].

Окрім амплітуди самого індуктивного струму, величина його «зрізу» визначається конструктивними особливостями вимикача, типом дугогасного

середовища, ємністю кола, що відключається, та матеріалом контактів. Якщо перехідна відновлювана напруга між контактами перевищує діелектричну міцність міжконтактного проміжку, відбувається його повторний пробій.

## **2 ОЦІНКА ВІДМОВИСТОЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Останнім часом невід'ємною умовою наукових досліджень виробничих процесів є математичне моделювання. Зокрема, під час оцінювання безвідмовності електротехнічних систем найбільшого поширення набули ймовірно-статистичні методи.

Апарат теорії ймовірностей та математичної статистики застосовується практично в усіх галузях сучасної економіки. Ймовірно-статистичні підходи є традиційними у фізиці, теорії вимірювань (метрології), енергетиці, геодезії, гірничій справі тощо. Крім того, вони активно використовуються в медицині, біології, аерокосмічній галузі, військовій науці, а також у лінгвістиці, психології та теорії навчання.

Слід зазначити, що як у теоретичному, так і в практичному аспектах вирішення фундаментальних завдань паливно-енергетичного комплексу, металургії, машинобудування та будівництва є неможливим без застосування ймовірнісних і статистичних методів.

Стрімкий розвиток електронно-обчислювальної та мікропроцесорної техніки суттєво підвищив прикладне значення теорії ймовірностей та математичної статистики.

На їхньому аналітичному фундаменті сформувалася низка самостійних наукових дисциплін: теорія інформації, теорія надійності, теорія випадкових імпульсних потоків, статистичний контроль якості, а також методологія планування експерименту.

На основі численних теоретичних та експлуатаційних досліджень встановлено, що відмови електрообладнання негативно впливають на ефективність функціонування технологічних машин незалежно від місця його локалізації в системі.

Ступінь цього впливу безпосередньо визначається характером взаємозв'язку електрообладнання з робочими машинами. Застосування

апарату випадкових імпульсних потоків дозволяє абстрагуватися від складності функціональних взаємозв'язків та конфігурації з'єднань елементів, що уможливорює зведення розгалужених систем до еквівалентних моделей із жорсткими технологічними зв'язками.

В оригіналі виправлено неузгодженість родів («*виявляється можливим оцінка*» – іменник «оцінка» жіночого роду, тому правильно «*можливою*», або краще змінити на дієслово «*оцінити*»), а також замінено описову конструкцію «стійкість до відмови» на нормативний та лаконічний інженерний термін – «відмовостійкість».

## **2.1 Оцінка впливу засобів та способів підвищення відмовостійкості системи**

Для виконання аналогічних функцій у виробничому процесі можуть застосовуватися машини та обладнання різних типів (марок). Відповідно, вони характеризуються різними показниками продуктивності, надійності, вартості, а також вимогами до кваліфікації та затрат праці обслуговчого персоналу, специфікою постачання запасних частин тощо.

Впровадження такого устаткування має відповідати вимогам технологічного взаємозв'язку та взаємодії із суміжним обладнанням. Водночас за відносно низьких капітальних і експлуатаційних витрат воно повинно забезпечувати необхідний рівень надійності.

Для оцінювання відмовостійкості системи доцільно виконати її декомпозицію на окремі підсистеми (ієрархічні рівні). Такий підхід дає змогу представити математичну модель функціонування кожної підсистеми у вигляді випадкового потоку імпульсів одиначної висоти. Надійність окремого рівня може бути покращена завдяки застосуванню більш безвідмовного електрообладнання. Водночас доцільність підвищення загальної відмовостійкості має базуватися на техніко-економічному розрахунку, який

враховує як технологічні параметри, так і паспортні характеристики надійності устаткування.

Добове енергоспоживання (навантаження)  $A_{сут}$ , зумовлене електричним з'єднанням конкретного рівня, може бути визначене на основі коефіцієнта машинного часу відповідного технологічного обладнання.

$$A_{сут} = K_{см} \bar{b} T_{см} n_{см} \quad (2.1)$$

де  $\bar{b}$  – середня продуктивність робочої машини за машинний час;

$T_{см}$  – тривалість робочої зміни;

$n_{см}$  – кількість робочих змін на добу.

Застосування розглядуваного високонадійного електрообладнання забезпечує підвищення коефіцієнта машинного часу. Як наслідок, знижується частота вимушених перерв у виробничому процесі, що зумовлює зростання навантаження на технологічні машини. При цьому відносний приріст навантаження становитиме:

$$\alpha = \frac{K'_{см}}{K_{см}} \quad (2.2)$$

де  $K'_{см}$ ,  $K_{см}$  – змінний коефіцієнт машинного часу після та до заміни електричного обладнання рівня більш надійні.

Інтеграція більш надійного електрообладнання потребує додаткових фінансових витрат. Вони зумовлені одноразовими капіталовкладеннями, амортизаційними відрахуваннями, витратами на матеріали та запасні частини, проведенням монтажних і демонтажних робіт, а також можливим збільшенням фонду оплати праці обслуговчого персоналу.

Щорічні приведені витрати від капітальних вкладень визначаються як добуток нормативного коефіцієнта ефективності капіталовкладень  $E_n$  на величину додаткових капітальних вкладень  $K_d$ :

$$З_k = E_H K_D \quad (2.3)$$

Значення нормативного коефіцієнта  $E_H$  у промисловості приймається 0,15. Додаткові капітальні вкладення без урахування витрат на монтаж електроустаткування встановлюються як

$$K_D = (1 + 0,06)K \quad (2.4)$$

де 0,06 – коефіцієнт, що враховує транспортні витрати;

$K$  – вартість електрообладнання.

Амортизаційні відрахування за рахунок введення електрообладнання становитимуть

$$З_A = \frac{K N_A}{100} \quad (2.5)$$

де  $N_A$  – норма амортизаційних відрахувань на відновлення та капітальний ремонт обладнання.

Витрати на матеріали та запасні частини

$$З_M = 0,05K$$

де 0,05 – коефіцієнт, що враховує витрати на матеріали та запасні частини з розрахунку 5% вартості обладнання.

Витрати на монтаж та демонтаж електроустаткування визначаються з виразу

$$З_{MD} = K_{\text{доп}} \pi_{\text{дм}} \sum_{i=1}^{m_{\text{дм}}} H_{Pi} \pi_{2i} \quad (2.6)$$

де  $K_{\text{доп}}$  – коефіцієнт, що враховує доплату до заробітної плати;

$\pi_{\text{дм}}$  – кількість днів на демонтаж та монтаж електрообладнання;

$m_{\text{дм}}$  – кількість робітників, які беруть участь у демонтажі та монтажі обладнання;

$N_{Pi}$  - число робітників  $i$ -го розряду, зайнятих на демонтажних та монтажних роботах;

$\pi_{2i}$ - тарифна ставка електриків  $i$ -го розряду

Під час вибору електрообладнання з урахуванням показників надійності на стадії проектування системи з розрахунків виключають витрати на демонтаж. Водночас для устаткування, яке здійснює трансформацію електроенергії або її перетворення на механічну роботу, обов'язково враховують витрати на компенсацію технологічних втрат енергії.

На основі наведеного підходу, шляхом порівняння річного економічного ефекту  $E_g$ , визначають варіант електрообладнання, який забезпечує максимальну економічно обґрунтовану продуктивність робочих машин. Перевірку відповідності встановленим вимогам першочергово виконують для силовими споживачів технологічних машин.

