

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

**до виконання лабораторних робіт**

**з навчальної дисципліни**

# **ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСТ ТА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної, заочної та дистанційної форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2025**

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електропостачання міст та промислових підприємств» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної, заочної та дистанційної форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : В. Ф. Харченко, А. І. Кузнецов, Д. Е. Плаксін. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 86 с.

**Укладачі :** д-р техн. наук, проф. **Харченко В. Ф.**,  
канд. техн. наук, доц. **Кузнецов А. І.**,  
аспірант **Плаксін Д. Е.**

**Рецензент:** **В. Є. Плюгін**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та електроспоживання міст, протокол № 15 від 30.06.2025*

## ЗМІСТ

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Передмова.....                                                   | 6  |
| 1 Робота з інтерфейсом програмного середовища MATLAB R2023b..... | 9  |
| 1.1 Головне меню та вкладки.....                                 | 9  |
| 1.2 Вікно команд (Command Window).....                           | 9  |
| 1.3 Поточна папка (Current Folder).....                          | 11 |
| 1.4 Робочий простір (Workspace) .....                            | 11 |
| 1.5 Інші області.....                                            | 11 |
| 1.6 Опис основних елементів меню (вкладка HOME).....             | 11 |
| 1.6.1 Група "File".....                                          | 12 |
| 1.6.2 Група "Variable".....                                      | 12 |
| 1.6.3 Група "Code".....                                          | 12 |
| 1.6.4 Група "Simulink" (ключова група для запуску Simulink)..... | 13 |
| 1.6.5 Група "Environment".....                                   | 13 |
| 1.6.6 Група "Resources".....                                     | 13 |
| 1.7 Значення основних кнопок.....                                | 13 |
| 1.8 Робота з Simulink у Matlab R2023b.....                       | 15 |
| 1.8.1 Запуск середовища Simulink.....                            | 15 |
| 1.8.2 Створення нової моделі.....                                | 15 |
| 1.8.3 Відкриття існуючих моделей.....                            | 16 |
| 1.8.4 Запуск та налаштування моделі.....                         | 16 |
| 1.8.5 Експорт результатів.....                                   | 16 |
| 1.9 Робота з m-файлами у Matlab R2023b.....                      | 17 |
| 1.9.1 Створення нового скрипту.....                              | 17 |
| 1.9.2 Відкриття наявного скрипту.....                            | 17 |
| 1.9.3. Виконання m-файлів.....                                   | 17 |
| 1.9.4. Основні можливості редактора.....                         | 18 |
| 1.9.5. Використання m-файлів разом із Simulink.....              | 18 |
| 1.10 Корисні команди Matlab.....                                 | 19 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2 Використання і аналіз метода розрахунку електричних навантажень промислового підприємства.....                                 | 21 |
| 2.1 Мета роботи.....                                                                                                             | 21 |
| 2.2 Загальні відомості.....                                                                                                      | 21 |
| 2.3 Основні методи розрахунку електричних навантажень.....                                                                       | 22 |
| 2.3.1 По річній витраті активної потужності.....                                                                                 | 22 |
| 2.3.2 Метод коефіцієнту попиту.....                                                                                              | 22 |
| 2.3.3 Метод упорядкованих діаграм.....                                                                                           | 23 |
| 2.3.4 Статистичний метод розрахунку.....                                                                                         | 27 |
| 2.4 Порядок виконання роботи.....                                                                                                | 28 |
| 2.5 Порядок вводу вихідних даних у середовище MATLAB і виконання розрахунку.....                                                 | 30 |
| 2.6 Приклад розрахунку навантаження підстанції на 11 груп електричних приймачів.....                                             | 34 |
| 2.7 Оформлення звіту.....                                                                                                        | 36 |
| 3 Вибір компенсуючої потужності для навантаження та дослідження її впливу на втрати потужності в системах електропостачання..... | 37 |
| 3.1 Мета роботи.....                                                                                                             | 37 |
| 3.2 Загальні відомості.....                                                                                                      | 37 |
| 3.3 Опис віртуальної фізичної лабораторної установки з використанням блоків Simulink (Matlab).....                               | 41 |
| 3.4 Порядок виконання роботи.....                                                                                                | 42 |
| 3.5 Приклад виконання лабораторної роботи.....                                                                                   | 46 |
| 4 Визначення опору петлі фаза-нуль і струмів однофазного короткого замикання в мережі напругою до 1000 В.....                    | 50 |
| 4.1 Мета роботи.....                                                                                                             | 50 |
| 4.2 Загальні відомості.....                                                                                                      | 50 |
| 4.2.1 Зміст роботи.....                                                                                                          | 50 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.2 Опис і інструкція з експлуатації приладу для вимірювання опору ланцюга фаза – нуль М-417.....                  | 52 |
| 4.3 Порядок виконання роботи.....                                                                                    | 55 |
| 4.4 Порядок оформлення роботи.....                                                                                   | 59 |
| 5 Якість електроенергії. Несинусоїдальність напруги в промислових мережах і вплив її на роботу електроприймачів..... | 62 |
| 5.1 Мета роботи.....                                                                                                 | 62 |
| 5.2 Загальні відомості.....                                                                                          | 62 |
| 5.3 Несинусоїдальність напруги.....                                                                                  | 63 |
| 5.4 Процеси, які викликають напругу несинусоїдальної форми в промислових мережах.....                                | 64 |
| 5.5 Вплив несинусоїдальної напруги на роботу електроприймачів.....                                                   | 65 |
| 5.6 Засоби виміру несинусоїдальної напруги.....                                                                      | 67 |
| 5.6.1 Порядок роботи.....                                                                                            | 67 |
| 5.7 Порядок виконання роботи.....                                                                                    | 72 |
| 5.8 Порядок роботи з використанням віртуальної лабораторії у програмному забезпеченні Simulink MATLAB.....           | 73 |
| 5.9 Оформлення звіту.....                                                                                            | 83 |
| Список рекомендованих джерел.....                                                                                    | 84 |

## ПЕРЕДМОВА

В методичних рекомендаціях дано опис лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електропостачання міст та промислових підприємств» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти галузі знань 14 – Електрична інженерія за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, професійного спрямування «Електротехнічні системи електроспоживання».

Перша частина методичних рекомендацій присвячена навичкам роботи в програмному середовищі Matlab R2023b. Описані головне меню та вкладки, вікно команд, поточний каталог користувача, де зберігаються проєктні файли, робочий простір, який відображає всі змінні під час роботи в середовищі. Дано опис основних елементів меню (вкладка HOME).

Це дає студенту можливість працювати з віртуальними моделями лабораторних робіт, змінювати їх параметри, відповідно до отриманих завдань від викладача, запускати модель в середовищі Matlab.

Перша робота представлена в другому розділі і присвячена використанню аналізу метода розрахунку електричних навантажень промислового підприємства. Вона дає можливість ознайомитись з основними методами розрахунку навантаження промислового підприємства, що найбільш часто використовуються на різних етапах проєктування електропостачання, порівняти їх за складністю, точністю розрахунку, показати відхилення розрахункових значень одного методу від іншого та виконати один із них з використанням комп'ютерної програми в Matlab.

Друга робота, яка представлена у третьому розділу, присвячена вибору компенсуючої потужності для навантаження та дослідження, її впливу на втрати потужності в системах електропостачання. Метою цієї роботи є вивчення споживання навантаження. В лабораторній роботі, як навантаження, використовується асинхронний двигун, який споживає і реактивну потужність. Студент навчається алгоритму вибору батареї конденсаторів для компенсації

реактивної потужності і оцінювати зниження втрат в системах електропостачання. Віртуальна модель електричної мережі та навантаження створена в середовищі Matlab.

Третя робота представлена у четвертому розділі і присвячена визначенню опору петлі фаза-нуль і струмів однофазного короткого замикання в мережі напругою до 1 кВ. Студент отримує від викладача завдання відповідно варіанту та схеми і робить розрахунки струму короткого замикання, вивчає принцип дії і порядок роботи приладу М-417 та замірює ланцюг мережі фаза – нуль, включаючи трансформатор. Використовуючи розрахунки та заміри, студент робить висновки по захисту мережі від короткого замикання. У цій роботі також за рахунок побудови віртуальної моделі є можливість відтворити реальну мережу і вибрати апарат для захисту даної ділянки.

Четверта робота, яка представлена у п'ятому розділі, присвячена якості електроенергії. Це стосується несинусоїдальної напруги в промисловій мережі і вплив її на роботу електричних приймачів. Студент знайомиться з пристроями виміру несинусоїдальної напруги та використанням їх для заміру спотворення в мережі. Також студенти в програмному середовищі Matlab, використовуючи нелінійне навантаження, напругу та струм, який протікає в мережі, розраховують додаткові втрати в елементах системи електропостачання.

При роботі в реальній мережі або в лабораторії університету необхідно строго дотримуватись наступних правил безпеки:

- перед збиранням схеми переконатися, що вимикачі, якими подається напруга, відключені;
- після збирання схеми ще раз переконатися у правильності всіх з'єднань, звіривши їх з принциповою схемою. Запам'ятайте, які відкриті частини схеми або апаратів знаходяться під напругою;
- включити апаратуру під напругу тільки після перевірки зібраної схеми керівником і з його дозволу;
- не торкатися струмопровідних частин, що знаходяться під напругою;

- усі приєднання приладів і зміни схем проводити тільки після відключення апаратури від джерел живлення;
- при виникненні несправності приладів і устаткування негайно відключити лабораторну роботу від джерел живлення і доповісти про несправність керівникові;
- особливу обережність проявляти при роботі з ланцюгами, що містять конденсатори і котушки з великим числом витків;
- після закінчення робіт відключити апаратуру, розібрати схему і здати робоче місце керівникові.

До виконання лабораторних робіт студенти допускаються після ознайомлення з правилами техніки безпеки. Всі розрахунки, записи показань приладів, ескізи приладів і схем, технічні дані приладів заносять в робочий зошит – один для всієї бригади. Робота вважається виконаною, якщо всі записи перевірені і завізовані керівником. Звіт повинен бути складений відповідно до методичних вказівок з оформлення звітів лабораторних робіт.

# 1 РОБОТА З ІНТЕРФЕЙСОМ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА MATLAB R2023b

MATLAB (Matrix Laboratory) — це програмне середовище, яке орієнтоване на виконання математичних розрахунків, моделювання, аналіз даних, візуалізацію та створення алгоритмів. У поєднанні з Simulink MATLAB дозволяє розробляти складні системи у візуальному середовищі моделювання.

На рисунку 1.1 зображено стартове вікно MATLAB R2023b у стандартному вигляді при запуску. Інтерфейс MATLAB можна умовно поділити на кілька основних частин.

## 1.1 Головне меню та вкладки

У верхній частині вікна розміщено **стрічкове меню**, подібне до інтерфейсів сучасних офісних програм. Вкладки згруповані за функціональністю:

- **Home** — основні інструменти роботи з файлами, змінними, середовищем MATLAB, запуском скриптів та Simulink.
- **Plots** — швидкий доступ до візуалізації даних.
- **Apps** — запуск вбудованих та встановлених додатків MATLAB

Це меню дозволяє швидко виконувати основні дії без необхідності запам'ятовувати команди.

## 1.2 Вікно команд (Command Window)

Центральне місце інтерфейсу займає **Command Window** — основне середовище для введення MATLAB-команд у режимі реального часу. Саме тут користувач може:

- виконувати обчислення;
- запускати скрипти;
- викликати функції;
- виводити результати обчислень.

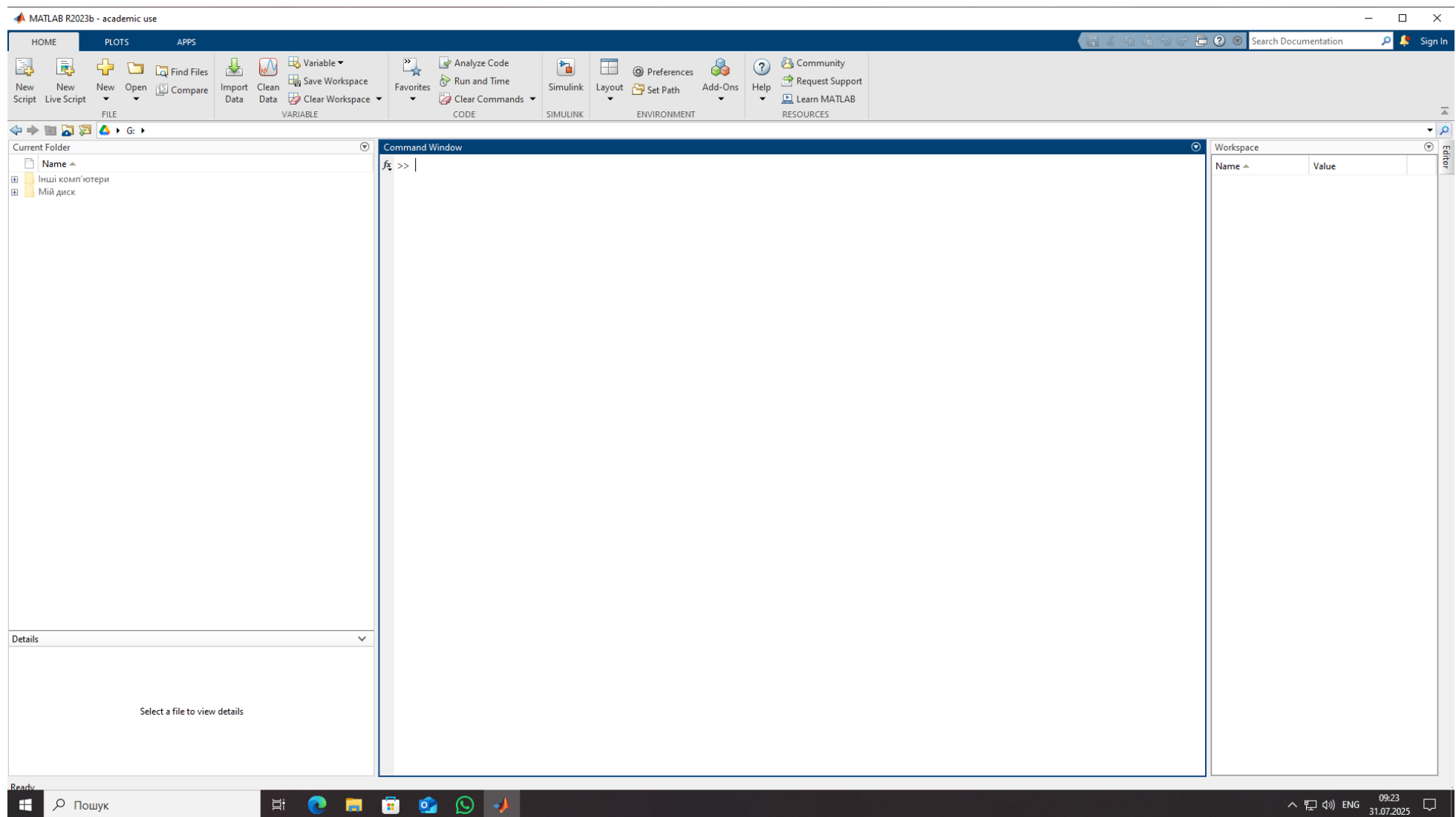


Рисунок 1.1 – Стартове вікно Matlab R2023b у стандартному вигляді при запуску

### 1.3 Поточна папка (Current Folder)

Зліва розміщується панель **“Current Folder”**, яка показує поточний каталог користувача, де зберігаються проєктні файли (включаючи \*.m файли та моделі Simulink). Тут можна переглядати структуру каталогів та відкривати, перейменовувати, видаляти та створювати нові файли. Від цієї папки MATLAB виконує пошук скриптів і функцій.

### 1.4 Робочий простір (Workspace)

Праворуч розміщується панель **“Workspace”**, відображає всі змінні, які створені під час роботи в середовищі MATLAB. Для кожної змінної вказується її ім'я та поточне значення або тип даних. Ця панель дозволяє: стежити за станом змінних; подвійним «кліком» відкривати їх у редакторі змінних; видаляти змінні чи зберігати їх у файли.

### 1.5 Інші області

У нижній частині можуть з'являтися додаткові вкладки:

- **Command History** – історія введених команд;
- **Details** – деталі вибраного файлу з поточної папки.

Ці вкладки можуть бути активовані вручну, якщо вони не відображаються за замовчуванням.

### 1.6 Опис основних елементів меню (вкладка HOME)

Головне меню MATLAB R2023b організоване у вигляді вкладок. Найважливішою з них для початкової роботи є **вкладка "Home"**, яка активна одразу після запуску середовища. Вона містить основні інструменти, згруповані за функціональністю, які полегшують навігацію, обробку даних, запуск Simulink, редагування скриптів та керування проєктами.

### 1.6.1 Група "File"

Містить інструменти для роботи з файлами:

- **New Script** – створення нового скрипту (\*.m файл).
- **New Live Script** – (нового сценарію) створення live-скрипту з підтримкою форматowanego тексту, графіки та коду в одному документі.
- **Open** – відкриття існуючих файлів.
- **Compare** – порівняння змісту двох файлів (наприклад, різних версій одного скрипту).
- **Find Files** – пошук файлів за іменем або змістом.

