

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного  
менеджменту

## Магістерська кваліфікаційна робота

на тему: «Оптимізація режиму електромережі підприємства у разі обмеження  
його потужності енергосистемою»

Виконала: студентка 2 курсу, гр. ЕМ-22м  
спеціальність 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(шифр, назва)




Рикова А.К.

(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2023 р.

Керівник: к.т.н., професор каф. ЕСЕЕМ

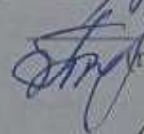


Терешкевич Л.Б.

(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2023 р.

Опонент к.т.н., доц. каф. ЕСС



Теня В.В.

(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

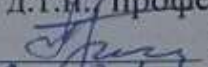
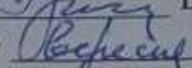
д.т.н., проф. Бурбело М.Й.

(прізвище та ініціали)

« 8 » 12 2023 р.

Вінниця – 2023 рік

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітньо-професійна програма – Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ЕСЕМ  
д.т.н./професор  
 Бурбело М.Й.  
« 19 »  2023 р.

### ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ РИКОВОЇ АННИ КОСТЯНТИНІВНИ

1. Тема роботи: «Оптимізація режиму електромережі підприємства у разі обмеження його потужності енергосистемою».  
керівник роботи: Терешкевич Леонід Борисович, к.т.н., професор каф. ЕСЕМ, затверджені наказом по ВНТУ від 18.09.2023 р., № 247
2. Строк подання студентом роботи 04.12.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: Наукові публікації з питань оптимізації режимів в електричних мережах, математичні моделі оптимального симетрування, відомості про електричні навантаження.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки.
  - Анотація.
  - Вступ.
  - 1 Аналіз стану проблеми і постановка задачі досліджень
    - 1.1 Сучасний стан якості електроенергії в промислових електромережах
    - 1.2 Втрати електроенергії та збитки від незадовільної якості електроенергії
    - 1.3 Енергозберігаючий зміст задач симетрування електричних режимів
    - 1.4 Способи й технічні засоби підвищення якості електроенергії
    - 1.5 Наукові задачі, що потребують свого вирішення. Постановка задачі, що вирішується в роботі
  - 2 Несиметричні електричні режими та математичні моделі їх оптимізації
    - 2.1 Вирішення задач симетрування режимів методами дослідження операцій
    - 2.2 Задачі внутрішнього симетрування, математичні моделі для прийняття рішень
  - 3° Математична модель розрахунку оптимального варіанту обмеження навантажень несиметричних електроприймачів при дефіциті потужності
    - 3.1 Математична модель для пошуку оптимального варіанту обмеження потужності навантажень
    - 3.2 Алгоритм аналізу математичної моделі для пошуку оптимального варіанту обмеження потужності групи несиметричних електроприймачів



3.3 Приклад розрахунку з пошуку оптимального рішення обмеження потужності групи несиметричних навантажень

4 Економічні розрахунки обґрунтування ефективності наукових досліджень

4.1 Оцінка економічного ефекту

4.2 Техніко-економічні розрахунки з порівняння різних варіантів вирішення задачі

4.3 Розрахунок терміну окупності капітальних вкладень

5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу: Матеріал, необхідний для висвітлення сутності проведених досліджень та впровадження розроблених методик

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.В., зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., професор,		
Економічна частина	Шулле Ю.А., к.т.н., доцент кафедри ЕСЕЕМ		
Спеціальна частина	Терешкевич Л.Б., к.т.н., професор кафедри ЕСЕЕМ		

6. Дата видачі завдання « 20 » вересня 2023 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання	Примітка
1	Аналіз стану проблеми та наукових напрацювань, постановка задачі досліджень	30.09.2023	
2	Дослідження процесів формування несиметричних режимів в електричній мережі, математичні моделі їх оптимізації	20.10.2023	
3	Математична модель розрахунку оптимального варіанту обмеження навантажень несиметричних електроприймачів при дефіциті потужності	10.11.2023	
4	Економічна частина роботи	15.11.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2023	
6	Написання пояснювальної записки	30.11.2023	

Студентка

(підпис)

Рикова А.К.

Керівник роботи

(підпис)

Терешкевич Л.Б.

Нормоконтроль

(підпис)

Войтюк Ю.П.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного  
менеджменту

## Магістерська кваліфікаційна робота

на тему: «Оптимізація режиму електромережі підприємства у разі обмеження  
його потужності енергосистемою»

Виконала: студентка 2 курсу, гр. ЕМ-22м  
спеціальність 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
(шифр, назва)

Рикова А.К.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Керівник: к.т.н., професор каф. ЕСЕЕМ

Терешкевич Л.Б.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Опонент \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Допущено до захисту**  
Завідувач кафедри ЕСЕЕМ  
д.т.н., проф. Бурбело М.Й.  
(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Вінниця – 2023 рік

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітньо-професійна програма – Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ЕСЕЕМ  
д.т.н., професор  
\_\_\_\_\_ Бурбело М.Й.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

### **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ РИКОВОЇ АННИ КОСТЯНТИНІВНИ**

1. Тема роботи: «Оптимізація режиму електромережі підприємства у разі обмеження його потужності енергосистемою».  
керівник роботи: Терешкевич Леонід Борисович, к.т.н., професор каф. ЕСЕЕМ, затверджені наказом по ВНТУ від 18.09.2023 р., № 247
2. Строк подання студентом роботи 04.12.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: Наукові публікації з питань оптимізації режимів в електричних мережах, математичні моделі оптимального симетрування, відомості про електричні навантаження.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки.
  - Анотація.
  - Вступ.
    - 1 Аналіз стану проблеми і постановка задачі досліджень
      - 1.1 Сучасний стан якості електроенергії в промислових електромережах
      - 1.2 Втрати електроенергії та збитки від незадовільної якості електроенергії
      - 1.3 Енергозберігаючий зміст задач симетрування електричних режимів
      - 1.4 Способи й технічні засоби підвищення якості електроенергії
      - 1.5 Наукові задачі, що потребують свого вирішення. Постановка задачі, що вирішується в роботі
    - 2 Несиметричні електричні режими та математичні моделі їх оптимізації
      - 2.1 Вирішення задач симетрування режимів методами дослідження операцій
      - 2.2 Задачі внутрішнього симетрування, математичні моделі для прийняття рішень
    - 3° Математична модель розрахунку оптимального варіанту обмеження навантажень несиметричних електроприймачів при дефіциті потужності
      - 3.1 Математична модель для пошуку оптимального варіанту обмеження потужності навантажень
      - 3.2 Алгоритм аналізу математичної моделі для пошуку оптимального варіанту обмеження потужності групи несиметричних електроприймачів

3.3 Приклад розрахунку з пошуку оптимального рішення обмеження потужності групи несиметричних навантажень

4 Економічні розрахунки обґрунтування ефективності наукових досліджень

4.1 Оцінка економічного ефекту

4.2 Техніко-економічні розрахунки з порівняння різних варіантів вирішення задачі

4.3 Розрахунок терміну окупності капітальних вкладень

5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

**ВИСНОВКИ**

5. Перелік графічного матеріалу: Матеріал, необхідний для висвітлення сутності проведених досліджень та впровадження розроблених методик

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.В., зав. каф. БЖДПБ, д.пед.н., професор,		
Економічна частина	Шулле Ю.А., к.т.н., доцент кафедри ЕСЕМ		
Спеціальна частина	Терешкевич Л.Б., к.т.н., професор кафедри ЕСЕМ		

6. Дата видачі завдання « 20 » вересня 2023 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання	Примітка
1	Аналіз стану проблеми та наукових напрацювань, постановка задачі досліджень	30.09.2023	
2	Дослідження процесів формування несиметричних режимів в електричній мережі, математичні моделі їх оптимізації	20.10.2023	
3	Математична модель розрахунку оптимального варіанту обмеження навантажень несиметричних електроприймачів при дефіциті потужності	10.11.2023	
4	Економічна частина роботи	15.11.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2023	
6	Написання пояснювальної записки	30.11.2023	

Студентка

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рикова А.К.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Терешкевич Л.Б.

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_ (підпис)

Войтюк Ю.П.

АНОТАЦІЯ

Рикова Анна Костянтинівна. Оптимізація режиму електромережі підприємства у разі обмеження його потужності енергосистемою. Спеціальність 141 - Вінниця: ВНТУ, ФЕЕМ, кафедра ЕСЕЕМ, 2023 - 91 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 28 назв.; рис. 8; табл. 26.

В магістерській кваліфікаційній роботі проаналізовано наукові роботи з проблеми симетрування режиму та розглянуто процеси формування несиметричних режимів в електричних мережах, особливо в умовах дефіциту потужності. Розглянуто два метода обмеження потужності групи несиметричних електроприймачів, що підключені до одного вузла електромережі, та проведено розрахунки по відключенню несиметричних електроприймачів даними методами.

Проведено техніко-економічну оцінку ефективності капітальних вкладень в обмеження потужності у вузлі з несиметричним навантаженням.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: несиметричні електроприймачі, обмеження потужності, вузол живлення.

## ABSTRACT

Rukova A. K.

Optimization the mode of the company's power grid in case of power system limitation. Specialty 141 – Vinnitsa: VNTU, FEEEM. Department of ESEEM, 2023 - 91. In Ukrainian language. Bibliographer: 28 titles; fig.: 8; tabl. 26.

In the master's qualification work, scientific works on the problem of mode symmetrization were analyzed and the processes of formation of asymmetric modes in electric networks, especially in conditions of power shortage, were considered. Two methods of limiting the power of a group of asymmetric electric receivers connected to one node of the power grid were considered, and calculations were made for disconnecting the asymmetric electric receivers by these methods.

A technical and economic evaluation of the effectiveness of capital investments in limiting capacity in a node with an asymmetric load was carried out.

The issue of occupational health and safety in emergency situations was considered.

**Key words:** asymmetric electric receivers, power limitations, power unit.



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРНІ ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА .....	8
1.1 Показники якості електричної енергії.....	8
1.2 Вплив якості електроенергії на електроприймачів. Збитки від незадовільної якості електроенергії.....	11
1.3 Сутність впливу несиметрії напруги на роботу електроприймачів.....	15
1.4 Способи й технічні засоби для підвищення якості електроенергії .....	20
1.5 Наукові задачі, що потребують свого вирішення. Постановка задачі, що вирішується в роботі .....	24
Висновки по розділу 1 .....	26
РОЗДІЛ 2 ПОСТАНОВКА ТА ВИРІШЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАДАЧ МЕТОДАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙ .....	29
2.1 Дослідження операцій – класичний математичний апарат вирішення оптимізаційних задач .....	29
2.2 Цільова функція для задач симетрування режимів .....	32
2.3 Параметри оптимізації несиметричних режимів в 3-проводній мережі шляхом внутрішнього симетрування однофазних навантажень ..	33
2.4 Математична модель оптимізації несиметричних режимів.....	36
2.5 Математична модель оптимізації несиметричного режиму в 4-провідній мережі шляхом внутрішнього симетрування навантажень.....	38
Висновки по розділу 2 .....	39
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ОБМЕЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НЕСИМЕТРИЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ПРИ ДЕФІЦИТІ ПОТУЖНОСТІ .....	41
3.1 Питання обмеження потужності навантажень .....	41
3.2 Математична модель оптимізації несиметричного режиму мережі шляхом внутрішнього симетрування навантажень із постійним фазуванням при дефіциті потужності в енергосистемі.....	42
3.3 Алгоритм аналізу математичної моделі для пошуку оптимального варіанту обмеження потужності групи несиметричних електроприймачів із постійним фазуванням.....	44

3.4 Числовий приклад процесу розрахунку з пошуку рішення оптимального обмеження потужності вузла несиметричних навантажень із постійним фазуванням .....	46
3.5 Числовий приклад оптимального внутрішнього симетрування із зміною фазування при обмеженні потужності вузла несиметричних навантажень .....	49
Висновки по розділу 3 .....	59
<b>РОЗДІЛ 4 МЕТОДИ ЕКОНОМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>60</b>
4.1 Оцінка економічного ефекту .....	60
4.2 Техніко-економічні розрахунки з порівняння різних варіантів вирішення задачі. Розрахунок терміну окупності капітальних вкладень .....	61
4.3 Впровадження інформаційної моделі для контролю ПЯЕ та технологічний аудит проекту .....	64
4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	66
4.5 Розробка ринкової стратегії проекту .....	67
4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	68
Висновки по розділу 4 .....	69
<b>РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....</b>	<b>70</b>
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації обладнання .....	70
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць .....	70
5.1.2 Електробезпека .....	74
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії .....	75
5.2.1 Мікроклімат приміщення .....	75
5.2.2 Склад повітря робочої зони .....	76
5.2.3 Виробниче освітлення .....	76
5.2.4 Виробничий шум .....	78
5.2.5 Виробничі вібрації .....	78
5.2.6 Фактори трудового процесу .....	79

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи системи електропостачання підприємства в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій .....	80
5.3.1 Дослідження безпеки роботи електромережі в умовах дії іонізуючих випромінювань .....	82
5.3.2 Дослідження безпеки роботи електромережі в умовах дії електромагнітного імпульсу .....	83
5.3.3 Розробка заходів з безпеки роботи елементів системи електропостачання в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	85
Висновки по розділу 5 .....	87
ВИСНОВКИ .....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	89
ДОДАТКИ.....	92

## ВСТУП

Актуальність теми. В будь-якій електроенергетичній системі постає виробнича задача по забезпеченню балансу потужності генерації та споживання електроенергії. Особливо важливою ця задача стає в енергосистемах, які мають дефіцит потужності генерації.

Через високі ціни на енергоносії та можливістю їх подальшого зростання, задача економії енергоносіїв з відповідним балансом потужності в електричній мережі стає дуже важливою і виникає навіть в економічно розвинутих країнах.

Чи не найдоступнішим шляхом вирішення буде зменшення споживання потужності із енергосистеми через зменшення споживачів електроенергії шляхом відключення менш важливих споживачів. Задача вирішується у два етапи: спочатку на рівні енергосистеми визначається значення потужності, до якого обмежується мережа та визначаються споживачі, що будуть відключені; потім це рішення реалізується вже на рівні споживача шляхом відключення того чи іншого обладнання із зміною робочого процесу, із застосуванням інших технологічних режимів.

Зрозуміло, що це призводить до порушень у виробничому процесі, що, у свою чергу, призводить до збитків, розмір яких потрібно якомога зменшити. Саме для цього і використовують різноманітні математичні методи, моделі і розрахунки, щоб заздалегідь підготувати оптимально можливі рішення.

Тому наукові роботи із розробки та вдосконалення математичних методів прийняття рішень в електроенергетиці (в тому числі рішення від самого споживача) є і будуть актуальними.

Серед великої різноманітності можливих випадків, пов'язаних із обмеженням потужності, дуже часто необхідно враховувати параметри симетрії режиму, який складеться після відключення відповідної частини обладнання. Це буде пов'язано з випадком обмеження потужності вузла, до якого підключено групу електроприймачів несиметричного виконання – вимикання несиметричних електроприймачів позначається на несиметрії електричного режиму усієї

системи. Такий взаємопов'язаний ефект обов'язково повинен прийматись до уваги. Тому обмеження потужності групи несиметричних електроприймачів є актуальною технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлена магістерська кваліфікаційна робота виконувалась у відповідності із програмою наукових досліджень на кафедрі електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Вінницького національного технічного університету. Авторка була виконавцем частини робіт.

Мета і задачі дослідження. Метою представленої магістерської роботи є математичні методи, що направлені на зниження рівня несиметрії у мережі електропостачання підприємств, що виникає після обмеження потужності групи несиметричних електроприймачів. Передбачається впровадження розроблених моделей та методів для проведення розрахунків та визначення оптимального відключення частини споживачів від енергопостачання з метою найменшого відхилення від симетрії режиму у мережі.

Відповідно враховуються наступні основні задачі:

- дослідження існуючих методів симетрування навантажень;
- аналіз впливу несиметричних навантажень на режим мережі;
- розробка алгоритмів, математичне моделювання та розв'язок задачі

по обмеженню потужності несиметричних навантажень;

Об'єктом дослідження магістерської роботи є електрична мережа із великою кількістю несиметричних електроприймачів.

Предметом дослідження магістерської роботи є методи і засоби зменшення потужності споживання шляхом відключення частини несиметричних навантажень із врахуванням симетрування тих несиметричних навантажень, що залишилися.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використано методи дослідження операцій та математичного моделювання, зокрема методи лінійного та динамічного програмування.

Наукова новизна отриманих результатів. Запропоновано новий метод пошуку оптимального рішення для обмеження споживаної потужності шляхом відключення від мережі окремих несиметричних електроприймачів із врахуванням можливості (чи неможливості) переключення цих приймачів з однієї лінійної напруги на іншу, для знаходження мінімально можливого рівня несиметрії в лінії живлення.

Практичне значення отриманих результатів. На підставі виконаних досліджень вирішена наукова задача обмеження рівня потужності групи несиметричних електроприймачів із врахуванням режиму несиметрії.

Працездатність та ефективність запропонованих методів. Вказані у магістерській роботі алгоритми і методи перевірені через чисельні розрахунки на контрольному прикладі.

Особистий внесок здобувача. Розроблений метод моделювання та алгоритми вирішення, що складають основний обсяг магістерської роботи, самостійно отримані авторкою.

Апробація роботи. Основні положення роботи та її результати неодноразово доповідались на LIII науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки [16].

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, трьох основних розділів, розділів з економіки та безпеки праці, списку літератури з 28 найменувань та додатків. Основний зміст викладено на 91 сторінках друкованого тексту, містить 8 рисунків, 26 таблиць.



## РОЗДІЛ 1

### ХАРАКТЕРНІ ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

#### 1.1 Показники якості електричної енергії

Електроенергія як товар має ряд специфічних властивостей, і поняття якості електричної енергії відрізняється від поняття якості інших товарів. Взагалі якість електричної енергії прийнято оцінювати безпосередньо через показники напруги, частоти, рівнів несиметрії та несинусоїдальності. Але оскільки електроенергія безпосередньо використовується при створенні багатьох інших видів продукції і впливає на їх якість та на економічні показники виробництва в цілому, можна стверджувати, що якість електроенергії виявляється через якість роботи електроприймачів (ЕП).

Важливим фактором вважаються втрати та спотворення, що виникають при передачі електроенергії від виробника до споживача; тобто напруга на затискачах ЕП залежить від довжини й характеру електричної мережі, що використовується. Оскільки параметри мереж помітно впливають на показники якості електричної енергії, виникає необхідність належного забезпечення якості електроенергії саме в точці підключення споживача електроенергії (ТПЕ), тобто якість електроенергії на місці виробництва ще не гарантує її якість у споживача. Виробничий процес сам по собі також істотно впливає на параметри якості електроенергії, і якщо ЕП працює незадовільно, у кожному конкретному випадку проводиться аналіз якості споживаної електроенергії в точці підключення. Якщо показники якості електроенергії (ПЯЕ) не відповідають вимогам на рівні постачальника (енергетичного підприємства), висувуються претензії до нього; якщо аналіз дає позитивні результати якості енергії, що надходить, то винуватим є сам електроприймач.

Зрозуміло, що різноманітні апарати та обладнання приймача призначені для роботи лише при встановлених параметрах якості електричної енергії. Тому, ще

на етапі проектування мережі, необхідно прийняти жорсткі заходи, щоб забезпечити показники якості електричної енергії, навіть якщо це потребує додаткових витрат; відхилення ПЯЕ від допустимих меж може принести значні збитки вже після запуску виробництва.

Можливо може показатись, що заходи щодо забезпечення показників якості електричної енергії можуть бути досить дорогими, і тому, з погляду економії, більш доцільним буде використання обладнання, що допускає роботу при деяких, відносно невеликих та нормованих відхиленнях ПЯЕ; але це не є завжди можливим, тому що технічні й економічні показники обладнання можуть значно змінюватися. Якщо ці показники будуть знаходитися в межах оптимальної роботи обладнання, то таке рішення можливе; в іншому випадку необхідно прийняти міри для забезпечення відповідних значень ПЯЕ.

Основними параметрами якості електричної енергії завжди були значення частоти змінного струму  $f$  у мережі і рівень напруги  $U$  у вузлах мережі; але потрібно розуміти, що показники напруги є місцевими (локальними), вони можуть мати деяку різницю значень в різних точках мережі. У свою чергу, частота  $f$  мережі є загальносистемним ПЯЕ.

Через велику кількість обладнання, що має нелінійні вольт-амперні характеристики, наразі доводиться постійно враховувати можливість порушення симетрії режиму та синусоїдальної форми кривої живильної напруги у трифазних мережах. Тому в сучасній електричній мережі повинні постійно вживатися заходи для приведення цих ПЯЕ до відповідних норм. Для цього існують національні і міжнародні норми припустимих відхилень ПЯЕ; нажаль, вони мають деякі розбіжності, оскільки у кожній країні ці норми відповідають місцевим економічним, організаційним, технічним умовам.

В Україні проблема розглядається саме з позицій нормування в рамках показників якості електричної енергії. На 1 січня 2000 р. наказом Держстандарту України від 18 червня 1999 р. як державний стандарт України введено в дію міждержавний стандарт ДСТ 13109–97 «Електрична енергія. Електромагнітна

сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення».

Отже, за цим стандартом прийнято поділяти ПЯЕ на дві групи: основні, що безпосередньо характеризують властивості та якість електроенергії; додаткові, що є лише додатковою формою запису основних показників – їх використовують у нормативно-технічній документації.

До основних ПЯЕ відносять вже згадувані відхилення частоти  $\Delta f$  та відхилення напруги  $\Delta U$ ; також розмах зміни напруги  $\delta U_t$  та декілька коефіцієнтів: дозу флікера коливання напруги  $\Psi$ , коефіцієнт несинусоїдальності напруги  $K_{н.с.U}$ , коефіцієнт n-ої гармонійної складової  $K_{U(n)}$ , коефіцієнт зворотної послідовності  $K_{2U}$  та коефіцієнт нульової послідовності  $K_{0U}$ ; іще існує тривалість провалу напруги  $\Delta t_{п}$  та значення імпульсної напруги  $U_{імп}$ .

Типову статистику порушень показників якості електроенергії в промисловості України показано на рис. 1.1.

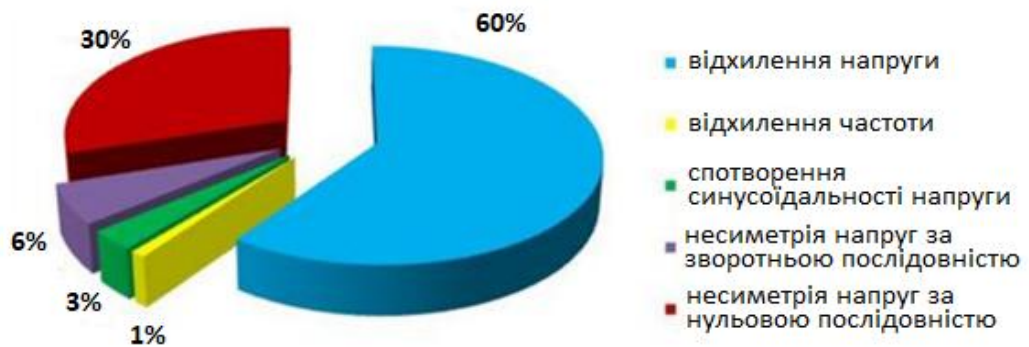


Рисунок 1.1 – Статистика порушень показників якості електроенергії

Виходячи зі статистики, можна зробити висновок, що найбільш часто відбувається порушення таких параметрів якості, як відхилення напруги та несиметрія напруги по нульовій і зворотній послідовності.

Одні ПЯЕ характеризують режими роботи електроустаткування енергопостачальної організації й споживачів електроенергії що встановилися, й дають кількісну оцінку по особливостям технологічного процесу виробництва, передачі, розподілу й споживання електроенергії. До цих ПЯЕ відносяться: стале

відхилення напруги, коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги, коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги, коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності, коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності, відхилення частоти, розмах зміни напруги. Інші ПЯЕ характеризують короточасні перешкоди, що виникають в електричній мережі в результаті комутаційних процесів, грозових атмосферних явищ, роботи засобів захисту й автоматики у після аварійних режимах. До них відносяться провали й імпульси напруги, короточасні перенапруги.

## 1.2 Вплив якості електроенергії на електроприймачів. Збитки від незадовільної якості електроенергії

Як вже відмічалось, взагалі споживачі електроенергії працюють у тривалому режимі лише при номінальних електричних параметрах режиму ( $f_n$ ,  $U_n$ ,  $I_n$  і ін.), при яких вони мають найвищі техніко-економічні показники. Зниження якості електроенергії може призвести до негативних наслідків: по перше, це збільшення втрат активної потужності, тобто втрат електроенергії, за яку вже сплачені значні кошти. По друге, це негативно впливає на строк служби і електрообладнання, і елементів самої мережі, що потребує збільшення капітальних вкладень в електричну систему. По третє, порушення нормального ходу технологічних процесів у споживачів призводить до збільшення браку продукції.