Це зумовлено тим, що їхня потужність, кількість та частота увімкнень є базовими чинниками для розрахунку та вибору елементів системи електропостачання: трансформаторних підстанцій, кабельних мереж, автоматичних вимикачів і магнітних пускачів.

## **2.2 Визначення вихідних даних підвищення ефективності функціонування систем електропостачання**

Для підвищення ефективності функціонування систем електропостачання (СЕР) необхідно розробити критерії прямого та непрямого оцінювання безвідмовності живлення електроприймачів у багаторівневих мережах із використанням усіх видів резервування. Необхідний рівень безвідмовності електропостачання визначається економічно виправданими витратами на створення структурної надмірності в системі; водночас капіталовкладення у формування таких резервних зв'язків мають бути мінімальними.

Розв'язання задачі виконується в загальному вигляді, без прив'язки до конкретних конфігурацій схем електропостачання та умов їхньої експлуатації. З цією метою використано математичну модель, побудовану не на статичних параметрах чи фіксованих характеристиках – тобто застосовано не усереднені детерміновані значення, а інтегральні функції розподілу ймовірностей.

Для підвищення ефективності функціонування систем впроваджується комплекс різноманітних заходів. Незалежно від свого характеру та функціонального спрямування, всі вони утворюють у системі певну надмірність (резервування). Загалом виділяють три види такої надмірності:

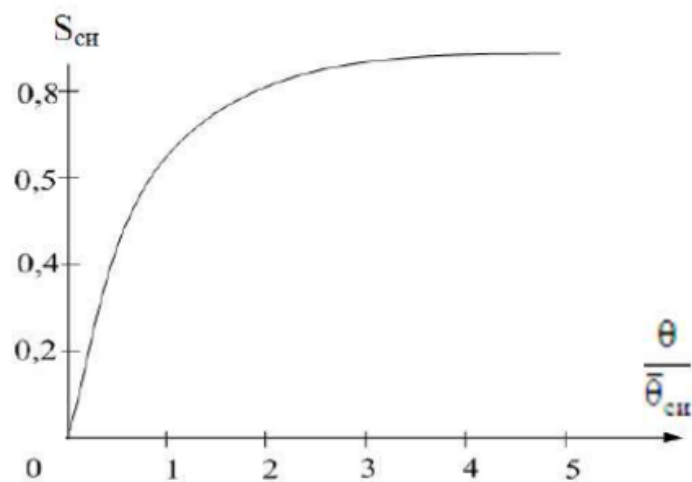


Рисунок 2.1 – Зміна взаємодії між електрообладнанням під час відмов

До них належать структурна, часова (резерв часу) та інформаційна надмірності. Для забезпечення нормативного рівня безвідмовності в інженерних системах широко застосовують метод резервування. Воно може охоплювати як окремі компоненти, так і комплексні підсистеми, їхні функціональні з'єднання, а також пристрої релейного захисту та автоматики.

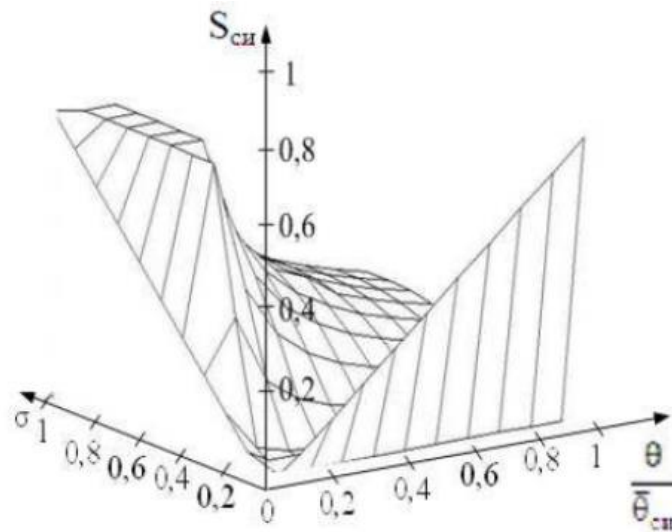


Рисунок 2 .2 – Зміна зв'язку між електрообладнанням під час відмов та логарифмічного розподілення відмов

В результаті виникає структурна надмірність, що дозволяє підвищити безвідмовність забезпечення електричної енергії приймачів технологічних машин.

### 2.3 Формування керуючих впливів під час управління багаторівневими системами електропостачання

Для ієрархічних багаторівневих систем із резервуванням, особливо за умов керування ними, вимушені зупинки виконавчих машин унаслідок відмов елементів є практично непередбачуваними. У випадках, коли аналізовані чинники не пов'язані між собою або їхній зв'язок є дуже слабким, інші методи розрахунку не забезпечують належної об'єктивності.

Під час аналізу виробничого комплексу металургійного заводу на підставі досвіду експлуатації систем електропостачання було прийнято припущення: чим ближче електрообладнання розташоване до першого (вищого) ієрархічного рівня системи, тим суттєвіше воно впливає на ймовірність вимушених зупинок кінцевих електроприймачів.

У розглянутому випадку згідно з використанням підходу електроценозу встановлено, що значний вплив має четвертий рівень рисунок 2.3

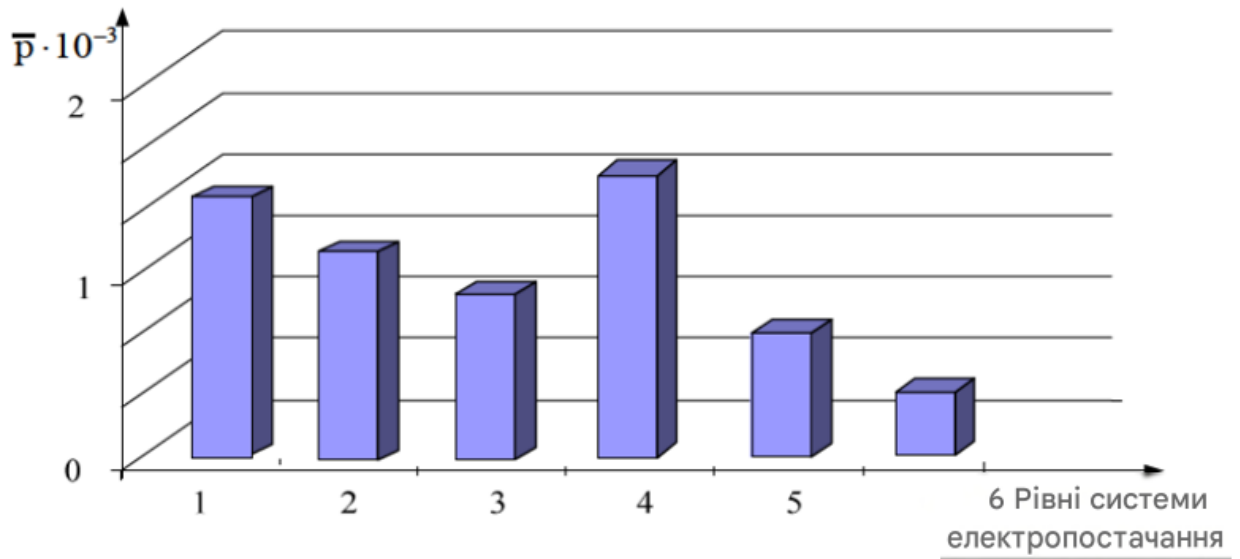


Рисунок 2.3 – Верогідність відмов електричного обладнання різних рівнів електроживлення

Висока ймовірність відмови обладнання на цьому етапі свідчить про недостатню надійність системи відповідного рівня. Якщо розглядати процес живлення електроприймачів у межах усіх шести рівнів, то з погляду надійності елементи системи з'єднані послідовно. Така класична топологія спрощує оцінювання впливу відмов окремого устаткування вищих ієрархічних рівнів на вимушені зупинки кінцевих споживачів.