### 1.6.2 Група "Variable"

Дозволяє працювати зі змінними:

- **Import Data** – імпорт даних з файлів Excel, текстових файлів тощо.
- **Clean Data** – очищення й підготовка наборів даних.
- **Save Workspace / Clear Workspace** – збереження та очищення робочого простору.

### 1.6.3 Група "Code"

Призначена для аналізу коду:

- **Analyze Code** – аналіз якості та ефективності скриптів.
- **Run and Time** – виконання скрипту з оцінкою часу виконання.
- **Clear Commands** – очищення вікна команд.

#### 1.6.4 Група "Simulink" (ключова група для запуску Simulink)

- **Simulink** – відкриття головного вікна Simulink. Через нього користувач може створювати, відкривати та редагувати моделі \*.slx.

#### 1.6.5 Група "Environment"

Містить налаштування середовища:

- **Layout** – зміна вигляду вікон MATLAB (можна налаштувати під індивідуальні потреби).
- **Set Path** – управління шляхами пошуку файлів і функцій.
- **Preferences** – глобальні налаштування MATLAB.

#### 1.6.6 Група "Resources"

- **Help** – відкриття довідкової системи Matlab.
- **Learn MATLAB** – навчальні ресурси для самостійного опанування.
- **Request Support** – звернення до служби підтримки MathWorks.
- **Community** – доступ до онлайн-спільноти користувачів MATLAB.

### 1.7 Значення основних кнопок

Графічний інтерфейс Matlab R2023b зроблений інтуїтивно зрозумілим. Завдяки ньому користувач може запускати необхідні дії швидко, без введення команд вручну. Позначення кнопок та їх призначення дано в таблицях 1.1–1.4.

Таблиця 1.1 – Робота з файлами та скриптами

| Іконка                 | Призначення                                                                                      |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>New Script</b>      | Відкриває редактор для створення нового m-файлу (функція або скрипт)                             |
| <b>Open</b>            | Дозволяє вибрати та відкрити файл (наприклад, <code>model.slx</code> або <code>script.m</code> ) |
| <b>New Live Script</b> | Створення інтерактивного скрипту з текстовими описами, графіками та кодом                        |
| <b>Compare</b>         | Порівняння змісту двох m-файлів (наприклад, стара та нова версії)                                |
| <b>Find Files</b>      | Швидкий пошук по назві або вмісту файлів у поточній папці                                        |

Таблиця 1.2 – Керування виконанням скриптів

| Іконка                | Призначення                         |
|-----------------------|-------------------------------------|
| <b>Run</b>            | Виконує активний скрипт у редакторі |
| <b>Run and Time</b>   | Оцінює час виконання скрипту        |
| <b>Clear Commands</b> | Очищає Command Window               |

Таблиця 1.3 – Simulink

| Іконка                 | Призначення                                                        |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Simulink</b>        | Запускає середовище Simulink — головне вікно для створення моделей |
| <b>Library Browser</b> | Дає доступ до бібліотеки блоків Simulink                           |

Таблиця 1.4 – Робоче середовище

| Іконка                 | Призначення                                                                      |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Save Workspace</b>  | Зберігає всі змінні у <code>.mat</code> файл                                     |
| <b>Clear Workspace</b> | Видаляє всі змінні з Workspace                                                   |
| <b>Set Path</b>        | Додає/видаляє папки до шляху пошуку функцій                                      |
| <b>Preferences</b>     | Дає змогу змінити параметри зовнішнього вигляду, редактора та виконання скриптів |

## 1.8 Робота з Simulink у Matlab R2023b

**Simulink** — це інтегроване середовище графічного моделювання динамічних систем, що використовується в інженерії, автоматизації, енергетиці та багатьох інших галузях

На ілюстрації (Рис.1) запуск Simulink здійснюється через вкладку **Home**, групу **Simulink**, або кнопку **Simulink**:

### 1.8.1 Запуск середовища Simulink

1. У вкладці **Home** натискається кнопка **Simulink** (з іконкою у вигляді квадрата з блоками).
2. Відкривається вікно **Simulink Start Page**, де доступні:
  - створення **нової моделі** (Blank Model),
  - відкриття **останніх моделей**,
  - запуск **Library Browser**.

**Library Browser** — це бібліотека блоків Simulink, розділених за функціональністю (джерела, суматори, інтегратори, осцилографи, логічні блоки, ПІ-регулятори, тощо).

### 1.8.2 Створення нової моделі

Після вибору "Blank Model" відкривається **робоче вікно Simulink-моделі**. Користувач може:

- додавати блоки з **Library Browser**,
- з'єднувати їх **лініями зв'язку (signal lines)**,
- налаштовувати параметри **подвійним кліком** на блок.

Основні дії:

- **Double-click** на робоче поле відкриває пошук блоків.
- **Drag-and-drop** із Library Browser – для вставки блоків.

- **Ctrl+S** – збереження моделі у файл із розширенням .slx.

### 1.8.3 Відкриття існуючих моделей

Simulink підтримує відкриття моделей безпосередньо:

- через **панель Current Folder** – подвійний клік на .slx файлі,
- через кнопку **Open** у вкладці Home,
- через **команду** у **Command Window**:

`open_system('назва_моделі')`

### 1.8.4 Запуск та налаштування моделі

Після створення або відкриття моделі її можна **запустити на симуляцію** за допомогою кнопки **Run** (зелена стрілка вгорі вікна моделі).

Налаштування симуляції:

- Через меню **Simulation > Model Settings** можна змінити:
  - час моделювання (stop time),
  - тип моделювання (fixed-step / variable-step),
  - параметри solver'а.

Після запуску блоки **Scope** або **Display** дозволяють виводити сигнали у вигляді графіків або значень в реальному часі.

### 1.8.5 Експорт результатів

Результати моделювання можна експортувати в Matlab Workspace для подальшого аналізу або візуалізації через блок **To Workspace** або збереження вручну за допомогою скриптів.

## 1.9 Робота з m-файлами у Matlab R2023b

**m-файли** — це звичайні текстові файли з розширенням **.m**, які містять програмний код на мові Matlab. Вони можуть бути двох типів:

- **Скрипти** — набір команд, що виконуються послідовно;
- **Функції** — мають вхідні та вихідні параметри, і використовуються повторно в інших скриптах або моделях.

### 1.9.1 Створення нового скрипту

Для створення нового m-файлу необхідно:

- Натиснути "**New Script**" на вкладці **Home**;
- Відкриється **MATLAB Editor** — інтегрований редактор із підсвічуванням синтаксису, автозавершенням та перевіркою помилок у коді.

Після введення коду скрипт зберігається через **Ctrl + S** або кнопку **Save**. За замовчуванням файл зберігається в поточній папці (Current Folder) і повинен мати розширення **.m**.

### 1.9.2 Відкриття наявного скрипту

Існуючі m-файли відкриваються декількома способами:

- **Подвійним кліком** у вікні **Current Folder**;
- Натисканням кнопки "**Open**" на вкладці **Home**;
- Через команду: `edit('назва_файлу.m')`

Всі відкриті m-файли автоматично відкриваються в **Matlab Editor**, де можна переглядати, змінювати й запускати код.

### 1.9.3 Виконання m-файлів

Після відкриття скрипту його можна виконати кількома способами:

- натиснувши кнопку **Run** (зелена стрілка у верхній частині редактора);
- натиснувши правою кнопкою миші на файлі та обравши у меню **Run**;

- ввівши ім'я файлу (без .m) у **Command Window**, наприклад: my\_script

Назва файлу має збігатися з іменем функції (у випадку функціонального файлу) та не повинна збігатися з вбудованими функціями Matlab.

#### 1.9.4 Основні можливості редактора

MATLAB Editor надає зручні засоби для ефективного редагування коду:

- **Підсвічування синтаксису** — різні кольори для змінних, функцій, операторів;
- **Вкладки для кількох файлів** — зручно перемикатися між скриптами;
- **Аналіз коду (Code Analyzer)** — підказки та попередження щодо можливих помилок або неоптимального коду;
- **Нумерація рядків та закладки** — для швидкої навігації;
- **Коментування/розкоментування** — через комбінації клавіш або відповідні кнопки в редакторі.

#### 1.9.5 Використання m-файлів разом із Simulink

m-файли можуть взаємодіяти з Simulink моделями: задавати початкові умови, вхідні сигнали, параметри моделі; виконувати обробку результатів симуляції; керувати моделюванням за допомогою команд: `set_param('model_name', 'ParameterName', 'Value')`, `sim('model_name')`.

Це дозволяє автоматизувати запуск симуляцій, виконання серій експериментів, зберігання результатів тощо.

## 1.10 Корисні команди Matlab

В таблицях 1.5–1.9 представлені команди та їх призначення.

Таблиця 1.5 – Команди для роботи з файлами та скриптами

| Команда         | Призначення                                       |
|-----------------|---------------------------------------------------|
| edit ім'я_файлу | Відкриває m-файл у редакторі                      |
| run ім'я_файлу  | Запускає m-файл на виконання                      |
| open ім'я_файлу | Відкриває будь-який файл (у т.ч. Simulink модель) |
| save            | Зберігає всі змінні з Workspace у файл matlab.mat |
| load ім'я_файлу | Завантажує змінні з .mat файлу                    |

Таблиця 1.6 – Команди для роботи з робочим простором

| Команда   | Призначення                        |
|-----------|------------------------------------|
| clear     | Видаляє всі змінні з Workspace     |
| clc       | Очищує вікно команд                |
| who       | Показує список змінних             |
| whos      | Детальна інформація про змінні     |
| workspace | Відкриває графічне вікно Workspace |

Таблиця 1.7 – Команди для роботи з Simulink

| Команда              | Призначення                           |
|----------------------|---------------------------------------|
| sim('model')         | Запускає симуляцію моделі             |
| open_system('model') | Відкриває модель Simulink             |
| set_param            | Зміна параметрів моделі або блоку     |
| get_param            | Отримання параметрів моделі або блоку |
| save_system('model') | Зберігає відкриту модель              |

Наприклад:

```
sim('pendulum_model')
```

```
set_param('pendulum_model', 'StopTime', '10')
```

Таблиця 1.8 – Команди візуалізації

| <b>Команда</b>                      | <b>Призначення</b>                  |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| plot(x, y)                          | Побудова графіку 2D                 |
| subplot(m, n, i)                    | Побудова декількох графіків у вікні |
| title('Назва')                      | Назва графіку                       |
| xlabel('ось X'),<br>ylabel('ось Y') | Назви осей                          |
| grid on                             | Увімкнення сітки                    |

Таблиця 1.9 – Команди навігації та допомоги

| <b>Команда</b>           | <b>Призначення</b>                         |
|--------------------------|--------------------------------------------|
| doc команда              | Відкриває документацію у браузері          |
| lookfor<br>ключове_слово | Пошук команд за ключовими словами          |
| matlabroot               | Шлях до встановленого MATLAB               |
| ver                      | Перегляд версії та встановлених toolbox'ів |

## **2 ВИКОРИСТАННЯ І АНАЛІЗ МЕТОДА РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА**

### **2.1 Мета роботи**

Ознайомитись з методами розрахунку навантаження промислового підприємства та виконати один із методів з використанням комп'ютерної програми в Matlab.

### **2.2 Загальні відомості**

Вірне визначення очікуваних електричних навантажень при проєктуванні елементів системи електропостачання є основою для раціонального рішення всього комплексу питань, пов'язаних з електропостачанням промислового підприємства. Завищення розрахункових навантажень приводить до перевитрат матеріалу дротів мережі, збільшенню потужності трансформаторів і, отже, до подорожчання систем електропостачання. Зниження розрахункових навантажень веде до зменшення пропускної спроможності електричних мереж і може викликати порушення нормальної роботи силових і освітлювальних електричних приймачів.

Тому, очікувані електричні навантаження, бажано визначити при проєктуванні як можна точніше.

Однак, унаслідок недостатньої щільності, точності й вірогідності вихідної інформації про всі багаточисельні випадкові фактори, що формують навантаження, вони не можуть бути визначені з високою точністю. Звичайно при визначенні очікуваних навантажень вважають припустимими помилки в межах  $\pm 10\%$ .

В практиці проєктування використовують в основному методи визначення розрахункових навантажень, які приведені в наступному розділі.

## 2.3 Основні методи розрахунку електричних навантажень

### 2.3.1 По річній витраті активної потужності

а) при наявності даних про питомі витрати електроенергії на одиницю продукції в натуральному виразі  $w_{num}$  та продукції, що випускається,  $M$  за формулою:

$$P_p = w_{num} M / T_M, \quad (2.1)$$

де  $T_M$  – річна кількість годин використання максимуму активної потужності;

б) при наявності даних про питому щільність максимального навантаження на квадратний метр площини цеху  $P_{num}$  та заданій величині цієї площини  $F$  за формулою:

$$P_p = P_{num} F, \quad (2.2)$$

в) при наявності даних про питомі витрати для окремих агрегатів за формулою:

$$P_p = \sum w_{num} M / T_M + P_{\text{вст}}, \quad (2.3)$$

де  $P_{\text{вст}}$  – встановлена потужність загальноцехових електричних приймачів.

### 2.3.2 Метод коефіцієнту попиту

Застосовується при визначенні навантаження підприємства в цілому на стадії проєктного завдання й при інших орієнтовних розрахунках за середніми коефіцієнтами попиту  $K_n$  за формулою:

$$P_p = K_n P_{\text{вст}}. \quad (2.4)$$

Величина  $K_n$  приймається однаковою для електроприймачів однієї групи, що працюють в одному режимі, незалежно від кількості і потужності окремих приймачів. Значення коефіцієнту попиту приводиться для машинобудівної галузі в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнта використання та попиту

| Електроприймачі                                                                                                                               | Коефіцієнти |                |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------|-----------|
|                                                                                                                                               | $K_e$       | $\cos \varphi$ | $K_n$     |
| Металорізальні верстати, дрібні токарні, стругальні, свердлильні, фрезерні і т. ін.                                                           | 0,12-0,14   | 0,4-0,5        | 0,14-0,16 |
| Те саме, при важкому режимі роботи: штампувальні преси, автомати, револьверні, обдирні, а також круглі токарні, стругальні, фрезерні і т. ін. | 0,17-0,2    | 0,65           | 0,23-0,28 |
| Те саме, з особливо важким режимом роботи: приводи молотів, кувальні машини, волочильні верстати, очисні барабани та ін.                      | 0,24        | 0,65           | 0,4       |
| Крани мостові, грейферні, кран-балки, тельфери, ліфти                                                                                         | 0,15-0,35   | 0,5            | 0,2-0,5   |
| Вентилятори, санітарно-гігієнічна вентиляція, насоси, компресори, двигуни-генератори, електропід, нагрівачі                                   | 0,65-0,8    | 0,8            | 0,75      |

### 2.3.3 Метод упорядкованих діаграм

Метод застосовується для всіх рівнів системи електропостачання незалежно від стадії проектування. Розрахункове навантаження визначається за формулою:

$$P_p = K_M K_B P_H, \quad (2.5)$$

де  $P_H$  – сумарна активна потужність робочих електроприймачів;  
 $K_B$  – груповий коефіцієнт використання активної потужності за найбільш завантажену зміну (див. табл. 2.1);

$K_M$  – коефіцієнт максимуму активної потужності. Цей коефіцієнт знаходиться в таблиці 2.2 залежно від величини групового коефіцієнту використання  $K_B$  і так званої ефективної кількості електричних приймачів групи  $n_e$ .

Ефективною кількістю електричних приймачів  $n_e$  називається така кількість однорідних за режимом роботи електричних приймачів однакової потужності, яка дає ту ж величину розрахункового максимуму  $P_p$ , що й група електричних приймачів, різних за потужністю та режиму роботи, знаходиться за формулою:

$$n_e = \left( \sum_{i=1}^n P_H \right)^2 / \sum_{i=1}^n P_H^2, \quad (2.6)$$

де  $P_H$  – номінальна потужність окремих ЕП.