Втрати напруги виникають в мережі час передачі електроенергії від електростанції до споживачів; поштовхи навантаження при відключенні й підключенні потужних споживачів викликають коливання напруги й частоти; наявність різноманітних перетворювальних пристроїв призводить до несинусоїдальності напруги; несиметрія навантаження фаз викликає несиметрію напруги мережі. Окрім цього, існує ще ряд інших факторів, що призводять до відхилення ПЯЕ від нормованих значень, і все це значно впливає на роботу електроприймачів.

Погіршення синусоїдальної форми напруги виникає на елементах, які генерують вищі гармоніки: устаткування з нелінійними магнітопроводами, що насичуються, випрямлячі та перетворювачі частоти. Ці гармоніки напруги й струму в основному впливають на системи автоматики та релейного захисту; також на системи телемеханіки та зв'язку. У самій мережі гармоніки викликають додаткові втрати в трансформаторах і двигунах, що значно скорочує строк їх служби; перевантажують по струму конденсаторні батареї, створюючи умови для резонансних явищ; прискорюють старіння ізоляції електроустаткування.

Також поява вищих гармонік у мережах електропостачання в певних умовах може впливати на здоров'я людей.

Відхилення (або коливання) напруги в електричних мережах виникає через зміну електричних навантажень; в першу чергу це призводить до зміни освітленості приміщень та підвищення питомих витрат енергії через збільшення струму споживання; також знову відбуваються зміни у режимах роботи обладнання (в першу чергу – двигуни), що веде до браку продукції, й іншим негативним наслідкам, що також знижують ефективність виробництва. Момент на валу асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги – тому значне відхилення напруги може призвести до гальмування або повної зупинки. У свою чергу, момент синхронного двигуна також пропорційний напрузі; зміни напруги викликають відповідні зміни моменту на валу та впливають на статичну стійкість роботи таких двигунів, на значення їх реактивної потужності.

Перетворювальні пристрої (керовані випрямлячі, перетворювачі частоти й т.п.) при відхиленнях напруги змінюють кути регулювання, що впливає на їх коефіцієнти потужності. Електротермічні установки реагують на зміну напруги зниженням продуктивності, оскільки нагрів залежить від квадрату напруги. В цілому коливання напруги в електричній мережі, що виникають при пусках потужних двигунів або при роботі зварювальних агрегатів, дугових печей та вентильних пристроїв, викликають однакові наслідки: «миготіння» ламп в освітлювальних мережах; виникнення неправильних команд у схемах

автоматики; збої під час пуску двигунів; мимовільне спрацювання контакторів, пускачів, реле і ін.

Несиметричний режим багатофазної системи електропостачання призводить до появи у мережі напруг так званих систем зворотної й нульовий послідовностей. Головною причиною виникнення несиметрії режиму є наявність несиметричного навантаження у мережі. Також впливає відмінність параметрів фаз на окремих ділянках мережі, відсутність транспозиції фаз на протяжних ЛЕП. Несиметрія напруги мережі погіршує умови роботи споживачів та їх технічні характеристики: знову викликає додаткові втрати енергії в елементах мережі, що скорочує термін служби електроустаткування й т.п. Все це знижує економічність обладнання.

Усе це відбувається через виникнення в електричних двигунах, як наслідок напруги зворотної послідовності, додаткових магнітних полів, що обертаються з тією ж швидкістю, що і магнітні поля від прямої послідовності напруги, але в протилежному напрямку. Як наслідок, виникає гальмовий електромагнітний момент, що веде до нагрівання активних частин машин. У свою чергу, це змушує знижувати робочу потужність двигунів, щоб зберегти нормований термін служби. Також несиметрія напруги в електричних машинах може призвести до вібрацій ротора через знакозмінні обертаючі моменти; наслідком може стати механічне руйнування конструкцій двигуна.

Також несиметрія напруги викликає нагрівання трансформаторів, що знову скорочує строк їх служби; як і несинусоїдальність, несиметрія впливає на батареї конденсаторів, оскільки реактивна потужність конденсаторів залежить від напруги зворотної послідовності. Режим несиметрії майже не впливає на роботу повітряних і кабельних ліній, але зменшує термін служби обслуговуючого устаткування цих ліній.

Відхилення частоти найбільше впливає на синхронні та асинхронні двигуни, які є електроприводом робочих механізмів; їх кутова швидкість лінійно залежить від частоти живлячої напруги. Зниження частоти приводить до зниження



потужності двигуна, тобто до зниження продуктивності обладнання, що матиме дуже негативні наслідки; наприклад, може порушитись робота механізмів власних потреб електростанцій. Також відхилення частоти впливає на розподіл навантаження між паралельно працюючими електростанціями, можуть викликати «хитання» двигунів і навіть генераторів електростанцій.

Коливання частоти виникають в наслідок коротких замикань, підключення або відключення споживачів з великою потужністю.

Як стає зрозуміло, якість електроенергії безпосередньо пов'язана з економічністю виробництва – відхилення ПЯЕ від номінальних значень призводить до погіршення стану технологічного обладнання – знижуються ККД та коефіцієнт потужності, зменшується продуктивність роботи та термін служби обладнання. У свою чергу, це веде безпосередньо до порушення технологічних процесів (обробка, прокат, гальваніка, нагрівання й т.п.).

З другої сторони, якість електричної енергії може бути пов'язана й з соціальними проблемами: як вже відмічалось, відхилення ПЯЕ в освітлювальних мережах викликає погіршення якості освітлення, що важко позначається на органах зору людину та впливає на весь виробничий процес, оскільки ці зміни освітленості, у свою чергу, викликають зниження продуктивності праці, збільшення травматизму й виробничого браку.

Таким чином, можна зробити висновок, що проблема контролю й підтримки (регулювання) ПЯЕ завжди є актуальною, інакше, при низькому рівні якості електроенергії, значна частина паливно-енергетичних ресурсів буде витратитися вхолосту, або на виробництво бракованої продукції.

Дотримання показників ПЯЕ дозволяє заощаджувати значну кількість матеріальних та грошових ресурсів.

### 1.3 Сутність впливу несиметрії напруги на роботу електроприймачів

Несиметрія напруги у трифазній електричній мережі проявляється як нерівність лінійних і фазних напруг; цю нерівність прийнято характеризувати

через так звані напруги зворотної та нульової послідовності, які додаються до напруги прямої (основної) послідовності. Для оцінки несиметрії використовують коефіцієнти зворотної послідовності напруги  $K_{2U}$  і нульової послідовності напруги  $K_{0U}$ .

Коефіцієнт зворотної послідовності напруги розраховують за виразом

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_H} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де  $U_{2(1)}$  – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи, В;

$U_H$  – номінальне значення лінійної напруги, В.

Діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти  $U_{2(1)}$  можна отримати через значення лінійних напруг:

$$U_{2(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \cdot \left[ \left( \sqrt{3} \cdot U_{BA(1)} - \sqrt{4 \cdot U_{CB(1)}^2 - \left( \frac{U_{CB(1)}^2 - U_{AC(1)}^2}{U_{BA(1)}} + U_{BA(1)} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{CB(1)}^2 - U_{AC(1)}^2}{U_{BA(1)}} \right)^2 \right]}, \quad (1.2)$$

де  $U_{BA(1)}$ ,  $U_{CB(1)}$ ,  $U_{AC(1)}$  – діючі значення лінійних напруг основної частоти.

Можна використовувати наближену формулу для  $U_{2(1)}$

$$U_{2(1)} = 0,62 \cdot (U_{H\bar{6}(1)} - U_{Hm(1)}), \quad (1.3)$$

де  $U_{H\bar{6}(1)}$ ,  $U_{Hm(1)}$  – найбільше і найменше діюче значення з трьох лінійних напруг основної частоти, В.

Також можна рахувати  $U_{2(1)}$  через фазні напруги:

$$U_{2(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot (U_{A(1)} \cdot y_A + U_{B(1)} \cdot y_B + U_{C(1)} \cdot y_C)}{y_A + y_B + y_C}, \quad (1.4)$$

де  $U_{A(1)}$ ,  $U_{B(1)}$ ,  $U_{C(1)}$  – фазні напруги основної частоти, В;

$y_A$ ,  $y_B$ ,  $y_C$  – провідності фаз А, В, С.

Можна також при обчисленні  $U_{2(1)}$  застосувати замість діючих значень лінійних напруг основної частоти  $U_{BA(1)}$ ,  $U_{CB(1)}$ ,  $U_{AC(1)}$  діючі значення лінійних напруг, які визначаються з урахуванням всіх гармонічних складових, якщо коефіцієнт несинусоїдальності  $K_{нс.У} \leq 5\%$ ;

Коефіцієнт зворотної послідовності тоді

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% . \quad (1.5)$$

У свою чергу, коефіцієнт нульової послідовності  $K_{0U}$  для трифазної чотирипровідної системи рахують за виразом

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{н.ф}} \cdot 100\% , \quad (1.6)$$

де  $U_{0(1)}$  – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної чотирипровідної системи напруг, В;

$U_{н.ф}$  – номінальне значення фазної напруги, В.

Для діючого значення  $U_{0(1)}$  є формула

$$U_{0(1)} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\left[ \frac{U_{CB(1)}^2 - U_{AC(1)}^2}{U_{BA(1)}} - 3 \cdot \frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{BA(1)}} \right]^2 + \left[ \sqrt{4 \cdot U_{CB(1)}^2 - \left( \frac{U_{CB(1)}^2 - U_{AC(1)}^2}{U_{BA(1)}} + U_{BA(1)} \right)^2} - \sqrt{4 \cdot U_{B(1)}^2 - \left( \frac{U_{B(1)}^2 - U_{A(1)}^2}{U_{BA(1)}} + U_{BA(1)} \right)^2} \right]^2} , \quad (1.7)$$

де  $U_{BA(1)}$ ,  $U_{CB(1)}$ ,  $U_{AC(1)}$  – діючі значення лінійних напруг основної частоти;

$U_{A(1)}$ ,  $U_{B(1)}$  – діючі значення фазних напруг основної частоти.

За аналогією із  $U_{2(1)}$ , можна обчислювати  $U_{0(1)}$  за приблизними даними

$$U_{0(1)} = 0,62 \cdot (U_{нб \phi(1)} - U_{нм \phi(1)}) , \quad (1.8)$$

де  $U_{нб \phi(1)}$ ,  $U_{нм \phi(1)}$  – відповідно найбільше і найменше із діючих значень трьох фазних напруг основної частоти.

Можливо рахувати  $U_{0(1)}$  через фазні напруги:

$$U_{0(1)} = \frac{U_{A(1)} \cdot y_A + U_{B(1)} \cdot y_B + U_{C(1)} \cdot y_C}{y_A + y_B + y_C + y_0}, \quad (1.9)$$

де  $U_{A(1)}, U_{B(1)}, U_{C(1)}$  – фазні напруги основної частоти, В;

$y_A, y_B, y_C, y_0$  – провідності фаз А, В, С і нульового проводу.

Можна також знову, за умови, що  $K_{нс.У} \leq 5\%$ , застосовувати замість діючих значень лінійних і фазних напруг основної частоти діючі значення напруг з урахуванням всіх гармонічних складових. Тоді

$$K_{0У} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (1.10)$$

де  $U_{1(1)}$  – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, В.

За експертними оцінками, основним джерелом несиметрії напруги є: індукційні печі електрошлакового переплавлення; дугові сталеплавильні печі; тягові підстанції залізничних шляхів, що живлять однофазні навантаження; несиметричні навантаження та несиметрії опору мережі; перетворювальні та зварювальні установки. На окремих підприємствах несиметричних навантажень іноді буває до 85–90%. Характеристики подібних несиметричних навантажень наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики окремих характерних навантажень

№	Тип ЕП	U, кВ	$K_{2У}$ , %
1	ДСП-100	220	1,3
		35	4,5
2	ДСП-40	110	1,4
		35	4,0
3	Тягові підстанції	110	4,6
		6	1,4
4	Однофазні електротермічні установки	10	18
5	Прокатний стан	10	2,0
6	Зварювальні машини	0,4	1 - 5

Напруга зворотної послідовності, навіть невеликої величини, дуже впливає на роботу електричних двигунів, оскільки, через малий опір зворотної

послідовності асинхронного електродвигуна  $X_{2ад}$ , струм зворотної послідовності  $I_2$  може бути досить значним. Через це виникає магнітне поле, що обертається в протилежний бік; в ланцюгах роторів виникають ЕДС і струми подвійної частоти, що призводить до нагрівання машини. Навить при несиметрії напруги в межах норми через відповідну напругу зворотної послідовності строк служби АД скорочується на 11 %; СД – на 16 %; трансформаторів – на 4 %; КБ – на 20 %. У свою чергу, збільшення  $K_{2U}$  до 20% призводить до зниження продуктивності на 30–40%, а збільшення  $K_{2U}$  до 40% призводить до значного марного розходу енергії.

Від напруги нульової послідовності погіршується режими роботи однофазних приймачів. Через струми нульової послідовності, що постійно протікають через заземлювачі, біля цих заземлювачів висихає ґрунт, що збільшує опір заземлювачі – від цього неприпустимо страждає релейний захист, низькочастотні установки зв'язку, пристрої залізничного устаткування. І в черговий раз, від струмів зворотної і нульової послідовностей збільшуються втрати потужності і енергії в окремих елементах мережі через сумарні струми, що знову призводить до надлишкового нагрівання обладнання.

Для розрахунку цих додаткових втрат використовують відповідні вирази. Для асинхронних двигунів:

$$\Delta P_{ад} = \Delta P_{M1ном} \cdot I_{п} \cdot 2,41 \cdot (U_2)^2, \quad (1.11)$$

де  $\Delta P_{M1ном}$  – втрати в міді статора при номінальному струмі основної частоти;  
 $I_{п}$  – кратність пускового струму при номінальній напрузі основної частоти;  
 $U_2$  – відносне значення величини напруги зворотної послідовності.

Для синхронних двигунів:

$$\Delta P_{сд} = \Delta P_{д.ном} \cdot \frac{U_2^2}{Z_{2см}^2}, \quad (1.12)$$

де  $\Delta P_{д.ном} = 3 \cdot I_{ном}^2 \cdot r_{2р}$  – додаткові втрати в синхронній машині при струмі зворотної послідовності, що дорівнює номінальному;

$r_{2p}$  – активний опір зворотної послідовності обмотки ротора;

$Z_{2cm}$  – повний опір зворотної послідовності СД.

Зазначимо, що додаткові втрати в статорі синхронного двигуна значно менші втрат в обмотці ротору, тому їх не враховують.

Для силових трансформаторів:

$$\Delta P_{mp} = U_2^2 \cdot \left( \Delta P_x + \frac{\Delta P_k}{U_k^2} \right), \quad (1.13)$$

де  $\Delta P_x, \Delta P_k, U_k$  – розрахункові дані трансформатора.

Конденсаторні батареї:

$$\Delta P_{KB} = Q_{ном} \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U_2^2, \quad (1.14)$$

де  $Q_{ном}$  – номінальна потужність КБ;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс кута діелектричних втрат КБ;

$U_2$  – відносне значення напруги зворотної послідовності.

Лінії електропередач:

$$\Delta P_{ЛЕП} = \frac{r \cdot U_2^2}{Z \cdot \cos \varphi} \cdot P_{ЛЕП}, \quad (1.15)$$

де  $r, Z$  – активний і повний опір ЛЕП;

$P_{ЛЕП}$  – активна потужність, що передається по ЛЕП;

$\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності ЛЕП.

Усі ці вирази вказують на квадратичну залежність додаткових втрат від несиметрії напруги, причому, через те, що опір зворотної послідовності в електродвигунах менший, ніж у статичному електрообладнанні, в двигунах струми зворотної послідовності значно вищі.

І як вже неодноразово відмичалось, додаткові втрати від несиметрії призводять до перегріву струмоведучих частин, від чого страждає в першу чергу ізоляція обмоток; її строк служби знижується:

$$Z = C \cdot e^{-b\theta}, \quad (1.16)$$



де  $C, b$  – постійні коефіцієнти для даного виду ізоляції;  
 $\theta$  – температура ізоляції.

Зниження строку служби електрообладнання може бути у декілька раз:

$$\gamma = e^{b \cdot \Delta\tau}, \quad (1.17)$$

де  $b$  – коефіцієнт, що враховує тепловідведення електричної машини;  
 $\Delta\tau$  – зміни температури ізоляції від додаткових втрат через несиметрією.

#### 1.4 Способи й технічні засоби для підвищення якості електроенергії

Насущна необхідність забезпечити нормальну роботу електроприймачів вимагає утримання параметрів якості електроенергії у допустимих межах. До того-ж, спотворення напруги може проникати в різні точки електричної мережі через розподільні мережі й живильні трансформатори та впливати на споживачів. Але, з технічної та економічної точок зору, надмірне зменшення рівнів спотворень напруги майже до нуля, є не вигідним. Достатньо втримувати ці показники на рівні стандарту якості електричної енергії (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Стандартні показники якості електроенергії

Найменування показника	Допустиме значення показника	
	нормальне	граничне
Відхилення напруги, %	$\pm 5$	$\pm 10$
Доза флікера, відн. од.: короткочасна тривала		1,38 1,0
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, %, не більше	8	12
Коефіцієнт гармонійної складової напруги непарного (парного) порядку, %, не більше	5 (2)	7,5 (3)
Несиметрія напруги, %	2	4
Тривалість провалу напруги, с	0	30
Відхилення частоти, Гц	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$

Але при цьому виникає ще одна складність: цілеспрямований вплив на один з видів спотворень напруги може викликати деяку непряму дію на усі інші види спотворень, тобто пристрої для підвищення ПЯЕ можуть впливати як на один показник, так і на декілька (такі пристрої називаються багатофункціональними). Наприклад, компенсація коливань напруги, разом із зменшенням відхилень напруги, може знизити рівні гармонік.

Такі пристрої діляться на дві категорії: ті, що не змінюють свої параметри, незалежно від режиму роботи мережі (нерегульовані пристрої); щоб ефективніше впливати на ПЯЕ, змінюють свої параметри під впливом керуючого сигналу (регульовані пристрої). Принципи впливу і способи зміни (підвищення) ПЯЕ різних пристроїв залежать від фізики процесу виникнення порушення якості електроенергії.

Методи симетрування режимів, залежно від того, на який параметр направлено дію, можна підрозділити на методи симетрування струмів і методи симетрування напруги (рис. 1.2).

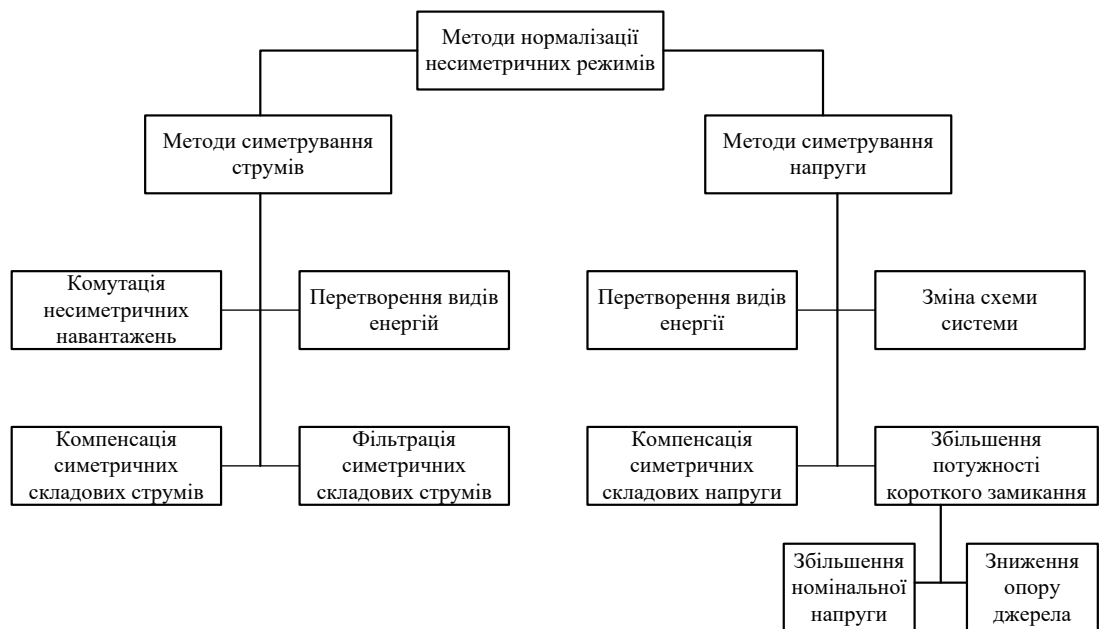


Рисунок 1.2 – Класифікація методів нормалізації несиметричних режимів

В принципі, відхилення напруги в мережі виникають зі зміною навантажень; на жаль, напругу не вдається підтримувати номінальних значеннях у будь-який

момент часу. Отже, відхилення напруги залежать і від режиму роботи мережі, і від параметрів як електроприймачів, так і місцевих мереж.

Інші параметри напруги, окрім вказаних вище, також залежать від режиму й параметрів районних мереж напругою 35-154 кВ. Споживанні електроенергії протягом дня дуже нерівномірно, тому рівень споживання поділяють на базисні, проміжні і пікові навантаження. Саме пікові навантаження, нехай одноразові, нехай тривалістю кілька хвилин, мають значні наслідки для погіршенні якості напруги в мережі, для порушень нормальної роботи обладнання, і як наслідок, це відображається на вартості електроенергії для підприємства.

Для покриття пікових навантажень існує багато технічних способів, але в наш час іноді доводиться вдаватися до вживання крайніх заходів – відключення навантажень. Це означає, що споживання електроенергії вимушено відбувається з урахуванням можливостей живильної. У свою чергу, для промисловості це означає порушення режимів роботи та порушення параметрів мережі, що відображається на ПЯЕ, зокрема, на режимі симетрії напруги.

Відключення однофазних навантажень може викликати несиметрією напруги у мережі. Протистояти цьому можна зменшенням опору мережі струмам зворотної і нульової послідовностей, щоб зменшити рівень напруги цих послідовностей, або зниженням значень цих струмів. Але враховуючи, що опір трансформаторів, кабелів і ліній є однаковим для струмів прямої і зворотної послідовностей, істотно знизити рівень зворотної послідовності можливо лише через підключення несиметричного навантаження до окремого джерела живлення (окремого трансформатора).

Знизити несиметрію також можна за допомогою збільшення потужності у вузлі  $S_{K3}$ : при рівні відношення потужності  $S_{K3}$  до потужності однофазного навантаження  $S_{одн}$  хоча б  $\frac{S_{K3}}{S_{одн}} \geq 50$ , коефіцієнт зворотної послідовності буде не більше 2-х відсотків – але це знову означає підключення потужного однофазного навантаження до шин 110–220 кВ через власний трансформатор.

Боротьба з несиметрією в мережах низької напруги здійснюється через раціональний розподіл однофазних навантажень між різними фазами з метою зрівноваження опорів цих навантажень між собою.

Але якщо несиметрію не вдається знизити за допомогою схемних рішень, застосовують спеціальні «центруючі» пристрої (ЦП) – або несиметричне ввімкнення конденсаторних батарей (КБ) (рис. 1.3, а), або спеціальні схеми центрування однофазних навантажень (рис. 1.3, б).

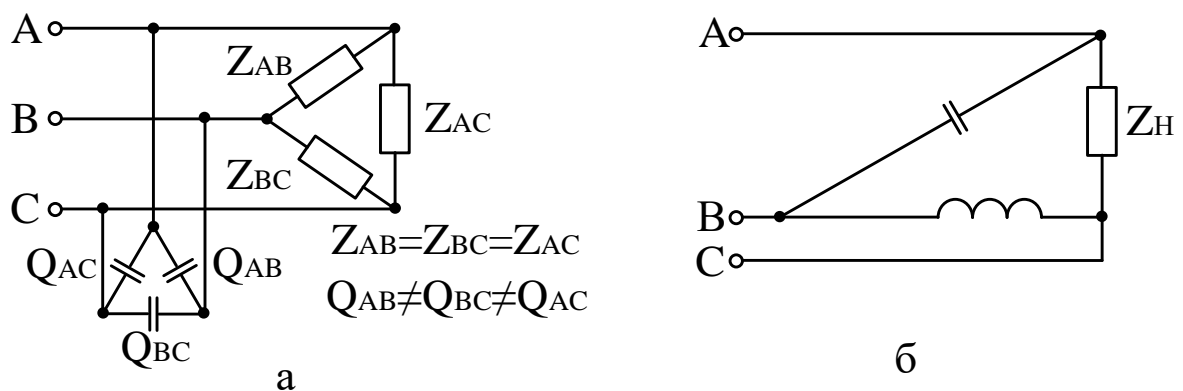


Рисунок 1.3 – Центруючі пристрої з КБ (а) і однофазна схема (б)

Взагалі, існує багато методів створення центруючого ефекту за допомогою КБ для однофазних навантажень. Якщо несиметрія змінюється за ймовірним законом, застосовують автоматичні (регульовані) ЦП. Також розроблена велика кількість схем ЦП і методів керування ними. Одна з найбільш поширених схем подана на рисунку 1.4.