З підвищенням рівня ієрархії масштаби наслідків аварій зростають, оскільки відмова одного елемента знеструмлює значно більшу кількість підпорядкованого електрообладнання. Саме тому для апаратури найвищих рівнів зазвичай передбачають обов'язкове резервування шляхом закладання структурної надмірності.

Висока ймовірність відмови обладнання на цьому етапі свідчить про недостатню надійність системи відповідного рівня. Якщо розглядати електропостачання споживачів у межах усіх шести рівнів, то з погляду надійності елементи структури з'єднані послідовно. Це суттєво спрощує аналіз впливу відмов окремого устаткування вищих ієрархічних рівнів на вимушені

простої кінцевих електроприймачів. З підвищенням рівня ієрархії збільшується й обсяг обладнання, яке залишається без живлення в разі аварії.

Виходячи зі структури взаємопов'язаного електроустаткування в технологічній системі та припущення про рівну ймовірність відмови її компонентів, інтегральний коефіцієнт готовності системи  $K_{\Sigma}$  матиме такий вигляд:

$$k_{\text{ГН}} = \frac{q_{\text{н}}}{q_{\text{н}} + \lambda_{\text{н}} t_{\text{дп}}} \quad (2.7)$$

де  $t_{\text{дп}}$  – допустимий час простою

Формування керівних впливів для оптимізації розподілу та підвищення ефективності використання електроенергії здійснюється на основі штучної нейронної мережі. У багаторівневій системі електропостачання за умови раціонального керування енергетичними потоками ця мережа виконує функцію динамічної моделі. Вона описує як сам енергопотік, так і його реакцію на зміни стану аналізованої системи при відомому графіку навантаження, що дало змогу сформувати повноцінну цифрову модель енергетичного потоку.

Ізоляцію електрообладнання необхідно проектувати з розрахунком на те, щоб протягом усього тривалого терміну експлуатації вона витримувала не лише номінальну напругу електроустановки, а й можливі короткочасні перенапруги.

До таких короткочасних чинників належать внутрішні та атмосферні (грозові) перенапруги.

Основними причинами виникнення перенапруг у мережі є:

- прямі удари блискавки (ПУБ);
- комутаційні операції (оперативні перемикання обладнання);
- аварійні режими роботи під час коротких замикань на землю.

Атмосферні перенапруги зумовлені розрядами блискавки в елементи електроустановок, зокрема в такі протяжні об'єкти, як повітряні лінії електропередачі.

Тривалість поодиноких грозових імпульсів лежить у мікросекундному діапазоні. За відсутності належного захисту пошкодження та перекриття ізоляції відбуваються через надвисокі амплітуди атмосферної перенапруги, значення якої може сягати кількох мільйонів вольт.

Індуктовані перенапруги виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції зарядів під час розрядів блискавки в землю поблизу електроустановки. Водночас частою причиною комутаційних перенапруг є спрацьовування апаратів захисту та комутаційної апаратури.

Перенапруги є одним із головних чинників виходу з ладу елементів електричних мереж напругою до 35 кВ. У мережах із повітряними лініями електропередачі основну частку становлять грозові перенапруги (близько 80 % випадків), перенапруги від однофазних замикань на землю з перемежованою дугою (орієнтовно 10 % випадків) та перенапруги, зумовлені ферорезонансними явищами (близько 5 % випадків).

Натомість у кабельних мережах перше місце за частотою виникнення (до 80 % випадків) посідають ферорезонансні процеси, оскільки грозові імпульси в підземну кабельну інфраструктуру практично не проникають.

### **3 МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНО-МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З КОМУТАЦІЙНИМИ ПЕРЕНАПРЯЖЕННЯМИ**

#### **3.1 Можливості прогнозу комутаційні перенапруги**

Математичну модель електричної частини галузі, підприємства, цеху, виробничого відділення, дільниці або окремої одиниці обладнання як об'єкта проєктування можна реалізувати через комплексну систему показників (графічних, цифрових та таблично-текстових образів). При цьому обов'язковим є дотримання принципів системної ієрархії, цілісності, автономності, додатковості (оцінювання складної системи у взаємодії із зовнішнім середовищем), а також врахування чинників невизначеності, вибору, структурованості та стійкості розвитку [9].

Ізоляція систем електропостачання промислових підприємств повинна протягом тривалого терміну експлуатації надійно витримувати прикладену робочу напругу з урахуванням постійного впливу деструктивних факторів: забруднення, зволоження, корозійних процесів, електродинамічних зусиль, а також старіння діелектрика внаслідок дії часткових розрядів.

Ізоляція має бути стійкою до багаторазових комутаційних перенапруг і забезпечувати швидку та легку ліквідацію наслідків у разі її перекриття. При цьому обов'язково враховується координація ізоляції з дією захисних засобів та апаратів: нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН), розрядників, релейного захисту, пристроїв автоматичного повторного ввімкнення (АПВ) тощо [6].

Поява комутаційних перенапруг зумовлена тим, що в попередньому (усталеному) режимі в реактивних елементах – ємностях та індуктивностях – існував певний запас електричної та магнітної енергії. Під час зміни конфігурації мережі (комутації) цей запас енергії не може змінитися миттєво відповідно до параметрів нової схеми.

Це призводить до виникнення перехідного процесу, який супроводжується інтенсивним обміном та перерозподілом енергії між електричним і магнітним полями. Найбільш бурхливо ці процеси протікають між реактивними опорами тих елементів мережі, що розташовані в безпосередній близькості від місця комутаційного збурення.

Як правило, цей процес має коливальний характер із частотою, що значно перевищує промислову (50 Гц), і може супроводжуватися піковими підвищеннями напруги, небезпечними для ізоляції обладнання.

Залежно від місця прикладання та характеру дії виділяють фазні, міжфазні, внутрішньофазні перенапруги, а також перенапруги між контактами комутаційних апаратів (поздовжні). Фазні перенапруги діють на ізоляцію електроустаткування відносно землі або заземлених конструкцій.

Варто враховувати, що в мережах з ізолюваною нейтраллю в режимі однофазного замикання на землю до фазної ізоляції здорових фаз прикладається повна лінійна напруга. Міжфазні перенапруги є визначальним фактором під час вибору параметрів лінійної ізоляції (зокрема, повітряних проміжків між проводами фаз на лініях, а також ізоляційних відстаней між обмотками фаз трансформаторів, електродвигунів та реакторів).

Внутрішньофазні перенапруги виникають між струмопровідними елементами однієї і тієї ж фази (наприклад, між сусідніми витками або котушками обмоток електричних машин). Своєю чергою, перенапруги між контактами комутаційних апаратів (поздовжні) з'являються під час їхнього розмикання або в разі несинхронної роботи окремих частин енергосистеми [8].