Значення коефіцієнтів максимуму  $K_M$  для різноманітних коефіцієнтів використання  $K_B$  залежно від  $n_e$  наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти максимуму  $K_M$  для різних коефіцієнтів використання  $K_B$  залежно від  $n_e$

| $n_e$ | Значення $K_M$ при $K_B$ |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | 0,1                      | 0,15 | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  |
| 4     | 3,43                     | 3,11 | 2,64 | 2,14 | 1,87 | 1,65 | 1,46 | 1,29 | 1,14 |
| 5     | 3,23                     | 2,87 | 2,42 | 2    | 1,76 | 1,57 | 1,41 | 1,26 | 1,12 |
| 6     | 3,04                     | 2,64 | 2,24 | 1,88 | 1,66 | 1,51 | 1,37 | 1,23 | 1,1  |
| 7     | 2,88                     | 2,48 | 2,1  | 1,8  | 1,58 | 1,45 | 1,33 | 1,21 | 1,09 |
| 8     | 1,72                     | 2,31 | 1,99 | 1,72 | 1,52 | 1,4  | 1,3  | 1,2  | 1,08 |
| 9     | 2,56                     | 2,2  | 1,90 | 1,65 | 1,47 | 1,37 | 1,28 | 1,18 | 1,08 |
| 10    | 2,42                     | 2,1  | 1,84 | 1,6  | 1,43 | 1,34 | 1,26 | 1,16 | 1,07 |
| 12    | 2,24                     | 1,96 | 1,75 | 1,52 | 1,36 | 1,28 | 1,23 | 1,15 | 1,07 |
| 14    | 2,10                     | 1,85 | 1,67 | 1,45 | 1,32 | 1,25 | 1,20 | 1,13 | 1,07 |
| 16    | 1,99                     | 1,77 | 1,61 | 1,41 | 1,28 | 1,23 | 1,18 | 1,12 | 1,07 |
| 18    | 1,91                     | 1,7  | 1,55 | 1,37 | 1,26 | 1,21 | 1,16 | 1,11 | 1,06 |
| 20    | 1,84                     | 1,65 | 1,5  | 1,34 | 1,24 | 1,2  | 1,15 | 1,11 | 1,06 |
| 25    | 1,71                     | 1,55 | 1,4  | 1,28 | 1,21 | 1,17 | 1,14 | 1,1  | 1,06 |
| 30    | 1,62                     | 1,46 | 1,34 | 1,24 | 1,19 | 1,19 | 1,13 | 1,1  | 1,05 |
| 40    | 1,5                      | 1,37 | 1,27 | 1,19 | 1,15 | 1,13 | 1,12 | 1,09 | 1,05 |
| 50    | 1,4                      | 1,3  | 1,23 | 1,16 | 1,14 | 1,11 | 1,1  | 1,08 | 1,04 |
| 60    | 1,32                     | 1,25 | 1,19 | 1,14 | 1,12 | 1,11 | 1,09 | 1,07 | 1,03 |
| 70    | 1,27                     | 1,22 | 1,17 | 1,12 | 1,1  | 1,1  | 1,09 | 1,06 | 1,3  |
| 80    | 1,25                     | 1,2  | 1,15 | 1,11 | 1,11 | 1,1  | 1,08 | 1,06 | 1,03 |
| 90    | 1,23                     | 1,18 | 1,13 | 1,1  | 1,09 | 1,09 | 1,08 | 1,05 | 1,02 |
| 100   | 1,21                     | 1,17 | 1,12 | 1,1  | 1,08 | 1,08 | 1,07 | 1,05 | 1,02 |
| 120   | 1,19                     | 1,16 | 1,12 | 1,09 | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 1,05 | 1,02 |

Продовження таблиці 2.2

| $n_e$ | Значення $K_M$ при $K_B$ |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | 0,1                      | 0,15 | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  |
| 140   | 1,17                     | 1,15 | 1,11 | 1,08 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,05 | 1,02 |
| 160   | 1,16                     | 1,13 | 1,1  | 1,08 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,04 | 1,02 |
| 180   | 1,16                     | 1,12 | 1,1  | 1,08 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,04 | 1,01 |
| 200   | 1,15                     | 1,12 | 1,09 | 1,07 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,04 | 1,01 |

При  $n_e > 200$   $K_M \approx 1,0$

Розрахункове реактивне навантаження визначається за формулою:

$$Q_p = L_M K_B \operatorname{tg} \varphi_{CM} P_H, \quad (2.7)$$

де  $\operatorname{tg} \varphi_{CM}$  – середньозважений  $\operatorname{tg} \varphi$  за потужністю окремих ЕП;

$L_M$  – коефіцієнт максимуму за реактивним навантаженням.

Для груп ЕП з рівномірним графіком навантаження приймають  $L_M = 1,05$  для будь-якого  $n_e$ . Для груп ЕП з нерівномірним графіком навантаження числові значення вибирають залежно від  $K_B$  і  $n_e$  за таблицею 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнта максимуму за реактивною потужністю  $L_M$  залежно від  $K_B$  і  $n_e$

| $K_B$ | $> 0,2$   |        | $\leq 0,2$ |         |
|-------|-----------|--------|------------|---------|
| $n_e$ | $\leq 10$ | $> 10$ | $\leq 100$ | $> 100$ |
| $L_M$ | 1,1       | 1,0    | 1,1        | 1,0     |

При використанні цього методу рекомендується наступний порядок розрахунку:

1 Визначається кількість розрахункових вузлів  $N$ . Для електричної схеми це може дорівнювати кількості радіальних шинопровідів, підключених до цехової трансформаторної підстанції.

2 Всі електричні приймачі по кожному розрахунковому вузлу розбиваються на групи за режимами роботи. Першу групу складають електричні приймачі зі змінним графіком навантаження, а другу складають з практично постійним графіком навантаження.

3 По кожній групі підсумовуються кількість і номінальна потужність електричних приймачів.

4 З таблиці 2.1 знаходимо по кожному найменуванню електричних приймачів,  $K_B$  і  $\cos \varphi$ .

5 За формулами знаходимо середню потужність по кожному найменуванню:

$$P_C = K_B \cdot P_H \text{ і } Q_C = P_C \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.8)$$

6 По групі підсумовується середня потужність.

7 По кожній групі визначається за формулою (2.6)  $n_e$ .

8 За таблицями 2.2 і 2.3 визначаються  $L_M$  і  $K_M$ .

9 Визначаються розрахункові активна і реактивна потужності по групі:

$$P_P = K_M P_C \text{ і } Q_P = L_M Q_C. \quad (2.9)$$

10 Визначається повна потужність по групі  $S_P$ .

11 По групі визначається груповий коефіцієнт використання

$$K_B = \frac{\sum P_C}{\sum P_H}, \quad (2.10)$$

де  $\sum P_C$  – сума середніх потужностей по групі;

$\sum P_H$  – сума номінальних потужностей по групі.

12 По вузлу підсумовується  $P_C$  і  $Q_C$ . Визначаються  $n$  і  $\sum P_H$ , знаходиться  $n_e$ . А далі за пунктами 8-11. Значення, одержані при розрахунках вже відносяться до розрахункового вузла.

При використанні обчислювальної техніки коефіцієнт максимуму  $K_M$  можна визначити:

$$K_M = \left( 1 + \frac{\sqrt{3} \sqrt{f_{KI}^2}}{\sqrt{n_e}} \right) (AK_\Phi - B), \quad (2.11)$$

де  $f_{KI}$  – коефіцієнт форми впорядкованих індивідуальних коефіцієнтів використання (лежить у межах 1,05-1,2);

$K_\Phi$  – груповий коефіцієнт форми графіка навантаження за найбільш завантажену зміну, а коефіцієнти  $A$  і  $B$  мають таке числове значення, що залежить від величини  $K_\Phi$ :

при  $K_\Phi < 1,1$  буде  $A=4,1$ ,  $B=3,1$

$$1,1 \leq K_{\phi} \leq 1,5$$

$$A=2,8, \quad B=1,67$$

Метод виявився громіздким. Застосування його на вищому рівні призводить до більших помилок в розрахунках. Помилки накопичуються від рівня до рівня. Відбувається просте підсумовування потужності і коефіцієнтів, хоча електричні приймачі виявляються з різних груп.

#### 2.3.4 Статистичний метод розрахунку

Він дозволяє визначити розрахункову потужність з будь-якою прийнятою ймовірністю по піку температури та зношеності ізоляції й дозволяє подолати недоліки попереднього методу. Він виявляється більш прогресивним і в подальшому повинен знайти широке використання.

Розрахункове навантаження визначається двома інтегральними показниками: середнім навантаженням  $P_{CM}$  і середньоквадратичним відхиленням за рівнянням:

$$P_p = P_{CM} \pm \beta \sigma_{cp}, \quad (2.12)$$

де  $\beta$  – прийнята кратність міри розсіювання для розрахункового навантаження по піку температури і по зношеності ізоляції. Але, для інженерних розрахунків достатньо використовувати тільки порядок розрахунку статистичним методом, який приводиться в літературі.

1. По розрахунковому вузлу визначається сумарна встановлена потужність  $\Sigma P_H$  та виділяється найбільш потужний ЕП в групі  $P_{Hmax}$ .

2. Визначається ефективна кількість електричних приймачів за формулою:

$$n_e = 2 \Sigma P_H / P_{Hmax}. \quad (2.13)$$

3. Визначається середнє навантаження вузла  $P_C$  та  $Q_C$ :

$$P_C = P_H K_B \quad - \text{ для активного навантаження;}$$

$$Q_C = P_C \operatorname{tg} \varphi \quad - \text{ для реактивного навантаження.}$$

Якщо середнє навантаження рахується для групи електричних приймачів, то коефіцієнт використання  $K_B$  береться з табличних даних (див. табл. 2.1).

Підсумувавши середнє навантаження по групах арифметичним складанням, отримуємо середнє навантаження на вузол  $\Sigma P_C$  та  $\Sigma Q_C$ .

4. Визначається  $K_B$  по вузлу

$$K_B = \frac{\sum P_C}{\sum P_H},$$

де  $\Sigma P_H$  – сумарна встановлена потужність по вузлу.

5. Визначається коефіцієнт максимуму  $K_M$ :

$$K_M = I + \frac{I}{\sqrt{n_e}} \left( 0,5 / K_B - 0,4 \right). \quad (2.14)$$

6. Визначається розрахункове навантаження за формулою:

$$P_P = K_M \Sigma P_C, \quad Q_P = L_M \Sigma Q_C, \quad (2.15)$$

де  $L_M$  – визначається за таблицею 2.3 залежно від  $K_B$  і  $n_e$ .

## 2.4 Порядок виконання роботи

Задана схема цехової електричної мережі, що живиться від трансформаторної підстанції (ТП) (рис. 2.1).

1. Викладач визначає варіант завдання та кількість груп електричних приймачів, вихідні дані яких подані в таблиці 2.4.

2. Вибирається основний більш придатний метод розрахунку (в даному випадку – статистичний метод, як більш простий метод) й визначається навантаження цехової трансформаторної підстанції. Розрахунок ведеться відповідно до порядку розрахунку, викладеного вище.

3. Відповідно до вихідних даних і використання програми розрахунку в середовищі Matlab проводимо визначення розрахункового навантаження трансформаторної підстанції.

4. Після розрахунків провести порівняння результатів в першому і другому варіантах.

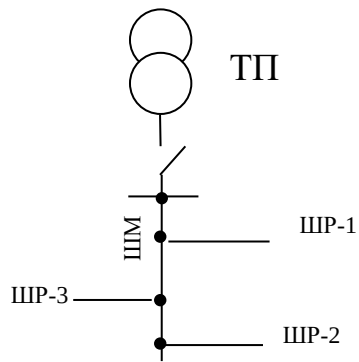


Рисунок 2.1 – Схема до розрахунку електричних навантажень

Таблиця 2.4 – Варіанти розрахунку

| Найменування вузлів живлення і груп ЕП | Варіант 1         |                             |       | Варіант 2         |                             |       | Варіант 3         |                             |       |
|----------------------------------------|-------------------|-----------------------------|-------|-------------------|-----------------------------|-------|-------------------|-----------------------------|-------|
|                                        | Кількість ЕП, $n$ | Встановлена потужність, кВт |       | Кількість ЕП, $n$ | Встановлена потужність, кВт |       | Кількість ЕП, $n$ | Встановлена потужність, кВт |       |
|                                        |                   | $P_{од}$                    | $P_H$ |                   | $P_{од}$                    | $P_H$ |                   | $P_{од}$                    | $P_H$ |
| <u>ШП-1</u><br>Металорізальні верстати | 38                | 5                           | 190   | 30                | 4                           | 120   | 45                | 5                           | 225   |
| Пресове обладнання                     | 13                | 15                          | 195   | 9                 | 10                          | 90    | 11                | 12                          | 132   |
| Електропіч                             | 1                 | 50                          | 50    | 4                 | 50                          | 200   | 2                 | 50                          | 100   |
| Вентилятори                            | 2                 | 4,5                         | 9     | 4                 | 4,5                         | 18    | 2                 | 4,5                         | 9     |
| <u>ШП-2</u><br>Верстати різні          | 60                | 15                          | 900   | 48                | 15                          | 720   | 72                | 12                          | 864   |
| Вентилятори                            | 4                 | 15                          | 60    | 6                 | 15                          | 90    | 10                | 15                          | 150   |
| Насоси                                 | 2                 | 75                          | 150   | 4                 | 60                          | 240   | 4                 | 75                          | 300   |
| Нагрівачі                              | 3                 | 30                          | 90    | 6                 | 42                          | 252   | 2                 | 30                          | 60    |
| <u>ШП-3</u><br>2 заливальні крани      |                   |                             |       |                   |                             |       |                   |                             |       |
| а) головний підйом (2 двигуни)         | 2                 | 100                         | 200   | 4                 | 100                         | 400   | 3                 | 100                         | 300   |
| б) допоміжний підйом                   | 6                 | 15                          | 90    | 5                 | 12                          | 60    | 4                 | 15                          | 60    |
| в) пересувний міст (2 двигуни)         | 2                 | 80                          | 160   | 4                 | 80                          | 320   | 3                 | 80                          | 240   |

## 2.5 Порядок вводу вихідних даних у середовище MATLAB і виконання розрахунку

Після запуску MATLAB , за допомогою провідника переходимо до папки, де знаходиться програма розрахунку навантаження цехової трансформаторної підстанції. На папку натискаємо двічі правою кнопкою мишки, у робочому просторі Matlab з'являються 2 файли: *Load\_calc\_gui2.fig* та *Load\_calc\_gui2.m*. Запускаємо файл *Load\_calc\_gui2.m*, лівою кнопкою відкриваємо меню (рис. 2.2) і правою кнопкою натискаємо на Run, з'являється вікно завдання параметрів програми розрахунків (рис. 2.3).

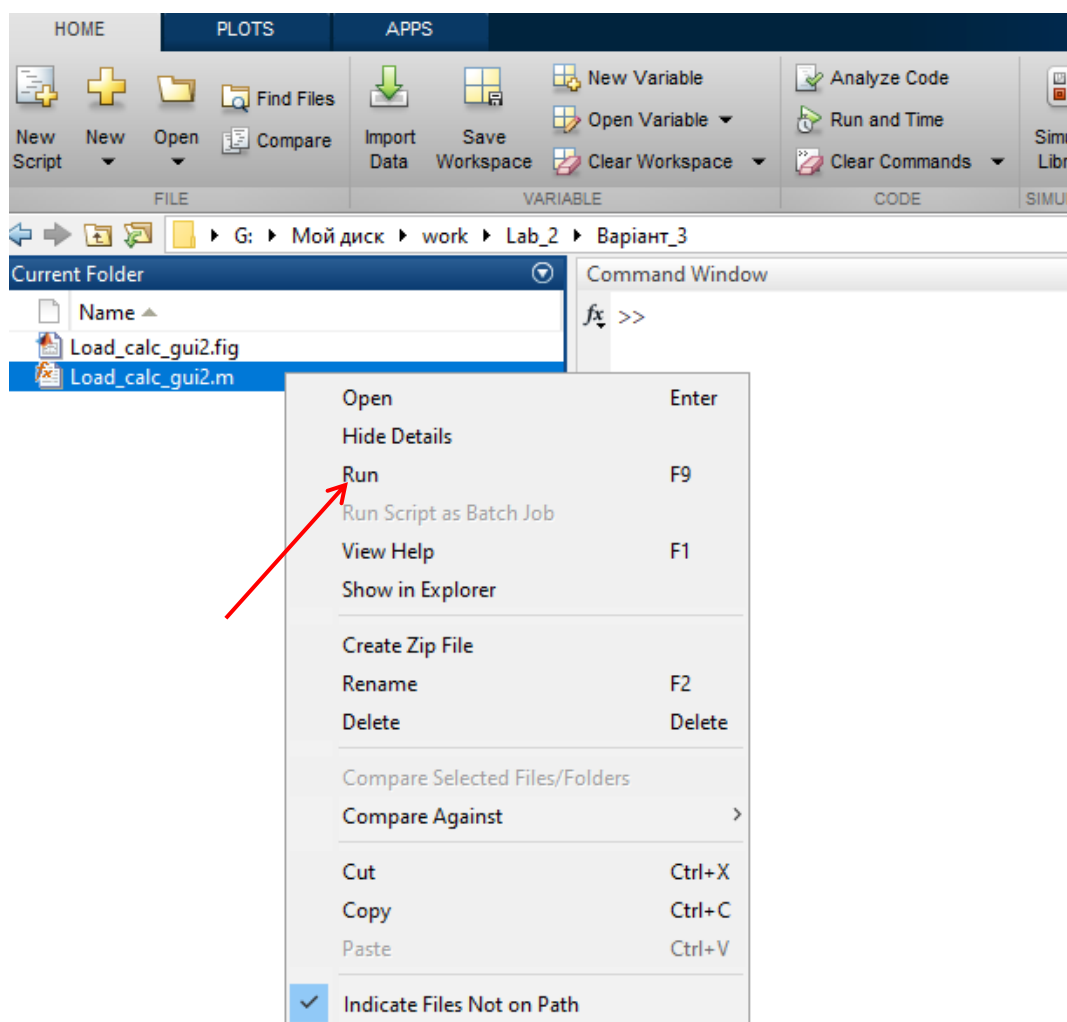


Рисунок 2.2 – Порядок запуску файлу MATLAB з розширенням .m

Рисунок 2.3 – Вікно для заповнення програми розрахунку навантаження

Заповнюємо вхідні дані розрахунку навантаження. Якщо ви від викладача отримали завдання що ваш варіант перший і груп електричних приймачів 4, ви починаєте введення значень в програму (рис. 2.3).