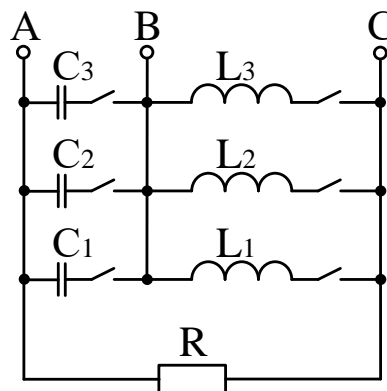


Рисунок 1.4 – Типова схема центруючого пристрою

У цій схемі конденсатори  $C$  і реактори  $L$  набирають з декількох невеликих паралельних груп, які підключають чи відключають залежно від струму (чи напруги) зворотної послідовності. Головний недолік – додаткові втрати енергії на реакторах.

Також є схеми ЦП на базі трансформаторів (наприклад, трансформаторів з обертаючим магнітним полем), які діють, як несиметричні навантаження; це дає змогу здійснювати пофазне регулювання напруги. Такі схеми дозволяють здійснювати симетрування і при несиметрії напруг живильної мережі, і при несиметричному навантаженні.

1.5 Наукові задачі, що потребують свого вирішення. Постановка задачі, що вирішується в роботі

При експлуатації системи електропостачання в умовах обмеження потужності мережі з несиметричним навантаженням може виникнути цілий комплекс технічних задач, пов'язаних з управлінням режимом. Наукові дослідження з цих питань мають ряд напрямків; в систематизованому вигляді вони зображені на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Систематизація основних напрямків наукових досліджень

1. Серед цих задач саме важливою буде задача розробки систем керування несиметрією режиму у випадках, коли рівень напруги зворотної послідовності перевищує вимоги ДСТ 13109–97 (або навіть менш жорсткі вимоги технології).

Серед існуючих способів симетрування навантаження є такі, що не потребують для своєї реалізації (або потребують незначних) суттєвих капіталовкладень – це вдосконалення схем і режимів роботи існуючих елементів системи електропостачання. Ці заходи виконуються першочергового.

Інші методи симетрування реалізуються через встановлення центруючих пристроїв; вони потребують значних капіталовкладень, але мають велику кількість розробок та схем реалізації. Перелічимо головні способи симетрування навантажень і найбільш часто використовувані схеми.

На практиці це: підключення на недовантажені фази додаткових опорів для симетрування навантаження; використання багатофазних схем для виправлення струму; використання симетруючого ефекту трифазних асинхронних двигунів; використання перетворювального агрегату «трифазний двигун – генератор»; симетрування за допомогою фазних порівнювачів і фазовипрямлячів з обертаючими магнітами ножами; симетрування струмів при роботі трансформаторів двома фазами; використання несиметричних трифазно-двофазних трансформаторів; підвищення потужності системи; симетрування за допомогою спеціальних статичних симетрируючих пристроїв (СП).

Як вже відмічалось, найбільш розповсюдженим і ефективним є метод СП, що виконані із промислово вироблених батарей статичних компенсаторів; вони забезпечують симетрування при різноманітних параметрах несиметричного навантаження.

2. Регулювання графіку активних навантажень також є дуже актуальною задачею; її мета – зниження потужності підприємства в час максимальних навантажень в мережі, або вирівнювання групового графіка навантажень в цілому – для зменшення втрат активної потужності в електричних мережах.

Наприклад, при навантаженні двох різних вузлів системи електропостачання, від яких живляться потужні однофазні ЕП, коли за період часу кількість однофазних електроприймачів, що знаходилися в роботі, була однаковою, технології виробництва подібні, але спостерігається різка відмінність

в нерівномірності графіків навантаження. Це пов'язано з різними графіками технологічних циклів в часі. При цьому графіки несиметрії також суттєво відрізняються, в зв'язку з чим вихідні умови симетрування режиму по вузлам 1 та 2 будуть різними.

З усієї множини задач, що розглядалися, виділимо задачу *оптимального* управління режимом в умовах *дефіциту* потужності в енергосистемі.

Суть задачі: на випадок тимчасового дефіциту потужності, для забезпечення стійкого режиму енергосистеми, розробляють графік обмеження споживання по потужності. На практиці, після передачі диспетчером енергосистеми вимоги про обмеження споживання, здійснюється обмеження по потужності споживачів, включених в графік.

Якщо основне навантаження енергоємних заводів складають однофазні споживачі, черговий диспетчер, отримавши задачу по обмеженню, приймає рішення про відключення частини несиметричних електроприймачів. Але кожне таке відключення також призводить до змін зворотної послідовності мережі, тобто виникає множина можливих варіантів зменшення навантаження із різними, відповідно, рівнями несиметрії. Потрібно прийняти рішення, щоб забезпечити обмеження потужності з мінімальною величиною рівня несиметрії. Але при великій кількості можливих варіантів визначення *оптимального* варіанту на інтуїтивному рівні стає неможливим; тому ця задача знаходиться серед задач, які вирішуються в рамках АСУ.

Для практичної реалізації потрібна спеціальна математична модель, для створення якої необхідно провести аналіз впливу ввімкнення або вимкнення несиметричних навантажень на режим системи електропостачання.

## Висновки по розділу 1

Було проведено аналіз наукових досліджень на тему симетрування режимів в мережах як енергопостачальних компаній, так і у системах електропостачання промислових підприємств, виконаних різними науковцями. Цей аналіз свідчить,

що багато наукових задач вже було успішно вирішено, їх результати впроваджуються на практиці та дають вагомий економічний ефект. Але, як виявилось, саме досліджень із пошуку та прийняття оптимального рішення в умовах обмеження потужності для електроприймачів несиметричного виконання проведено недостатньо, не кажучи про практичне їх використання.

Тому метою роботи було обрано розробку математичної моделі задачі на обмеження потужності однофазних електроприймачів, яку також можливо буде ввести до системи АСУ підприємства. Дослідження, що приведені в даній роботі, обмежені лише випадками у 3-провідній мережі, в якій несиметричні електроприймачі приєднані до лінійних напруг.

Уся життєдіяльність сучасного суспільства потребує якісного постачання якісної електроенергії, а секторів економіки, де ця якість електроенергії допускається на задовільному рівні стає все менше і менше. Тому сучасні підприємства із сучасним обладнанням пред'являють дедалі жорсткіші вимоги до ПЯЕ, щоб уникнути збитків. Для цього самим споживачам доводиться вживати відповідні заходи. Щоб захистити своє устаткування від проблем із якістю електроенергії, використовують різноманітні технології: розподіленої генерації; відновлення та розподілення пристроїв сполучення; сучасні методи регулювання напруги і т.д.

На даний момент вже існує велика кількість різноманітних приладів для регулювання напруги у мережі, однак усі вони мають ряд своїх специфічних недоліків. У зв'язку із цим, як один із ряду напрямків вдосконалення та покращення, виникає необхідність у розробці нових методів використання цих приладів, щоб максимально зменшити вплив їх недоліків.

Так, несиметрію напруг, обумовлену несиметричними електроприймачами, можна обмежити як шляхом застосування спеціальних симетруючих пристроїв, так і за допомогою схемних рішень – так зване «внутрішнє симетрування».

Тому потребують додаткових досліджень:



– явища з формуванням несиметричного режиму в лініях живлення, до яких приєднано велику групу електроприймачів несиметричного виконання;

– можливий вплив на несиметрію режиму відключення або підключення окремих потужних однофазних електроприймачів.

Задача обмеження потужності однофазних електроприймачів досі залишається маловивченою, і як оптимізаційна задача вона не ставилась, тобто не обґрунтовувались критерії оптимальності та технічні обмеження, в рамках яких мають прийматись рішення.

## РОЗДІЛ 2

### ПОСТАНОВКА ТА ВИРІШЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАДАЧ МЕТОДАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙ

2.1 Дослідження операцій – класичний математичний апарат вирішення оптимізаційних задач

На практиці дуже часто виникають випадки, коли складна технічна задача, маючи багато різноманітних факторів впливу, може отримати цілу низку ймовірних рішень. Потреба знайти для такої ситуації оптимальне рішення (тому такі задачі називають *оптимізаційними*) викликала до життя низку спеціальних наукових методів, які були поєднані під загальною назвою «дослідження операцій». Зазвичай це застосування математичних, кількісних методів, що використовують для обґрунтування (та прийняття) саме оптимального рішення у всіх галузях технічної діяльності; тож ці методи використовують і при експлуатації систем електропостачання, зокрема для випадків несиметричного навантаження, де виникає цілий комплекс технічних задач управління режимом. Отже, дослідження операцій починається тоді, коли обґрунтування та прийняття рішень відбувається через застосування того чи іншого *математичного* апарату, а не на основі досвіду та здорового глузду, що і дозволяє отримати оптимальне рішення (за певними ознаками воно є кращім за інші).

Усі математичні методи та дисципліни, що використовуються при дослідженні операцій, об'єднуються в рамках математичної теорії, яка називається «математичне програмування». Цей термін склався історично – у розумінні «математичне планування» його ввели американські математики Дж. Данциг та Т. Кумпанс, але в наслідок недбалого перекладу історично закріпилась перша назва. «Математичне планування» починається з побудови відповідної математичної моделі, яка через набір різних змінних відображає усі важливі фактори явища, та введення у рамках моделі спеціального критерію оцінювання (ефективності) – це обов'язково *кількісний* показник, через який можливі

варіанти рішення порівнюються між собою. Математичний запис критерію ефективності – це так звана «цільова функція»  $F(X)$ , що уявляє собою набір значень *шуканих* змінних  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ . Цей набір називають *вектором* цільової функції. Сама математична модель оптимізаційної задачі – це також сукупність математичних виразів, що встановлюють функціональні залежності критерію ефективності з існуючими обмеженнями (вхідні змінні, тобто умови задачі) та шуканими показниками (шукані змінні), кожен з яких мають конкретний зміст.

Рішення математичної моделі – знаходження такого розв'язку (тобто значень змінних вектору цільової функції), що призводить критерій ефективності (цільову функцію  $F(X)$ ) до значень максимуму або мінімуму – так звані *екстремуми* функції (в залежності від постанови задачі).

Методів математичного програмування досить багато:

- лінійне програмування; використовується для аналізу лінійних моделей та з використання лінійних залежностей між обмеженнями та цільовою функцією;
- квадратичне програмування; аналізуються моделі, де цільова функція є квадратичною залежністю від змінних, а обмеження лінійні;
- нелінійне програмування; цільова функція та обмеження нелінійні, або цільова функція лінійна, а обмеження – нелінійні;
- статистичне програмування; явище, що моделюється, залежить від великої кількості взаємопов'язаних *випадкових* значень;
- динамічне програмування; задачі, що можна умовно розділити на послідовність окремих етапів, і ще багато інших методів.

Потрібно зауважити, що найбільш простим, доступним та зрозумілим є метод лінійного програмування, за допомогою якого вирішують широке коло задач. Інші методи є досить «важкі та об'ємні» за розрахунками, а задачі лінійного програмування досить легко вирішуються за допомогою так званого симплекс-методу, який розробили саме Дж. Данциг та Т. Кумпанс у 1951 році. У математиці симплекс (від латинського simplex – простий) – це найпростіший опуклий багатокутник у  $n$ -мірному просторі з кількістю вершин  $(n+1)$ ; наприклад

трикутник на площині, тетраедр у 3-мірному просторі. Для математичної моделі цей багатокутник уявляє собою так звану «область допустимих рішень» – ОДР, яка містить у собі усі можливі варіанти рішень. Симплекс-метод полягає у *ітераційному* переборі допустимих розв’язків за відповідними правилами з метою знаходженні оптимального розв’язку (якщо він існує). Спочатку одне із рішень – у вигляді сукупності невід’ємних значень  $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , що задовольняє обмеженням задачі – обирається у якості так званого пробного розв’язку (пробний вектор); далі виконується розрахунок за симплекс-методом з метою знаходження оптимального вектору  $X^*$ , який визначає *екстремум* цільової функції  $F(X)$ .

Цілком зрозуміло, що екстремум цільової функції може бути лише на вершині багатокутника ОДР, тому пробний розв’язок  $X$  перевіряється, чи є він координатою вершини ОДР (цей розв’язок називається опорним планом). Далі, шляхом послідовних спроб (ітерацій) визначаються координати екстремуму  $F(X^*)$ , тобто оптимальний розв’язок.

Блок-схема симплекс-методу для рішення задачі ЛП наведена на рис. 2.1. Як бачимо, він складається з двох частин: визначення «опорного плану» серед ОДР та визначення «оптимального рішення» серед опорних.

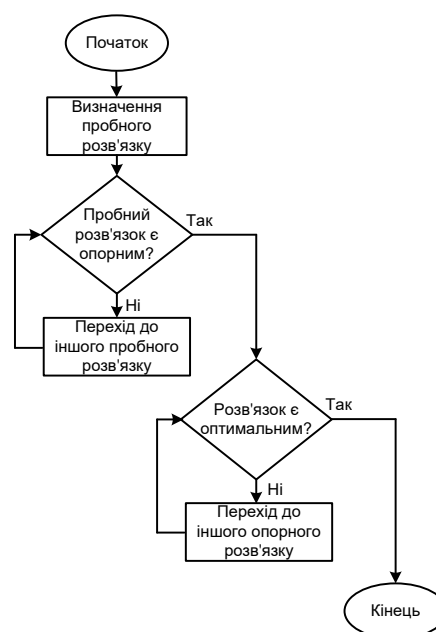


Рисунок 2.1 – Спрощений алгоритм симплекс-методу

## 2.2 Цільова функція для задач симетрування режимів

В загальному вигляді математична модель лінійного програмування:

$$\begin{cases} F(X) = \sum_{j=1}^n p_j \cdot x_j \rightarrow \max (\min); \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \leq y_i, (i=1, \dots, m); \\ x_j \geq 0, (j=1, \dots, n), \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $x_j$  – шукані змінні (вектор розв’язку  $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , що належить ОДР);

$j$  – індекс шуканих змінних;

$n$  – кількість цих змінних;

$p_j$  – якісний показник використання змінних;

$i$  – індекс обмежень (вхідні умови задачі – зазвичай це якісь ресурси);

$y_i$  – наявний обсяг обмежуючих ресурсів;

$a_{ij}$  – параметр використання ресурсів по відношенню до шуканих змінних.

$F(X)$  – цільова функція (критерій ефективності) – кількісний показник для порівняння розв’язків між собою. Сума  $\sum a_{ij} \cdot x_j$  – власне математична модель, що описує зазначені умови задачі, визначаючи ОДР. Додаткова нерівність  $x_j \geq 0$  встановлює додатні обмеження на ОДР – значення шуканих змінних повинні бути невід’ємні.

Зазвичай методи лінійного програмування використовуються для розв’язання великого класу подібних між собою *оптимізаційних* задач – операцій з планування та управління складними системами (насамперед економічними). Розв’язування такої задачі означає знаходження екстремуму для цільової функції  $F(X)$ , де значення вектору  $X^* = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  є скалярними числами дійсного змінного (тобто приймають значення дійсних чисел).

Проте, задачі, пов’язані із режимами електричних мереж, дуже часто можуть бути у комплексному вигляді. До числа таких задач відносять і задачі оптимізації несиметричних режимів, де критеріями оптимальності (тобто  $F(X)$ ) є

такі параметри режиму – струм чи напруга зворотної послідовності ( $\dot{I}_2$ ,  $\dot{U}_2$ ). Тоді цільова функція такої задачі також буде комплексною та матиме вигляд:

$$\dot{F}(X) = f(x) + j \cdot \varphi(x) = a + j \cdot b \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

де  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор змінних, кожний компонент якого  $x_n$  є дійсним числом;

$f(x)$  та  $\varphi(x)$  – скалярні функції;

$a, b$  – відповідно, дійсна та уявна частини  $F(X)$ .

Цільова функція цієї моделі спрямована до *min*, оскільки в задачах симетрування електричних режимів оптимальним є стан електричної мережі, коли струм чи напруга зворотної послідовності ( $\dot{I}_2$ ,  $\dot{U}_2$ ), що описується комплексними векторами (комплексами), наближаються до нуля.

Як бачимо, формула (2.2) є *нескалярною* функцією дійсного змінного, де кожному значенню  $x_n$  відповідає комплексне значення цільової функції, і знехтувати будь-якою з складових в цьому випадку неможливо. Тому класичні методи при такій постановці оптимізаційної задачі буде важко використати – використовують нелінійні методи. До того ж, керування несиметричним режимом в реальному часі потребує розв'язків у *цілочислових* змінних, оскільки, наприклад, параметри симетрувального пристрою, або відповідне фазування несиметричних навантажень, мають дискретні величини – тому розв'язання таких оптимізаційних задач має деякі труднощі.

Через це було вирішено використовувати звичайний симплекс-метод лінійного програмування для обох складових формули (2.2) окремо, оскільки поодиноці ці складові є лінійною функцією вектора змінних  $X$ . Зрозуміло, що це є певне спрощення, але абсолютно точних математичних моделей не існує.

### 2.3 Параметри оптимізації несиметричних режимів в 3-проводній мережі шляхом внутрішнього симетрування однофазних навантажень

Зрозуміло, що режим несиметрії у трифазній мережі виникає через нерівномірне підключення однофазних навантажень. Також зрозуміло, що

критерій оптимальності (цільова функція) має бути простим та вимірюваним, що дозволить кількісно оцінювати вплив різних факторів на режим системи. На перший погляд, в якості такого критерію для керування несиметрією режиму було б доцільно обрати значення  $Z_{\Sigma}$  – величину сумарних збитків підприємства від несиметрії. Цей критерій чітко відображає мету оптимізації – зниження збитків; але описується він досить складною функцією вектора змінних  $X$ , тому що система електропостачання промислового підприємства має велику кількість одиниць електрообладнання, і в процесі експлуатації схема електромережі та її параметри можуть значно змінюватися у часі, змінюючи тим самим коефіцієнти несиметрії напруг в різних вузлах мережі.

У свою чергу, модулі векторів напруги зворотної послідовності  $\dot{U}_2$ , струму зворотної послідовності  $\dot{I}_2$  та коефіцієнт несиметрії напруг  $K_{2U}$  пов'язані між собою лінійними співвідношеннями (див. форм. 1.1):

$$K_{2U} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_n} = \frac{\dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_2}{\dot{U}_n}, \quad (2.3)$$

де  $\dot{Z}_2$  – опір для струму зворотної послідовності.

Рівень струму  $\dot{I}_2$  характеризується більшими абсолютними значеннями, ніж  $\dot{U}_2$ , тому визначається точніше; струми зворотної послідовності в усіх лініях схеми та рівень  $K_{2U}$  в усіх вузлах системи, незалежно від її конфігурації та параметрів, залежать від струму  $\dot{I}_2$  в головній лінії, що живить групу несиметричних навантажень.

Якщо маємо кількість однофазних приймачів  $m$ , то вектор струму зворотної послідовності в головній лінії  $\dot{I}_2^H$  складатиметься зі струмів зворотної послідовності  $\dot{I}_{2ni}$ , що створюються кожним електроприймачем:

$$\dot{I}_2^H = \sum_{n=1}^m \dot{I}_{2ni} \quad (2.4)$$

де  $\dot{I}_2^H$  – сумарний вектор струму зворотної послідовності в лінії, що живить групу несиметричних навантажень;

$m$  – загальна кількість несиметричних електроприймачів;

$\dot{I}_{2ni}$  – струм зворотної послідовності окремого приймача.

Індекс ( $i$ ) у формулі (2.4) можна представити як номерний код лінійної напруги, до якої підключено  $n$ -го приймача. Оскільки в 3-проводній мережі є лише три лінійні напруги, значення будуть  $i = 1; 2; 3$  для  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  відповідно. Це означає, що під знаком суми у формулі (2.4) буде лише три складові, кожна з яких, в залежності від того, до якої лінійної напруги підключено приймача, виражається формулою:

$$\dot{I}_{2n_1} = \frac{P_n}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_n} \cdot \left[ e^{j(30^\circ - \varphi_n)} + e^{j(90^\circ - \varphi_n)} \right] \quad (2.5)$$

$$\dot{I}_{2n_2} = \frac{P_n}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_n} \cdot \left[ e^{j(-210^\circ - \varphi_n)} + e^{j(210^\circ - \varphi_n)} \right] \quad (2.6)$$

$$\dot{I}_{2n_3} = \frac{P_n}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_n} \cdot \left[ e^{j(-30^\circ - \varphi_n)} + e^{j(-90^\circ - \varphi_n)} \right] \quad (2.7)$$

де  $P_n$  – активна потужність  $n$ -го однофазного електроприймача;

$\cos \varphi_n$  – коефіцієнт потужності  $n$ -го електроприймача;

$U_n$  – номінальна напруга.

Зауважимо, що для прямої послідовності струм однофазного навантаження не залежить від фазності напруги:

$$\dot{I}_{1n_1} = \dot{I}_{1n_2} = \dot{I}_{1n_3} = \frac{P_n}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_n} \left[ e^{j(30^\circ - \varphi_n)} + e^{j(-30^\circ - \varphi_n)} \right] \quad (2.8)$$

З формул (2.4 – 2.7) бачимо, що модуль і фаза загального струму зворотної послідовності  $\dot{I}_2^H$  залежать від того, до яких напруг приєднані однофазні електроприймачі. Зваживши, що потужність різних приймачів може бути дуже різною, а варіантів підключення приймачів до мережі є  $3^m$ , доходимо до висновку, що забезпечити належне симетрування, де  $\dot{I}_2^H \rightarrow \min$ , лише шляхом спроби рівномірного підключення навантажень до різних напруг, буде дуже



складно; оптимальне рішення можливо знайти лише за допомогою математичних розрахунків.

#### 2.4 Математична модель оптимізації несиметричних режимів

Отже, модуль струму зворотної послідовності  $\dot{I}_2^H$  в головній лінії живлення буде критерієм ефективності (цільовою функцією) математичної моделі внутрішнього симетрування навантажень 3-проводної мережі. Також для математичної моделі потрібно забезпечити додаткові умови і обмеження:

- кожне навантаження підключаємо лише до однієї з лінійних напруг;
- відключати навантаження від мережі за для симетрування не можна.

В якості керованих змінних обираємо показник підключення  $n$ -го приймача до відповідної  $i$ -ї лінійної напруги у вигляді булевої функції: коли  $n$ -й приймач підключено до  $i$ -ї напруги,  $x_{ni} = 1$ ; коли не підключено,  $x_{ni} = 0$ . За цією інформацією складається відповідна таблиця (табл. 2.1); в стовпцях вказані струми зворотної послідовності відповідного приймача при його підключенні до відповідної лінійної напруги.

Таблиця 2.1 – Матриця струмів зворотної послідовності

№ навантаження	Струми зворотної послідовності $\dot{I}_2^H$		
	$U_{AB} (i = 1)$	$U_{BC} (i = 2)$	$U_{CA} (i = 3)$
1	$a_{11}+j \cdot b_{11}$	$a_{12}+j \cdot b_{12}$	$a_{13}+j \cdot b_{13}$
2	$a_{21}+j \cdot b_{21}$	$a_{22}+j \cdot b_{22}$	$a_{23}+j \cdot b_{23}$
-----			
$n$	$a_{n1}+j \cdot b_{n1}$	$a_{n2}+j \cdot b_{n2}$	$a_{n3}+j \cdot b_{n3}$
-----			
$m$	$a_{m1}+j \cdot b_{m1}$	$a_{m2}+j \cdot b_{m2}$	$a_{m3}+j \cdot b_{m3}$

У таблиці (2.1) показники  $a_{ni}$  та  $b_{ni}$  – дійсна та уявна частини вектора струму зворотної послідовності; вони показують включення  $n$ -го приймача  $n = (1, 2, 3, \dots, m)$  на  $i$ -у напругу  $i = (1, 2, 3)$  та рахуються за формулами (2.5) – (2.7).

Цільова функція повинна вказати залежність між сумарним струмом зворотної послідовності в головній лінії  $\dot{I}_2^H$ , що є сумою векторів струмів

зворотної послідовності окремих навантажень, та керованими змінними. Наприклад, для двох навантажень  $n = 2, i = 3$ ;  $I_2^H = a_{11} \cdot x_{11} + a_{12} \cdot x_{12} + a_{13} \cdot x_{13} + a_{21} \cdot x_{21} + a_{22} \cdot x_{22} + a_{23} \cdot x_{23}$ . При цьому зрозуміло, що для  $(x_{11}, x_{12}, x_{13})$  та  $(x_{21}, x_{22}, x_{23})$  лише одна змінна може мати значення 1, а по дві інші мають дорівнювати 0 – це означатиме, що кожне навантаження приєднано лише до однієї лінійної напруги.