За можливістю прогнозування комутаційні перенапруги умовно поділяють на планові (оперативні) та аварійні. Планові перенапруги зумовлені регламентними оперативними ввімкненнями та вимкненнями обладнання. Оскільки час таких комутацій відомий заздалегідь, це дозволяє завчасно вжити технологічних заходів для мінімізації їхнього негативного впливу.

Типовими прикладами процесів, що супроводжуються плановими комутаційними перенапругами, є ввімкнення та вимкнення ліній

електропередачі в режимі холостого ходу (ненавантажених ліній), комутації ненавантажених трансформаторів, а також батареї статичних конденсаторів і реакторів поперечної компенсації.

Для обмеження таких перенапруг застосовують апаратні засоби (ОПН, шунтувальні резистори у вимикачах, шунтувальні реактори) та методи, пов'язані з безпосереднім керуванням комутаціями (кероване або синхронне ввімкнення та вимкнення, програмовані комутації) [8]. Крім того, під час планових перемикань оперативний персонал має можливість завчасно підготувати схему мережі, а саме: знизити струм збудження генераторів, змінити коефіцієнт трансформації трансформаторів або ввести в роботу вимкнені шунтувальні реактори.

Натомість за аварійних комутацій момент спрацьовування захисного апарата є випадковим і невідомим заздалегідь. Це унеможливорює попередню режимну підготовку енергосистеми, внаслідок чого кратність перенапруг під час таких процесів є значно вищою.

Високочастотні перенапруги виникають у такі моменти та за таких умов:

- у початкові моменти коротких замикань (КЗ) на шинах підстанцій, а також у разі близьких КЗ на лініях приєднань;
- під час спрацьовування короткозамикачів;
- внаслідок електричного пробою міжконтактних проміжків високовольтних вимикачів;
- під час пробою (спрацьовування) іскрових проміжків захисних апаратів;
- під час комутації роз'єднувачами ненавантажених ділянок шин та малопотужних електричних апаратів, зокрема: збірних шин у комірках вимикачів, обхідних систем шин, а також комірок із трансформаторами напруги й розрядниками.

Головна особливість високочастотних перенапруг полягає в тому, що традиційні захисні апарати – вентиляльні розрядники, нелінійні обмежувачі

перенапруг (ОПН) та іскрові проміжки – виявляються малоефективними. Це зумовлено стрімким зростанням (підйомом) їхніх вольт-секундних характеристик у сфері надкоротких передрозрядних часів (менше 1 мкс)



Рисунок 3.1 – Класифікація комутаційних перенапруг

До ключових комутаційних процесів в електричних мережах належать вимкнення ненавантажених ділянок шин і ліній, ізоляція ємнісних навантажень, розділення ліній в асинхронному режимі, а також комутація малих індуктивних струмів та ліквідація симетричних і несиметричних коротких замикань.

Найбільшу загрозу через виникнення комутаційних перенапруг становить саме відключення малих індуктивних струмів. Оскільки рівень іонізації дуги за таких умов є мінімальним, руйнування дугового каналу відбувається надто стрімко — ще до природного переходу струму через нульове значення. Як наслідок, опір дугового проміжку стрибкоподібно

зростає, а струм миттєво падає до нуля, що призводить до так званого зрізу струму.

Цей процес супроводжується виділенням значного обсягу енергії, акумульованої в індуктивності кола, що спричиняє суттєві перенапруги [15]. Після переривання струму у вимикачі, у міру розходження його контактів, електрична міцність між контактного проміжку поступово відновлюється. Проте, якщо в процесі розведення контактів відновлювана напруга перевищить поточну діелектричну міцність ізоляційного середовища, відбудеться пробій проміжку, тобто повторне запалювання дуги та замикання кола.

Чергове переривання струму відбудеться під час його природного переходу через нуль або внаслідок наступного зрізу (якщо йдеться про малі струми). Таким чином, процес вимкнення може перетворитися на серію циклічних повторних пробіїв та згасань дуги, яка триває доти, доки контакти не розійдуться на відстань, достатню для остаточного деіонізації та обриву дугового каналу.

### **3.2 Вибір обмежувачів перенапруг для захисту від комутаційних перенапруг**

Тривало допустима робоча напруга УНД (у міжнародній практиці – $U_c$ , кВ – найбільше діюче значення напруги частоти 50 Гц, яка може бути прикладена до виводів обмежувача необмежено довго (за нормованих умов експлуатації).

При виборі цього параметра повинна виконуватися нерівність

$$U_{нд} \geq U_{н.р} \quad (3.1)$$

де  $U_{н.р}$ , кВ - найбільша робоча напруга обладнання;

$U_{\text{ндр}}$ , кВ - найбільша напруга частоти 50 Гц, необмежено тривалий додаток якого до затискачів різних фаз (полюсів) електроустаткування допустимо для його ізоляції.

В Україні електричні мережі напругою 6–10 кВ працюють переважно з ізолюваною нейтраллю або з її заземленням через дугогасний реактор, який призначений для компенсації ємнісних струмів замикання на землю.

При увімкненні ОПН між фазою та землею за розрахункову тривало допустиму напругу приймають найбільшу лінійну напругу мережі  $U_{\text{л.макс}}$  (кВ). Це пов'язано з тим, що в таких режимах роботи нейтралі під час однофазного замикання на землю напруга на неушкоджених (здорових) фазах зростає до повного лінійного значення. Оскільки найбільша робоча напруга обладнання для мереж номіналом 6 кВ становить 7,2 кВ, а для мереж 10 кВ – 12 кВ, у першому наближенні для параметра УНД можна прийняти саме ці значення.

Водночас існує технічний компроміс: підвищення тривало допустимої робочої напруги УНД обмежувача призводить до зростання його залишкової напруги  $U_{\text{зал}} \leq U_{\text{ост}}$ , що відповідно знижує захисну ефективність апарата.

Залишкова напруга  $U_{\text{зал}}$  (кВ) – це максимальне амплітудне значення напруги на виводах ОПН під час протікання через нього імпульсу струму заданої форми. У паспортних характеристиках ОПН зазвичай нормуються параметри для імпульсів струму форми 8/20 мкс та 30/60 мкс (де перша цифра вказує на тривалість фронту, а друга – на час півспаду імпульсу).

Для оцінки захисного рівня ОПН при комутаційних перенапругах (КП) використовують криву струму форми 30/60 мкс, яка відтворює типовий для КП крутий фронт хвилі. Амплітуда цього імпульсу визначається на основі розрахунку перехідних процесів для конкретного виду комутації. Оскільки в більшості випадків цей струм не перевищує 500 А, за відсутності детальних розрахунків за базове приймають саме це значення, а відповідну залишкову напругу позначають як  $U_{\text{ост.500}}$ .

При цьому має дотримуватися умова:

$$U_{\text{ост.500}} \leq K_{\text{доп}} \sqrt{2} U_{\text{нд}} \quad (3.2)$$

де  $K_{\text{доп}}$  – допустима кратність внутрішніх перенапруг.