Деякі рекомендації при введенні даних в програму. При заповненні значень (кількість груп) – натисніть *Enter*, з'являється вікно, яке нагадує послідовність введення значень (рис. 2.4) (введіть номінальну напругу), натискаєте *OK*. Заходите в вікно номінальна напруга, якщо напруга 0,4 кВ, підтвердіть це, натиснувши на *Enter*, з'являється вікно, яке нагадує заповнення таблиці (рис. 2.5).

Натискаєте на *OK*, цим ви підтверджуєте готовність заповнення таблиці. Заповняйте (рекомендується) таблицю для всіх груп: спочатку потужність, потім кількість, коефіцієнт  $K_v$  і нарешті  $\cos(\phi)$ . Після того, коли буде заповнена вся таблиця (рис. 2.6) – натискаєте на кнопку *Розрахувати*. З'являються результати розрахунку (рис. 2.7). Можна звірити ще раз значення які вводились, якщо все вірно, підтверджуєте, натискаєте на *OK*.

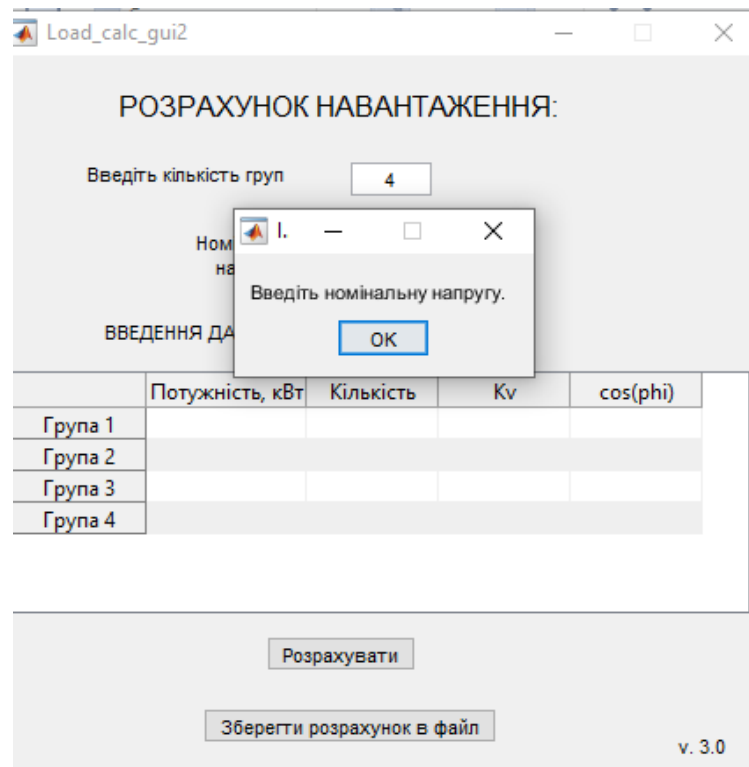


Рисунок 2.4 – Вікно, яке нагадує введення номінальної напруги

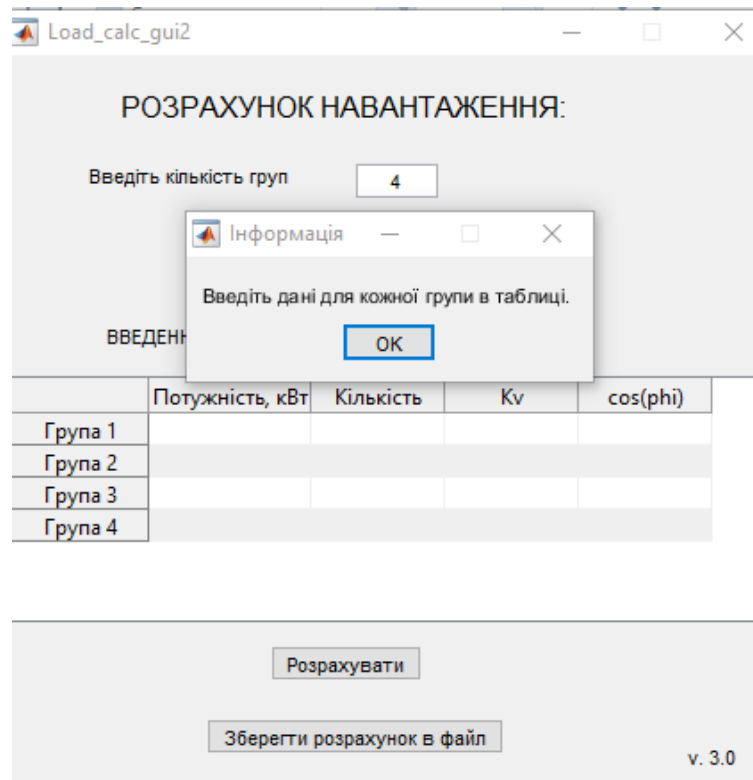


Рисунок 2.5 – Вікно, яке нагадує введення даних в таблицю

Load\_calc\_gui2

РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕННЯ:

Введіть кількість груп

Номінальна напруга  кВ

ВВЕДЕННЯ ДАНИХ НАВАНТАЖЕНЬ:

|         | Потужність, кВт | Кількість | Kv     | cos(phi) |
|---------|-----------------|-----------|--------|----------|
| Група 1 | 5               | 38        | 0.1700 | 0.6500   |
| Група 2 | 15              | 13        | 0.2000 | 0.6500   |
| Група 3 | 50              | 1         | 0.8000 | 0.8000   |
| Група 4 | 4.5000          | 2         | 0.7000 | 0.8000   |

Розрахувати

Зберегти розрахунок в файл

v. 3.0

Рисунок 2.6 – Вікно, яке заповнене на 4 групи електричних приймачів

Результати

=== Вхідні дані ===

Група 1: Потужність 5.00 кВт, Кількість 38, Kv 0.17, cos(phi) 0.65  
 Група 2: Потужність 15.00 кВт, Кількість 13, Kv 0.20, cos(phi) 0.65  
 Група 3: Потужність 50.00 кВт, Кількість 1, Kv 0.80, cos(phi) 0.80  
 Група 4: Потужність 4.50 кВт, Кількість 2, Kv 0.70, cos(phi) 0.80  
 \n

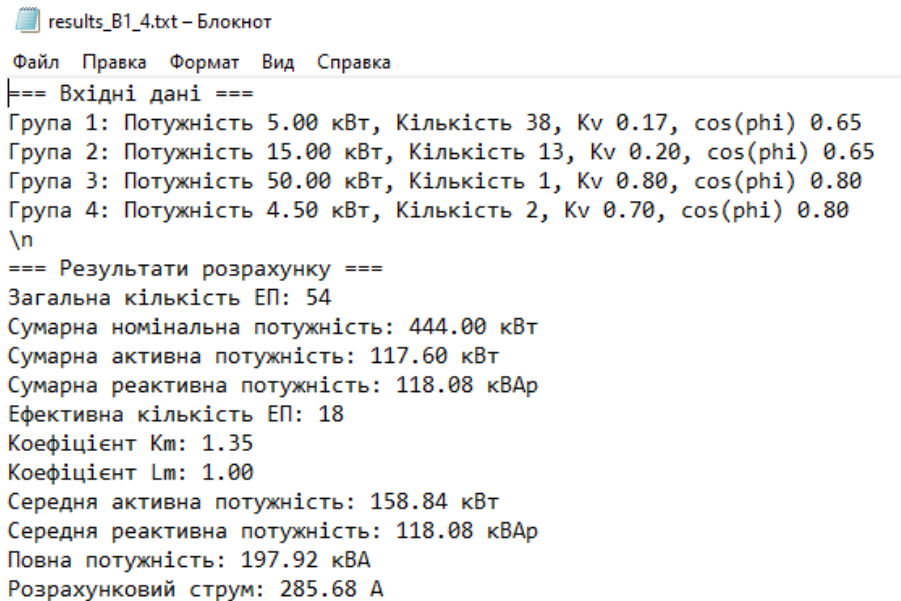
=== Результати розрахунку ===

Загальна кількість ЕП: 54  
 Сумарна номінальна потужність: 444.00 кВт  
 Сумарна активна потужність: 117.60 кВт  
 Сумарна реактивна потужність: 118.08 кВАр  
 Ефективна кількість ЕП: 18  
 Коефіцієнт K<sub>m</sub>: 1.35  
 Коефіцієнт L<sub>m</sub>: 1.00  
 Середня активна потужність: 158.84 кВт  
 Середня реактивна потужність: 118.08 кВАр  
 Повна потужність: 197.92 кВА  
 Розрахунковий струм: 285.68 А

OK

Рисунок 2.7 – Результати розрахунку навантаження

Наступним етапом натискаєте на кнопку *Зберегти результати в файл* і провідник запропонує зберегти результати на ваш комп'ютер в текстовому форматі – results.txt (рис. 2.8)



```
results_B1_4.txt – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
=== Вхідні дані ===
Група 1: Потужність 5.00 кВт, Кількість 38, Kv 0.17, cos(phi) 0.65
Група 2: Потужність 15.00 кВт, Кількість 13, Kv 0.20, cos(phi) 0.65
Група 3: Потужність 50.00 кВт, Кількість 1, Kv 0.80, cos(phi) 0.80
Група 4: Потужність 4.50 кВт, Кількість 2, Kv 0.70, cos(phi) 0.80
\n
=== Результати розрахунку ===
Загальна кількість ЕП: 54
Сумарна номінальна потужність: 444.00 кВт
Сумарна активна потужність: 117.60 кВт
Сумарна реактивна потужність: 118.08 кВАр
Ефективна кількість ЕП: 18
Коефіцієнт Km: 1.35
Коефіцієнт Lm: 1.00
Середня активна потужність: 158.84 кВт
Середня реактивна потужність: 118.08 кВАр
Повна потужність: 197.92 кВА
Розрахунковий струм: 285.68 А
```

Рисунок 2.8 – Результати розрахунку навантаження у текстовому форматі (.txt).

Результати можна копіювати і вставляти в форматі *Word* для оформлення звіту з лабораторної роботи.

## 2.6 Приклад розрахунку навантаження підстанції на 11 груп електричних приймачів

Відповідно до завдання викладача і таблиці варіантів розраховуємо навантаження по алгоритму, який викладений раніше, і результати заносимо в таблицю 2.5.

Аналогічно, як ми виконували розрахунки в програмі MATLAB на 4 групи, розраховуємо перший варіант на 11 груп.

Результати представлені на рисунку 2.8. Проаналізуйте результати розрахунків, які представлені в таблиці 2.5 та на рисунку 2.8. Зробіть висновки.

Таблиця 2.5 – розрахунок навантаження підстанції на 11 електричних груп

| Найменування вузлів і груп ЕП    | Кількість ЕП, п | Встановлена потужність, кВт |             | $K_B$       | $\cos \varphi / \operatorname{tg} \varphi$ | Середнє навантаження |              | $\eta_e$  | $K_M$          | Розрахункова потужність |              |              | Струм $I_p$ , А |
|----------------------------------|-----------------|-----------------------------|-------------|-------------|--------------------------------------------|----------------------|--------------|-----------|----------------|-------------------------|--------------|--------------|-----------------|
|                                  |                 | $P_{od}/P_{\max}$           | $P_n$       |             |                                            | $P_c$ , кВт          | $Q_c$ , кВАр |           |                | $P_p$ , кВт             | $Q_p$ , кВАр | $S_p$ , кВА  |                 |
| 1                                | 2               | 3                           | 4           | 5           | 6                                          | 7                    | 8            | 9         | 10             | 11                      | 12           | 13           | 14              |
| Металорізальні верстати          | 38              | 5                           | 190         | 0,17        | 0,65/1,17                                  | 32,3                 | 37,8         | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| Пресове обладнання               | 13              | 15                          | 195         | 0,2         | 0,65/1,17                                  | 39                   | 45,6         | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| Електропіч                       | 1               | 50                          | 50          | 0,8         | 0,8/0,75                                   | 40                   | 30           | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| Вентилятори                      | 2               | 4,5                         | 9           | 0,7         | 0,8/0,75                                   | 6,3                  | 4,7          | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| Верстати різні                   | 60              | 15                          | 900         | 0,2         | 0,65/1,17                                  | 180                  | 210          | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| Вентилятори                      | 4               | 15                          | 60          | 0,7         | 0,8/0,75                                   | 42                   | 31,5         | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| Насоси                           | 2               | 75                          | 150         | 0,75        | 0,8/0,75                                   | 112,5                | 84,4         | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| Нагрівачі                        | 3               | 30                          | 90          | 0,8         | 0,8/0,75                                   | 72                   | 54           | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| 2 заливальні крани               |                 |                             |             |             |                                            |                      |              |           |                |                         |              |              |                 |
| а) головний підйом (2 двигуни)   | 2               | 100                         | 200         | 0,2         | 0,5/1,73                                   | 40                   | 69,2         | —         | —              | —                       |              | —            | -               |
| б) допоміжний підйом             | 6               | 15                          | 90          | 0,2         | 0,5/1,73                                   | 18                   | 31,1         | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| в) пересувний підйом (2 двигуни) | 2               | 80                          | 160         | 0,2         | 0,5/1,73                                   | 32                   | 55,4         | —         | —              | —                       |              | —            | —               |
| <b>Разом</b>                     | <b>133</b>      | <b>-/80</b>                 | <b>2094</b> | <b>0,29</b> | —                                          | <b>614,1</b>         | <b>653,7</b> | <b>42</b> | <b>1,2/1,0</b> | <b>736,9</b>            | <b>653,7</b> | <b>985,0</b> | <b>1423</b>     |

=== Вхідні дані ===

Група 1: Потужність 5.00 кВт, Кількість 38,  $K_v$  0.17,  $\cos(\phi)$  0.65  
Група 2: Потужність 15.00 кВт, Кількість 13,  $K_v$  0.20,  $\cos(\phi)$  0.65  
Група 3: Потужність 50.00 кВт, Кількість 1,  $K_v$  0.80,  $\cos(\phi)$  0.80  
Група 4: Потужність 4.50 кВт, Кількість 2,  $K_v$  0.70,  $\cos(\phi)$  0.80  
Група 5: Потужність 15.00 кВт, Кількість 60,  $K_v$  0.20,  $\cos(\phi)$  0.65  
Група 6: Потужність 15.00 кВт, Кількість 4,  $K_v$  0.70,  $\cos(\phi)$  0.80  
Група 7: Потужність 75.00 кВт, Кількість 2,  $K_v$  0.75,  $\cos(\phi)$  0.80  
Група 8: Потужність 30.00 кВт, Кількість 3,  $K_v$  0.80,  $\cos(\phi)$  0.80  
Група 9: Потужність 100.00 кВт, Кількість 2,  $K_v$  0.20,  $\cos(\phi)$  0.50  
Група 10: Потужність 15.00 кВт, Кількість 6,  $K_v$  0.20,  $\cos(\phi)$  0.50  
Група 11: Потужність 80.00 кВт, Кількість 2,  $K_v$  0.20,  $\cos(\phi)$  0.50  
\n

=== Результати розрахунку ===

Загальна кількість ЕП: 133  
Сумарна номінальна потужність: 2094.00 кВт  
Сумарна активна потужність: 614.10 кВт  
Сумарна реактивна потужність: 654.29 кВАр  
Ефективна кількість ЕП: 42  
Коефіцієнт  $K_m$ : 1.20  
Коефіцієнт  $L_m$ : 1.00  
Середня активна потужність: 737.75 кВт  
Середня реактивна потужність: 654.29 кВАр  
Повна потужність: 986.09 кВА  
Розрахунковий струм: 1423.30 А

Рисунок 2.9 – Результати розрахунку навантаження трансформаторної підстанції на 11 груп електричних приймачів

## 2.7 Оформлення звіту

Звіт повинен містити розрахункову схему й вихідні дані, а також розрахункові навантаження підстанції, які ви отримали вручну та за допомогою комп'ютерної програми. Проаналізуйте відхилення розрахункових навантажень. Зробіть висновки по роботі.