Тоді, відповідно та таблиці (2.1):

$$\operatorname{Re} I_2^H = \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 a_{ni} \cdot x_{ni}, \quad (2.9)$$

$$\operatorname{Im} I_2^H = \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 b_{ni} \cdot x_{ni}. \quad (2.10)$$

Відповідно до формули (2.2), цільова функція:

$$\dot{F}(X) = \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 a_{ni} \cdot x_{ni} + j \cdot \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 b_{ni} \cdot x_{ni} \rightarrow \min. \quad (2.11)$$

Стає зрозумілим зміст вимоги, щоб хоч одна змінна у наборах  $x_{ni} = (x_{11}, x_{12}, x_{13})$  і т.п. повинна обов'язково дорівнювати одиниці, тобто обмеження  $\sum_{n=1}^m x_{ni} = 1$ ; інакше простіше буде отримати  $\min$  цільової функції, коли усі приймачі взагалі не підключені – технічно це не має сенсу, але з математичної точки зору цілком допустимо. Ця додаткова умова запишеться як  $x_{ni} \in \{1; 0\}$ .

Повна математична модель, що дозволяє прорахувати мінімум струму зворотної послідовності через оптимальне обов'язкове підключення однофазних навантажень до 3-проводної мережі, має вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 a_{ni} \cdot x_{ni} + j \cdot \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 b_{ni} \cdot x_{ni} \rightarrow \min \\ \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 x_{ni} = 1, n = 1 \dots m; i = 1, 2, 3 \\ x_{ni} \in \{1; 0\}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Якщо, наприклад, шукані змінні позначити як  $x_{11} = x_1, x_{12} = x_2, x_{13} = x_3, x_{21} = x_4, x_{22} = x_5$  і т.д., після використання симплекс методу можна отримати звичний

вектор змінних  $X = (x_1, x_2, x_3, \dots)$ , що покаже, яке навантаження до якої лінійної напруги підключати, щоб отримати  $\min \dot{I}_2^H$ .

## 2.5 Математична модель оптимізації несиметричного режиму в 4-провідній мережі шляхом внутрішнього симетрування навантажень

На відміну від розглянутого раніше симетрування для 3-проводної мережі, для 4-проводної мережі існують додаткові параметри електричного режиму, які використовують як критерій ефективності. Наприклад, окрім струмів та напруг зворотної та нульової послідовності, це будуть втрати активної потужності через струми нульової послідовності –  $\Delta P_0$ ; втрати активної потужності, зумовлені протіканням струмів зворотної послідовності –  $\Delta P_2$ . Тоді у якості критерію оптимальності сумарні втрати:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_0 + \Delta P_2 \rightarrow \min \quad (2.13)$$

Якщо критерій має декілька складових, можливо ввести так звані вагові коефіцієнти, що відобразять вагомість однієї складової у порівнянні з іншими. Наприклад, якщо в системі є багато асинхронних двигунів, які є чутливі до струмів зворотної послідовності, можна встановити для  $\Delta P_2$  додатковий коефіцієнт, більший за 1, вказуючи на важливість саме цієї складової.

Далі, аналогічно до розділів 2.3 та 2.4, вводимо змінні: кількість навантажень  $n = (1, 2, 3, \dots, m)$ ; кількість фаз  $i = 1, 2, 3$  для  $U_A, U_B, U_C$  відповідно; підключення навантаження до відповідної фази  $x_{ni} = \{1; 0\}$ .

Тоді втрати потужності:

$$\begin{cases} \Delta P_2 = 3 \cdot \left( \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 I_{2ni} \cdot x_{ni} \right)^2 \cdot r_2, \\ \Delta P_0 = 12 \cdot \left( \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 I_{0ni} \cdot x_{ni} \right)^2 \cdot r_0, \end{cases} \quad (2.14)$$

де  $r_0$  та  $r_2$  – активна складова опорів нульової та зворотної послідовностей;

$\dot{I}_{0ni}$  та  $\dot{I}_{2ni}$  – вектори струму нульової та зворотної послідовностей.

Визначаємо цільову функцію:

$$\dot{F}(X) = 3 \cdot \left( \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 I_{2ni} \cdot x_{ni} \right)^2 \cdot r_2 + 12 \cdot \left( \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 I_{0ni} \cdot x_{ni} \right)^2 \cdot r_0 \rightarrow \min \quad (2.15)$$

Відповідно, математична модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} 3 \cdot \left( \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 I_{2ni} \cdot x_{ni} \right)^2 \cdot r_2 + 12 \cdot \left( \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 I_{0ni} \cdot x_{ni} \right)^2 \cdot r_0 \rightarrow \min \\ \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 x_{ni} = 1, \quad n = 1 \dots m; \quad i = 1, 2, 3 \\ x_{ni} \in \{1; 0\} \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Зазначимо, що ця модель має квадратичну залежність; до неї неможливо застосувати симплекс-метод. Рішення задачі потребує використання динамічного програмування. У найпростішому вигляді це виглядає так: початкове оцінювання системи; якщо усі навантаження підключені до однієї напруги, рахуються вектора струмів  $\dot{I}_{0ni}$  та  $\dot{I}_{2ni}$  для кожного навантаження та сумарні втрати  $\Delta P_{\Sigma}$  активної потужності в лінії живлення, обумовлені несиметрією режиму.

Далі рахуються варіанти сумарних втрат для почергового переключення кожного з навантажень на інші напруги. З усіх розглянутих варіантів обирається той, де втрати потужності найменші, та порівнюється із значенням, отриманим на попередньому етапі. Так продовжується допоки нове отримане значення буде меншим за попереднє; в іншому випадку останній розв'язок приймається як оптимальний, розрахунки припиняються.

## Висновки по розділу 2

Головним висновком розділу буде той факт – щоб зробити критичний аналіз складної технічної або управлінської задачі, прояснити усі обставини та допомогти відповідальній за прийняття рішень особі обрати оптимальний (або близький до оптимального) варіант, необхідно порівняти між собою за низкою

ознак усі наявні варіанти рішень – це і є дослідження операцій. Для цього організують серію математичних розрахунків з метою *кількісного* обґрунтування прийнятих рішень (під прийняттям рішення розуміється остаточне затвердження дій, що становлять операцію, на основі запропонованого *оптимального* рішення).

Необхідність обрання конкретного рішення диктується саме наявністю мети, яку потрібно досягти (мета дії – бажаний стан чи запланований результат діяльності, на який спрямовані зусилля та ресурси).

Основою методу дослідження операцій є моделювання, що спирається на принцип аналогії, подібності та – як наслідок – можливості вивчення параметрів існуючого, реального об'єкта через розгляд параметрів його моделі.

Економіко-математична модель – це відображення зв'язків показників операції через засоби математичного опису, коли після постановки завдання здійснюється формалізація та опис операції за допомогою формул – математична модель та критерій ефективності (цільова функція). Зазвичай, при цьому сама операція частково спрощується.

Другий висновок – задачі з галузі електроенергетики мають свою важливу специфіку. Це вимагає від проєктанта наявності відповідних професійних знань; або спеціаліст-енергетик повинен знати математичні методи досліджень та мати навички програмування. В будь-якому випадку, рішення практичної задачі виконується наступним чином: спеціаліст створює модель об'єкта; обирається математичний метод (або декілька методів) розв'язання; створюється програма для ЕОМ, виконуються розрахунки, перевірка та коригування моделі; реалізація знайденого рішення практично (або видача рекомендацій).

Що стосується вирішення конкретних задач симетрування режимів, то як і в більшості практичних задач, багато залежить саме від визначення найбільш суттєвих факторів та їх взаємозв'язків, обґрунтування параметрів, якими можна користуватись, та встановлення критерію ефективності (оптимальності). Взагалі, вибір критерію ефективності визначає практичну цінність дослідження; помилка критерію може зашкодити, бо такі операції призведуть до невиправданих затрат.

## РОЗДІЛ 3

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ОБМЕЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НЕСИМЕТРИЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ПРИ ДЕФІЦИТІ ПОТУЖНОСТІ

#### 3.1 Питання обмеження потужності навантажень

Як було показано в розділі 2, використання математичних методів для рішення задач керування режимами електричної мережі, зокрема, оптимізації несиметричних режимів, може дати значний ефект, хоча і пов'язано з деякими труднощами. Окрім перелічених задач оптимального керування режимами, також існують варіанти задачі оптимізації несиметричних режимів за допомогою симетрувальних пристроїв; задачі оптимального керування реактивною потужністю; задачі синтезу оптимального графіку навантажень; задачі оптимізації електроспоживання в умовах дефіциту потужності у системі живлення – в усіх цих випадках «математичне програмування» може забезпечити найбільший ефект з точки зору мінімуму втрат активної потужності із максимальною надійністю електропостачання, мінімальної плати за спожиту електроенергію, мінімальних збитків і т. п.

Наразі, для багатьох сучасних підприємств стає характерною задача оптимізації електроспоживання в умовах дефіциту потужності, коли, за вимогою енергопостачальної організації, виникає потреба на деякий час зменшити потужність підприємства на задану величину  $\Delta P$ ; але при цьому виникає багато критеріїв, які потрібно враховувати – тому і варіантів виконання задачі також існує досить багато. Кожний має як переваги, так і недоліки, хоча усі вони мають певні наслідки для виробництва: додаткові технологічні збитки через порушення режиму роботи обладнання; підвищується ймовірність поломки обладнання; погіршення якості продукції та брак; недовипуск продукції за обсягом. Крім того, це впливає на саму мережу: можливі зміни параметрів електричного режиму мережі, зниження її надійності, параметрів якості електроенергії і т.п.

Для умов дефіциту потужності існує узагальнений алгоритм рішення: спочатку визначаються приймачі, які не можна відключати (або міняти їх режим) ні за яким критерієм; серед тих, що залишилися, визначають приймачі, що небажано відключати за певним *головним* критерієм – і якщо сумарна потужність приймачів, які буде можливо відключати, перевищує вказане обмеження  $\Delta P$ , тоді визначають ті приймачі, що можна відключити від мережі за більш низькими критеріями, але із мінімумом збитків.

Саме на останньому етапі можна використовувати критерій оптимізації симетрування режиму електропостачання мережі, тобто намагатися так відключати саме несиметричні навантаження. За цільову функцію  $F(X)$  можна знову обрати модуль струму зворотної послідовності  $I_2$  в лінії живлення вузла навантаження. До обмежень математичної моделі потрібно додати встановлену величину обмеження потужності  $\Delta P$ ; можливість відключення будь-якого навантаження із тих, що залишилися; неможливість відключення усіх цих навантажень разом через введення мінімального рівня робочої потужності. Останній пункт, як і раніше, унеможливорює математично допустимий, але безглуздий з технічної точки зору результат.

### 3.2 Математична модель оптимізації несиметричного режиму мережі шляхом внутрішнього симетрування навантажень із постійним фазуванням при дефіциті потужності в енергосистемі

Цей метод використовують, коли на підприємстві немає оперативної можливості переключати навантаження між лінійними напругами – кожне несиметричне навантаження може бути лише або підключено до конкретної лінійної напруги, або відключено від мережі. Тоді до математичної моделі (2.12) слід додати обмеження на неможливість переключення навантаження між фазами. Цей стан визначається через булеву змінну  $x_{ni} = \{1,0\}$ , але на відміну від моделі (2.12), індекс  $i$  (підключення до певної напруги) у новій моделі

залишається незмінним, тому підсумовувати у формулах будемо лише за одним параметром  $m$ .

Якщо  $n$ -й несиметричний приймач ( $n = 1, 2, \dots, m$ ) при підключенні створює струм зворотної послідовності  $\dot{I}_2 = a_{ni} + j \cdot b_{ni}$ , то цільову функцію математичної  $F(X)$  моделі можна записати у вигляді

$$\left| \sum_{n=1}^m a_{ni} \cdot x_{ni} + j \cdot \sum_{n=1}^m b_{ni} \cdot x_{ni} \right| \rightarrow \min . \quad (3.1)$$

Потужність підприємства  $P_M$  після отримання вимоги на зменшення споживання потужності на величину  $\Delta P$ :

$$P_M = \sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P , \quad (3.2)$$

де  $P_{ni}$  – потужність  $n$ -го приймача, якого жорстко підключено до  $i$ -ї напруги.

У свою чергу, враховуючи значення булевої змінної  $x_{ni} = \{1,0\}$ , можна записати сумарну потужність приймачів після часткового відключення у вигляді

$$\sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P = \sum_{n=1}^m P_{ni} \cdot x_{ni} . \quad (3.3)$$

Тоді обмеження математичної моделі, що враховує зменшення споживаної потужності через відключення деяких навантажень

$$\sum_{n=1}^m P_{ni} \cdot x_{ni} \leq \sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P . \quad (3.4)$$

Обмеження, що враховує можливість відключення будь-якого навантаження та неможливість підключення до іншої напруги у вигляді булевого рівняння:

$$x_{ni} + \underline{x}_{ni} = 1, \quad n = 1, \dots, m , \quad (3.5)$$

де  $\underline{x}_{ni}$  – фіктивна змінна «не  $x_{ni}$ », що немає фізичного змісту.

Неможливість відключення усіх навантажень разом:

$$\sum_{n=1}^m P_{ni} \cdot x_{ni} \geq \sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P - 2 \cdot P_{ni \max} , \quad (3.6)$$



де  $P_{ni \max}$  – потужність найбільш потужного навантаження серед усіх  $P_{ni}$ .

Зібравши формули (3.1), (3.4), (3.5) та (3.6), отримаємо нову математичну модель оптимізації несиметричного режиму мережі шляхом внутрішнього симетрування навантажень при дефіциті потужності в енергосистемі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^m a_{ni} \cdot x_{ni} + j \cdot \sum_{n=1}^m b_{ni} \cdot x_{ni} \rightarrow \min \\ \sum_{n=1}^m P_{ni} \cdot x_{ni} \leq \sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P \\ \sum_{n=1}^m P_{ni} \cdot x_{ni} \geq \sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P - 2 \cdot P_{ni \max} \\ x_{ni} + \underline{x}_{ni} = 1; \quad x_{ni}, \underline{x}_{ni} \in \{1; 0\}; \quad n = 1, \dots, m \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Після прорахунку цієї моделі матимемо оптимальне рішення для підключення несиметричних навантажень при неможливості переключення між фазами, при якому буде забезпечено мінімальний струм зворотної послідовності  $\dot{I}_2$  у лінії живлення (оптимальне симетрування) при виконанні умови зменшення потужності на задану величину  $\Delta P$ .

3.3 Алгоритм аналізу математичної моделі для пошуку оптимального варіанту обмеження потужності групи несиметричних електроприймачів із постійним фазуванням

Розглянемо алгоритми розрахунків математичних моделей (2.12) та (3.7). Спочатку, як більш простіший, розглянемо модель (3.7), яка здійснюється на практиці шляхом поетапного вмикання навантажень.

Розв'язок задачі виконується за схемою методу динамічного програмування, який призначений для вирішення *багатоетапних* задач. Під етапом в даному випадку розуміється прийняття чергового рішення про підключення (або не підключення) чергового несиметричного приймача.

Загальна ідея алгоритму полягає в наступному: формується множина потужностей несиметричних приймачів, в якій всі елементи розташовані в

порядку їх зростання; розрахунок першого етапу починається із вихідного стану, коли всі електроприймачі начебто *відключені*. В цілому алгоритм, що забезпечує всі умови математичної моделі (3.7) зображений на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Алгоритм розрахунку оптимального рішення щодо обмеження потужності групи електроприймачів несиметричного виконання

На першому етапі приймається рішення про підключення найбільш потужного приймача; маємо на увазі, що згідно з обмеженням (див. форм. 3.5),

його фазування є відомим та незмінним. Цій дії буде відповідати певний струм зворотної послідовності в лінії живлення, який можна розрахувати.

Перевіряється вимога обмеження (3.4); якщо воно не виконується, то цей приймач слід відключити для забезпечення вимоги енергосистеми – із подальшого розрахунку цей приймач *вилучається* і залишається відключеним. Приймається рішення про підключення наступного за потужністю несиметричного електроприймача і знову перевіряється обмеження (3.4).

Якщо вимога (3.4) виконується, настає другий етап – пошук такого електроприймача із тих, що залишились, щоб в результаті його підключення в лінії живлення створювався мінімально можливий сумарний струм зворотної послідовності від вже двох навантажень, після чого знову перевіряється вимога (3.4). Таким чином, якщо вести розрахунок за потужністю у напрямку «від найпотужнішого до найменш потужного», обмеження (3.6) буде виконуватись автоматично. Таким чином декілька раз перебираються усі електроприймачі, допоки не отримаємо ряд навантажень, що задовольняє обмеження (3.4) та забезпечує мінімально можливий струм зворотної послідовності.

3.4 Числовий приклад процесу розрахунку з пошуку рішення оптимального обмеження потужності вузла несиметричних навантажень із постійним фазуванням

Інформація про несиметричні електроприймачі наведена в таблиці 3.1. Згідно до вимог енергосистеми, потрібно зменшити потужність по всьому вузлу навантаження на 55 кВт.

Таблиця 3.1 – Інформація про несиметричне вузлове навантаження

№ електроприймача	Потужність, кВт	$\cos \varphi$	Напруги підключення
1	10	0,7	$U_{AB}$
2	10	0,8	$U_{BC}$
3	25	0,56	$U_{AB}$
4	30	0,7	$U_{CA}$
5	40	0,5	$U_{BC}$
6	45	0,7	$U_{CA}$

За формулою (3.2), остаточно потужність вузла складатиме:

$$P_M = 10 + 10 + 25 + 30 + 40 + 45 - 55 = 105 \text{ кВт.}$$

За обмеженням (3.6), мінімальна потужність:  $P_{\min} = 105 - 2 \cdot 45 = 15 \text{ кВт.}$

Розрахуємо струми зворотної послідовності окремих навантажень за формулами (2.5-2.7).

Перше навантаження підключено до напруги  $U_{AB}$ , отже:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{211} &= \frac{10000}{3 \cdot 380 \cdot 0,7} \cdot \left[ e^{j(30^\circ - 45^\circ)} + e^{j(90^\circ - 45^\circ)} \right] = 12,53 \cdot \left[ e^{j(-15^\circ)} + e^{j(45^\circ)} \right] = \\ &= 12,1 - j \cdot 3,24 + 8,86 + j \cdot 8,86 = 20,96 + j \cdot 5,62 = |21,7| \cdot e^{j(15^\circ)} \text{ (А)}. \end{aligned}$$

Друге навантаження підключено до напруги  $U_{BC}$ :

$$\begin{aligned} \dot{i}_{222} &= \frac{10000}{3 \cdot 380 \cdot 0,8} \cdot \left[ e^{j(-210^\circ - 37^\circ)} + e^{j(210^\circ - 37^\circ)} \right] = 10,96 \cdot \left[ e^{j(-247^\circ)} + e^{j(173^\circ)} \right] = \\ &= -4,28 + j \cdot 10,09 - 10,88 + j \cdot 1,33 = -15,16 + j \cdot 11,42 = |18,98| \cdot e^{j(143^\circ)} \text{ (А)}. \end{aligned}$$

Третє навантаження підключено до напруги  $U_{AB}$ :

$$\begin{aligned} \dot{i}_{231} &= \frac{25000}{3 \cdot 380 \cdot 0,56} \cdot \left[ e^{j(30^\circ - 56^\circ)} + e^{j(90^\circ - 56^\circ)} \right] = 39,16 \cdot \left[ e^{j(-26^\circ)} + e^{j(34^\circ)} \right] = \\ &= 35,2 - j \cdot 17,17 + 32,47 + j \cdot 21,9 = 67,67 + j \cdot 4,73 = |67,83| \cdot e^{j(3^\circ)} \text{ (А)}. \end{aligned}$$

Четверте навантаження підключено до напруги  $U_{CA}$ :

$$\begin{aligned} \dot{i}_{243} &= \frac{30000}{3 \cdot 380 \cdot 0,7} \cdot \left[ e^{j(-30^\circ - 45^\circ)} + e^{j(-90^\circ - 45^\circ)} \right] = 37,59 \cdot \left[ e^{j(-75^\circ)} + e^{j(-135^\circ)} \right] = \\ &= 9,73 - j \cdot 36,31 - 26,58 - j \cdot 26,58 = -16,85 - j \cdot 62,89 = |65,11| \cdot e^{j(-105^\circ)} \text{ (А)}. \end{aligned}$$

П'яте навантаження підключено до напруги  $U_{BC}$ :

$$\begin{aligned} \dot{i}_{252} &= \frac{40000}{3 \cdot 380 \cdot 0,5} \cdot \left[ e^{j(-210^\circ - 60^\circ)} + e^{j(210^\circ - 60^\circ)} \right] = 70,18 \cdot \left[ e^{j(-270^\circ)} + e^{j(150^\circ)} \right] = \\ &= 0,00014 + j \cdot 70,17 - 60,78 + j \cdot 35,09 = -60,78 + j \cdot 105,26 = |121,55| \cdot e^{j(120^\circ)} \text{ (А)}. \end{aligned}$$

Шосте навантаження підключено до напруги  $U_{CA}$ :

$$\begin{aligned} \dot{i}_{263} &= \frac{45000}{3 \cdot 380 \cdot 0,7} \cdot \left[ e^{j(-30^\circ - 45^\circ)} + e^{j(-90^\circ - 45^\circ)} \right] = 56,39 \cdot \left[ e^{j(-75^\circ)} + e^{j(-135^\circ)} \right] = \\ &= 14,59 - j \cdot 54,47 - 39,87 - j \cdot 39,87 = -25,28 - j \cdot 94,34 = |97,67| \cdot e^{j(-105^\circ)} \text{ (А)}. \end{aligned}$$

Загальний струм зворотної послідовності, якщо усі навантаження будуть підключені, складе:  $\dot{I}_2^H = -29,45 - j \cdot 30,2 = |42,18| \cdot e^{j \cdot (-134^\circ)}$  А.

За першим кроком алгоритму (рис. 3.1) обираємо навантаження з найбільшою потужністю: № 6 (45 кВт;  $U_{CA}$ ).

Обмеження (3.6) та (3.4) виконуються:  $45 \text{ кВт} \leq 105 \text{ кВт}$ . Струм зворотної послідовності цього навантаження  $\dot{I}_2^1 = -25,28 - j \cdot 94,34 = |97,67| \cdot e^{j \cdot (-105^\circ)}$  А.

За пунктом 4 алгоритму, по чергово додаємо усі електроприймачі, що залишилися, розраховуючи сумарні струми зворотної послідовності в лінії живлення у разі включення кожного із них із врахуванням вже обраного №6.

Розрахунки проведемо за допомогою математичної програми Mathcad. Мінімальний струм зворотної послідовності буде при підключенні 5-го навантаження:  $\dot{I}_2^2 = \dot{I}_2^{63} + \dot{I}_2^{52} = -86,06 + j \cdot 10,92 = |86,75| \cdot e^{j \cdot (172^\circ)}$  А.

Перевіряємо за потужністю:  $45 \text{ кВт} + 40 \text{ кВт} \leq 105 \text{ кВт}$  – обмеження (3.4) виконується. Далі по чергово перевіряємо на струм зворотної послідовності підключення до обраних навантажень №6 та №5 тих, що залишились. Менший струм зворотної послідовності буде при підключенні навантаження №3:

$$\dot{I}_2^3 = \dot{I}_2^{63} + \dot{I}_2^{52} + \dot{I}_2^{31} = -18,39 + j \cdot 15,65 = |24,15| \cdot e^{j \cdot (139^\circ)}$$
 А.

Але обмеження по потужності (3.4) не виконується:  $45 + 40 + 25 > 105 \text{ кВт}$ . Отже, це навантаження *виключається* з розрахунку – замість нього обираємо інше навантаження з *наступним найменшим* сумарним струмом зворотної послідовності – навантаження №1. Струм зворотної послідовності буде:

$$\dot{I}_2^4 = \dot{I}_2^{63} + \dot{I}_2^{52} + \dot{I}_2^{11} = -65,1 + j \cdot 16,54 = |67,16| \cdot e^{j \cdot (166^\circ)}$$
 А.

Обмеження по потужності (3.4) виконується:  $45 + 40 + 10 \leq 105 \text{ кВт}$ . Серед неврахованих залишились навантаження №2 та №4. Вочевидь, навантаження №4 занадто потужне, тож залишається лише навантаження №2:

$$\dot{I}_2^5 = \dot{I}_2^{63} + \dot{I}_2^{52} + \dot{I}_2^{11} + \dot{I}_2^{22} = -80,26 + j \cdot 27,96 = |84,99| \cdot e^{j \cdot (160^\circ)}$$
 А.