Питома енергоємність  $W_{\text{уд}}$  (кДж/кВ) – це відношення енергії, що виділилася в  $\Gamma_{\text{нн}}$  при подачі нормованого імпульсу струму комутаційного перенапруги до  $U_{\text{нд}}$ , кВ. Поглинається ОПН при обмеженні напруги енергія  $W_{\text{пог}}$ , кДж, не повинна перевищувати енергоємність ОПН:

$$W_{\text{уд}} \geq \frac{W_{\text{пог}}}{U_{\text{нд}}} \quad (3.3)$$

Оцінку граничного значення поглинається електромагнітної енергії навантаження дає вираз

$$W_{\text{пог}} = \frac{L_{\text{нг}} I_{\text{сз}}^2}{2} \quad (3.4)$$

де  $L_{\text{нг}}$  – індуктивність навантаження, Гн;

$I_{\text{сз}}$  – струм зрізу, А.

Довжина шляху витоків  $H$ , см – це найменша відстань по поверхні ізолюючої деталі між металевими частинами (арматурою) різного потенціалу без урахування ділянок, що проходять уздовж шарів цементу або інших аналогічних матеріалів.

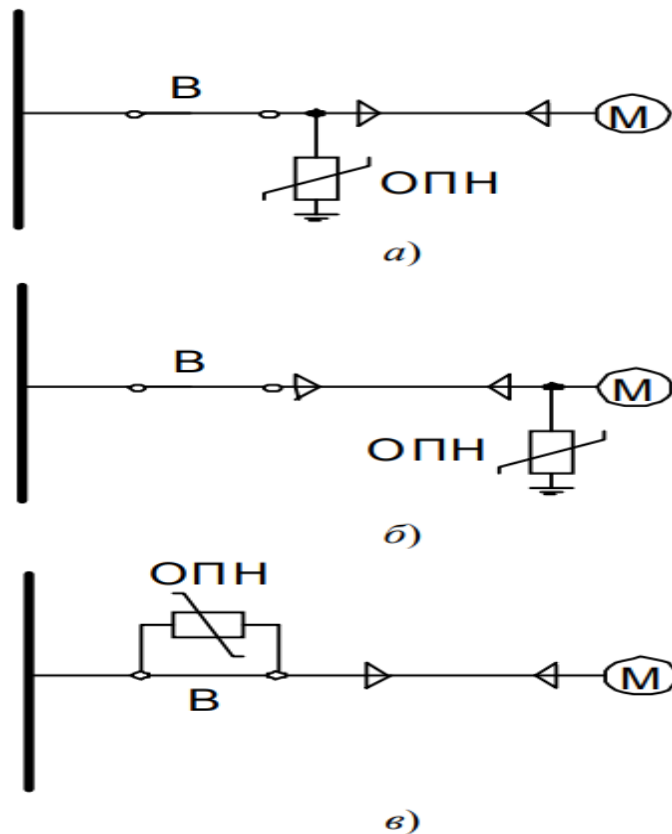


Рисунок 3.2 – Места установки ОПН

За повну довжину шляху витоку складової ізоляційної конструкції або багатоелементного ізолятора приймають суму шляхів витоку всіх його послідовно з'єднаних елементів.

Під час організації захисту електродвигунів ОПН можуть встановлюватися в трьох місцях:

- за вимикачем на початку кабельної лінії в комірці КРП (комплектного розподільного пристрою) за схемою «фаза–земля» (рис. 3.2, а);
- безпосередньо біля електродвигуна за схемою «фаза–земля» (рис. 3.2, б);
- паралельно контактам комутаційного апарата безпосередньо в його відсіку (рис. 1в).

Порівнюючи розміщення ОПН за вимикачем (рис. 1а) та безпосередньо біля навантаження (рис. 3.2, б), з погляду ефективності захисту ізоляції двигуна перевагу слід віддати другому варіанту.

### 3.3 Розрахунок допустимої тривалості тимчасових підвищень напруги

Така перевага зумовлена тим, що в разі розміщення ОПН за вимикачем напруга на затискачах двигуна буде вищою за залишкову напругу на обмежувачі через хвильові процеси в кабелі, який їх розділяє. За малої довжини кабельної лінії від вимикача до електродвигуна (до 50 м) обидва варіанти встановлення апарата захисту є еквівалентними, оскільки значення напруги на двигуні та залишкової напруги ОПН відрізняються несуттєво.

Останнім часом пропонується альтернативне рішення — встановлення ОПН паралельно контактам вимикача безпосередньо у його комірці (рис. 1в). За такої схеми обмежувач реагує не на абсолютну амплітуду хвилі перенапруги, що надходить з боку електродвигуна (як у перших двох варіантах), а на різницю напруг між живильним джерелом і двигуном.

З погляду захисту ізоляції цей варіант є найбільш ефективним, особливо у випадках із повторними запалюваннями дуги в міжконтактному проміжку під час відключення індуктивного навантаження. Його ключова перевага полягає в тому, що він забезпечує захист не лише поперечної (головної), а й поздовжньої (виткової) ізоляції електродвигуна. Проте практична реалізація такої схеми потребує спільного конструктивного опрацювання з боку підприємств-виробників комутаційних апаратів та ОПН.

Під час захисту силових трансформаторів від комутаційних перенапруг встановлення ОПН є обов'язковим за довжини кабельної лінії до 300 м, оскільки при більшій довжині кратність перенапруг уже не перевищує допустимих для ізоляції значень. ОПН монтується на початку кабельної лінії в комірці КРП (комплектного розподільного пристрою) або безпосередньо біля об'єкта, що захищається, аналогічно до схем, зображених на рис. 1а та 1б

Тимчасові підвищення напруги (квазістаціонарні перенапруги) Утимч (кВ) – це перенапруги промислової частоти обмеженої тривалості, які безпосередньо впливають на ОПН. До цієї категорії належать дугові та ферорезонансні перенапруги.

Небезпека таких режимів зумовлена не стільки їхньою амплітудою, скільки тривалістю безперервної дії на захисний апарат. Здатність ОПН витримувати короточасні підвищення напруги без загрози термічного руйнування характеризується залежністю  $M(t)$  (характеристика TOV – допустима кратність напруги залежно від часу її прикладання), яку заводо-виробники обов'язково зазначають у технічній документації до пристрою.