# **З ВИБІР КОМПЕНСУЮЧОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ВПЛИВУ НА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

## **3.1 Мета роботи**

Метою роботи є вивчення споживання навантаження. Як навантаження, використовується асинхронний двигун, який споживає також і реактивну потужність. Робота присвячена і вибору батареї конденсаторів для компенсації реактивної потужності і проведенню оцінювання зниження втрат в системах електропостачання.

## **3.2 Загальні відомості**

Електричні приймачі промислових підприємств та міст для своєї роботи потребують як активної ( $P$ ), так і реактивної ( $Q$ ) потужності. Реактивна потужність, як і активна виробляється синхронними генераторами й передається по системі електропостачання до споживачів.

Основними електричними приймачами реактивної потужності на промислових підприємствах є асинхронні двигуни (65-70 %), 20-25 % приходить на трансформатори, 10 % – на всі інші електричні приймачі.

Знижуючи споживання приймачами реактивної потужності, можна зменшити встановлену потужність генератора, трансформаторну потужність підстанції, збільшити пропускну спроможність системи електропостачання, не збільшуючи розрізу кабелів, дротів та інших струмопровідних частин.

Втрати активної електроенергії для лінії електропостачання:

$$\Delta P_{\text{л}} = 3 \cdot I_e^2 \cdot R_0 \cdot l \cdot 10^{-3}, \text{кВт}, \quad (3.1)$$

де  $I_e$  – ефективне значення струму лінії, А;

$R_0$  – погонне значення активного опору проводу (жили) лінії електропостачання, Ом/км;

$l$  – довжина лінії, км.

Погонне значення опору визначається за формулою:

$$R_0 \approx \rho \frac{l}{s}, \quad (3.2)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу лінії, Ом\*мм<sup>2</sup>/км (для алюмінію – 31,5; для міді – 18,7);  $s$  – переріз проводу (кабелю), мм<sup>2</sup>.

Втрати реактивної електроенергії для лінії електропостачання:

$$\Delta Q_l = 3 \cdot I_e^2 \cdot X_0 \cdot l \cdot 10^{-3}, \text{ кВар}, \quad (3.3)$$

де  $X_0$  – погонний індуктивний опір лінії, Ом/км

Наближено  $X_0$  дорівнює 0,06–0,08 Ом/км – для кабелів; 0,09 Ом/км – для ізольованих проводів; 0,3 Ом/км – для повітряних ліній напругою 0,38 кВ; 0,4 Ом/км – для повітряних ліній напругою 10 кВ.

Втрати активної потужності в трансформаторі розраховують за формулою:

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \left( \frac{S_E}{S_{HT}} \right)^2, \quad (3.4)$$

де  $\Delta P_{xx}$  – потужність холостого ходу трансформатора, кВт;

$\Delta P_{кз}$  – потужність короткого замикання трансформатора, кВт;

$S_E$  – навантаження трансформатора, кВА;

$S_{HT}$  – номінальна потужність трансформатора, кВА.

Втрати реактивної потужності в трансформаторі знаходять за формулою:

$$\Delta Q_T = \frac{i_{xx}}{100} \cdot S_{HT} + \frac{u_{кз}}{100} \cdot S_{HT} \left( \frac{S_E}{S_{HT}} \right)^2, \quad (3.5)$$

де  $i_{xx}$ ,  $u_{кз}$  – струм холостого ходу та напруга короткого замикання трансформатора, %.

Передача значної реактивної потужності по лініях та через трансформатори не вигідна, оскільки:

- виникають додаткові втрати активної потужності й енергії у всіх елементах системи електропостачання, зумовлені завантаженням їх реактивної потужності:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta P_P, \quad (3.6)$$

де  $P$ ,  $Q$  – активна і реактивна потужності відповідно, що передаються по елементах мережі опором  $R$ ;

$\Delta P_a$ ,  $\Delta P_p$  – втрати активної потужності, викликані протіканням відповідно активної й реактивної потужностей по елементах мережі.

- виникають додаткові втрати напруги

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} = \Delta U_a + \Delta U_p, \quad (3.7)$$

де  $R$ ,  $X$  – активний і реактивний опори відповідно елементів мережі електропостачання;

$\Delta U_a$ ,  $\Delta U_p$  – втрати напруги, обумовлені проходженням відповідно активної і реактивної потужності по елементах мережі.

- завантаження реактивною потужністю ліній електропередачі й трансформаторів зменшує їх пропускну спроможність і потребує додаткових заходів по збільшенню пропускну спроможності мережі.

Наведені міркування змушують, наскільки це технічно й економічно доцільно, наближати джерела реактивної потужності до місць її споживання. Це розвантажує значну частину ліній електропередачі і трансформаторів від реактивної потужності, що рівносильне збільшенню коефіцієнта потужності.

Величина споживання реактивної потужності асинхронними двигунами залежить від коефіцієнту завантаження й номінального коефіцієнту потужності двигуна.

При номінальному завантаженні й номінальній нарузі асинхронний двигун споживає реактивну потужність:

$$Q_H = \frac{P_H}{\eta_{\kappa\delta}} \operatorname{tg} \varphi_H, \quad (3.8)$$

де  $\eta_{\kappa\delta}$  – коефіцієнт корисної дії двигуна при повному навантаженні;

$P_H$  – номінальна активна потужність двигуна, кВт;

$\operatorname{tg} \varphi_H$  – номінальний коефіцієнт потужності двигунів.

Реактивна потужність, що споживається двигуном з мережі при х. х. визначається:

$$Q_{xx} \approx \sqrt{3} U_H I_{xx}, \quad (3.9)$$

де  $I_{xx}$  – струм х. х. асинхронного двигуна.

Збільшення споживання реактивної потужності при повному навантаженні двигуна у порівнянні з холостим ходом складає:

$$\Delta Q_H = Q_H - Q_{xx} \approx \frac{P_H}{\eta_{\kappa\delta}} \operatorname{tg} \varphi_H - \sqrt{3} U_H I_{xx}. \quad (3.10)$$

При навантаженнях асинхронного двигуна, менших за номінальні, приріст споживання реактивної потужності у порівнянні з холостим ходом пропорційний квадрату коефіцієнта завантаження двигуна:

$$\Delta Q = K_3^2 \Delta Q_H, \quad (3.11)$$

де  $K_3 = \frac{P}{P_H}$  – коефіцієнт завантаження двигуна.

Таким чином, реактивна потужність, що споживається двигуном при довільному навантаженні:

$$Q = Q_{xx} + \Delta Q_H K_3^2, \quad (3.12)$$

а коефіцієнт потужності асинхронного двигуна при довільному навантаженні дорівнює:

$$\cos \varphi_\delta = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{Q_{xx} + \Delta Q_H K_3^2}{P_H K_3} \right)^2}}. \quad (3.13)$$

З вище викладених формул витікає, що коефіцієнт потужності двигуна зменшується при зменшенні його завантаження. Заходи по підвищенню коефіцієнту потужності можна розділити на дві частини: зменшити споживання реактивної потужності приймачем без використання компенсуючих пристроїв і з використанням компенсуючи пристроїв. Одним із заходів, що не потребує використання компенсуючих пристроїв є заміна мало завантажених двигунів двигунами меншої потужності. Однак цей захід потребує економічного обґрунтування. Для підвищення коефіцієнту потужності й зменшення

завантаження реактивною потужністю елементів системи вдаються до встановлення компенсуючих пристроїв, у якості яких найчастіше використовують статичні конденсатори, які встановлюють поблизу споживання реактивної потужності. Якщо необхідно компенсувати значення коефіцієнту реактивної потужності до будь-якої заданої величини, потужність батареї конденсаторів визначається з співвідношення:

$$Q_{\phi} = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \quad (3.14)$$

де  $Q_{\phi}$  – реактивна потужність батареї конденсаторів, кВар;

$P$  – активна потужність споживача електроенергії, кВт;

$tg\varphi_1$  – фактичне значення коефіцієнту потужності;

$tg\varphi_2$  – задане значення коефіцієнту потужності реактивної потужності.

### **3.3 Опис віртуальної фізичної лабораторної установки з використанням блоків Simulink (Matlab)**

На рисунку 3.1 представлена віртуальна фізична установка з використанням блоків Simulink (Matlab). В якості джерела електроенергії використовується блок Three-Phase Source (система 10 кВ), який налагоджений на напругу  $U_n = 10$  кВ. Для лабораторної установки будемо використовувати напругу  $U_n = 0,4$  кВ, тому встановлюємо трансформатор 10/0,4 кВ (ТМ 63), а в модель Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type занесене параметри цього трансформатора. В модель Merezha elektropostachannya занесені параметри повітряної мережі 0,4 кВ,  $R = 0,42$  Ом,  $X = 0,3$  Ом. Для виміру струму у фазі А застосовуються блоки CRMS, Current Measurement, а результат можна спостерігати на Display\_2. Для виміру активної ( $P$ ), реактивної ( $Q$ ) та повної потужності ( $S$ ) використовується блок Measurements\_1, а спостерігаємо результат на Display\_1. В умовах реальних мереж можна використовувати Pure BlackBox, високоякісний аналізатор якості електроенергії класу А, або інші аналізатори параметрів електричної мережі. В лабораторній установці, як навантаження електричної мережі, використовується асинхронний двигун (Asynchronous Machine SI Units) як найбільш масовий приймач електричної

енергії і який споживає багато реактивної енергії. Вхід три фази (А, В, С),  $T_m$  – це параметр виражається в Н•м (Ньютон-метри) та використовується для моделювання зовнішнього механічного навантаження (Mechani. Loadcal Torque). Крім входів, модель має векторний «інформаційний» вихід  $m$ , який передбачає подальшу обробку або фіксацію сигналів засобами базових блоків *Simulink*. В нашій роботі осцилограф Rotor speed фіксує швидкість обертання ротора (об/хв.). Для подальших розрахунків будуть потрібні деякі залежності. Потужність АД в моделі становить 18,5 кВт, це вихідна механічна потужність на валу  $P_2$ . Швидкість обертання – близько 1450 об/хв.. Коефіцієнт корисної дії – 0,91. Розраховується:

$$\eta_{\kappa\partial} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (3.15)$$

де  $P_2$  – вихідна потужність на валу (18,5 кВт);

$P_1$  – активна споживана електрична електроенергія, кВт.

Для покращення коефіцієнта потужності в мережі електропостачання використовується конденсаторна батарея (Kondensatorna batareya), схема якої показана на рисунку 3.2.

### 3.4 Порядок виконання роботи

Батарея конденсаторів (Kondensatorna batareya) на початок проведення дослідів повинна бути відключена. Після запуску моделі, лівою кнопкою мишки виділяємо об'єкт Kondensatorna batareya, потім правою відкриваємо меню і натискаємо на *Comment Out*, батарея відключається від схеми. Для того щоб підключити батарею, лівою кнопкою мишки виділяємо об'єкт, а потім правою – відкриваємо меню і натискаємо на *Uncomment*. Від викладача отримуємо значення  $T_m$  (для моделювання зовнішнього механічного навантаження) та запускаємо модель (Run).

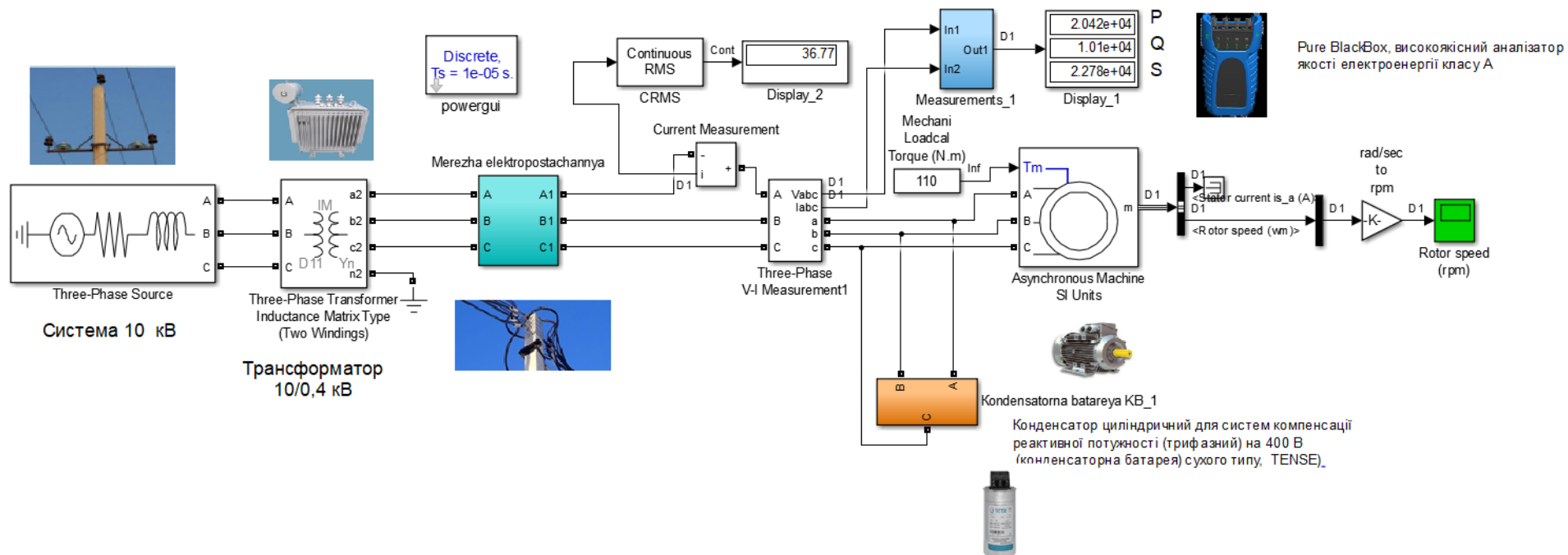


Рисунок 3.1 – Віртуальна фізична установка лабораторної роботи

В таблицю 3.1 в експеримент (Номінальне навантаження, (компенсація – відсутня)) записуємо показання приборів:  $T_m$  (н\*м); струм  $I_\phi$ , А;  $P$ , кВт;  $Q$ , кВар;  $S$ , кВА.

В таблицю 3.2 (Таблиця розрахунків) вносимо значення відповідно наступного алгоритму:

1. Визначаємо втрати активної потужності в лінії  $\Delta P_{\text{л}}$  по формулі 3.1.
2. Визначаємо втрати реактивної потужності в лінії  $\Delta Q_{\text{л}}$  по формулі 3.3.
3. Визначаємо втрати повної потужності в лінії  $\Delta S_{\text{л}} = \sqrt{\Delta P_{\text{л}}^2 + \Delta Q_{\text{л}}^2}$ .
4. Визначаємо  $\cos \varphi / \text{tg } \varphi$  системи електропостачання після підключення асинхронного двигуна до мережі 0,4 кВ:

$$\cos \varphi_c = \frac{P_1}{S_1}, \quad (3.16)$$

де  $P_1$  – споживана електрична електроенергія, кВт;

$S_1$  – споживана повна потужність електроенергії системою електропостачання, кВА.

$$\text{tg } \varphi_c = \frac{Q_1}{P_1}, \quad (3.17)$$

де  $Q_1$  – споживана реактивна потужність електроенергії системи електропостачання, кВар.

5. Визначаємо коефіцієнт корисної дії  $\eta_{\text{кд}}$  двигуна по формулі 3.15.
6. Визначаємо потужність батареї конденсаторів по формулі 3.14, кВар
7. Знаходимо ємність батареї конденсаторів (з'єднана у трикутник) для трифазної мережі:

$$C_{\phi} = \frac{Q_{\phi}}{3 \cdot 2\pi \cdot f \cdot U_n^2}, (\phi), \quad (3.18)$$

де  $f$  – частота мережі, Гц;

$U_n$  – лінійна напруга мережі, В

8. Визначаємо ємність одного конденсатора  $C_n$  у схемі рисунок 3.2. та виставляємо це в моделі

10. Запускаємо модель та робимо заміри при ввімкненому конденсаторі (компенсація – підключена).