Отже, при підключенні 6-го, 5-го, 2-го та 1-го навантажень обмеження (3.4) виконується ( $45 + 40 + 10 + 10 = 105 \text{ кВт}$ ); отримали найменший можливий струм зворотної послідовності:  $\dot{I}_2^H_{\min} = -80,26 + j \cdot 27,96 = |84,99| \cdot e^{j \cdot (160^\circ)}$  А.

Якщо дефіцит потужності буде зменшено (до рівня 50 кВт), буде можливо до навантажень №6 та №5 підключити навантаження №3 – і загальний струм зворотної послідовності стане меншим:  $I_2^3 = -18,39 + j \cdot 15,65 = |24,15| \cdot e^{j \cdot (139^\circ)}$  А.

### 3.5 Числовий приклад оптимального внутрішнього симетрування із зміною фазування при обмеженні потужності вузла несиметричних навантажень

Як показав попередній приклад, алгоритм на рис. 3.1 не дає можливості досягти оптимального рівня симетрування через неможливість змінювати фазування навантажень. Але якщо на підприємстві є можливість оперативно переключати навантаження між лінійними напругами, можливо використання математичної моделі (2.12); для цього спочатку переробимо спрощений алгоритм симплекс-методу з рис. 2.1 під цю задачу (рис. 3.2).

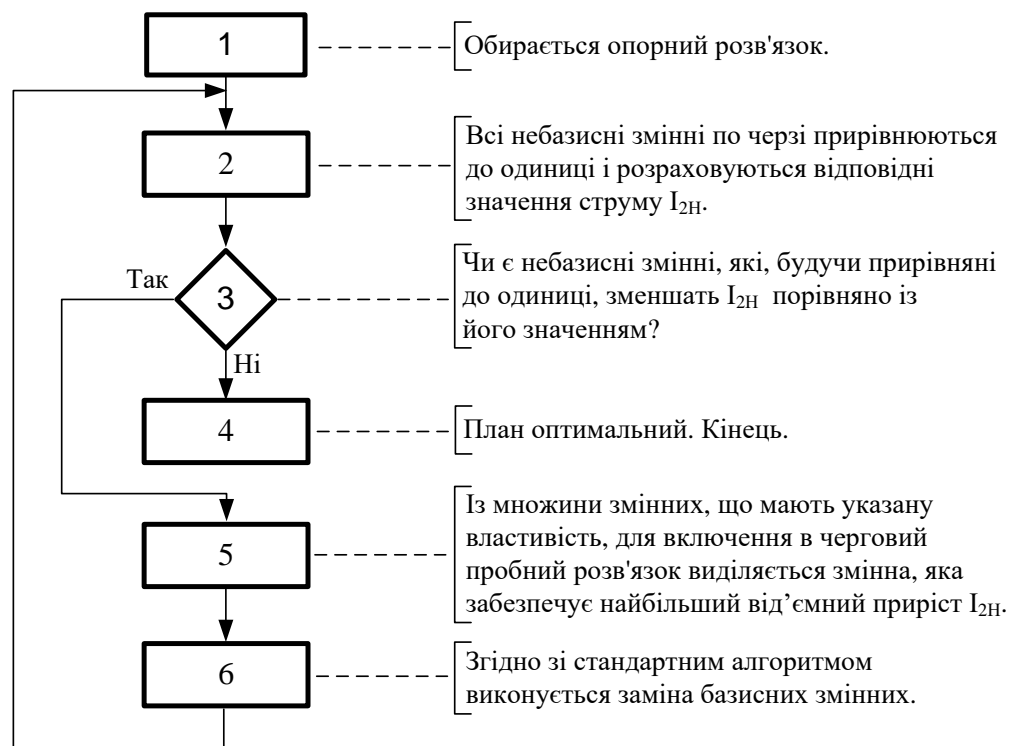


Рисунок 3.2 – Алгоритм розв'язування задачі внутрішнього симетрування симплекс-методом

При цьому, для прикладу з табл. 3.1 можливо спростити пошук навантажень для забезпечення обмеження (3.4) при дефіциті потужності 55 кВт; простіше

відключити 1-ше та 6-те навантаження. Інші навантаження перерозподілимо між лінійними напругами, щоб мати найменший струм зворотної послідовності  $\dot{I}_2^H$ .

Далі для навантажень, що залишилися (2-ге, 3-тє, 4-тє, 5-тє), за формулами (2.5) - (2.7) потрібно прорахувати усі можливі значення струмів зворотної послідовності при їх підключенні до різних лінійних напруг:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{2_{21}} &= \frac{10000}{3 \cdot 380 \cdot 0,8} \cdot \left[ e^{j(30^\circ - 37^\circ)} + e^{j(90^\circ - 37^\circ)} \right] = 10,96 \cdot \left[ e^{j(-7^\circ)} + e^{j(53^\circ)} \right] = \\ &= 10,88 - j \cdot 1,34 + 6,59 + j \cdot 8,75 = 17,47 + j \cdot 7,41 = 18,98 \cdot e^{j(23^\circ)} \text{ (A);} \\ \dot{i}_{2_{22}} &= \frac{10000}{3 \cdot 380 \cdot 0,8} \cdot \left[ e^{j(-210^\circ - 37^\circ)} + e^{j(210^\circ - 37^\circ)} \right] = 10,96 \cdot \left[ e^{j(-247^\circ)} + e^{j(173^\circ)} \right] = \\ &= -4,28 + j \cdot 10,09 - 10,88 + j \cdot 1,33 = -15,16 + j \cdot 11,42 = 18,98 \cdot e^{j(143^\circ)} \text{ (A);} \\ \dot{i}_{2_{23}} &= \frac{10000}{3 \cdot 380 \cdot 0,8} \cdot \left[ e^{j(-30^\circ - 37^\circ)} + e^{j(-90^\circ - 37^\circ)} \right] = 10,96 \cdot \left[ e^{j(-67^\circ)} + e^{j(-127^\circ)} \right] = \\ &= 4,28 - j \cdot 10,09 - 6,59 - j \cdot 8,75 = -2,31 - j \cdot 18,84 = 18,98 \cdot e^{j(-97^\circ)} \text{ (A).} \\ \dot{i}_{2_{31}} &= \frac{25000}{3 \cdot 380 \cdot 0,56} \cdot \left[ e^{j(30^\circ - 56^\circ)} + e^{j(90^\circ - 56^\circ)} \right] = 39,16 \cdot \left[ e^{j(-26^\circ)} + e^{j(34^\circ)} \right] = \\ &= 35,2 - j \cdot 17,17 + 32,47 + j \cdot 21,9 = 67,67 + j \cdot 4,73 = 67,83 \cdot e^{j(3^\circ)} \text{ (A);} \\ \dot{i}_{2_{32}} &= \frac{25000}{3 \cdot 380 \cdot 0,56} \cdot \left[ e^{j(-210^\circ - 56^\circ)} + e^{j(210^\circ - 56^\circ)} \right] = 39,16 \cdot \left[ e^{j(-266^\circ)} + e^{j(154^\circ)} \right] = \\ &= -2,73 + j \cdot 39,06 - 35,19 + j \cdot 17,17 = -37,92 + j \cdot 56,23 = 67,83 \cdot e^{j(123^\circ)} \text{ (A);} \\ \dot{i}_{2_{33}} &= \frac{25000}{3 \cdot 380 \cdot 0,56} \cdot \left[ e^{j(-30^\circ - 56^\circ)} + e^{j(-90^\circ - 56^\circ)} \right] = 39,16 \cdot \left[ e^{j(-86^\circ)} + e^{j(-146^\circ)} \right] = \\ &= 2,73 - j \cdot 39,06 - 32,47 - j \cdot 21,9 = -29,74 - j \cdot 60,96 = 67,83 \cdot e^{j(-117^\circ)} \text{ (A).} \\ \dot{i}_{2_{41}} &= \frac{30000}{3 \cdot 380 \cdot 0,7} \cdot \left[ e^{j(30^\circ - 45^\circ)} + e^{j(90^\circ - 45^\circ)} \right] = 37,59 \cdot \left[ e^{j(-15^\circ)} + e^{j(45^\circ)} \right] = \\ &= 36,31 - j \cdot 9,73 + 26,58 + j \cdot 26,58 = 62,89 + j \cdot 16,85 = 65,11 \cdot e^{j(15^\circ)} \text{ (A);} \\ \dot{i}_{2_{42}} &= \frac{30000}{3 \cdot 380 \cdot 0,7} \cdot \left[ e^{j(-210^\circ - 45^\circ)} + e^{j(210^\circ - 45^\circ)} \right] = 37,59 \cdot \left[ e^{j(-255^\circ)} + e^{j(165^\circ)} \right] = \\ &= -9,73 + j \cdot 36,31 - 36,31 + j \cdot 9,73 = -46,04 + j \cdot 46,04 = 65,11 \cdot e^{j(135^\circ)} \text{ (A);} \\ \dot{i}_{2_{43}} &= \frac{30000}{3 \cdot 380 \cdot 0,7} \cdot \left[ e^{j(-30^\circ - 45^\circ)} + e^{j(-90^\circ - 45^\circ)} \right] = 37,59 \cdot \left[ e^{j(-75^\circ)} + e^{j(-135^\circ)} \right] = \\ &= 9,73 - j \cdot 36,31 - 26,58 - j \cdot 26,58 = -16,85 - j \cdot 62,89 = 65,11 \cdot e^{j(-105^\circ)} \text{ (A).} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{2_{51}} &= \frac{40000}{3 \cdot 380 \cdot 0,5} \cdot \left[ e^{j(30^\circ - 60^\circ)} + e^{j(90^\circ - 60^\circ)} \right] = 70,18 \cdot \left[ e^{j(-30^\circ)} + e^{j(30^\circ)} \right] = \\ &= 60,78 - j \cdot 35,09 + 60,78 + j \cdot 35,09 = 121,56 + j \cdot 0 = 121,56 \cdot e^{j(0^\circ)} \text{ (A);} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{2_{52}} &= \frac{40000}{3 \cdot 380 \cdot 0,5} \cdot \left[ e^{j(-210^\circ - 60^\circ)} + e^{j(210^\circ - 60^\circ)} \right] = 70,18 \cdot \left[ e^{j(-270^\circ)} + e^{j(150^\circ)} \right] = \\ &= 0,00014 + j \cdot 70,17 - 60,78 + j \cdot 35,09 = -60,78 + j \cdot 105,26 = 121,56 \cdot e^{j(120^\circ)} \text{ (A);} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{2_{53}} &= \frac{40000}{3 \cdot 380 \cdot 0,5} \cdot \left[ e^{j(-30^\circ - 60^\circ)} + e^{j(-90^\circ - 60^\circ)} \right] = 70,18 \cdot \left[ e^{j(-90^\circ)} + e^{j(-150^\circ)} \right] = \\ &= -0,00014 - j \cdot 70,17 - 60,78 - j \cdot 35,09 = -60,78 - j \cdot 105,26 = 121,56 \cdot e^{j(-120^\circ)} \text{ (A).} \end{aligned}$$

Складемо нову таблицю 2.1 із отриманими розрахованими коефіцієнтами, попередньо змінивши порядкову нумерацію: навантаження №2 стане під першим номером, навантаження №3 – під другим і т.д. Отримаємо таблицю 3.2, після чого перепишемо математичну модель (2.12) у числовому вигляді, підставивши до неї усі отриманні значення та отримаємо математичну модель (3.8).

Таблиця 3.2 – Струми зворотної послідовності  $\dot{I}_2$

№ п/п	№ навантаження	Струми в залежності від фази підключення		
		$U_{AB} (i = 1)$	$U_{BC} (i = 2)$	$U_{CA} (i = 3)$
1	2	$17,47 + j \cdot 7,41$	$-15,16 + j \cdot 11,42$	$-2,31 - j \cdot 18,84$
2	3	$67,67 + j \cdot 4,73$	$-37,92 + j \cdot 56,23$	$-29,74 - j \cdot 60,96$
3	4	$62,89 + j \cdot 16,85$	$-46,04 + j \cdot 46,04$	$-16,85 - j \cdot 62,89$
4	5	$121,56 + j \cdot 0$	$-60,78 + j \cdot 105,26$	$-60,78 - j \cdot 105,26$

$$\left\{ \begin{array}{l} (17,47 \quad -15,16 \quad -2,31 ; \quad 67,67 \quad -37,92 \quad -29,74 ; \\ 62,89 \quad -46,04 \quad -16,85 ; \quad 121,56 \quad -60,78 \quad -60,78) \cdot X + \\ + j \cdot (7,41 \quad 11,42 \quad -18,84 ; \quad 4,73 \quad 56,23 \quad -60,96 ; \\ 16,85 \quad 46,04 \quad -62,89 ; \quad 0 \quad 105,26 \quad -105,26) \cdot X \end{array} \right\} \rightarrow \min$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1) \end{array} \right\} \cdot X = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$x_{ni} \in \{1;0\} \quad n=1\dots 4; \quad i=1,2,3$$



У математичній моделі (3.8) спочатку записана цільова функція  $F(X)$  у вигляді суми коефіцієнтів з табл. 3.2, помножених на шуканий вектор змінних  $X$ , що має загальний вигляд  $X = (x_{11} \ x_{12} \ x_{13}; \ x_{21} \ x_{22} \ x_{23}; \ x_{31} \ x_{32} \ x_{33}; \ x_{41} \ x_{42} \ x_{43})$ ,  $x_{ni} = \{1;0\}$ . Головне рівняння математичної моделі записано як матричний добуток.

За алгоритмом симплексного методу, спочатку обирається довільний базисний розв'язок. У нашому випадку цей розв'язок визначається довільним підключенням навантажень до напруг мережі – наприклад, усі навантаження підключимо до напруги  $U_{AB}$ .

Тоді вектор змінних  $X = (1 \ 0 \ 0; \ 1 \ 0 \ 0; \ 1 \ 0 \ 0; \ 1 \ 0 \ 0)$ ; струм зворотної послідовності  $I_2^H = (17,47 + 67,67 + 62,89 + 121,56) + j \cdot (7,41 + 4,73 + 16,85 + 0) = 269,59 + j \cdot 28,99 = 271,14 \cdot e^{j \cdot (6^\circ)}$  А.

Отримали базисний розв'язок, який можна прийняти за опорний. Базисними змінними є  $x_{11}, x_{21}, x_{31}, x_{41}$ ; за умовами задачі, зараз вони дорівнюють «1». Змінні  $x_{12}, x_{13}, x_{22}, x_{23}, x_{32}, x_{33}, x_{42}, x_{43}$  є вільними; зараз вони дорівнюють «0».

Зазвичай, задача лінійного програмування має декілька опорних розв'язків – саме серед них і знаходиться *оптимальний*, який надає *екстремум* цільової функції. Суть симплексного методу полягає у переборі опорних розв'язків з оцінкою на оптимальність по певному критерію. Але оскільки опорних розв'язків може бути дуже багато, простий перебір варіантів буде малоефективний; симплексний метод надає можливість знаходити «напрямок», в якому необхідно шукати оптимальний розв'язок, що скорочує процес.

Щоб розв'язати задачу симплексним методом, її необхідно представити в канонічному (основному) вигляді. Для цього потрібно виразити базисні змінні через вільні змінні та вільні члени (наприклад,  $x_{11}$  через  $x_{12}$  та  $x_{13}$ , вільний член 1):

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} = 1 \rightarrow x_{11} = 1 - (x_{12} + x_{13}) \quad (3.9)$$

Тоді сума дійсних частин змінних  $x_{11}, x_{12}, x_{13}$  складатиме:

$$\begin{aligned} 17,47 \cdot x_{11} - 15,16 \cdot x_{12} - 2,31 \cdot x_{13} &= 17,47 \cdot (1 - (x_{12} + x_{13})) - 15,16 \cdot x_{12} - 2,31 \cdot x_{13} = \\ &= 17,47 - 17,47 \cdot x_{12} - 17,47 \cdot x_{13} - 15,16 \cdot x_{12} - 2,31 \cdot x_{13} = \\ &= 17,47 - 32,63 \cdot x_{12} - 19,78 \cdot x_{13} = 17,47 - (32,63 \cdot x_{12} + 19,78 \cdot x_{13}). \end{aligned}$$

Теж саме для уявних частин:

$$\begin{aligned} 7,41 \cdot x_{11} + 11,42 \cdot x_{12} - 18,84 \cdot x_{13} &= 7,41 \cdot (1 - (x_{12} + x_{13})) + 11,42 \cdot x_{12} - 18,84 \cdot x_{13} = \\ &= 7,41 - 7,41 \cdot x_{12} - 7,41 \cdot x_{13} + 11,42 \cdot x_{12} - 18,84 \cdot x_{13} = \\ &= 7,41 + 4,01 \cdot x_{12} - 26,25 \cdot x_{13} = 7,41 - (-4,01 \cdot x_{12} + 26,25 \cdot x_{13}). \end{aligned}$$

Теж саме робимо для  $x_{21} \ x_{22} \ x_{23}$ ;  $x_{31} \ x_{32} \ x_{33}$ ;  $x_{41} \ x_{42} \ x_{43}$ .

$$\begin{aligned} 67,67 \cdot x_{21} - 37,92 \cdot x_{22} - 29,74 \cdot x_{23} &= 67,67 \cdot (1 - (x_{22} + x_{23})) - 37,92 \cdot x_{22} - 29,74 \cdot x_{23} = \\ &= 67,67 - 67,67 \cdot x_{22} - 67,67 \cdot x_{23} - 37,92 \cdot x_{22} - 29,74 \cdot x_{23} = \\ &= 67,67 - 105,59 \cdot x_{22} - 97,41 \cdot x_{23} = 67,67 - (105,59 \cdot x_{22} + 97,41 \cdot x_{23}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4,73 \cdot x_{21} + 56,23 \cdot x_{22} - 60,96 \cdot x_{23} &= 4,73 \cdot (1 - (x_{22} + x_{23})) + 56,23 \cdot x_{22} - 60,96 \cdot x_{23} = \\ &= 4,73 - 4,73 \cdot x_{22} - 4,73 \cdot x_{23} + 56,23 \cdot x_{22} - 60,96 \cdot x_{23} = \\ &= 4,73 + 51,5 \cdot x_{22} - 65,69 \cdot x_{23} = 4,73 - (-51,5 \cdot x_{22} + 65,69 \cdot x_{23}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 62,89 \cdot x_{31} - 46,04 \cdot x_{32} - 16,85 \cdot x_{33} &= 62,89 \cdot (1 - (x_{32} + x_{33})) - 46,04 \cdot x_{32} - 16,85 \cdot x_{33} = \\ &= 62,89 - 62,89 \cdot x_{32} - 62,89 \cdot x_{33} - 46,04 \cdot x_{32} - 16,85 \cdot x_{33} = \\ &= 62,89 - 108,93 \cdot x_{32} - 79,74 \cdot x_{33} = 62,89 - (108,93 \cdot x_{32} + 79,74 \cdot x_{33}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 16,85 \cdot x_{31} + 46,04 \cdot x_{32} - 62,89 \cdot x_{33} &= 16,85 \cdot (1 - (x_{32} + x_{33})) + 46,04 \cdot x_{32} - 62,89 \cdot x_{33} = \\ &= 16,85 - 16,85 \cdot x_{32} - 16,85 \cdot x_{33} + 46,04 \cdot x_{32} - 62,89 \cdot x_{33} = \\ &= 16,85 + 29,19 \cdot x_{32} - 79,74 \cdot x_{33} = 16,85 - (-29,19 \cdot x_{32} + 79,74 \cdot x_{33}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 121,56 \cdot x_{41} - 60,78 \cdot x_{42} - 60,78 \cdot x_{43} &= 121,56 \cdot (1 - (x_{42} + x_{43})) - 60,78 \cdot x_{42} - 60,78 \cdot x_{43} = \\ &= 121,56 - 121,56 \cdot x_{42} - 121,56 \cdot x_{43} - 60,78 \cdot x_{42} - 60,78 \cdot x_{43} = \\ &= 121,56 - 182,34 \cdot x_{42} - 182,34 \cdot x_{43} = 121,56 - (182,34 \cdot x_{42} + 182,34 \cdot x_{43}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 \cdot x_{41} + 105,26 \cdot x_{42} - 105,26 \cdot x_{43} &= 0 \cdot (1 - (x_{42} + x_{43})) + 105,26 \cdot x_{42} - 105,26 \cdot x_{43} = \\ &= 0 - 0 \cdot x_{42} - 0 \cdot x_{43} + 105,26 \cdot x_{42} - 105,26 \cdot x_{43} = \\ &= 0 + 105,26 \cdot x_{42} - 105,26 \cdot x_{43} = 0 - (-105,26 \cdot x_{42} + 105,26 \cdot x_{43}). \end{aligned}$$

Запишемо математичну модель (3.8) у новому вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} 269,59 - (32,63 + 19,78 + 105,59 + 97,41 + 108,93 + 79,74 + \\ + 182,34 + 182,34) \cdot X + j \cdot (28,99 - (-4,01 + 26,25 - 51,5 + \\ + 65,69 - 29,19 + 79,74 - 105,26 + 105,26) \cdot X) \rightarrow \min \\ x_{11} = 1 - (x_{12} + x_{13}); \quad x_{21} = 1 - (x_{22} + x_{23}); \quad x_{31} = 1 - (x_{32} + x_{33}); \\ x_{41} = 1 - (x_{42} + x_{43}); \quad x_{ni} \in \{1; 0\} \quad n = 1 \dots 4; \quad i = 1, 2, 3 \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Стає можливим визначити вільну змінну, яку треба ввести в базис, щоб покращити результати розрахунку сумарного струму зворотної послідовності.

Для цього по чергово надаємо кожній вільній змінній значення «1» та рахуємо відповідні струми зворотної послідовності. Результати зберемо у табл. 3.3:

Таблиця 3.3 – Визначення вільної змінної для внесення в базис

Вільні змінні	Струми зворотної послідовності $I_2$		
	Re $I_2$	Im $I_2$	$ I_2 $
$x_{12} = 1$	236,96	33	239,24
$x_{13} = 1$	249,81	2,74	249,82
$x_{22} = 1$	164	80,49	182,68
$x_{23} = 1$	172,18	-36,7	176,04
$x_{32} = 1$	160,66	58,18	170,86
$x_{33} = 1$	189,85	-50,75	196,51
$x_{42} = 1$	87,25	134,25	160,11
$x_{43} = 1$	87,25	-76,27	<b>115,88</b>

Як бачимо з табл. 3.3, до базису потрібно ввести змінну  $x_{43}$ ; відповідно, за булевою функцією  $x_{ni} = \{1;0\}$ , з базису виводимо змінну  $x_{41}$ . Для заміни базисних змінних будемо стандартну симплексну таблицю (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Перша ітерація симплекс-метода

$F(X)$ та базисні змінні	Вільн. члени	Вільні змінні							
		$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{42}$	$x_{43}$
Re $I_2$	269,59	32,63	19,78	105,59	97,41	108,93	79,74	182,34	182,34
	87,25	32,63	19,78	105,59	97,41	108,93	79,74	0	-182,34
Im $I_2$	28,99	-4,01	26,25	-51,5	65,69	-29,19	79,74	-105,26	105,26
	-76,27	-4,01	26,25	-51,5	65,69	-29,19	79,74	-210,52	-105,26
$x_{11}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0
$x_{21}$	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	1	1	0	0	0	0
$x_{31}$	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	1	0	0	0	0	1	1	0	0
$x_{41}$	1	0	0	0	0	0	0	1	1
	1	0	0	0	0	0	0	1	$\mu = 1/1$

У першому стовбці позначені цільова функція та базисні змінні; у другому стовбці – вільний член, його числові значення для Re  $I_2$  та Im  $I_2$  та значення базисних змінних (зверху вихідні, знизу після обрахунку). Далі строки Re  $I_2$  та

Im  $I_2$  містять коефіцієнти з цільової функції для відповідних вільних змінних (зверху вихідні, знизу після обрахунку). Усі інші клітини заповнюються коефіцієнтами при вільних змінних у головному рівнянні (див. форм. 3.8): зверху вихідні, знизу після обрахунку.

За стандартним симплекс-методом, на перетині змінних  $x_{43}$ , що вводимо до базису, та  $x_{41}$ , що виводимо з базису, рахуємо робочий елемент  $\mu$ , як зворотне значення обраного елемента таблиці. Усі елементи обраного рядка множимо на  $\mu$ ; усі елементи обраного стовпця множимо на  $-\mu$ .