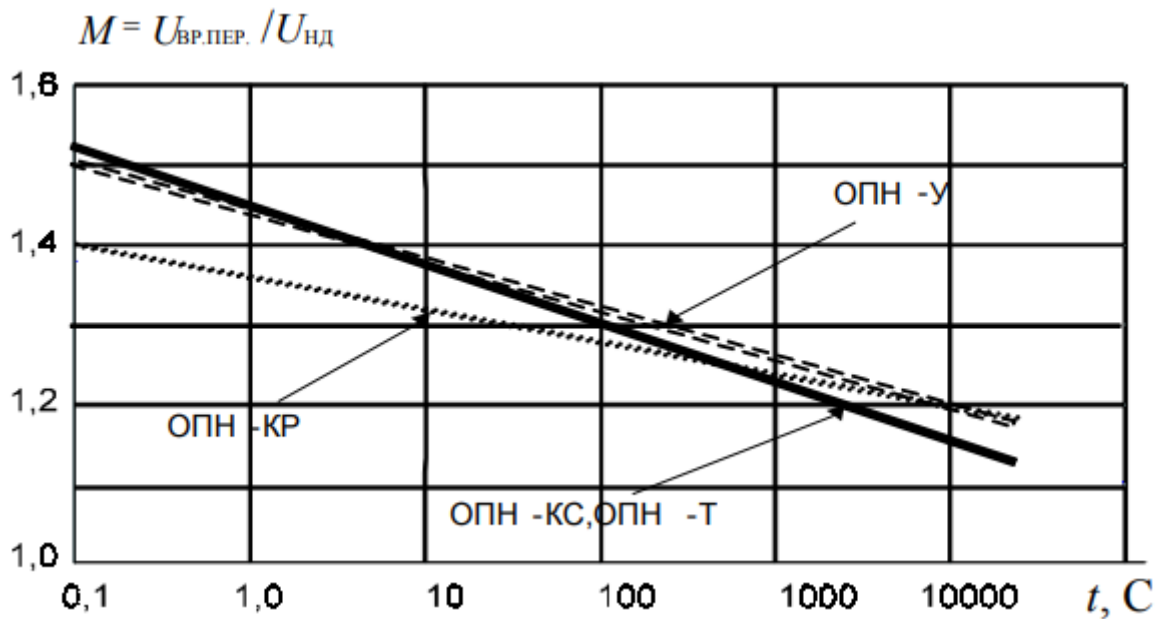


Рисунок 3.3 – Допустима тривалість тимчасових підвищень напруги

На рисунку 3.3 наведено вольт-часові характеристики ОПН, які дають змогу оцінити їхню стійкість до дії дугових та ферорезонансних перенапруг. За цими кривими визначають гранично допустимі рівні та тривалість короточасних підвищень напруги.

Для забезпечення надійної роботи обладнання необхідно впроваджувати заходи щодо обмеження кратності та тривалості таких процесів. Недотримання цієї умови призводить до стрімкого скорочення терміну служби ОПН або його термічного руйнування (пробою) внаслідок тривалого впливу тимчасових перенапруг.

У системах з ізольованою нейтраллю найбільшу загрозу становлять саме дугові перенапруги, максимальна зафіксована кратність яких може досягати 3–3,5 відносно найбільшої робочої напруги мережі.

Ймовірність виникнення дугових перенапруг із кратністю 3–3,5 не перевищує 0,05, проте такі процеси тривалістю 2–3 секунди є надзвичайно небезпечними для ОПН. Обмежувачі перенапруг не призначені для захисту мережі від тривалих дугових перенапруг, тому головна вимога до них у таких режимах – володіти достатньою термічною та напівпровідниковою стійкістю.

Для гарантування надійної та тривалої експлуатації ОПН в електричних мережах з ізольованою нейтраллю необхідно впроваджувати додаткові технічні заходи для зниження параметрів дугових перенапруг. Найбільш відомим та поширеним способом зменшення їхньої кратності є збільшення приєднаної ємності шляхом встановлення захисних конденсаторів безпосередньо на затискачах електродвигунів та силових трансформаторів.

Саме цей чинник зумовив розробку та впровадження резистивно-ємнісних обмежувачів перенапруг (RC-обмежувачів). При цьому тривалість існування дугових перенапруг в системі безпосередньо залежить від швидкодії релейного захисту (зокрема, захисту від підвищення напруги та захисту від однофазних замикань на землю).

У мережах із заземленням нейтралі через дугогасний реактор (ДГР) рівень комутаційних та дугових перенапруг є значно нижчим, а його величина визначається ступенем розстроєння компенсації ємнісного струму. У разі значного відхилення від резонансного налаштування реактора такі мережі втрачають свої експлуатаційні переваги і за характеристиками наближаються до систем із чисто ізольованою нейтраллю.

Під час налаштування ДГР критично важливо точно визначити величину ємнісних струмів мережі, які підлягають компенсації. Розрахункові значення ємнісних струмів у нормальному робочому режимі та в режимі однофазного замикання на землю (ОЗЗ) різняться. Через це необхідно забезпечити такий алгоритм налаштування, за якого задане співвідношення між ємнісним

струмом мережі та індуктивним струмом реактора залишатиметься незмінним як за умов нормальної експлуатації, так і при виникненні замикання на землю.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Задачі розділу

Згідно із ст. 1 Закону України «Про охорону праці» «Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності» [10].

Законодавство визначає такі основні засади державної політики у сфері охорони праці:

- Пріоритетність збереження життя і здоров'я працівників та повна відповідальність роботодавця за забезпечення належних, безпечних і здорових умов праці.
- Підвищення рівня промислової безпеки шляхом запровадження суцільного технічного контролю за станом виробництва, технологій і продукції, а також всебічне сприяння підприємствам у створенні безпечного середовища.
- Комплексний підхід до вирішення завдань охорони праці на базі державних, галузевих і регіональних програм, із урахуванням світових досягнень науки, техніки, екологічних стандартів та загальних напрямів соціально-економічної політики.
- Соціальний захист працюючих та повне відшкодування шкоди особам, які постраждали від професійних захворювань чи нещасних випадків на виробництві.
- Єдність вимог з охорони праці для всіх підприємств та суб'єктів господарювання, незалежно від їхнього профілю, виду діяльності та форми власності.

- Адаптація робочих процесів до індивідуальних можливостей працівника з обов'язковим урахуванням стану його здоров'я та психофізіологічних особливостей.

## 4.2 Аналіз нормативно-правової бази з питань захисту від перенапруг

Забезпечення надійного захисту виробничого персоналу та електрообладнання від перенапруг є одним із ключових завдань при проектуванні та експлуатації систем електропостачання промислових підприємств.

Правове регулювання цієї сфери в Україні базується на системі законодавчих актів, які визначають технічні вимоги, правила влаштування електроустановок та відповідальність за їх дотримання.

Основоположним документом є Закон України «Про охорону праці», який встановлює гарантії прав працівників на безпечні умови праці та зобов'язує роботодавця створювати належні умови для запобігання виробничому травматизму, зокрема від ураження електричним струмом внаслідок комутаційних та атмосферних перенапруг.

Безпосередньо технічні аспекти регламентуються Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів (далі – ПБЕЕС), які встановлюють вимоги до заземлюючих пристроїв, захисного відключення та блискавкозахисту. Крім того, чинними є Державні будівельні норми ДБН В.2.5-23:2010 «Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення» та ДСТУ Б В.2.5-38:2008 «Інженерне обладнання будинків і споруд».

Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд», які містять детальні вказівки щодо класифікації зон захисту від блискавки, вибору типів громовідводів та розрахунку імпедансу струмовідводів. Особливої уваги заслуговують

Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), зокрема розділ 1.7 «Заземлення і захисні заходи електробезпеки», де визначено категорії

електроустановок за напругою, режимами нейтралі та величини допустимого опору заземлення в залежності від умов середовища.

Аналіз наведеної нормативної бази дозволяє зробити висновок, що для промислового цеху зі значною кількістю електроприймачів та протяжними кабельними лініями обов'язковим є виконання комплексу заходів: влаштування зовнішньої та внутрішньої блискавкозахисту, встановлення обмежувачів перенапруг (ОПН) на вводі та у розподільчих щитах, а також організація системи вирівнювання потенціалів, що дозволяє уникнути небезпечних крокових напруг та напруг дотику при виникненні аварійних режимів.

#### **4.3 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів, пов'язаних з перенапругами**

У виробничому середовищі промислового цеху, де експлуатуються потужні електродвигуни, зварювальні агрегати та частотні перетворювачі, джерелами перенапруг можуть виступати як внутрішні чинники (комутаційні перехідні процеси, відключення індуктивних навантажень, короткі замикання), так і зовнішні (прямі удари блискавки у будівлю або лінії електропередач, а також електростатична індукція від грозових розрядів, що відбуваються поблизу).