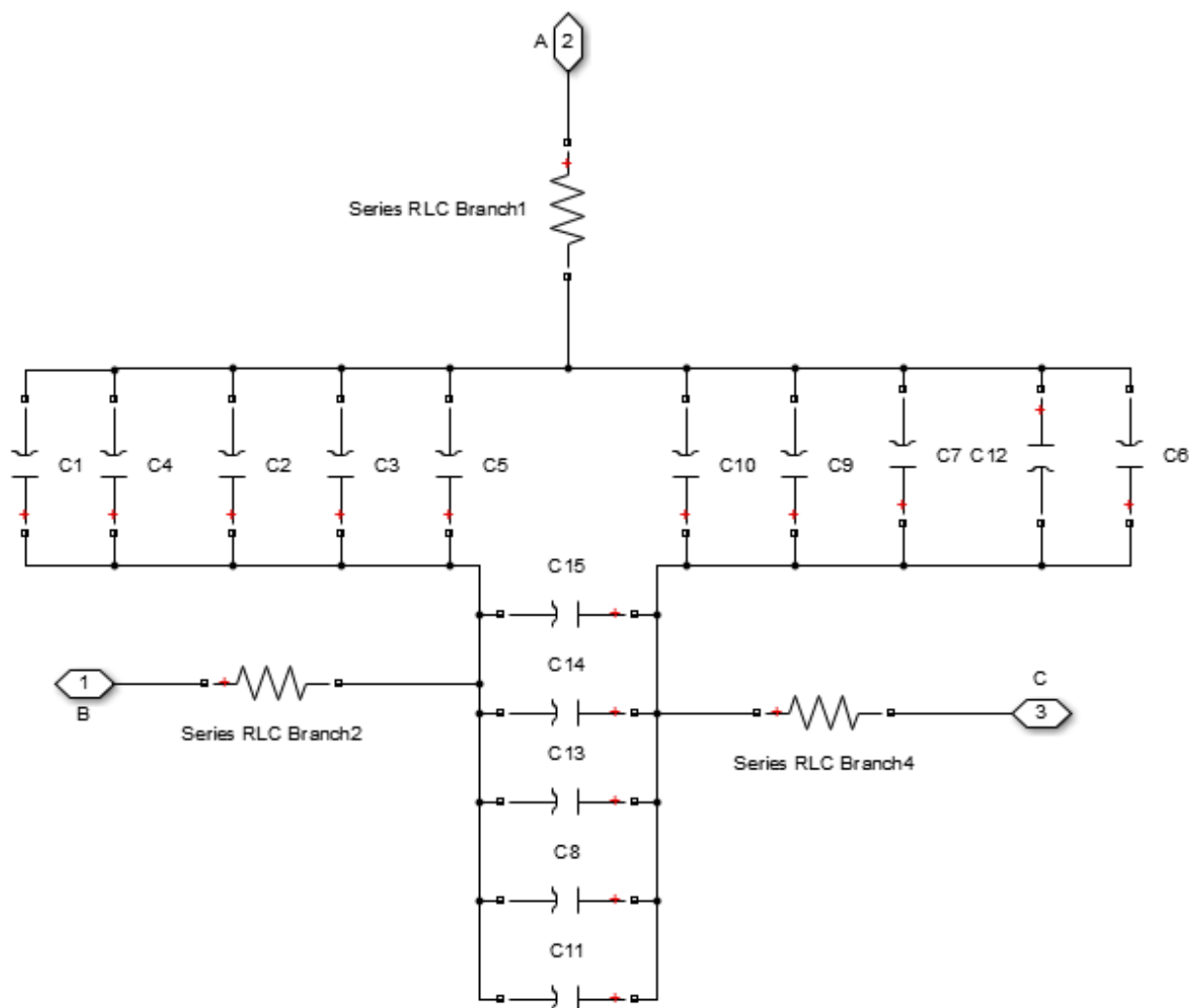


Рисунок 3.2 – Схема конденсаторної батареї

Таблиця 3.1 – Таблиця вимірів

| Експеримент                                   | Параметри   |            |             |              |             |
|-----------------------------------------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|
|                                               | $T_m$ (Н*М) | Струм I, А | $P_1$ , кВт | $Q_1$ , кВар | $S_1$ , кВА |
| 1                                             | 2           | 3          | 4           | 5            | 6           |
| Навантаження,<br>(компенсація –<br>відсутня)  |             |            |             |              |             |
| Навантаження<br>(компенсація –<br>підключена) |             |            |             |              |             |

Таблиця 3.2 – Таблиця розрахунків

| Експеримент                                         | Параметри                     |                                |                               |                          |                                            |                                            |                         |                        |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|------------------------|
|                                                     | $\Delta P_{\text{л}},$<br>кВт | $\Delta Q_{\text{л}},$<br>кВАр | $\Delta S_{\text{л}},$<br>кВА | $\eta_{\text{кд}},$<br>% | $\cos \varphi_1$<br>$/\text{tg} \varphi_1$ | $\cos \varphi_2$<br>$/\text{tg} \varphi_2$ | $Q_{\text{б}},$<br>кВАр | $C_{\text{б}},$<br>мкф |
| 1                                                   | 2                             | 3                              | 4                             | 5                        | 6                                          | 7                                          | 8                       | 9                      |
| Номінальне навантаження, (компенсація – відсутня)   |                               |                                |                               |                          |                                            |                                            |                         |                        |
| Номінальне навантаження, (компенсація – підключена) |                               |                                |                               |                          |                                            |                                            |                         |                        |

Заданий коефіцієнт потужності  $\cos \varphi_2$  задається викладачем. Необхідна ємність конденсаторів у кожній фазі при з'єднанні трикутником визначається по формулі 3.18. Оскільки кожна фаза моделі складається із 5 конденсаторів, то ємність конденсатора визначається:

$$C_n = \frac{C_{\text{б}}}{5}. \quad (3.19)$$

Після визначення ємності конденсаторів необхідно для підвищення коефіцієнта потужності до заданого значення ввести значення у модель, блок (Kondensatorna batareya).

### 3.5. Приклад виконання лабораторної роботи

Викладач задає групі студентів значення  $T_{\text{м}}$  (механічне навантаження). Наприклад, це буде 110 н\*м (ньютон\*метрах). В параметри лінії (Merezha elektropostachannya) внесено опір  $R = 0,42$  Ом і індуктивність  $H = 0,00095$  Гн ( $X = \omega * L$ , тоді  $X = 314 * 0,00095 = 0,3$  Ом). Ці параметри за час роботи моделі не змінюються. Запускаємо Matlab – натискаємо на  MATLAB. Вказуємо шлях де знаходиться файл з моделлю і її відкриваємо. В блок Mechani Loadcal Torque (N.m) вносимо механічне навантаження, яке ви отримали від викладача (110

н\*м). Час розрахунку 10 с (за замовчуванням) вже встановлено. Запускаємо саму модель (натискаємо на Run – розрахувати). Заносимо в таблицю вимірів 3.3 показники приборів віртуальної моделі.

Таблиця 3.3 – Таблиця вимірів (приклад)

| Експеримент                             | Параметри   |               |             |              |             |
|-----------------------------------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
|                                         | $T_m$ (н*м) | Струм $I$ , А | $P_1$ , кВт | $Q_1$ , кВар | $S_1$ , кВА |
| Навантаження, (компенсація – відсутня)  | 110         | 42,2          | 20,56       | 15,34        | 25,65       |
| Навантаження (компенсація – підключена) | 110         | 36,28         | 20,41       | 9,54         | 22,53       |

Розрахуємо втрати потужності в мережі електропостачання по формулам 3.1 і 3.3.

Активна:

$$\Delta P_{\lambda} = 3 \cdot I_e^2 \cdot R_0 \cdot l \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 42,2^2 \cdot 0,42 \cdot 10^{-3} = 2,24 \text{ кВт}.$$

Реактивна:

$$\Delta Q_{\lambda} = 3 \cdot I_e^2 \cdot X_0 \cdot l \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 42,2^2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 1,6 \text{ кВар}.$$

Повна:

$$\Delta S_{\lambda} = \sqrt{\Delta P_{\lambda}^2 + \Delta Q_{\lambda}^2} = \sqrt{2,24^2 + 1,6^2} = 2,75 \text{ кВА}.$$

По формулі 3.15 розраховуємо коефіцієнт корисної дії двигуна:

$$\eta_{\kappa\delta} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{18,5}{20,56} \cdot 100 \approx 90\%.$$

Визначаємо  $\cos \varphi / \tan \varphi$  системи електропостачання мережі 0,4 кВ:

$$\cos \varphi_c = \frac{P_1}{S_1} = \frac{20,56}{25,65} \approx 0,8.$$

$$\tan \varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = \frac{\sqrt{1 - 0,64}}{0,8} = 0,75.$$

Від викладача отримуємо значення коефіцієнту реактивної потужності ( $\cos \varphi = 0,92$ ) і визначаємо  $\tan \varphi \approx 0,43$ .

По формулі 3.14 знаходимо потужність батареї конденсаторів:

$$Q_{\phi} = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = 20,56 \cdot (0,75 - 0,43) = 6,58 \text{ кВАр}.$$

Знаходимо ємність батареї конденсаторів (з'єднана у трикутник) для трифазної мережі (на фазу):

$$C_{\phi} = \frac{Q_{\phi}}{3 \cdot 2\pi \cdot f \cdot U_n^2} = \frac{6,58 \cdot 10^3}{3 \cdot 314 \cdot 380^2} = 48,3 \cdot 10^{-6} (\phi) = 48,3 \text{ мкф}.$$

Оскільки кожна фаза моделі складається із 5 батарей, то кожна батарея визначається:

$$C_n = \frac{C_{\phi}}{5} = \frac{48,3}{5} \approx 9,6 (\text{мкф}).$$

Завантажуємо це значення в модель (у кожен ємність батареї конденсаторів), попередньо активізувавши саму батарею (дивись раніше).

Всі результати розрахунків заносимо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Таблиця розрахунків (приклад)

| Експеримент                                   | Параметри                     |                                |                               |                          |                                                     |                                                     |                     |                    |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|--------------------|
|                                               | $\Delta P_{\text{л}},$<br>кВт | $\Delta Q_{\text{л}},$<br>кВАр | $\Delta S_{\text{л}},$<br>кВА | $\eta_{\text{кд}},$<br>% | $\cos \varphi_1 /$<br>$\operatorname{tg} \varphi_1$ | $\cos \varphi_2 /$<br>$\operatorname{tg} \varphi_2$ | $Q_{\phi},$<br>кВАр | $C_{\phi},$<br>мкф |
| 1                                             | 2                             | 3                              | 4                             | 5                        | 6                                                   | 7                                                   | 8                   | 9                  |
| Навантаження<br>(компенсація<br>– відсутня)   | 2,25                          | 1,605                          | 2,76                          | 90                       | 0,8<br>/0,75                                        | 0,92<br>/0,43                                       | -                   | -                  |
| Навантаження<br>(компенсація<br>– підключена) | 1,66                          | 1,18                           | 2,03                          | 90,6                     | 0,91<br>/0,45                                       | 0,92<br>/0,43                                       | 6,58                | 48,3               |

Запускаємо модель і результати заносимо в таблицю 3.3 – Таблиця вимірів (приклад) в строку «Навантаження (компенсація – підключена)».

Проводимо розрахунки для режиму – компенсація підключена.

Втрати потужності в мережі електропостачання:

$$\Delta P_{\text{л}} = 3 \cdot I_e^2 \cdot R_0 \cdot l \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 36,28^2 \cdot 0,42 \cdot 10^{-3} = 1,66 \text{ кВт},$$

$$\Delta Q_{\text{л}} = 3 \cdot I_e^2 \cdot X_0 \cdot l \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 36,28^2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 1,18 \text{ кВАр},$$

$$\Delta S_{\text{л}} = \sqrt{\Delta P_{\text{л}}^2 + \Delta Q_{\text{л}}^2} = \sqrt{1,66^2 + 1,18^2} = 2,03 \text{ кВА}.$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна:

$$\eta_{\text{кд}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{18,5}{20,41} \cdot 100 \approx 90,6\%.$$

Визначаємо  $\cos \varphi / \operatorname{tg} \varphi$  системи електропостачання мережі 0,4 кВ, коли компенсація підключена:

система електропостачання мережі 0,4 кВ,

$$\cos \varphi_c = \frac{P_1}{S_1} = \frac{20,41}{22,53} \approx 0,906,$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = \frac{\sqrt{1 - 0,82}}{0,906} \approx 0,455.$$

Порівняйте систему електропостачання асинхронного двигуна без компенсації і з компенсацією. Зробіть висновки по роботі.

### Контрольні питання

1. Як впливають втрати потужності при компенсації реактивної потужності?
2. Як міняється коефіцієнт потужності мережі від навантаження на валу двигуна?
3. Вигідна чи ні передача реактивної потужності по системах електропостачання?
4. Як визначити потужність батареї конденсаторів для компенсації реактивної потужності?

## **4 ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПЕТЛІ ФАЗА-НУЛЬ І СТРУМІВ ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ ДО 1000 В**

### **4.1 Мета роботи**

Спрощене визначення струмів і перевірка умови спрацьовування захисних апаратів при однофазних замиканнях в мережах напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю.

### **4.2 Загальні відомості**

#### **4.2.1 Зміст роботи**

У електричних мережах напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю повинно бути забезпечене надійне відключення захисним апаратом однофазного короткого замикання. Це диктується вимогами техніки безпеки, оскільки однофазне замикання (замикання на корпус) для таких мереж пов'язане з появою напруги в нульовому дроті, потенціал якого повинен бути близький до нуля або рівний нулю.

Розрахунковими точками для визначення струму короткого замикання є найбільш електрично віддалені точки мережі.

Найменша величина однофазного струму короткого замикання може бути визначена по наближеній формулі

$$I_{к.з.} = \frac{U_{\phi}}{Z_n + Z_m / 3}, \quad (4.1)$$

де  $U_{\phi}$  – фазна напруга мережі, В;

$Z_m$  – повний опір знижувального трансформатора струму заземлення на корпус, Ом;

$Z_n$  – повний опір ланцюга фазний провідник – нульовий провідник (захисний або робочий), Ом

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2}, \quad (4.2)$$

де  $R_n$  – активний опір фазного ( $R_\phi$ ) і нульового ( $R_H$ ) провідників, Ом;

$X_n$  – індуктивний опір ланцюга фаза-нуль, Ом.

$$R_n = R_\phi + R_H. \quad (4.3)$$

Надійне відключення захисним апаратом однофазного короткого замикання буде забезпечено за умови виконання співвідношення

$$K_3 I_\phi \leq I_{K.3.}, \quad (4.4)$$

де  $K_3$  – припустима кратність мінімального струму короткого замикання ( $I_{K.3.}$ ) по відношенню до номінального струму плавкої вставки запобіжника або струму спрацьовування розчіплювача автомата  $I_B$ .

Правила пристрою електроустановок регламентують наступні коефіцієнти, що забезпечують швидке спрацьовування захисту при однофазних коротких замиканнях в кінці ділянки лінії, що захищається:

- $K_3 \geq 3$  – при захисті запобіжниками або автоматичними вимикачами з назад-залежною від струму характеристикою;
- при захисті автоматичними вимикачами, що мають тільки електромагнітний розчіплювач (відсічення),  $K_3 = 1,1 K_P$ , де  $K_P$  – коефіцієнт розкиду (за заводськими даними). За відсутності заводських даних дозволяється приймати  $K_3 \geq 1,4$  для автоматичних вимикачів з номінальним струмом до 100 А, для інших автоматичних вимикачів  $K_3 = 1,25$ .

В процесі експлуатації мережі часто виникає необхідність в уточненні опору ланцюга фазний провідник – нульовий провідник для установки, що діє. Це завдання може бути вирішене оперативно за допомогою приладу типу М-417 без зняття напруги з досліджуваної ділянки мережі.

#### 4.2.2 Опис і інструкція з експлуатації приладу для вимірювання опору ланцюга фаза – нуль М-417

Прилад М-417 призначений для вимірювання опору ланцюга фаза – нуль в діапазоні від 0,1 до 1,6 Ом без відключення живлячого джерела струму. Він забезпечує перевірку умов електробезпеки роботи на електроустановці, що живиться від мережі змінного струму з лінійною напругою 380 В частотою 50 Гц з глухозаземленою нейтраллю живлячого трансформатора.

##### *Технічна характеристика*

Діапазон показань, Ом 0 - 2

Робочий діапазон вимірювань, Ом 0,1-1,6

Основні похибки у відсотках

від довжини робочої частини шкали  $\pm 10$

Прилад забезпечує автоматичне розмикання вимірювального ланцюга при появі на корпусі контрольованого об'єкту небезпечного потенціалу 36 В і більш (опір ланцюга фаза – нуль більше 2 Ом). Час розмикання не перевищує 0,3 с.

Споживана потужність:

у режимі підготовки – не більше 30 ВА;

у режимі вимірювання – не більше 4,5 кВА.

На передній панелі приладу розташовані: відліковий пристрій, кнопка «ПЕРЕВІРКА КАЛІБРУВАННЯ», кнопка «ВИМІРЮВАННЯ», ручка «КАЛІБРУВАННЯ», сигнальні лампи « $Z < 2$  Ом», « $Z > 2$  Ом» і затиск для підключення приладу. Електрична принципова схема приладу зображена на рисунку 4.1.

Принцип дії приладу заснований на вимірюванні падіння напруги на відомому опорі. При підключенні приладу до контрольованого об'єкту заряджає конденсатор С3, який при натисканні кнопки «ПЕРЕВІРКА КАЛІБРУВАННЯ» розряджається через обмотку реле Р2. Реле Р2 спрацьовує і контактами 7, 8 включає дільника напруги схеми калібрування, контактами 1, 2

шунтує сигнальну лампу « $Z > 2 \text{ Ом}$ », контактами 3, 4 готує до роботи реле P1 і контактами 10, 11 замикає ланцюг самоблокування.