Всі інші елементи таблиці перераховуємо за алгоритмом: навпроти елемента, що розраховується, визначаються і перемножуються елементи у вибраних стовпці (новий елемент) і рядку (вихідний елемент) і додається сам вихідний елемент. Наприклад, другий стовбець вільних членів:

$$\text{для Re } I_2 = 269,59 + (-182,34 \times 1) = 87,25; \text{ для Im } I_2 = 28,99 + (-105,26 \times 1) = -76,27;$$

$$\text{для } x_{11} = 1 + (0 \times 1) = 1; \text{ для } x_{21} = 1 + (0 \times 1) = 1; \text{ для } x_{31} = 1 + (0 \times 1) = 1.$$

$$\text{Для стовпця } x_{12}: 32,63 + (-182,34 \times 0) = 32,63; \quad -4,01 + (-105,26 \times 0) = -4,01;$$

$$1 + (0 \times 0) = 1; \quad 0 + (0 \times 0) = 0; \quad 0 + (0 \times 0) = 0.$$

$$\text{Для стовпця } x_{13}: 19,78 + (-182,34 \times 0) = 19,78; \quad 26,25 + (-105,26 \times 0) = 26,25;$$

$$1 + (0 \times 0) = 1; \quad 0 + (0 \times 0) = 0; \quad 0 + (0 \times 0) = 0.$$

$$\text{Для стовпця } x_{22}: 105,59 + (-182,34 \times 0) = 105,59; \quad -51,5 + (-105,26 \times 0) = -51,5;$$

$$0 + (0 \times 0) = 0; \quad 1 + (0 \times 0) = 1; \quad 0 + (0 \times 0) = 0 \text{ і т.д.}$$

$$\text{Для стовпця } x_{42}: 182,34 + (-182,34 \times 1) = 0; \quad -105,26 + (-105,26 \times 1) = -210,52;$$

$$0 + (0 \times 1) = 0; \quad 0 + (0 \times 1) = 0; \quad 0 + (0 \times 1) = 0.$$

Нове опорне рішення  $X = (1 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1)$ ; змінну  $x_{41}$  вивели з базису, змінну  $x_{43}$  ввели до базису.

Струм зворотної послідовності  $\dot{I}_2^H = 87,25 - j \cdot 76,27 = 115,88 \cdot e^{j(-41^\circ)}$  А; зменшився більш, ніж в два рази. Рішення буде оптимальним (мінімальним), якщо заміна базисних змінних вже не призведе до зменшення цільової функції.

Перепишемо таблиці (3.3) та (3.4) з новими даними та визначимо нові змінні для вводу-виводу у базисі; проведемо розрахунки (нова ітерація).



На перетині змінних  $x_{22}$ , що вводимо до базису, та  $x_{21}$ , що виводимо з базису, рахуємо робочий елемент  $\mu$ , як зворотне значення обраного елемента таблиці. Усі елементи обраного рядка множимо на  $\mu$ ; усі елементи обраного стовпця множимо на  $-\mu$  (зверху вихідні дані, знизу після обрахунку).

Другий стовбець вільних членів:

для  $\text{Re } I_2 = 87,25 + (-105,59 \times 1) = -18,34$ ; для  $\text{Im } I_2 = -76,27 + (51,5 \times 1) = -76,27$ ;

для  $x_{11} = 1 + (0 \times 1) = 1$ ; для  $x_{31} = 1 + (0 \times 1) = 1$ ; для  $x_{43} = 1 + (0 \times 1) = 1$ .

Для стовпця  $x_{12}$ :  $32,63 + (-105,59 \times 0) = 32,63$ ;  $-4,01 + (51,5 \times 0) = -4,01$ ;  
 $1 + (0 \times 0) = 1$ ;  $0 + (0 \times 0) = 0$ ;  $0 + (0 \times 0) = 0$ .

Для стовпця  $x_{13}$ :  $19,78 + (-105,59 \times 0) = 19,78$ ;  $26,25 + (51,5 \times 0) = 26,25$ ;  
 $1 + (0 \times 0) = 1$ ;  $0 + (0 \times 0) = 0$ ;  $0 + (0 \times 0) = 0$ .

Для стовпця  $x_{23}$ :  $97,41 + (-105,59 \times 1) = -8,18$ ;  $65,69 + (51,5 \times 1) = 117,19$ ;  
 $0 + (0 \times 1) = 0$ ;  $0 + (0 \times 1) = 0$ ;  $0 + (0 \times 1) = 0$  і т.д.

Для стовпця  $x_{32}$ :  $108,93 + (-105,59 \times 0) = 108,93$ ;  $-29,19 + (51,5 \times 0) = -29,19$ ;  
 $0 + (0 \times 0) = 1$ ;  $1 + (0 \times 0) = 1$ ;  $0 + (0 \times 0) = 0$ .

Нове опорне рішення  $X = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1)$ ; змінну  $x_{21}$  вивели з базису, змінну  $x_{22}$  ввели до базису. Струм зворотної послідовності зменшився ще в три рази:  $\dot{I}_2^H = -18,34 - j \cdot 24,77 = 30,82 \cdot e^{j \cdot (-126^\circ)}$  А. Запишемо нову цільову функцію (3.12) та перепишемо табл. (3.5) – отримаємо таблицю (3.7).

Таблиця 3.7 – Визначення вільної змінної для третьої ітерації

Вільні змінні	Струми зворотної послідовності $\dot{I}_2$		
	$\text{Re } I_2$	$\text{Im } I_2$	$ \dot{I}_2 $
$x_{12} = 1$	-50,97	-20,76	<b>55,03</b>
$x_{13} = 1$	-38,12	-51,02	63,68
$x_{21} = 1$	87,25	26,73	91,25
$x_{23} = 1$	-10,16	-141,96	142,32
$x_{32} = 1$	-127,27	4,42	127,44
$x_{33} = 1$	-98,08	-104,51	143,32
$x_{41} = 1$	164	80,49	182,68
$x_{42} = 1$	-18,34	185,75	186,65

$$\left| \begin{array}{l} -18,34 - (32,63 + 19,78 - 105,59 - 8,18 + 108,93 + 79,74 - \\ -182,34 + 0) \cdot X + j \cdot (-24,77 - (-4,01 + 26,25 - 51,5 + \\ + 117,19 - 29,19 + 79,74 - 105,26 - 210,52) \cdot X \end{array} \right| \rightarrow \min \quad (3.12)$$

Як бачимо з табл. 3.7, до базису потрібно ввести змінну  $x_{12}$ ; відповідно, за булевою функцією  $x_{ni} = \{1;0\}$ , з базису виводимо змінну  $x_{11}$ . Для заміни базисних змінних запишемо нову симплексну таблицю (табл. 3.8). На перетині змінних  $x_{12}$ , що вводимо до базису, та  $x_{11}$ , що виводимо з базису, рахуємо робочий елемент  $\mu$ , як зворотне значення обраного елемента таблиці. Усі елементи обраного рядка множимо на  $\mu$ ; усі елементи обраного стовпця множимо на  $-\mu$  (зверху вихідні дані, знизу після обрахунку).

Другий стовбець вільних членів:

для  $\text{Re } I_2 = -18,34 + (-32,63 \times 1) = -50,97$ ; для  $\text{Im } I_2 = -24,77 + (4,01 \times 1) = -20,76$ ;

для  $x_{22} = 1 + (0 \times 1) = 1$ ; для  $x_{31} = 1 + (0 \times 1) = 1$ ; для  $x_{43} = 1 + (0 \times 1) = 1$ .

Для стовпця  $x_{13}$ :  $19,78 + (-32,63 \times 1) = -12,85$ ;  $26,25 + (4,01 \times 1) = 30,26$ ;  
 $0 + (0 \times 1) = 0$ ;  $0 + (0 \times 1) = 0$ ;  $0 + (0 \times 1) = 0$  и т.д.

Таблиця 3.8 – Третя ітерація симплекс-метода

$F(X)$ та базисні змінні	Вільн. члени	Вільні змінні							
		$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{21}$	$x_{23}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{41}$	$x_{42}$
$\text{Re } I_2$	-18,34	32,63	19,78	-105,59	-8,18	108,93	79,74	-182,34	0
	-50,97	-32,63	-12,85	-105,59	-8,18	108,93	79,74	-182,34	0
$\text{Im } I_2$	-24,77	-4,01	26,25	-51,5	117,19	-29,19	79,74	-105,26	-210,52
	-20,76	4,01	30,26	51,5	117,19	-29,19	79,74	-105,26	-210,52
$x_{11}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0
	1	$\mu = 1/1$	1	0	0	0	0	0	0
$x_{22}$	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	1	1	0	0	0	0
$x_{31}$	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	1	0	0	0	0	1	1	0	0
$x_{43}$	1	0	0	0	0	0	0	1	1
	1	0	0	0	0	0	0	1	1

Як бачимо, загальний струм зворотної послідовності після цієї ітерації збільшився:  $\dot{I}_2^H = -50,97 - j \cdot 20,76 = 55,03 \cdot e^{j \cdot (-158^\circ)}$  А. Отже, зупинимось на результаті другої ітерації:  $\dot{I}_2^H = -18,34 - j \cdot 24,77 = 30,82 \cdot e^{j \cdot (-126^\circ)}$  А.

Вектор змінних  $X = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0; 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1)$ : перше розрахункове навантаження (навантаження №2 за табл. 3.2) підключено до напруги  $U_{AB}$ , друге (навантаження №3) – до  $U_{BC}$ , третє (№4) – до  $U_{AB}$ , четверте (№5) – до  $U_{CA}$ . Навантаження №1 та №6 відключені від самого початку.

### Висновки по розділу 3

Як вже відмічалось, існує декілька методів розрахунку для оптимізації режиму електромережі у разі обмеження її потужності за вимогою енергосистеми. У роботі були показані та обраховані два методи оптимізації несиметричного режиму мережі: шляхом внутрішнього симетрування лінійних навантажень без можливості переключення навантажень між лінійними напругами; шляхом переключення однофазних навантажень між лінійними напругами. Перший метод має значну перевагу за простотою і у обчисленні, і за технічною реалізацією, але він є менш гнучким та не надає саме *оптимального* рішення із симетрування; тому все одно може виникнути необхідність у використанні додаткових симетрувальних пристроїв, хоча і меншої потужності.

Другий метод значно складніше для рахування, але за використання відповідної комп'ютерної програми процес рахування все одно буде простим, а результати симетрування надає значно кращі – але потрібно мати можливість оперативно змінювати фазування навантажень. Тоді можливо також поєднання обох методів, коли спочатку визначають навантаження, які забезпечують зменшення потужності по вузлу навантаження, а потім, якщо результат симетрування не влаштовує, застосовують симплекс-метод.

Також, коли постає задача не лише обмеження потужності, а навіть коли змінюється графік навантаження підприємства через зміну кількості робочого обладнання в залежності від технологічного процесу, стає можливим оперативне керування режимом навіть декілька разів за добу з метою не лише вирівнювання графіку навантажень, а й для отримання мінімального значення струмів зворотної та нульової послідовності.



## РОЗДІЛ 4

### МЕТОДИ ЕКОНОМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 4.1 Оцінка економічного ефекту

Поняття «економічний ефект» – це загальне поняття, до якого вкладається багато значень та смислів: від чистого прибутку до національного доходу, від доходу окремого підприємства до доходу держави.

Показники прибутку можуть бути різними, що обумовлено необхідністю відрахування з валового прибутку різних податків і зборів; розрахунком прибутку за різні проміжки часу (за місяць, рік, або за весь період виробництва продукції, до якої вкладались інвестиції).

Зазвичай, для розрахунку показників прибутку застосовують декілька загальних формул:

$$P = C - C; \quad (4.1)$$

$$P = (C - C) \cdot A; \quad (4.2)$$

$$P = C - H - C \quad (4.3)$$

де  $P$  – прибуток;

$C$  – ціна;

$C$  – собівартість одиниці продукції;

$A$  – обсяг виробництва за весь термін використання продукції;

$H$  – податки та обов'язкові платежі із розрахунку, відповідно, на одиницю продукції і весь її обсяг за весь термін використання.

В нашому випадку на першому місці стоїть виконання норм, поставлених енергопостачальною організацією; але важливим є можливість отримати прибуток завдяки збереженню (економії) електричної енергії, та зменшенню збитків, що виникають через погіршення якості електроенергії. Згідно з дослідженням, проведеним EPRI (Electric Power Research Institute (США)), для американської економіки збитки, пов'язані з порушенням надійності та якості

електропостачання, становлять 104-164 млрд. дол. на рік, тому що економічні показники роботи електрообладнання, кількість і характеристика продукції істотно залежать від якості електроенергії в системах електропостачання.

Як відомо, економічний збиток, зумовлений зниженням якості напруги, має дві складові: електромагнітну та технологічну. Електромагнітна складова в основному обумовлена зміною втрат активної потужності та в результаті, зміною терміну служби ізоляції електроустаткування. Технологічна складова шкоди характеризується впливом якості напруги на продуктивність технологічних установок і відповідно, собівартістю продукції, що випускається.

Наприклад, щорічні збитки (грн/рік) від втрат потужності, що обумовлені протіканням струму зворотної послідовності в електрообладнанні:

$$Y_{\Delta P} = \beta \cdot T^{(S)} \cdot \Delta P_2^{(S)} \cdot 10^3 + \Delta N_p^{(S)} \cdot N_p^{(S)} \cdot K^{(S)} \quad (4.4)$$

де  $\beta$  – вартість 1 кВт·год втрат електроенергії, грн./кВт·год;

$T^{(S)}$  – тривалість роботи електрообладнання в рік, тис. год;

$\Delta P_2^{(S)}$  – втрати потужності від протікання струму зворотної послідовності;

$K^{(S)}$  – капітальні витрати на електрообладнання;

$N_p^{(S)}$  – коефіцієнт відрахувань на реновацію від капітальних витрат.

4.2 Техніко-економічні розрахунки з порівняння різних варіантів вирішення задачі. Розрахунок терміну окупності капітальних вкладень

Будь-яка прикладна наукова розробка має своєю кінцевою метою вирішення деякої технічної задачі з наступним впровадженням результатів досліджень.

Але виконання наукової роботи потребує поточних витрат –  $\Pi$ , пов'язаних з оплатою праці наукових працівників, придбанням експериментального обладнання, відряджень і т.д.; якщо результати передбачають установку деякого пристрою або розробку прикладного програмного забезпечення, то необхідні ще капітальні вкладення –  $K$ .

Щоб оцінити термін окупності грошових витрат, необхідно:

- скласти кошторис поточних витрат капітальних вкладень;

- порахувати річний економічний ефект, який буде мати місце у разі впровадження виконаної розробки –  $E$ .

Термін окупності грошових витрат на дослідження, на виготовлення пристроїв, організації праці даного методу, на розробку програмного забезпечення розраховується:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K + \Pi}{E} . \quad (4.5)$$

Для робіт, пов'язаних із впровадженням інформаційних технологій, термін окупності може бути розраховано:

$$T_{\text{ок}} = \frac{B}{E} . \quad (4.6)$$

де  $B$  – вартість програмного забезпечення.

Для задачі обмеження потужності групи несиметричних електроприймачів, яка вирішувалася в магістерській роботі, економічний ефект полягає у зменшенні збитків, пов'язаних з несиметрією режиму.

Для розрахунку прибутку, що можливо отримати від зменшення несиметрії в мережі, потрібно порівняти два варіанти: в першому подати прибуток від роботи мережі з врахуванням втрат енергії без застосування розрахованого методу, коли оператор приймає рішення по відключенню електроприймачів без розрахунків; в другому подати прибуток від застосування мережі з врахуванням втрат енергії із застосуванням поданого методу. Розрахунок втрат виконується за формулою:

$$\Delta E = 3 \cdot I_2^2 \cdot Z_2 \cdot t , \quad (4.7)$$

де  $I_2^2$  – струм зворотної послідовності;

$Z_2$  – опір зворотної послідовності;

$t$  – час.

Сумарний збиток, пов'язаний з несиметрією режиму, складається з ряду складових, кожна з яких знаходиться в квадратичній або лінійній і квадратичній залежності від коефіцієнту несиметрії напруг.

$$Y_{\Sigma} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 \quad (5.8)$$

де  $Y_1$  – збиток від додаткових втрат електроенергії,  $Y_1 = \sum_{i=1}^c y_{1i}(\alpha_{ui}^2)$ ;

$Y_2$  – збитки, пов'язані з відносним збільшенням відрахувань на реновацію,  
 $Y_2 = \sum_{i=1}^c y_{2i}(\alpha_{ui}^2)$ ;

$Y_3$  – технічний збиток: якщо  $Y_3$  викликаний, наприклад, зменшенням корисного моменту асинхронних двигунів, то  $Y_3 = \sum_{i=1}^c y_{3i}(\alpha_{ui}^2)$ , але в ряді випадків, не формалізовано  $Y_3 = (\alpha_u^2)$ .

$Y_4$  – збиток, обумовлений зниженням світлового потоку ламп, встановлених у фазах з пониженою напругою, і скороченням терміну служби ламп, встановлених у фазах з підвищеною напругою,  $Y_4 = \sum_{i=1}^c y_{4i}(\alpha_{ui}^2, \alpha_{ui})$ ;

$Y_5$  – збиток, обумовлений недовиробітком реактивної потужності батареями конденсаторів і синхронними електродвигунами,  $Y_5 = \sum_{i=1}^c y_{5i}(\alpha_{ui}^2, \alpha_{ui})$ ;

$\alpha_{ui}$  – коефіцієнт несиметрії напруг в вузлі підключення відповідного електрообладнання,  $\alpha_{ui}(X)$ ;

$X$  – вектор керованих змінних.

Як вже відмічалось, коефіцієнт несиметрії напруги, модулі напруги  $U_2$  і струму  $I_2$  зворотної послідовності зв'язані лінійними співвідношеннями

$$\alpha_2 = \frac{U_2}{U_H} = \frac{I_2 \cdot Z_2}{U_H}, \text{ де } Z_2 \text{ – опір для струмів зворотної послідовності.}$$

Для оцінки середнього значення зменшення збитків, необхідно провести порівняння збитків в мережі від несиметричного навантаження у випадку коли оператор приймає рішення без розрахунків даним методом та збитків у випадку коли оператор користується методом розрахунку і приймає рішення згідно розрахунку. Дослідження збитків можна проводити за день, за місяць або за рік. Для максимально точного результату рекомендується дослідження проводити не

менше місяця. Отримавши результати обох випадків знаходять середнє значення за день, а потім за місяць. Порівнявши результати можна оцінити рівень зменшення збитків з застосуванням методу обмеження потужності однофазних електроприймачів.

#### 4.3 Впровадження інформаційної моделі для контролю ПЯЕ та технологічний аудит проекту

Потрібно зазначити, що несиметрія режиму дуже впливає на різноманітне нелінійне обладнання, наприклад, перетворювачі струму (інвертори), через що виникає додатковий вплив на якість електроенергії в мережі. Висока частота перемикання інверторів сама по собі може створювати додаткові гармоніки в системах та зменшувати ефективність системи у зв'язку з порушенням стійкості джерела та збоями в роботі інверторів. Через додаткові коливання, що пов'язані із несиметрією, ще більше порушується стійкість роботи, а відповідно й надійність енергосистеми.

Проаналізувавши дослідження, які проводилися в Україні та в інших європейських країнах, можна зробити висновок, що вплив неякісної електроенергії на електричне обладнання є досить суттєвим; наприклад, дослідження проблеми впливу джерел нетрадиційної генерації на ПЯЕ дозволили отримати шляхи зменшення втрат електроенергії, збільшити термін роботи електричного обладнання, зменшити швидкість старіння ізоляції ліній електропередач та обмежити нагрівання трансформаторів через несиметрію. Велике значення на ПЯЕ в системі має місце підключення та потужність джерела: можна виділити три варіанти впливу «розподільної генерації» (РГ) на енергосистему, що може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності в електричних мережах, впливати на величину зміни напруги, коливання напруги, величину флікера, надійність роботи та термін експлуатації електричної мережі.

Отже, показники якості електричної енергії в точці приєднання повинні відповідати міждержавному стандарту. Зазвичай робоча напруга має знаходитися

в діапазоні 0,34-0,42 кВ (низька напруга), 9-11 кВ (середня напруга), а частота від 49,6 (гранично допустиме зниження частоти) до 50,2 Гц (нормально допустиме підвищення частоти), стрибкоподібні зміни фаз до 20° в точці приєднання, падіння напруги в точці приєднання до рівня 20% від номінальної напруги як мінімум протягом 0,5 с без відключення.

Ідея проекту полягає в розповсюдженні застосування інформаційної моделі виявлення та ідентифікації спотворень якості електричної (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Зміст ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження інформаційної моделі виявлення та ідентифікації спотворень якості електричної енергії.	В науковій, дослідницькій, пізнавальній діяльності для підвищення ПЯЕ	Отримання інформації для порівняльного аналізу та швидкодії в усуненні проблем ПЯЕ
	- оперування даними щодо показників якості генерації електричної енергії відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ)	Можливість швидко зорієнтуватися в якісних показниках електричної енергії від ВДЕ.
	- визначення проблем та проведення заходів щодо підвищення ПЯЕ	Можливість визначити різновид та значення спотворення, виявленого моделлю.
	- дослідження факторів, які впливають на ПЯЕ	Можливість своєчасного виявлення погіршення якості та проведення заходів для покращення даних параметрів

В таблиці 4.2 наведено аналіз сильних та слабких характеристик проекту.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних та слабких характеристик проекту

Техніко-економічні характеристики	Потенційні концепції	Слабка сторона	Нейтральна	Сильна сторона
Собівартість реалізації	Низька			+
Пошук потенційних клієнтів	Залежить від виробника/покупця		+	
Отримання інформації про об'єкт	Від держави/від покупця	+	+	
Формат нагляду стосовно місця положення	Віддалений			+
Достовірність інформації	Повна, із врахуванням точності даних			+
Можливості	Виявлення спотворень, ідентифікація, обробка, збереження даних			+

Отже, серед переваг проекту є: простота у користуванні; достовірність та повнота даних; можливість доповнення та удосконалення.

#### 4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В таблиці 4.3 проведено аналіз попиту потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 4.3 – Попередня характеристика потенційного ринку проекту

Показники стану ринку	Характеристика
Кількість головних гравців, од	1
Динаміка ринку	Зростає
Наявність обмежень на ринку	Відсутні
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Не потребує стандартизації та сертифікації

Аналізуючи ринок, до якого входить даний проект, можна сказати, що кількість конкуруючих проектів дуже мала, проте попит на дану продукцію зростає, що обумовлено збільшенням популярності технологій ВДЕ, а в зв'язку з цим і підвищення контролю за ПЯЕ від цих виробників.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту наведена в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Інформаційна модель виявлення та ідентифікації спотворень якості електричної енергії	Наукова та дослідницька діяльність. Контроль та нагляд за функціонуванням.	При використанні в науковій чи дослідницькій діяльності потребується достовірність та повнота інформації	Повнота інформації
			Достовірність даних
		При застосуванні в контролі та нагляді першочергово необхідна автоматизація, швидкодія, точність систематизація	Швидкодія та точність збору інформації
			Автоматизація збору та систематизація інформації.

Проведений аналіз ринкового середовища (факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають) показано в таблицях 4.5-4.6.

Таблиця 4.5 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива дія
Конкуренція	Можливі зобов'язання держави по впровадженню інших систем нагляду за ПЯЕ	Зниження попиту на проект
Складне економічне становище в країні	Зниження зацікавленості до технологій нагляду за ПЯЕ із-за їх дорожечі	

Таблиця 4.6 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива дія
Затвердження	Затвердження даної моделі та часте її впровадження і використання	Зростання зацікавленості до даного проекту
Зростання інвестицій на технології нагляду за ПЯЕ	Нагальна потреба в нагляді та аналізі ПЯЕ	

Отже, з аналізу факторів можливостей та загроз робимо висновок, що реально погрожуючими факторами може стати зміна законодавчої бази та складне економічне становище у країні. Щодо можливостей – функціональність, точність та швидкодія даної моделі в комплекті з нагальною необхідністю в постійному нагляді за ПЯЕ в Україні може дати поштовх до великого попиту на цю продукцію. В таблиці 4.7 представлено SWOT- аналіз впровадження проекту.

Таблиця 4.7 – SWOT- аналіз впровадження проекту

S (strengths – сильні сторони)	W (weaknesses – слабкі сторони)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- проект не має рівносильних аналогів;</li> <li>- можливість дистанційного, віддаленого нагляду;</li> <li>- якість продукту (швидкодія та висока точність даних);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- реклама продукту;</li> <li>- взаємовідносини з органами влади;</li> </ul>
O (opportunities – можливості)	T (threats – загрози)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- зростання попиту на технології нагляду за ПЯЕ;</li> <li>- підтримка влади;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зниження доходів потенційних споживачів</li> <li>- зміна законодавчої бази</li> <li>- нові технології</li> </ul>

#### 4.5 Розробка ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів представлено в таблиці 4.8.



Таблиця 4.8 – Фактори загроз

Цільові групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтований попит в межах цільової групи	Рівень конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
Науковці	Повна готовність	Високий	Слабкий	Просто
Інвестори	Повна готовність	Високий	Слабкий	Просто
Журналісти	Часткова готовність	Високий	Помірний	Складно
Держенергопостачання	Повна готовність	Високий	Слабкий	Просто
Які цільові групи обрано: науковці, інвестори, Держенергопостачання				

Виходячи з даного аналізу, було прийнято рішення обрання стратегії розвитку: заняття конкурентної ніші. При прийнятті стратегії зайняття конкурентної ніші (стратегія фахівця) компанія в якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів. Ця конкурентна стратегія являється похідною від такої базової стратегії компанії, як концентрація. Ніша, для того, щоб вона була привабливою для компанії, повинна задовольняти таким умовам:

- бути досить прибутковою, щоб робити доцільним процес виробництва і обслуговування;
- залишатися стабільною упродовж тривалого проміжку часу;
- має бути добре захищеною, мати високі вхідні бар'єри;
- бути непривабливою для конкурентів;
- відповідати цілям і ресурсам компанії, її специфічним можливостям.