Дія перенапруг призводить до виникнення кількох небезпечних факторів, які класифікуються за ГОСТ 12.1.003-83 та ДСН 3.3.6.037-99. По-перше, це підвищене значення напруги в електричному колі, яке може досягати величин, значно вищих за номінальну (до 6-10 кВ на стороні 0,4 кВ), що спричиняє пробій ізоляції кабелів та обмоток обладнання, виникнення електричної дуги та, як наслідок, термічний вплив на персонал із можливими опіками.

По-друге, значну загрозу становить поява крокової напруги на металевих підлогах, заземлених конструкціях та корпусах верстатів у разі стікання струму блискавки в землю або замикання на корпус; це створює ризик

електротравм, тяжкість яких залежить від сили струму та часу його проходження через тіло людини, що згідно з класифікацією може призвести до фібриляції серця.

Крім прямих електронезбезпечних чинників, перенапруги спричиняють вторинні негативні ефекти: раптове відключення вентиляційних систем та систем технологічного контролю тягне за собою накопичення вибухонебезпечних газів або пилу, що класифікується як підвищена пожежонебезпека згідно з НПАОП 40.1-1.01-97.

Також варто зазначити, що імпульсні завади в мережах живлення викликають збої в роботі мікропроцесорних систем управління верстатами з числовим програмним керуванням, що відноситься до факторів психофізіологічної напруги через необхідність екстреного втручання оператора.

Таким чином, комплексний аналіз доводить необхідність розробки як технічних рішень для обмеження амплітуди перенапруг, так і організаційних процедур для мінімізації часу перебування персоналу в небезпечних зонах у грозивий період.

#### **4.4 Організаційні та технічні заходи щодо захисту від перенапруг у промисловому цеху**

Для забезпечення безпечних умов праці в умовах реальної експлуатації промислового цеху запропоновано комплекс організаційних та технічних заходів, які взаємодоповнюють один одного.

З боку організаційних заходів передбачається призначення наказом по підприємству особи, відповідальної за електрообладнання, яка проходить щорічну перевірку знань ПУЕ та ПБЕЕС.

Розробляється та затверджується інструкція з охорони праці під час роботи в електроустановках до 1000 В, в якій окремим пунктом регламентується діяльність персоналу при наближенні грози: забороняються

ремонтні роботи на повітряних лініях, перемикання в розподільчих пристроях, що не є аварійними, а також пересування в безпосередній близькості від струмовідводів та заземлювачів.

Обов'язково проводяться вступний та первинний інструктажі для всіх працівників цеху із записом у журналі реєстрації, де акцентується увага на небезпеці крокової напруги та дії при потраплянні під напругу (правила звільнення потерпілого від дії струму та надання першої домедичної допомоги).

Також організовується періодичний контроль опору ізоляції та стану системи заземлення не рідше одного разу на рік із оформленням відповідного протоколу випробувань, що дозволяє своєчасно виявляти деградацію ізоляційних властивостей.

До технічних заходів, які впроваджуються безпосередньо у виробничому приміщенні, належить модернізація системи блискавкозахисту. Враховуючи площу цеху та його конфігурацію, використовується стрижнева система громовідводів, встановлених на покрівлі будівлі, з'єднаних між собою горизонтальними токовідводами з сталевий стрічки перерізом 4x30 мм.

Усі металеві комунікації (трубопроводи, кабельні лотки) на вводі в будівлю приєднуються до головної заземлювальної шини (ГЗШ) через розрядники для захисту від занесення високого потенціалу.

Безпосередньо на вводі розподільного щита (РЩ-0,4 кВ) встановлюються обмежувачі перенапруг класу С (ІІ категорія) типу ОПН-0,4, які забезпечують обмеження амплітуди хвилі напруги на рівні не більше 1,5 кВ.

Для захисту кінцевих споживачів – верстатів та комп'ютерних блоків керування – у розподільчих шафах на вихідних лініях монтуються комбіновані фільтри та пристрої захисту класу D (ІІІ категорія).

З метою вирівнювання потенціалів у приміщенні цеху виконується додаткова система вирівнювання, що передбачає прокладання мідної

магістралі перерізом  $10 \text{ мм}^2$ , до якої приєднуються всі заземлені частини обладнання та сторонні провідні конструкції.

Крім того, проводиться заміна стрічкових запобіжників на автоматичні вимикачі з електронними розчіплювачами, що мають більш високу швидкодію при імпульсних струмах, що дозволяє локалізувати аварійну ділянку до того, як перенапруга вплине на ізоляцію сусідніх приєднань.

#### 4.5 Розрахунок штучного освітлення виробничого приміщення

Хоча штучне освітлення не є прямим засобом боротьби з перенапругами, його розрахунок є невід'ємною частиною розділу охорони праці, оскільки забезпечує нормальну видимість для персоналу, що обслуговує електроштити та проводить ремонтні роботи, а також дозволяє уникнути додаткових стресових ситуацій при аварійних відключеннях.

Розрахунок проведено за методом коефіцієнта використання світлового потоку. Вихідні дані: довжина цеху  $A = 60 \text{ м}$ , ширина  $B = 24 \text{ м}$ , висота підвісу світильників  $H_p = 6 \text{ м}$  (відстань від світильника до робочої поверхні). Згідно з ДБН В.2.5-28-2018, для виконання робіт середньої точності (розряд IV) потрібна освітленість  $E = 200 \text{ лк}$ .

Приймаємо коефіцієнт запасу  $K_z = 1,5$  (для запилених приміщень) та коефіцієнт нерівномірності  $Z = 1,1$ . Для освітлення обираємо світильники типу РСП-05 з газорозрядними лампами ДРЛ потужністю  $400 \text{ Вт}$ , світловий потік кожної лампи  $\Phi_l = 22000 \text{ лм}$ . Спочатку визначаємо індекс приміщення за формулою:

$$i = (A * B) / (H_p * (A + B)) \quad (4.1)$$

$$i = (60 * 24) / (6 * (60 + 24)) = 1440 / (6 * 84) = 1440 / 504 \approx 2,86.$$

Приймаючи коефіцієнти відбиття стелі  $\rho_{ст} = 50 \%$ , стін  $\rho_c = 30 \%$ , підлоги  $\rho_p = 10 \%$ , за довідковими таблицями знаходимо коефіцієнт використання

світлового потоку  $\eta = 0,58$ . Далі визначаємо необхідну кількість світильників (ламп) за формулою:

$$N = (E * S * K_3 * Z) / (\Phi_{\text{л}} * \eta) \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} N &= (200 * 1440 * 1,5 * 1,1) / (22000 * 0,58) = \\ &= (200 * 1440 = 288000; 288000 * 1,5 = 432000; \end{aligned}$$

$$432000 * 1,1 = 475200 - \text{чисельник; знаменник: } 22000 * 0,58 = 12760.$$

$$\text{Отже, } N = 475200 / 12760 \approx 37,2 \text{ шт.}$$

Приймаємо  $N = 38$  світильників. Розміщуємо їх у 4 ряди по довжині (по 10 світильників у ряду) та у 2 ряди по ширині (загалом 40 шт.), що забезпечить запас за освітленістю для компенсації старіння ламп.

Таким чином, розрахунок показав, що для створення нормованої освітленості достатньо встановити 38 сучасних світильників, однак для рівномірності застосовано 40 одиниць.