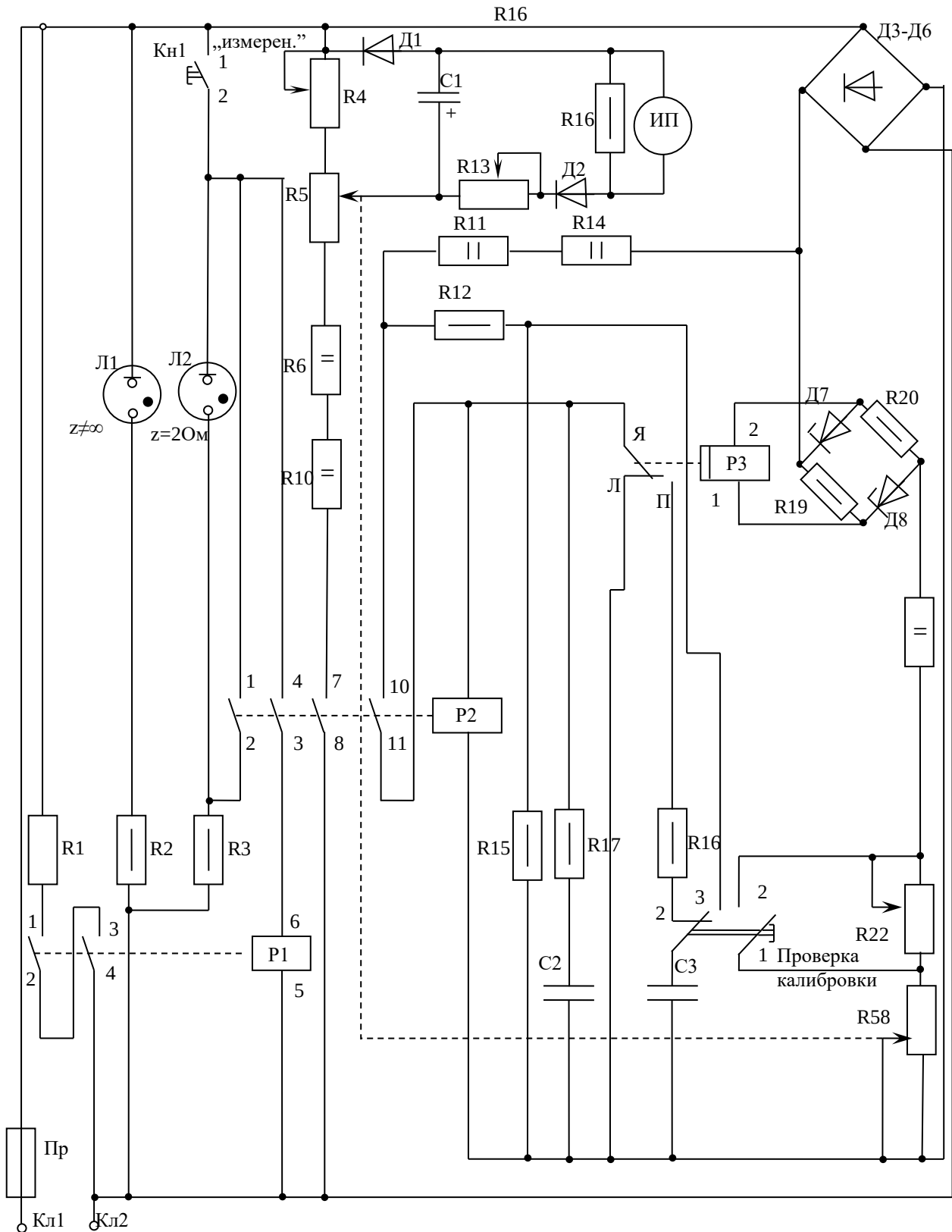


Рисунок 4.1 – Принципова схема приладу М-417

Вимірювання проводять при натисканні кнопки «ВИМІРЮВАННЯ». Спрацьовує реле Р1 і своїми контактами включає у вимірювальний ланцюг реостат навантаження R1. Величина падіння напруги на резисторі R1 є різницею між фазною напругою і падінням напруги в ланцюзі фаза – нуль.

Оскільки опір резистора навантаження R1 є незмінним, падіння напруги тут залежить від величини опору ланцюга фаза – нуль, що дозволяє відградувати шкалу відлікового пристрою в одиницях опору.

Схема захисту забезпечує автоматичне розмикання вимірювального ланцюга при появі на корпусі контрольованого об'єкту небезпечної напруги. В цьому випадку падіння напруги на резисторі R1 зменшується і в діагоналі моста Д7, Д8, R19, R20 з'являється напруга такої полярності, при якій спрацьовує реле Р3, замикаючи контакти «Я» і «Л». При цьому реле Р2 розмикає ланцюг калібрування і ланцюг живлення реле Р1, яке відключає резистор навантаження R1.

При роботі з приладами дотримуйтесь наступних заходів техніки безпеки.

З приладом повинні працювати не менше двох чоловіків. Якщо за умовами експлуатації неможливо відключити живлячу напругу, допускається підключати прилад без зняття напруги. В цьому випадку прилад необхідно одним затиском надійно з'єднати з корпусом контрольованого об'єкту, після чого другий затиск приладу підключити до фазного провідника. Приєднання необхідно проводити в гумових рукавичках.

Підготовка приладу до роботи:

- прилад встановлюють на горизонтальну поверхню;
- ручку «КАЛІБРУВАННЯ» встановлюють в крайнє ліве положення;
- приєднують провідники із затиском приладу;
- один провідник приєднують до корпусу контрольованого об'єкту, а другий – до однієї з фаз живлячої мережі.

Порядок роботи приладу:

подають напругу на вимірювану ділянку мережі. На приладі спалахує лампа «Z - -»;

натискають кнопку «ПЕРЕВІРКА КАЛІБРУВАННЯ» і ручкою «КАЛІБРУВАННЯ» встановлюють стрілку приладу на відмітку «0»;

натискають кнопку «ВИМІРЮВАННЯ» і відлічують свідчення за шкалою відлікового пристрою.

Величина опору ланцюга фаза – нуль дорівнює свідченню приладу мінус 0,1 Ом (опір сполучних проводів). Час вимірювання не повинен перевищувати 7хв із з інтервалом між вимірюваннями не менше 0,5хв.

Загоряння сигнальної лампи « $Z > 2$  Ом» при натиснутій кнопці «ВИМІРЮВАННЯ» свідчить про те, що опір ланцюга фаза – нуль контрольованого об'єкту більше 2 Ом.

Повторні вимірювання проводять тільки після перевірки калібрування.

### 4.3 Порядок виконання роботи

Схема мережі зображена на рисунку 4.2.

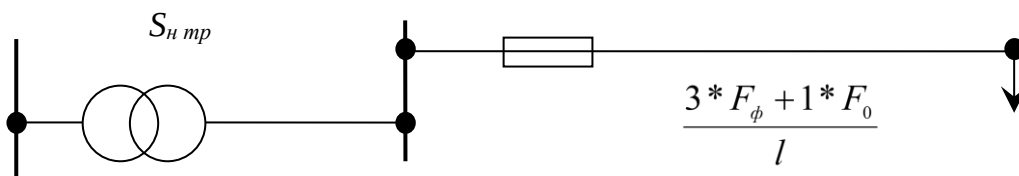


Рисунок 4.2 – Схема досліджуваної мережі

1. Відповідно до початкових даних для варіанту, заданого викладачем (табл. 4.1), визначити повний опір ланцюга фаза – нуль. Необхідні довідкові дані приведені в таблицях 4.2–4.5.

Таблиця 4.1 – Початкові дані, необхідні для виконання роботи

| Варіант | Потужність трансформатора, кВА | Виконання лінії | Переріз фазного і нульового провідників, мм <sup>2</sup> | Довжина лінії, км | Виконання захисту | Номинальний струм уставки захисту, А |
|---------|--------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 1       | 100                            | кабельне        | 3*50+1*25                                                | 0,38              | Запобіжник        | 125                                  |
| 2       | 160                            | –               | 3*70+1*35                                                | 0,6               | –                 | 160                                  |
| 3       | 100                            | повітряне       | 3*35+1*16                                                | 0,25              | –                 | 160                                  |
| 4       | 250                            | кабельне        | 3*95+1*35                                                | 0,71              | Автоматична       | 200                                  |
| 5       | 400                            | –               | 3*50+1*25                                                | 0,49              | –                 | 125                                  |
| 6       | 100                            | повітряне       | 3*70+1*50                                                | 0,59              | Запобіжник        | 260                                  |
| 7       | 250                            | кабельне        | 3*50+1*25                                                | 0,465             | Автоматична       | 125                                  |

Таблиця 4.2 – Значення повних опорів трансформаторів для різних схем з'єднання

| Потужність трансформатора (кВА) | Первинна напруга (кВ) | Схема з'єднання обмоток | Повний опір (Ом) 0,4 кВ |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 25                              | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 3,11                    |
| 40                              | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 1,94                    |
| 63                              | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 1,23                    |
| 100                             | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 0,77                    |
| 160                             | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 0,48                    |
| 250                             | 10                    | Δ/Y <sub>0</sub>        | 0,31                    |
| 250                             | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 0,11                    |
| 250                             | 20-35                 | Y/Y <sub>0</sub>        | 0,31                    |
| 400                             | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 0,20                    |
| 400                             | 10                    | Δ/Y <sub>0</sub>        | 0,07                    |
| 630                             | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 0,13                    |
| 1000                            | 10                    | Y/Y <sub>0</sub>        | 0,08                    |
| 1000                            | 10                    | Δ/Y <sub>0</sub>        | 0,03                    |

Таблиця 4.3 – Середнє значення індуктивних опорів петлі прямого і зворотного дротів або жил кабелю, Ом/км

| Умова прокладки         | Індуктивний опір |
|-------------------------|------------------|
| Кабель до 1 кВ          | 0,15             |
| Повітряні лінії 0,38 кВ | 0,6              |

Таблиця 4.4 – Активні опори проводів і жил кабелів виконаних з алюмінію, Ом/км

| Номинальний перетин | Активний опір |
|---------------------|---------------|
| 16                  | 1,98          |
| 25                  | 1,28          |
| 35                  | 0,92          |
| 50                  | 0,64          |
| 70                  | 0,46          |
| 95                  | 0,34          |

Таблиця 4.5 – Опір кабелів та окремо фазних та нульових жил різних перерізів при температурі +65°

| Опір фазних жил, мм <sup>2</sup> | Опір нульової жили, мм <sup>2</sup> | Повний опір ланцюга фаза – нуль, Ом/км при температурі жил кабелю +65 градусів |        |                    |        |        |                    |
|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------|--------|--------|--------------------|
|                                  |                                     | Матеріал жили:                                                                 |        |                    |        |        |                    |
|                                  |                                     | Алюміній                                                                       |        |                    | Мідь   |        |                    |
|                                  |                                     | R фази                                                                         | R нуля | Z ланцюга (кабелю) | R фази | R нуля | Z ланцюга (кабелю) |
| 1,5                              | 1,5                                 | -                                                                              | -      | -                  | 14,55  | 14,55  | 29,1               |
| 2,5                              | 2,5                                 | 14,75                                                                          | 14,75  | 29,5               | 8,73   | 8,73   | 17,46              |
| 4                                | 4                                   | 9,2                                                                            | 9,2    | 18,4               | 5,47   | 5,47   | 10,94              |
| 6                                | 6                                   | 6,15                                                                           | 6,15   | 12,3               | 3,64   | 3,64   | 7,28               |
| 10                               | 10                                  | 3,68                                                                           | 3,68   | 7,36               | 2,17   | 2,17   | 4,34               |
| 16                               | 16                                  | 2,3                                                                            | 2,3    | 4,6                | 1,37   | 1,37   | 2,74               |
| 25                               | 25                                  | 1,47                                                                           | 1,47   | 2,94               | 0,873  | 0,873  | 1,746              |
| 35                               | 35                                  | 1,05                                                                           | 1,05   | 2,1                | 0,625  | 0,625  | 1,25               |
| 50                               | 25                                  | 0,74                                                                           | 1,47   | 2,21               | 0,436  | 0,873  | 1,309              |
| 50                               | 50                                  | 0,74                                                                           | 0,74   | 1,48               | 0,436  | 0,436  | 0,872              |
| 70                               | 35                                  | 0,527                                                                          | 1,05   | 1,577              | 0,313  | 0,625  | 0,938              |
| 70                               | 70                                  | 0,527                                                                          | 0,527  | 1,054              | 0,313  | 0,313  | 0,626              |
| 95                               | 50                                  | 0,388                                                                          | 0,74   | 1,128              | 0,23   | 0,436  | 0,666              |
| 95                               | 95                                  | 0,388                                                                          | 0,388  | 0,776              | 0,23   | 0,23   | 0,46               |
| 120                              | 35                                  | 0,308                                                                          | 1,05   | 1,358              | 0,181  | 0,625  | 0,806              |
| 120                              | 70                                  | 0,308                                                                          | 0,527  | 0,527              | 0,181  | 0,313  | 0,494              |
| 120                              | 120                                 | 0,308                                                                          | 0,308  | 0,616              | 0,181  | 0,181  | 0,362              |
| 150                              | 50                                  | 0,246                                                                          | 0,74   | 0,986              | 0,146  | 0,436  | 0,582              |
| 150                              | 150                                 | 0,246                                                                          | 0,246  | 0,492              | 0,146  | 0,146  | 0,292              |
| 185                              | 50                                  | 0,20                                                                           | 0,74   | 0,94               | 0,122  | 0,436  | 0,558              |
| 185                              | 185                                 | 0,20                                                                           | 0,20   | 0,40               | 0,122  | 0,122  | 0,244              |
| 240                              | 240                                 | 0,153                                                                          | 0,153  | 0,306              | 0,090  | 0,090  | 0,18               |

2. Використовуючи формулу (4.1) і прийнявши фазну напругу  $U_{\phi} = 220$  В, визначити мінімальне значення однофазного струму короткого замикання.

3. Вивчити принцип дії і порядок роботи з приладом типу М-417.

4. На лабораторному стенді заміряти опір ( $Z_n'$ ) ланцюга фаза – нуль, включаючи трансформатор.

5. По формулі  $I'_{к.з} = U_\phi / Z_n$  визначити струм однофазного короткого замикання.

6. Порівняти значення  $I'_{к.з}$  отримані по п. п. 2 і 5.

7. Використовуючи формулу (4.4), перевірити, чи задовольняється необхідне співвідношення, і сформулювати висновок про надійність дії захисного апарату.

Якщо відсутня можливість заміру струмів короткого замикання в реальній мережі, то таку процедуру можна провести з віртуальною моделлю ділянки мережі 10/0,4 кВ в середовищу Matlab (рис.4.3). Як джерело напруги використовуємо систему електропостачання Three-Phase Source1 з необмеженою потужністю. Блок Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings) це віртуальна трансформаторна підстанція 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА. Обмотки трансформатора з'єднані в трикутник – зірка з нулем. Мережа представлена блоком Three-Phase Parallel RLC Branch. В параметрах цього блоку встановлений опір складає 0,5 Ом, а опір нульового провідника Series RLC Branch4 складає 0,25 Ом. В кінці мережі встановлені блоки контролю напруги та струму (Scope3, Three-Phase V-I Measurement, RMS\_Vabc, Fourier, Display1, Display3, Fourier1, RMS\_Iabc, Scope2, Display2, Display4).

До мережі підключено навантаження в фази А, В, С: Series RLC Branch1, Series RLC Branch2, Series RLC Branch3, це опір номіналом 10 Ом в кожній фазі. Блок Three-Phase Breaker1 моделює прилад М-417 (коротке замикання на час замірів). Після запуску моделі в Matlab, через Run, блоки контролю напруги та струму показують: Scope3 (рис. 4.4.) – напруга  $U$  в фазах А, В, С (у фазі А через 0,04с спрацьовує коротке замикання); Scope2 (рис. 4.5) – струм  $I$  в фазах А, В, С (у фазі А через 0,04с спрацьовує коротке замикання); Display1 –

середньоквадратичне (RMS) значення напруги в фазах А, В, С; Display3 – максимальні значення напруги в фазах А, В, С; Display2 – максимальне значення струму в фазах А, В, С; Display4 – середньоквадратичне (RMS) значення струму в фазах А, В, С.

Після отримання значень струму короткого замикання, як і при розрахунку розділу 4.3, підібрати захисний апарат для даної віртуальної мережі.

#### **4.4 Порядок оформлення роботи**

Звіт по роботі повинен містити:

схему мережі;

результати обчислень і експериментальні дані;

висновки.

#### **Контрольні питання**

1. Особливості розрахунку струмів короткого замикання в установках до 1000 В.

2. Вибір електричних апаратів за умовами однофазних струмів короткого замикання.

3. Принцип дії приладу М-417.

4. Правила роботи з приладом М-417.

5. Порядок роботи з віртуальною схемою мережі в Matlab Simulink та вибір електричних апаратів для даної схеми.