Головне завдання для компаній, що вибирають стратегію фахівця – це постійна турбота про підтримку і розвиток своєї конкурентної переваги, формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.

#### 4.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Другим кроком розроблення ринкової стратегії передбачено розробку концепції маркетингової комунікації, що показана в таблиці 4.9

Таблиця 4.9 – Концепція маркетингової комунікації

Цільові групи	Комунікації, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Науковці	Системи збору та передачі даних	Надійність, швидкодія, точність, достовірність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів в покупці права на користування продуктом	Зручність в експлуатації, надійність, швидкодія, точність, достовірність
Інвестори	Системи збору та передачі даних	Надійність, швидкодія, точність, достовірність, повнота інформації		
Держенергопостачання	Системи збору та передачі даних	Надійність, достовірність, швидкодія, точність, повнота інформації		

#### Висновки по розділу 4

Як вже відмічалось, впровадження розрахованих математичних моделей у вигляді програмного продукту дозволить значно зменшити кількість збитків від несиметричного навантаження мережі; практично доказано, що коли оператор приймає рішення без розрахунків даним методом, збитки можуть бути значними. Дослідження цих збитків, для отримання максимально точного результату, слід проводити на термін не менше місяця. Отримавши результати досліджень та порівнявши їх, можна оцінити рівень зменшення збитків із застосуванням методу обмеження потужності групи однофазних електроприймачів та без цього методу.

З точки зору ринкових можливостей можливо побачити:

1. даний продукт практично не має рівносильних аналогів на ринку, проте попит на ці роботи наявний як серед науковців і дослідників, так і у держенергопостачання та інвесторів. Враховуючи малі затрати на реалізацію даного проекту, даний проект є рентабельним.

2. Бар'єром до впровадження даного проекту є складність в рекламуванні, але подальший розвиток дозволить бути конкурентоздатним проектом на ринку.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У цьому розділі випускної магістерської дипломної роботи запропоновані заходи та засоби з охорони праці під час оптимізації режимів електромережі підприємства у разі обмеження його потужності енергосистемою. В процесі виконання досліджень на інженерний проектний персонал впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення – природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря.

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

#### 5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації обладнання

##### 5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Конструкція робочого місця інженера-проектувальника повинна відповідати сучасним вимогам ергономіки та Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я № 528 від 27 грудня 2001 року; характеру виконуваної роботи та

забезпечити оптимальне розміщення на робочій поверхні документів, рухомого пюпітра (тримача документів) та обладнання ПК (монітора, системного блоку, клавіатури, пристрою «миша», принтера та інших периферійних пристроїв з урахуванням їх кількості та конструктивних особливостей). Площа одного робочого місця інженера, обладнаного ПК, повинна складати не менше  $6 \text{ м}^2$ , а об'єм – не менше  $20 \text{ м}^3$ .

Живлення силового обладнання проектної організації та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі  $380 \times 220\text{В}$  (фазна напруга (фаза - "0") –  $220\text{В}$ , а міжфазна лінійна напруга (фаза - фаза) –  $380\text{В}$ ). Категорія умов по небезпеці електротравматизму – без підвищеної небезпеки.

Розташування монітора ПК має забезпечувати: безпечність роботи в цілому; зручність та ефективність зорової роботи з екраном в вертикальній площині під кутом  $\pm 30^\circ$  від лінії зору, площина екрана має бути перпендикулярною нормальній лінії зору користувача.

Нульовий захисний провід прокладається від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового захисного провідників. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі повинна бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники повинні відповідати номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту, вимогам ПВЕ. У приміщені, де одночасно експлуатується або обслуговується більше п'яти персональних комп'ютерів, на помітному та доступному місці встановлюється аварійний резервний вимикач, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, крім освітлення.

Комп'ютери та устаткування для їх обслуговування, ремонту та налагодження повинні підключатися до електромережі тільки з допомогою

справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників повинні мати спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Конструкція їх має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Необхідно унеможливити з'єднання контактів фазових провідників з контактами нульового захисного провідника.

Неприпустимим є підключення комп'ютерів та їх устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі – з використанням перехідних пристроїв. Індивідуальні та групові штепсельні з'єднання та електророзетки необхідно монтувати на негорючих або важкогорючих пластинах з урахуванням вимог ПВЕ та Правил пожежної безпеки в Україні.

Електромережу штепсельних розеток для живлення комп'ютерів та їх устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження при розташуванні їх уздовж стін приміщення прокладають по підлозі поряд зі стінами приміщення, як правило, в металевих трубах і гнучких металевих рукавах з відводами відповідно до затвердженого плану розміщення обладнання та технічних характеристик обладнання.

При розташуванні в приміщенні за його периметром до 5 комп'ютерів, при використанні трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з негорючого або важкогорючого матеріалу дозволяється прокладання їх без металевих труб та гнучких металевих рукавів.

Під час монтажу та експлуатації необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію. Під час ремонту ліній електромережі шляхом зварювання, паяння та з використанням відкритого вогню

необхідно дотримуватися Правил пожежної безпеки в Україні. Лінія електромережі для живлення комп'ютерів, їх периферійних пристроїв та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження виконується як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів. Використання нульового робочого провідника як нульового захисного провідника забороняється.

Є неприпустимими: експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками; застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам до переносних електропроводок; застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання; користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання; підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами); використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

Металеві труби та гнучкі металеві рукави повинні бути заземлені. Заземлення повинно відповідати вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів". Для підключення переносної електроапаратури застосовують гнучкі проводи в надійній ізоляції. Тимчасова електропроводка від переносних приладів до джерел живлення виконується найкоротшим шляхом без заплутування проводів у конструкціях

машин, приладів та меблях. Доточувати проводи можна тільки шляхом паяння з наступним старанним ізолюванням місць з'єднання.

### 5.1.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі. Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

### 3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги;

діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками. Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

## 5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

### 5.2.1 Мікроклімат приміщення

Мікроклімат приміщення – це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні. При цьому потрібно розрізняти оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови.

Допустимі мікрокліматичні умови – поєднання кількісних показників мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливові на людину можуть викликати скороминучі зміни, що швидко нормалізують тепловий стан організму, і які супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції, не виходячи за межі фізіологічних пристосувальних можливостей. При цьому виникає пошкодження або порушення стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності. Допустимі величини показників мікроклімату встановлюють тоді, коли за технологічними умовами, технічними і економічними причинами не забезпечуються оптимальні норми.

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» (постанова МОЗ № 42 від 01.12.1999), нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт).



Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні для виконання проектних робіт наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормування параметрів мікроклімату для постійних робочих місць

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху повітря
Теплий	Ia	22-28	55 при 28°С	0,1-0,2
Холодний	Ia	21-25	75 при 25°С	Не більше 0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату, відповідно до ДБН В.2.5-67:2013. «Опалення, вентиляція та кондиціонування» (чинний від 01.01.2014), на робочому місці інженера передбачається: в холодну пору року використання калорифера; в літню пору застосування вентиляторів обдуву; провітрювання приміщення.

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м, відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях, можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази; їх ГДК наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони оператора лінії

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено: провітрювання приміщення; цілісність вікон для перешкодження попадання пилу в приміщення під час роботи; встановлення пиловловлюючих засобів.

### 5.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» (чинний від 2019-03-01), розряд

зорової роботи IV, підрозряд «в» (таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	середній
Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне $E_{н пр}$	Сумісне $E_{сум}$
середній	всього	у т. ч. від загального	4	2,4
	400	200		

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею – 4,5 метра.

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу кольорів).

Світильники із світлодіодними лампами розміщують рядами, що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості. При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

#### 5.2.4 Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ССБТ «Шум. Загальні вимоги безпеки». Основні параметри вказані в таблиці 5.4.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – ССБТ «Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні потрібно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі екрани; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати малошумні вентилятори.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Творча діяльність, конструювання і проектування, програмування	86	71	61	54	49	45	42	40	38

#### 5.2.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають механічні коливання пружних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сідниці).

Допустимі рівні загальної вібрації на постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	<u>1,3</u> 108	<u>0,45</u> 99	<u>0,22</u> 93	<u>0,2</u> 92	<u>0,2</u> 92	<u>0,2</u> 92	-	-	-	-

В чисельнику дано середньоквадратичне значення вібрації, м/с  $10^{-2}$ , в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонансу; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів устаткування і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

#### 5.2.6 Фактори трудового процесу

Фактори трудового процесу визначаються відповідно до Гігієнічної класифікації праці – ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» (наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014).

Робота електротехнічного персоналу потребує значних фізичних зусиль за важкістю та напруженістю праці.

1. Клас умов праці за показниками важкості праці – допустимий (середньої важкості): загальні енергозатрати організму (кВт) – до 290; зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної роботи за зміну, кг/(Вт): при регіональному навантаженні (для чоловіків) – 13000; при загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – до 44000; маса вантажу, що постійно підіймається та переміщується вручну, кг – до 30 кг; стереотипні робочі рухи: при локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук) – до 40000; при регіональному навантаженні (участь рук та плечового суглоба) – до 20000; статичне навантаження (кг/с): двома руками (чоловіки) – до 70000; за

участю м'язів тулуба та ніг – до 100 000; робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни; перебування у вимушеній позі до 10%, в позі «стоячи» – до 60% часу зміни; нахил тулуба: вимушені нахили протягом зміни – 51-100 разів; переміщення у просторі (переходи через виконання технологічного процесу) – по горизонталі більше 8, вертикалі – 4 км.

## 2. Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження: зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання; характер виконуваної роботи – робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності

Сенсорні навантаження: зосередження (% за зміну) – більше 75; щільність сигналів (звукові за 1 год.) – більше 300; навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25.

Емоційне навантаження: ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; ступінь ризику для власного життя – вірогідний; ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці: тривалість робочого дня – 8 год.; змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

### 5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи системи електропостачання підприємства в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Щорічно в країні виникає багато надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, що призводить як до загибелі людей, так і до значних матеріальних збитків. Масштаби, характер руйнувань, кількість постраждалих

залежать від типу, масштабу і місця аварії, катастрофи чи стихійного лиха, від швидкості розвитку надзвичайної ситуації.

Забезпечення безпеки роботи звичайної системи електропостачання промислового підприємства під час НС базується на комплексі організаційних, інженерно-технічних заходів і засобів, спрямованих на збереження її працездатності в умовах дії загрозливих чинників. Для цього необхідно: вміти прогнозувати та оцінювати можливі наслідки; заздалегідь спланувати заходи із запобігання та зменшення вірогідності виникнення НС і скорочення масштабів прояву результатів НС; організувати роботу в умовах НС та ліквідацію можливих наслідків.

В будь-якій системі електропостачання використовуються елементи, до складу яких входять такі матеріали: метали, неорганічні матеріали (в основному діелектрики), різноманітні органічні сполуки (діелектрики, смоли і т.д.), електронні напівпровідникові компоненти, діоди, резистори, конденсатори та ін. Вплив іонізуючих випромінювань ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) на матеріали і деталі обладнання залежить від виду випромінювання, дози та умов навколишнього середовища. Найбільш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань є метали, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Іонізуючі випромінювання викликають зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можуть відбуватися порушення роботи електричних елементів схеми, що призводять до виходу з ладу апаратури. Проходячи через елементи електронної апаратури, потік гамма-випромінювань створює в них вільні носії електричних зарядів, в наслідок переміщення яких виникає помилковий імпульс, що призводить до хибного спрацьовування пристрою; в результаті опромінення у конденсаторах знижуються напруги пробою та опір стікання, змінюється провідність і внутрішній нагрів; в газорозрядних приладах зменшується напруга запалення. Взагалі наслідком такого опромінення буде підвищення провідності матеріалів, збільшення протікання струму у провідниках і зменшення опору або руйнація ізоляції.

Для інженерної практики найбільший інтерес представляє оцінка безпеки системи електропостачання при впливі на її компоненти іонізуючих випромінювань протягом певного часу.

Ще одним з чинників НС є електромагнітний імпульс (ЕМІ). Найбільш піддаються його впливу системи електроспоживання, зв'язку, сигналізації і керування. ЕМІ може поширюватись на десятки в навколишньому середовищі і по різних комунікаціях, здійснюючи вплив на об'єкти там, де інші чинники втрачають своє значення як вражаючі фактори. ЕМІ ушкоджують напівпровідникові прилади, резистори, конденсатори, викликає в лініях зв'язку та електропостачання імпульсні напруги, що може призвести до пробоя ізоляції елементів апаратури і пристроїв, підключених до повітряних і підземних ліній. Тому слід пам'ятати, що апаратура може втратити працездатність, навіть знаходячись у надійних захисних спорудженнях: ступінь пошкоджень залежить від наведеного імпульсу напруги чи струму і електричної міцності обладнання.

Отже, саме тому необхідно вміти оцінювати безпеку роботи електромережі в умовах дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу.

5.3.1 Дослідження безпеки роботи системи електропостачання в умовах дії іонізуючих випромінювань.

Визначимо гранично допустимі значення експозиційної дози випромінювань, при яких в типових елементах електромережі можуть виникнути вже незворотні зміни (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6 – Граничні значення експозиційних доз для звичайних елементів електромережі

№	Елементи електромережі		$D_{гр}, P$	$D_{гр}, P$
1	Трансформатори	ТДЦ-125000/110	$10^6$	$10^5$
		ТДЦ-125000/220	$10^6$	
		АТДЦТН-125000/220/110	$10^6$	
2	Розрядники	ОПН-1Ю-У1	$10^5$	
		ОПН-220-У1	$10^5$	
3	Струмопроводи	ГРТЕ-10-8550-250	$10^9$	

По мінімальному значенню експозиційної дози радіації  $D_{гр.мин}$  визначаємо межу стійкості системи електропостачання в цілому:  $D_{гр} = 10^5$  Р.

Визначаємо граничне значення рівня радіації, до якого можлива робота виробничого персоналу у звичайному режимі за час  $t_{max}$ :

$$P_{гр} = \frac{D_{гр} \cdot K_{пос}}{2 \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_{п}})} \text{ [Р/ГОД]} , \quad (5.1)$$

де  $K_{пос}$  – коефіцієнт послаблення ( $K_{пос} = 1$ );

$t_{п}$  – час початку опромінення ( $t_{п} = 1$  год);

$t_k = t_{р.макс} + t_{п}$ ;

$t_{р.макс}$  – максимальна тривалість роботи ( $t_{р.макс} = 87600$  год. (10 років)).

Отже,  $t_k = 87600 + 1 = 87601$  год.

$$P_{гр} = \frac{10^5 \cdot 1}{2 \cdot (\sqrt{87601} - \sqrt{1})} = 169,5 \text{ (Р/год)} .$$

Визначимо допустимий час роботи блоків електромережі в заданих умовах:

$$t_{доп} = \left( \frac{D_{гр} \cdot K_{посл} + 2 \cdot P_{гр} \sqrt{1}}{2 \cdot P_{гр}} \right)^2 \text{ [ГОД]} , \quad (5.2)$$

$$t_{доп} = \left( \frac{10^5 \cdot 1 + 2 \cdot 169,5}{2 \cdot 169,5} \right)^2 = 87582 \text{ [ГОД]} .$$

Таким чином, система електропостачання буде безпечно працювати майже 10 років, якщо граничне значення рівня радіації не перевищуватиме значення 169,5 Р/год.

### 5.3.2 Дослідження безпеки роботи електромережі в умовах дії електромагнітного імпульсу

Для оцінки впливу ЕМІ на струмопровідні елементи необхідно врахувати те, що ЕМІ мають горизонтальну та вертикальну складові напруженості електричного поля  $E_{в(г)}$ , кВ/м; тож визначають значення наведеної напруги  $U$  на



вертикальних та горизонтальних ділянках лінії. Для оцінки безпеки роботи системи електропостачання в умовах дії ЕМІ необхідно визначити значення наведеної напруги при напруженості електромагнітного поля  $E = 10$  кВ/м.

На об'єкті електрична мережа розподіляється на різні блоки, наприклад:

- трансформатори;
- струмопроводи.

Тому на кожній ділянці потрібно визначити максимальну довжину вертикальної та горизонтальної струмопровідної частини. Беремо максимальні значення розмірів:  $L_{B1} = 3$ м,  $L_{Г1} = 4$ м для напруги  $U_{ж} = 380$  В;  $L_{B2} = 0,5$ м;  $L_{Г2} = 10$ м для напруги  $U_{ж} = 220$  В.

Напруга, що буде наводитись в струмопровідній частині:

$$U_{B(\Gamma)} = E \cdot L_{B(\Gamma)} \text{ [В]}, \quad (5.3)$$

де  $U_{B(\Gamma)}$  – напруга, наведена у вертикальних (горизонтальних) частинах, В;

$E_{B(\Gamma)}$  – напруженість ЕМІ, кВ/м.

$$U_{B1} = 10 \cdot L_{B1} = 10 \cdot 3 = 30 \text{ (В)}; \quad U_{Г1} = 10 \cdot L_{Г1} = 10 \cdot 4 = 40 \text{ (В)};$$

$$U_{B2} = 10 \cdot L_{B2} = 10 \cdot 0,5 = 5 \text{ (В)}; \quad U_{Г2} = 10 \cdot L_{Г2} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ (В)}.$$

Визначимо критерій стійкості через коефіцієнт безпеки  $K_B$ :

$$K_B = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{доп}}}{U_{B(\Gamma)}} \geq 40 \text{ [Дб]}. \quad (5.4)$$

де  $U_{\text{доп}}$  – допустима напруга живлення, В;

Допустиме колювання напруги живлення

$$U_{\text{доп}} = U_{ж} + \frac{U_{ж} \cdot n}{100} \text{ [В]}, \quad (5.5)$$

де  $U_{ж}$  – напруга живлення, В;

$n$  – відхилення напруги від номінального значення, %.

Але зазвичай, для системи електропостачання існують норми:

При  $U_{ж} = 380$  (В),  $U_{\text{доп}} = 440$  (В); при  $U_{ж} = 220$  (В),  $U_{\text{доп}} = 242$  (В).

$$\text{Для напруги 380 В: } K_{\text{БВ1}} = 20 \cdot \lg \frac{440}{30} = 20 \cdot (1,17) = 23,4 \text{ (Дб)};$$

$$\text{Для напруги 380 В: } K_{\text{БГ1}} = 20 \cdot \lg \frac{440}{40} = 20 \cdot (1,04) = 20,8 \text{ (Дб)}.$$

$$\text{Для напруги 220 В: } K_{\text{БВ2}} = 20 \cdot \lg \frac{242}{5} = 20 \cdot (1,68) = 33,6 \text{ (Дб)};$$

$$\text{Для напруги 220 В: } K_{\text{БГ2}} = 20 \cdot \lg \frac{242}{100} = 20 \cdot (0,38) = 7,6 \text{ (Дб)}.$$

Нормою критерію стійкості для обох мереж встановлено  $K_{\text{Б}} \geq 40$  ДБ: отже, мережа живлення не зможе працювати стійко; для неї потрібен додатковий захист.

5.3.3° Розробка заходів з безпеки роботи елементів системи електропостачання в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Головними заходами щодо радіаційної безпеки є: застосування радіаційно-стійких елементів і матеріалів, спеціальних масивних екранів або активного захисту від впливу потоків заряджених частинок. Проти імпульсного впливу іонізуючих випромінювань, окрім перерахованих способів, застосовують схеми, що мало критичні до змін електричних параметрів; застосовують пристрої, які містять радіотехнічні схеми із збільшенням відстані між елементами, які знаходяться під навантаженням та інші.

Відповідно до розрахунків, в умовах дії іонізуючих випромінювань до рівня радіації 169,5 Р/год, система електропостачання буде безпечно працювати майже увесь допустимий час роботи обладнання – протягом 87582 год.

Оцінка безпеки роботи системи електропостачання в умовах дії ЕМІ показала, що обладнання мережі 380 В та мережі 220 В потребує додаткового захисту у вигляді екранування.

Щоб визначити необхідну товщину екрану, знайдемо відповідне перехідне затухання для цього екрану:

$$A_{\text{екр}} = K_{\text{Бном}} - K_{\text{Бмін}}, \quad (5.6)$$

де  $K_{\text{Бном}}$  – номінальний коефіцієнт безпеки ( $K_{\text{Бном}} = 40$ дБ);

$K_{\text{Бмін}}$  – мінімальний коефіцієнт безпеки, отриманий при розрахунках.

Для кола  $U_{\text{ж}} = 380\text{В}$  –  $A_{380} = 40 - 20,8 = 19,2$  (дБ).

Для кола  $U_{\text{ж}} = 220\text{В}$  –  $A_{220} = 40 - 7,6 = 32,4$  (дБ).

Товщину захисного екрану знайдемо за формулою

$$t = \frac{A_{\text{екр}}}{k \cdot \sqrt{f}} \text{ [см]}. \quad (5.7)$$

де  $k = 5,2$  (для сталі);

$f = 15000$  (Гц) – найбільш характерна частота.

$$\text{Для напруги } 380 \text{ В} - t = \frac{19,2}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,03 \text{ (см)}.$$

$$\text{Для напруги } 220 \text{ В} - t = \frac{32,4}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,05 \text{ (см)}.$$

Для підвищення стійкості обладнання до ЕМІ, необхідно встановити захисний екран із сталі з товщиною стінок не менш, ніж 0,05 (см). Застосовуючи заходи по підвищенню стійкості, ми забезпечуємо працездатність релейного захисту і автоматики, а також струмопровідні лінії та трансформатори в умовах дії електромагнітного імпульсу.

У кожному конкретному випадку повинні бути знайдені свої, економічно доцільні засоби захисту. Серед них виділимо вже знайомі:

- укриття обладнання металевим екраном;
- перехід від електричних мереж зв'язку до волоконно-оптичних;
- використання металоокисних варисторів, перехідних роз'ємів з фільтрами і вбудованими зенеровськими діодами, захисні пристрої;
- захист кабелів тощо.

З'єднувальні кабелі для захисту прокладають в земляних траншеях під цементною чи бетонною підлогою будинків, або укладають в сталеві коробки, які заземляють. Можна розміщувати кабелі і на поверхні, закривши їх

заземлюючими швелерами. Надійність додатково підвищується, якщо кабель розгалужується і підводиться до кількох шаф з роздільними трансформаторами.

Ізольовані ділянки мережі матимуть великий опір ізоляції і малу ємність проводів щодо землі. Також доцільно застосовувати фільтри від високочастотних перешкод. Ще для захисту апаратури можуть бути рекомендовані плавкі запобіжники і захисні вхідні пристосування, які являють собою різні релейні чи електронні пристрої, що реагують на перевищення струму у колі пристрої захисту від імпульсної перенапруги (ПЗП, або розрядник). Вони забезпечують «стікання на землю» великого розряду без ушкодження ізоляційних елементів ліній, тобто їх основна функція – розімкнути лінію та відвести надлишкову енергію задля унеможливлення ушкодження в устаткуванні, що захищається. Встановлюються на входи і виходи апаратури.

#### Висновки по розділу 5

В даному розділі було розглянуто технічні рішення з охорони праці, з гігієни праці та виробничої санітарії для науково-технічного та інженерного персоналу у приміщеннях науково-дослідницьких центрів, інститутів, або адміністративних офісних будинках. Розглянуто питання, що стосуються шкідливих та небезпечних виробничих чинників, оцінено мікроклімат приміщень за такими показниками, як виробниче освітлення, виробничий шум, виробнича вібрація. Розглянуто, як забезпечується пожежна безпека приміщень та адміністративних будівель, також основні причини виникнення пожежі на цих робочих місцях. Також розглянуті такі фактори трудового процесу, як важкість праці, фізичне, інтелектуальне та емоціональне навантаження, та ще багато інших технічних та фізичних критеріїв.

Оцінено стан захисту системи електропостачання від впливу дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій – від дії іонізуючого випромінювання та від дії електромагнітного імпульсу.

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розв'язана актуальна наукова задача оптимізації розподільної електромережі підприємства у разі обмеження його потужності енергосистемою шляхом впровадження моделей та методів, які дозволяють розрахувати оптимальний варіант реалізації відключень групи однофазних споживачів. Основні теоретичні та експериментальні дослідження, які виконані в магістерській роботі, можуть бути узагальнені такими висновками:

1. Малодослідженими залишаються явища, пов'язані:

- з формуванням несиметричного режиму в лінії живлення, до якої підключено групу електроприймачів несиметричного виконання;
- з впливом на несиметрію режиму вимкнення або увімкнення окремих однофазних електроприймачів.