#### **4.6 Розрахунок електробезпеки та параметрів захисного заземлення**

Розрахунок заземлення виконується з метою забезпечення швидкого стікання струму в землю при пробії ізоляції та обмеження напруги дотику на корпусах обладнання, що особливо важливо в умовах підвищеної вологості та наявності струмів витоку.

Для електроустановки напругою 380/220 В з ізольованою нейтраллю (система IT) згідно з ПУЕ допустимий опір заземлювального пристрою влітку не повинен перевищувати 4 Ом. Грунт на території цеху – глина з питомим опором  $\rho_{\text{вим}} = 60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . В якості заземлювачів приймаємо вертикальні стрижні довжиною  $L = 3 \text{ м}$ , діаметром  $d = 0,05 \text{ м}$  (куток 50x50x5 мм), заглиблені

на глибину  $t = 0,7$  м від поверхні землі до верхнього кінця, та з'єднані між собою горизонтальною сталевією смугою  $40 \times 4$  мм на глибині  $0,5$  м.

Розраховуємо коефіцієнт сезонності для вертикальних електродів у першій кліматичній зоні  $K_v = 1,5$ .

Розрахунковий питомий опір для вертикальних електродів:

$$\rho_{\text{розр.в}} = \rho_{\text{вим}} * K_v = 60 * 1,5 = 90 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (4.3)$$

Визначаємо опір розтіканню одного вертикального стержня за формулою для заглибленого стрижня:

$$R_v = (\rho_{\text{розр.в}} / (2 * \pi * L)) * [\ln(2L/d) + 0,5 * \ln((4t + L) / (4t - L))],$$

де  $t = 0,7 + L/2 = 0,7 + 1,5 = 2,2$  м (відстань від поверхні до середини стрижня).

Підставляємо значення:

$$\begin{aligned} R_v &= (90 / (2 * 3,14 * 3)) * [\ln(6/0,05) + 0,5 * \ln((4*2,2+3)/(4*2,2-3))] = (90 / \\ &18,84) * [\ln(120) + 0,5 * \ln(11,8/5,8)] = 4,78 * [4,787 + 0,5 * \ln(2,034)] = 4,78 * \\ &[4,787 + 0,5 * 0,709] = 4,78 * (4,787 + 0,354) = 4,78 * 5,141 \approx 24,6 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Оскільки опір одного стрижня перевищує допустимі  $4$  Ом, необхідно застосувати групове заземлення. Попередньо приймаємо кількість вертикальних електродів  $n = 15$  шт., розташованих у ряд на відстані  $a = 6$  м один від одного (відношення  $a/L = 2$ ).

Знаходимо коефіцієнт використання вертикальних стрижнів при рядному розміщенні  $\eta_v \approx 0,56$ , а коефіцієнт використання горизонтальної смуги  $\eta_g \approx 0,34$  (з довідкових таблиць).

Загальний опір складного заземлювача визначаємо з урахуванням опору горизонтальної смуги. Для цього спочатку розраховуємо опір горизонтальної

смуги довжиною  $15 \cdot 6 = 90$  м (без урахування екрануючого впливу) при розрахунковому коефіцієнті для смуги  $K_{\Gamma} = 2,2$  (для першої зони).

Розрахунковий опір горизонтального заземлювача:  $R_{\Gamma\_розр} = \rho \cdot K_{\Gamma}$ . Але спрощено загальний опір системи обчислюють за формулою для складного заземлювача в однорідному ґрунті. У практичному інженерному розрахунку приймають, що при  $n = 15$  та відношенні  $a/L = 2$  загальний опір системи становить:

$$R_{заг} = R_{в} / (n \cdot \eta_{в}) = 24,6 / (15 \cdot 0,56) = 24,6 / 8,4 \approx 2,93 \text{ Ом.} \quad (4.4)$$

Отримане значення 2,93 Ом менше за допустиме 4 Ом, отже, умова електробезпеки виконується із запасом. Остаточо приймаємо 15 вертикальних заземлювачів та горизонтальну смугу, що їх об'єднує.

Така конструкція забезпечує ефективне відведення струму короткого замикання та імпульсних струмів блискавки, мінімізуючи ризик виникнення небезпечних напруг дотику на металевих частинах обладнання. Результати розрахунків засвідчують, що запропонована система заземлення є надійною та відповідає всім нормативним вимогам.

Таким чином, розроблений комплекс заходів дозволяє повністю забезпечити вимоги чинного законодавства з охорони праці, створити безпечні умови для працівників та забезпечити безперебійну роботу виробничого обладнання навіть при впливі грозових та комутаційних перенапруг.

## ВИСНОВКИ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано підвищення безвідмовності електричних систем промислових підприємств.

В першій частині виконано підвищення безвідмовності електропостачання тимчасовим резервуванням при включенні в коло ємнісного накопичувача; забезпечення якості та надійності їх структур системи електропостачання; перенапруги систем електропостачання та їх кваліфікація.

В другій частині розглянуто питання оцінка відмовистості систем електропостачання промислових підприємств; оцінка впливу засобів та способів підвищення відмовостійкості системи; визначення вихідних даних підвищення ефективності функціонування систем електропостачання; формування керуючих впливів під час управління багаторівневими системами електропостачання.

В третій частині розраховано методи інформаційно-математичного опису систем електропостачання з комутаційними перенапряженнями; можливості прогнозу комутаційні перенапруги; вибір обмежувачів перенапруг для захисту від комутаційних перенапруг; розрахунок допустимої тривалості тимчасових підвищень напруги.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі були розглянуті питання з охорони праці, де розроблені організаційні та технічні заходи зі створенням безпечних та нешкідливих умов праці на об'єкті.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Мещеряков В. С., Глухов А. А. Основні напрями забезпечення надійності систем електропостачання / XIX ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ «СТАЛИЙ РОЗВИТОК МІСТ: ПОСТВОЄННИЙ ПЕРІОД» 18 квітня 2026 р м. Харків.
2. European Commission. (2023). \*Regulation (EU) 2023/... on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFIR). Text adopted\*.
3. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. *навч. посібник* Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004. 404с.
4. Попович М. Г., Артименко Л. Ф., Бурмістенков О. П. та ін. Електричні машини та електропривод побутової техніки: *Підручник*. За ред. Д. Б. Головка, М. Г. Поповича. – 2-ге вид., стеретик. К.: Либідь, 2004. 352с.
5. Буртний В. В., Карплюк Л. Ф., Панченко Б. Я.. Тиристорний електропривід постійного струму: *Навч. посібник* Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007. 128с.
6. Барало О. В., Самойленко П. Г., Гранат С. Є., Ковальов В. О. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: *Навчальний посібник* К.: Аграрна освіта, 2010. 557с.
7. Колісник М. П., Шевченко Д. Ф., Мелашич В. В. Основні розробки, виробництва, монтажу, випробувань та обстежень підйомно-транспортних машин. *Навчальний посібник* Дніпропетровськ: Пороги, 2007. 193с.
8. A New Range Of Medium Voltage Multilevel Inverter Drives With Floating Capacitor Technology. Beinhold Georg // EPE 2001 – Graz. – P. 42–44.
9. Dynamic Average-Value Modeling of a Four-Level Drive System / Corzine Keith // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2003. – № 18. – P.
10. Закон України «Про охорону праці». – К., 2016.

11. Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності». – К., 2001.