2. Вимикання однофазних електроприймачів впливає на несиметрію в груповій лінії живлення.

3. Розроблений метод вирішення задачі обмеження потужності однофазних електроприймачів дозволяє знайти оптимальне рішення їх відключення, що в свою чергу призводить до зниження несиметрії за умови виконання вимоги енергосистеми на обмеження потужності вузла навантаження. Відповідно до розрахунків, даний метод дає найкращий результат та має найвищу ефективність.

Також проведено розробку стартап-проекту, а саме висвітлено маркетингові аспекти створення стартапу, виконано оцінювання можливостей та формування заходів із ринкового впровадження інноваційних пропозицій. Проведення маркетингового аналізу здійснено за наступним кроками: опис ідеї, технологічний аудит ідеї проекту, аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, розроблення маркетингової програми стартап-проекту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бурбело М.Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання / М.Й. Бурбело // – Навчальний посібник / Вінниця: ВНТУ, 2023 – 159с.
2. Босий Д.О. Підвищення якості електроенергії у лініях / Д.О. Босий, Д.Р. Земський // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 12. – С. 76–81.
3. Гавриш О.А. Розроблення стартап-проекту: методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.
4. Жалдак М.І. Основи теорії і методів оптимізації : навчальний посібник / М. І. Жалдак, Ю. В Тріус. – Черкаси : Брама-Україна, 2005. – 608 с.
5. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій / Ю.П. Зайченко // – Київ.: Видавничий дім «Слово», 2006. – 816 с.
6. Лисенко О.І. Дослідження операцій. Конспект лекцій / Уклад.: О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, – К: НТУУ «КПІ», 2016. – 196 с.
7. Маліновський А.А. Основи електроенергетики та електропостачання. / А.А. Маліновський, Б.К. Хохулі // – Львів.: Львівська політехніка, 2007. – 379 с.
8. Милосердов В.О., Терешкевич Л.Б. Алгоритмізація оптимізаційних задач енергетики / В.О. Милосердов, Л.Б. Терешкевич // – Навчальний посібник / Вінниця: ВНТУ, 2004. – 123 с.
9. Терешкевич Л.Б. АСУ режимами систем електропостачання. / Терешкевич Л. Б.// Навчальний посібник / Вінниця:ВДТУ, 1998. – 119 с.
10. Терешкевич Л.Б. Оптимізація режимів електроспоживання / Л.Б. Терешкевич // Навчальний посібник / Вінниця:ВНТУ, 2020. – 113 с.
11. Терешкевич Л.Б. Симетрування електричного режиму шляхом зсуву в часі графіків навантаження електроприймачів однофазного виконання / Л.Б. Терешкевич, О.О. Хоменко // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 34. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т» 2017. – С. 132-139.

12. Терешкевич Л.Б. Внутрішнє симетрування у вузлах приєднання ліній з однофазним навантаженням / Л.Б. Терешкевич, І.О.Бандура, О.С. Владико // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. №6. – С. 71-73.

13. Терешкевич Л.Б. Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання / Л.Б. Терешкевич, М.І. Цибульський // Технічна електродинаміка. – 2006. – №2. – С. 64–67.

14. Терешкевич Л.Б. Симетрування напруги (струмів) з пріоритетним використанням КУ СП для компенсації реактивної потужності в мережах енергопостачальних компаній / Л. Б. Терешкевич, І. О. Бандура // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2011. – Випуск 117. – С. 82-84.

15. Камінський А. В. Математичне та комп'ютерне моделювання процесів оптимізації центрального електричного мереж : монографія / А. В. Камінський, Б. І. Мокін – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. –122 с.

16. Терешкевич Л.Б., Рикова А.К. Прийняття рішень з обмеження потужності групи однофазних електроприймачів із врахуванням впливу на несиметрію режиму. Матеріали ІІІ науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ – 2024). Збірник наукових праць [Електронний ресурс], Вінниця: ВНТУ, 2023-2024. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/schedConf/presentations>

17. Кобилянський О.В. Основи охорони праці Ч. 1 / О.В. Кобилянський // Навчальний посібник / – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 183 с.

18. Кобилянський О.В. Основи охорони праці Ч. 2 / О.В. Кобилянський // Навчальний посібник / – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 171 с.

19. Харченко В.Ф. Електропостачання міст та промислових підприємств / В. Ф. Харченко, О. А. Якунін, В. Г. Воропай ; Конспект лекцій – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 238 с.

20. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго [Чинний від 2021-02-03]. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=94285](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=94285)

21. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЕК 61000-4-30:2008) Електромагнітна сумісність (ЕМС) / Частина 4-30. Методи випробувань та вимірювань. Методи вимірювання якості електричної енергії, 2008. – 59 с.

22. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014. [Чинний від 2014-05-30]. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=58073](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58073).

23. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинний від 2009-01-27]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 116 с.

24. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

25. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Постанова МОЗ № 42 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

26. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

27. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2018. 133 с.

28. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова МОЗ № 37 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infravzuku-nor4878.html>.



# ДОДАТКИ

Додаток А  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

УЗГОДЖЕНО

\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри ЕСЕМ

д.т.н., проф. Бурбело М.Й.  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

до магістерської кваліфікаційної роботи на тему:  
Оптимізація режиму електромережі підприємства у разі обмеження його  
потужності енергосистемою  
08-17.МКР.010.01.000 ПЗ

Науковий керівник:

к.т.н., проф. Терешкевич Л.Б. \_\_\_\_\_  
(підпис)

Виконавець: студентка гр. ЕМ – 22м

Рикова А.К. \_\_\_\_\_  
(підпис)

Вінниця 2023 р.

## 1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (МКР)

Робота виконується на підставі наказу ВНТУ за №247 від 18.09.23 р.

Дата початку роботи 20.09.23 р.

Дата закінчення роботи 08.12.23 р.

## 2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

а) мета – математичні методи, що направлені на зниження рівня несиметрії у мережі електропостачання підприємств.

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

в) вихідні дані для виконання МКР:

бази даних енергоспоживання промисловими підприємствами України.

## 3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

3.1 Методичні вказівки до оформлення дипломних проектів (робіт) у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. Г.Л. Лисенко, А.Г. Буда, Р.Р. Обертюх. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 60 с.

3.2 Жалдак М.І. Основи теорії і методів оптимізації : навчальний посібник / – Черкаси: Брама-Україна, 2005. – 608 с.

3.3 Зайченко Ю.П. Дослідження операцій / Ю.П. Зайченко // – Київ.: Видавничий дім «Слово», 2006. – 816 с.

3.4 Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студентами спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Л.Б. Терешкевич, О.Д. Демов, Ю.А. Шулле. – Вінниця: ВНТУ, 2006р.

3.5 Терешкевич Л.Б. Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання / Технічна електродинаміка. – 2006. – №2. – С. 64.

#### 4. ЕТАПИ І ТЕРМІН ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Зміст етапу	Термін виконання	
	початок	кінець
4.1 Збір інформації, яка необхідна для дослідження		
4.2 Проведення дослідних розрахунків		
4.3 Розробка робочих креслень		
4.4 Написання розрахунково-пояснювальної записки і захист магістерської роботи		

#### 5. МАТЕРІАЛИ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстровані матеріали, анотація до МКР українською та іноземною мовою.

#### 6. ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ ВИКОНАННЯ ТА ЗАХИСТУ МКР

Робота приймається на проміжних контрольних перевірках, попередньому захисті та захисті в ДЕК.

#### 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

##### 7.1 Дані про патентоспроможність

Не передбачається

#### 8 ОЧІКУВАНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ

Не передбачається

Додаток Б  
ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Оптимізація режиму електромережі підприємства у разі обмеження його потужності енергосистемою

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ: кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту  
факультет електроенергетики та електромеханіки  
(кафедра, факультет)

**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність 89.3% Схожість 10.7%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

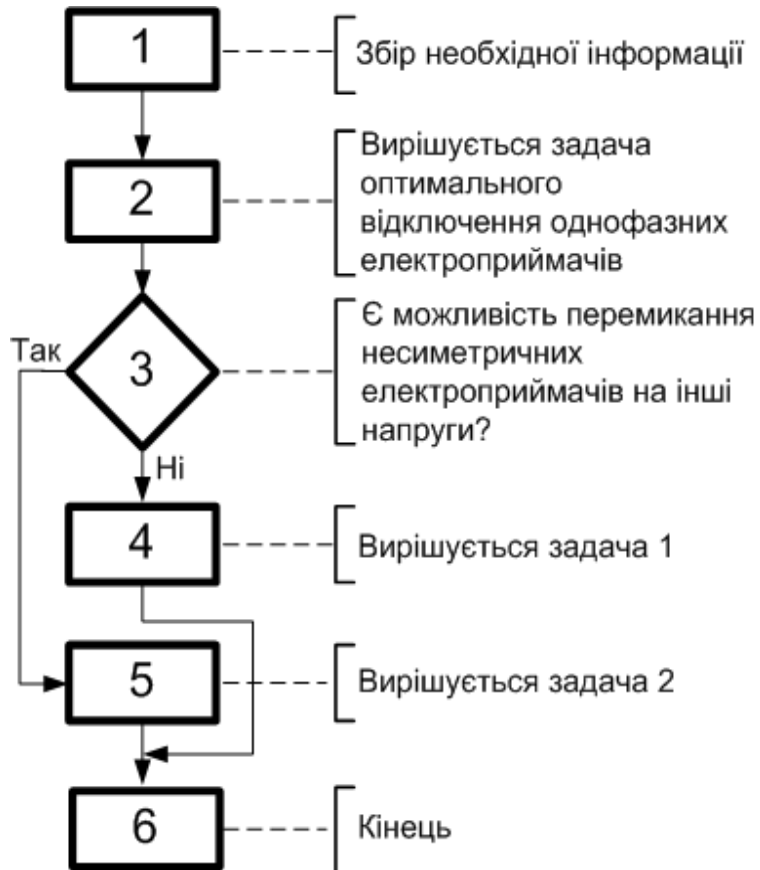
Особа, відповідальна за перевірку \_\_\_\_\_ Лобода Ю.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи	_____	<u>Рикова А.К.</u>
	(підпис)	(прізвище, ініціали)
Керівник роботи	_____	<u>Терешкевич Л.Б.</u>
	(підпис)	(прізвище, ініціали)

## Додаток В

Підхід до вирішення поставленої задачі, що реалізований в роботі



Збір інформації потребує визначення струмів зворотної послідовності усіх електроприймачів, в залежності від їх фазування.

$$\dot{I}_{2n_1} = \frac{P_n}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_n} \cdot \left[ e^{j(30^\circ - \varphi_n)} + e^{j(90^\circ - \varphi_n)} \right]$$

$$\dot{I}_{2n_2} = \frac{P_n}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_n} \cdot \left[ e^{j(-210^\circ - \varphi_n)} + e^{j(210^\circ - \varphi_n)} \right]$$

$$\dot{I}_{2n_3} = \frac{P_n}{3 \cdot U_H \cdot \cos \varphi_n} \cdot \left[ e^{j(-30^\circ - \varphi_n)} + e^{j(-90^\circ - \varphi_n)} \right]$$

Задача 1 – оптимальне відключення однофазних електроприймачів

Задача 2 – оптимальна зміна фазування у групі однофазних електроприймачів після відключення електроприймачів із потрібною потужністю

## Додаток Г

### Математична модель задачі 1

Цільова функція  $\dot{F}(X) = \dot{I}_2 = f(x) + j \cdot \varphi(x) = a + j \cdot b \rightarrow \min$

Цільова функція – комплексний струм зворотної послідовності  $I_2$

$P_{ni}$  – потужність  $n$ -го приймача, жорстко підключеного до  $i$ -ї напруги

$\Delta P$  – вимога на зменшення споживання потужності

$P_{n \max}$  – найбільша потужність у групі приймачів

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^m a_{ni} \cdot x_{ni} + j \cdot \sum_{n=1}^m b_{ni} \cdot x_{ni} \rightarrow \min \\ \sum_{n=1}^m P_{ni} \cdot x_{ni} \leq \sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P \\ \sum_{n=1}^m P_{ni} \cdot x_{ni} \geq \sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P - 2 \cdot P_{n \max} \\ x_{ni} + \bar{x}_{ni} = 1; \quad x_{ni}, \bar{x}_{ni} \in \{1; 0\}; \quad n = 1, \dots, m \end{array} \right.$$

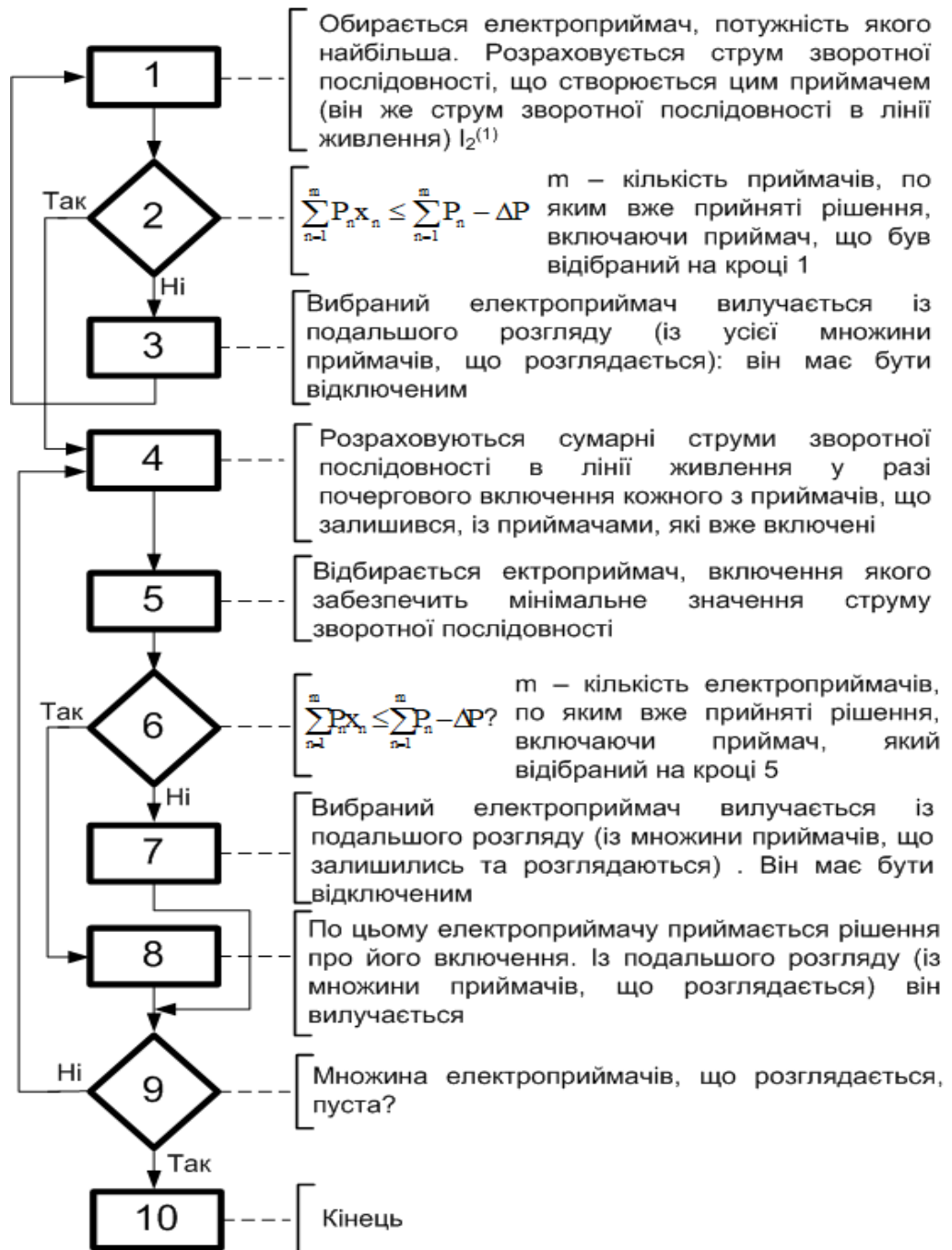
Отримана математична модель лінійна, нескаларна, дискретна

### Загальна матриця струмів зворотної послідовності

№ приймача	Струми зворотної послідовності $\dot{I}_2^H$		
	$U_{AB} (i = 1)$	$U_{BC} (i = 2)$	$U_{CA} (i = 3)$
1	$a_{11} + j \cdot b_{11}$	$a_{12} + j \cdot b_{12}$	$a_{13} + j \cdot b_{13}$
2	$a_{21} + j \cdot b_{21}$	$a_{22} + j \cdot b_{22}$	$a_{23} + j \cdot b_{23}$
-----			
$n$	$a_{n1} + j \cdot b_{n1}$	$a_{n2} + j \cdot b_{n2}$	$a_{n3} + j \cdot b_{n3}$
-----			
$m$	$a_{m1} + j \cdot b_{m1}$	$a_{m2} + j \cdot b_{m2}$	$a_{m3} + j \cdot b_{m3}$

## Додаток Д

### Алгоритм вирішення задачі 1





Додаток Е

Тестовий приклад вирішення задачі 1

№ електроприймача	Потужність, кВт	cos φ	Напруги підключення
1	10	0,7	$U_{AB}$
2	10	0,8	$U_{BC}$
3	25	0,56	$U_{AB}$
4	30	0,7	$U_{CA}$
5	40	0,5	$U_{BC}$
6	45	0,7	$U_{CA}$

№ приймача	Струми зворотної послідовності $\dot{I}_2^H$		
	$U_{AB} (i = 1)$	$U_{BC} (i = 2)$	$U_{CA} (i = 3)$
1	$20,96 + j \cdot 5,62 = 21,7 \cdot e^{j \cdot 15^\circ}$	0	0
2	0	$-15,16 + j \cdot 11,42 = 18,98 \cdot e^{j \cdot 143^\circ}$	0
3	$67,67 + j \cdot 4,73 = 67,83 \cdot e^{j \cdot 3^\circ}$	0	0
4	0	0	$-16,85 - j \cdot 62,89 = 65,11 \cdot e^{j \cdot -105^\circ}$
5	0	$-60,78 + j \cdot 105,26 = 121,55 \cdot e^{j \cdot 120^\circ}$	0
6	0	0	$-25,28 - j \cdot 94,34 = 97,67 \cdot e^{j \cdot -105^\circ}$

Додаток Ж

Математична модель задачі 2

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 a_{ni} \cdot x_{ni} + j \cdot \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 b_{ni} \cdot x_{ni} \rightarrow \min \\ \sum_{n=1}^m P_{ni} \cdot x_{ni} \leq \sum_{n=1}^m P_{ni} - \Delta P \\ \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 x_{ni} = 1, \quad n = 1 \dots m; \quad i = 1, 2, 3 \\ x_{ni} \in \{1; 0\}. \end{array} \right.$$

№ п/п	№ навантаження	Струми зворотної послідовності в залежності від фази підключення		
		$U_{AB} (i = 1)$	$U_{BC} (i = 2)$	$U_{CA} (i = 3)$
1	2	$17,47 + j \cdot 7,41 = 18,98 \cdot e^{j \cdot 23^\circ}$	$-15,16 + j \cdot 11,42 = 18,98 \cdot e^{j \cdot 143^\circ}$	$-2,31 - j \cdot 18,84 = 18,98 \cdot e^{j \cdot -97^\circ}$
2	3	$67,67 + j \cdot 4,73 = 67,83 \cdot e^{j \cdot 3^\circ}$	$-37,92 + j \cdot 56,23 = 67,83 \cdot e^{j \cdot 123^\circ}$	$-29,74 - j \cdot 60,96 = 67,83 \cdot e^{j \cdot -117^\circ}$
3	4	$62,89 + j \cdot 16,85 = 65,11 \cdot e^{j \cdot 15^\circ}$	$-46,04 + j \cdot 46,04 = 65,11 \cdot e^{j \cdot 135^\circ}$	$-16,85 - j \cdot 62,89 = 65,11 \cdot e^{j \cdot -135^\circ}$
4	5	$121,56 + j \cdot 0 = 121,56 \cdot e^{j \cdot 0^\circ}$	$-60,78 + j \cdot 105,26 = 121,56 \cdot e^{j \cdot 120^\circ}$	$-60,78 - j \cdot 105,26 = 121,56 \cdot e^{j \cdot -120^\circ}$

Додаток К

Алгоритм вирішення задачі 2



## Додаток Л

### Тестовий приклад вирішення задачі 2

Перший базисний розв'язок  $X = (x_{11} \ x_{12} \ x_{13}; x_{21} \ x_{22} \ x_{23}; x_{31} \ x_{32} \ x_{33}; x_{41} \ x_{42} \ x_{43})$  у вигляді  $X = (1 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0)$ .

Базисними змінними будуть  $x_{11}, x_{21}, x_{31}, x_{41}$ ; за умовами задачі, вони дорівнюють «1».

Змінні  $x_{12}, x_{13}, x_{22}, x_{23}, x_{32}, x_{33}, x_{42}, x_{43}$  є вільними; вони дорівнюють «0».

№ п/п	№ навантаження	Струми в залежності від фази підключення		
		$U_{AB} (i = 1)$	$U_{BC} (i = 2)$	$U_{CA} (i = 3)$
1	2	$17,47 + j \cdot 7,41 = 18,98 \cdot e^{j \cdot 23^\circ}$	0	0
2	3	$67,67 + j \cdot 4,73 = 67,83 \cdot e^{j \cdot 3^\circ}$	0	0
3	4	$62,89 + j \cdot 16,85 = 65,11 \cdot e^{j \cdot 15^\circ}$	0	0
4	5	$121,56 + j \cdot 0 = 121,56 \cdot e^{j \cdot 0^\circ}$	0	0

Загальний струм зворотної послідовності за першим базисним розв'язком  $\dot{I}_2^H = (17,47 + 67,67 + + 62,89 + 121,56) + j \cdot (7,41 + 4,73 + 16,85 + 0) = 269,59 + j \cdot 28,99 = 271,14 \cdot e^{j \cdot (6^\circ)}$  А.

Математична модель у канонічному чисельному вигляді, попередньо виразивши базисні змінні через вільні змінні

$$\left\{ \begin{array}{l} | 269,59 - (32,63 + 19,78 + 105,59 + 97,41 + 108,93 + 79,74 + \\ + 182,34 + 182,34) \cdot X + j \cdot (28,99 - (-4,01 + 26,25 - 51,5 + \\ + 65,69 - 29,19 + 79,74 - 105,26 + 105,26) \cdot X) | \rightarrow \min \\ x_{11} = 1 - (x_{12} + x_{13}); \quad x_{21} = 1 - (x_{22} + x_{23}); \quad x_{31} = 1 - (x_{32} + x_{33}); \\ x_{41} = 1 - (x_{42} + x_{43}); \quad x_{ni} \in \{1; 0\} \quad n = 1 \dots 4; \quad i = 1, 2, 3 \end{array} \right.$$

Додаток М

Тестовий приклад вирішення задачі 2

Вільні змінні	Струми зворотної послідовності $\dot{I}_2$		
	Re $I_2$	Im $I_2$	$ \dot{I}_2 $
$x_{12} = 1$	236,96	33	239,24
$x_{13} = 1$	249,81	2,74	249,82
$x_{22} = 1$	164	80,49	182,68
$x_{23} = 1$	172,18	-36,7	176,04
$x_{32} = 1$	160,66	58,18	170,86
$x_{33} = 1$	189,85	-50,75	196,51
$x_{42} = 1$	87,25	134,25	160,11
$x_{43} = 1$	87,25	-76,27	115,88

Симплекс таблиця. Перша ітерація

$F(X)$ та базисні змінні	Вільн. члени	Вільні змінні							
		$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{42}$	$x_{43}$
Re $I_2$	269,59	32,63	19,78	105,59	97,41	108,93	79,74	182,34	<b>182,34</b>
	87,25	32,63	19,78	105,59	97,41	108,93	79,74	0	<b>-182,34</b>
Im $I_2$	28,99	-4,01	26,25	-51,5	65,69	-29,19	79,74	-105,26	<b>105,26</b>
	-76,27	-4,01	26,25	-51,5	65,69	-29,19	79,74	-210,52	<b>-105,26</b>
$x_{11}$	1	1	1	0	0	0	0	0	<b>0</b>
	1	1	1	0	0	0	0	0	<b>0</b>
$x_{21}$	1	0	0	1	1	0	0	0	<b>0</b>
	1	0	0	1	1	0	0	0	<b>0</b>
$x_{31}$	1	0	0	0	0	1	1	0	<b>0</b>
	1	0	0	0	0	1	1	0	<b>0</b>
$x_{41}$	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b><math>\mu = 1/1</math></b>