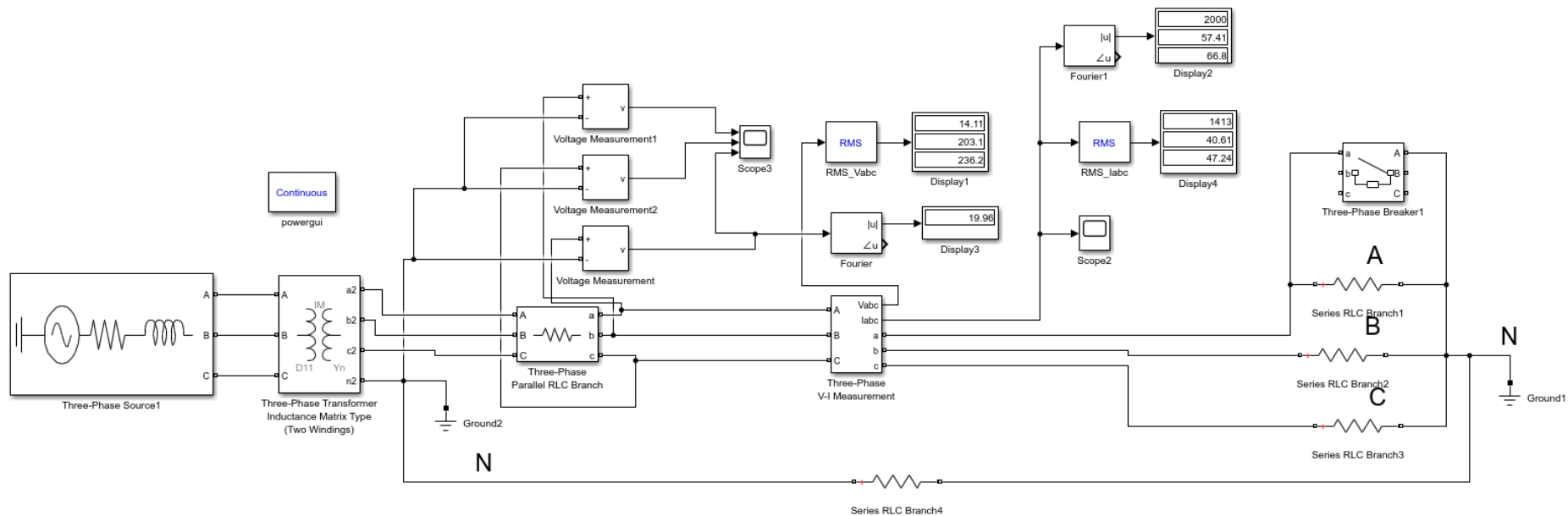


Рисунок 4.3 – Віртуальна модель ділянки мережі 10/0,4 кВ для вимірювання струму короткого замикання

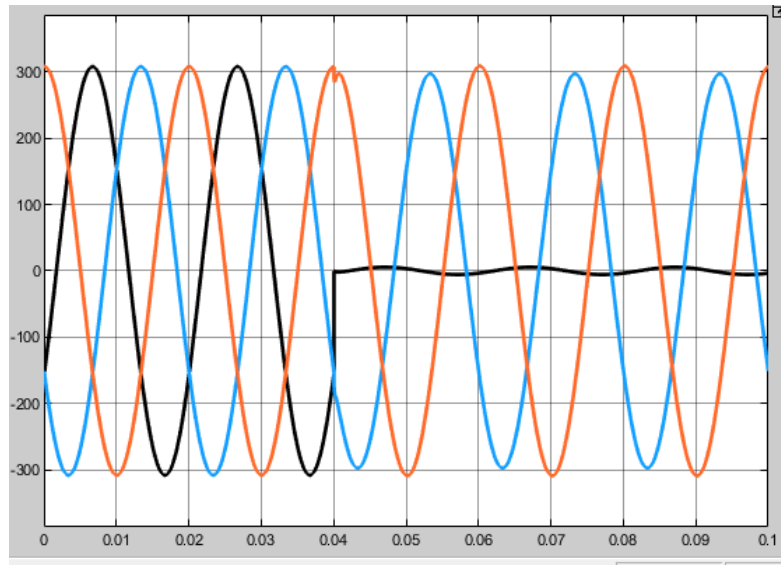


Рисунок 4.4 – Напруга  $U$  в фазах А, В, С (у фазі А через 0,04 с спрацьовує коротке замикання)

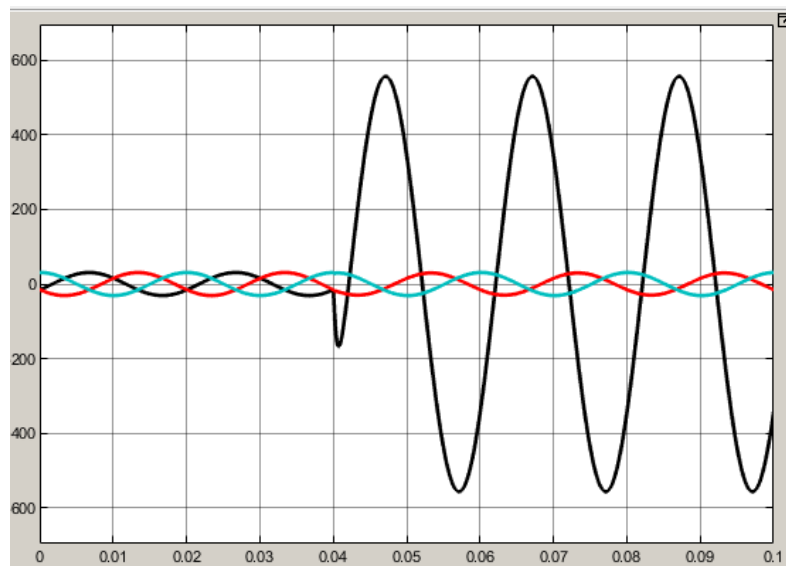


Рисунок 4.5 – Струм  $I$  в фазах А, В, С (у фазі А через 0,04 с спрацьовує коротке замикання)

## **5 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. НЕСИНУСОЇДАЛЬНІСТЬ НАПРУГИ В ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖАХ І ВПЛИВ ЇЇ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ**

### **5.1 Мета роботи**

Вивчення основних показників якості електричної енергії і закріплення практичних навичок з розрахунку і вимірюванню за допомогою сучасних приладів.

### **5.2 Загальні відомості**

Дотримання енергопостачаючими організаціями та електроприймачами показників якості електричної енергії дозволяє не тільки економити паливно-енергетичні ресурси, але й інші види матеріальних ресурсів, частина яких при низькому рівні якості електроенергії витрачається на продукцію, що бракується та утилізується.

У відповідності до ДСТУ показники якості електроенергії (ПЯЕ) розподіляються на 2 групи: основні ПЯЕ й додаткові ПЯЕ. Основні ПЯЕ визначають властивості електричної енергії, що характеризують її якість. Додаткові ПЯЕ являють собою форми запису основних ПЯЕ, що використовуються в інших нормативно-технічних документах.

До основних ПЯЕ відносяться:

- відхилення напруги  $\delta U$ ;
- розмах зміни напруги  $\delta U_t$ ;
- доза коливань напруги  $\Psi$ ;
- коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги  $K_{НСU}$ ;
- коефіцієнт  $n$  – гармонічної складової  $K_{U(n)}$ ;
- коефіцієнт зворотної послідовності напруги  $K_{2U}$ ;
- коефіцієнт нульової послідовності напруги  $K_{0U}$ ;
- відхилення частоти  $\Delta f$ ;
- тривалість провалу напруги  $\Delta t_n$ ;

– імпульсна напруга  $U_{imp}$ .

До додаткових ПЯЕ відносяться:

– коефіцієнт амплітудної модуляції  $K_{mod}$ ;

– коефіцієнт небалансу міжфазних напруг  $K_{неб}$ ;

– коефіцієнт небалансу фазних напруг  $K_{небф}$ ;

Значення ПЯЕ в нормальному режимі роботи електричної мережі повинні не виходити за межі максимальних значень, що вказані ДСТУ, при цьому на протязі не менш 95 % часу кожної доби значення ПЯЕ повинні не виходити за межі нормальних значень. Так, для мережі напругою до 1 кВ, відхилення напруги, %, максимальне –  $\pm 10$ , нормальне –  $+5$ .

Таблиця 5.1 – Значення коефіцієнту несинусоїдальності у відсотках в електричній мережі за напругою

| Напруга       | Припустиме значення |             |
|---------------|---------------------|-------------|
|               | нормальне           | максимальне |
| До 1 кВ       | 5                   | 10          |
| 6 – 20 кВ     | 4                   | 8           |
| 35 кВ         | 3                   | 6           |
| 110 кВ і вище | 2                   | 4           |

### 5.3 Несинусоїдальність напруги

Несинусоїдальність напруги характеризується наявністю крім гармоніки напруги основної частоти  $U_{(1)}$  гармонік  $U_\nu$  інших вищих частот, кратних основній частоті ( $\nu = 2, 3, 4 \dots \infty$ ), які визначаються розкладом кривої фактичної напруги в ряд Фур'є. Несинусоїдальність напруги характеризується коефіцієнтом несинусоїдальності напруги та коефіцієнтом  $\nu$ -ї гармонічної.

Коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги  $K_{HCU}$  обчислюється:

$$K_{HCU} = 100\% \sqrt{\sum_{\nu=2}^N U_\nu^2} / U_{ном} , \quad (5.1)$$

де  $U_\nu$  – діюче значення  $\nu$ -ї гармонічної складової напруги, В, кВ;

$\nu$  – порядок гармонічної складової напруги;  $N$  – порядок останньої з врахованих гармонічних складових напруги;

$U_{ном}$  – номінальна напруга мережі, В, кВ.

При визначенні даного ПЯЕ допускається:

1) не враховувати гармонічні складові порядку  $\nu > 40$  і (або) значення яких менш 0,3;

2) визначати даний ПЯЕ з рівняння:

$$K_{HCU} = 100\% \sqrt{\sum_{\nu=2}^N U_{\nu}^2} / U_{(1)}, \quad (5.2)$$

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

Коефіцієнт  $\nu$ -ї гармонічної складової напруги визначається з виразу:

$$K_{U(\nu)} = 100\% U_{\nu} / U_{ном}, \quad (5.3)$$

де  $U_{\nu}$  – діюче значення  $\nu$ -ї гармонічної складової напруги, В, кВ;

$U_{ном}$  – номінальне значення напруги мережі, В, кВ.

Допускається визначати даний ПЯЕ з виразу:

$$K_{U(\nu)} = 100\% U_{\nu} / U_{(1)}, \quad (5.4)$$

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

#### **5.4 Процеси, які викликають напругу несинусоїдальної форми в промислових мережах**

Джерелами гармонічних викривлень в електричних системах є, в основному, навантаження, що мають нелінійні характеристики: дугові сталеплавильні печі; вентильні перетворювачі; трансформатори з нелінійними вольт-амперними характеристиками; перетворювачі частоти; індукційні печі; електричні машини, що обертаються, які живляться через вентильні перетворювачі; телевізійні приймачі; люмінесцентні лампи; ртутні лампи.

Таблиця 5.2 – Характеристики деяких характерних джерел викривлень

| №№ п/п | Тип ЕП                               | U, кВ      | $K_{HCU}$ , % |
|--------|--------------------------------------|------------|---------------|
| 1.     | Дугові сталеплавильні печі (ДСП-100) | 220<br>35  | 2,5<br>8-10   |
| 2.     | ДСП-40                               | 110<br>35  | 2,1<br>7,8    |
| 3.     | Прокатний стан 1700                  | 10         | 13,2          |
| 4.     | Випрямлячі електролізних установок   | 10<br>0,38 | 8,3-12<br>6-8 |
| 5.     | Приводи потужних насосів             | 6          | 6-9           |
| 6.     | Зварювальне обладнання               | 0,38       | 7-8           |

### 5.5 Вплив несинусоїдальної напруги на роботу електроприймачів

Поява струму гармоніки з порядковим номером  $\nu > 1$  виявляється поверхневим ефектом (витискання струму до поверхні провідника), що призводить до додаткових втрат тепла, нагріванню ізоляції ЕП й апаратів в електричній мережі та зниженню їх строку служби. Так струм витоку в кабелях зростає пропорційно тривалості їх роботи в умовах підвищеного значення  $K_{HCU}$ . Через 2,5 роки при  $K_{HCU} = 6-8$  % струм витоку кабелю збільшується на 36 %, через 3,5 роки струм витоку дорівнює вже 43 %.

Проникнення вищої гармоніки в мережу призводить до порушень роботи пристроїв телемеханіки, автоматики, релейного захисту. В мережі можливо також виникнення резонансних режимів на вищих гармоніках, при цьому різко зростають струми й напруги на окремих ділянках мережі.

Розрахункові формули для додаткових втрат, що виникають в електрообладнанні із-за несинусоїдальності напруги, мають такий вигляд [2]:

1) для асинхронних двигунів:

$$\Delta P_{ad} = \Delta P_{m1ном} I_n^2 \sum_{\nu=3}^{\infty} \dot{U}_{\nu}^2 \frac{\sqrt{\nu} + \sqrt{\nu \pm 1}}{\nu^2}, \quad (5.5)$$

де  $\Delta P_{m1но с}$  – втрати в міді статора при номінальному струмі основної частоти;

$I_n$  – кратність пускового струму при номінальній напрузі основної частоти;

$\dot{U}_{\nu} = U_{\nu} / U_{ном}$  – відносне значення напруги  $\nu$ -ї гармоніки.

Плюс під знаком кореню у вищенаведеному виразі відповідає гармонікам, що створюють поля обертання, зустрічні полю основної частоти, а мінус – гармонікам, що створюють поля обертання, побіжні полю основної частоти;

2) для синхронних машин (СМ) додаткові втрати в роторі:

$$\Delta P_p = \frac{\sqrt{2}(r_2 - r_{cm})}{R_k X_2^2} P_{ном} \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}, \quad (5.6)$$

де  $r_2$ ,  $X_2$  – активний і реактивний опір зворотної послідовності СМ;

$r_{cm}$  – активний опір статора;

$R_k$  – коефіцієнт, який дорівнює 0,71 для явно полюсних машин і 0,88 – для неявно полюсних.

Додаткові втрати в статорі СМ від вищих гармонік:

$$\Delta P_{cm} = K_{cm} P_{ном} \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}, \quad (5.7)$$

де  $K_{cm} = \frac{0,47 P_{міди\_ном}}{R_k X_2^2 P_{ном}}$  – коефіцієнт, що враховує втрати в міді обмотки від

струму основної частоти, а також глибину проникнення струму в провідник;

3) для силових трансформаторів:

$$P_{mp} = \Delta P_x \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 + 0,607 \frac{\Delta P_k}{U_k} \sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0,05 v^2}{v\sqrt{v}} U_v^2, \quad (5.8)$$

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

4) для лінії електропередачі:

$$P_{ЛЕП} = 3 \sum_{v=2}^{\infty} I_v^2 r K_{rv}, \quad (5.9)$$

де  $K_{rv}$  – коефіцієнт, що враховує вплив поверхневого ефекту ( $K_{rv} \approx 0,47 * \sqrt{v}$ ).

## 5.6. Засоби виміру несинусоїдальної напруги

Виміри показників несинусоїдальної напруги мережі здійснюються аналізатором гармонік електричної мережі 43250. Він контролює: коефіцієнт несинусоїдальної кривої напруги; відносні рівні кожної з тридцяти дев'яти вищих гармонік напруги від другої до сорокової, відносно номінального значення дослідної напруги основної частоти; відносні рівні кожної з тридцяти дев'яти вищих гармонік струму від другої до сорокової відносно до нормованого максимального значення дослідного струму основної частоти; фази струму і напруги кожної з тридцяти дев'яти вищих гармонік, від другої до сорокової, виміри робляться в градусах фази гармоніки, що аналізується.

### 5.6.1 Порядок роботи

1. Включити кнопку « $U$ »
2. Подати сигнал на розмикання « $U$ »
3. Встановити обраний режим роботи за допомогою кнопок  $K_{nc}$ ,  $A_r$  або  $\varphi_r$ .
4. При вимірюванні  $K_{nc}$  необхідно встановити діапазон вимірювань (0–40, 0–20, 0–10, 0–5 %).

Діапазон вимірювання обирається виходячи з рівня вимірюваного параметру. На перевантаження, при не вірно обраному діапазоні вимірювання, вказує миготіння цифрового індикатора або перевищення показань цифрового індикатора максимально крайнього значення обраного діапазону вимірювань.

5. При вимірюванні відносного рівня гармонік напруги необхідно встановити номер вимірюваної гармоніки і діапазон вимірювання (0–40, 0–20, 0–10, 0–5 %).

6. При вимірюванні фази гармоніки напруга ( $\varphi_r$ ) необхідно встановити номер вимірюваної гармоніки та діапазон вимірювань (0–40, 0–20, 0–10, 0–5 %).

7. При вимірюванні параметрів струмів електричної мережі ( $A_r$ ,  $\varphi_r$ ) потрібно включити кнопку « $I$ »

8. Подати сигнал на розмикання «I». Сигнал на аналізатор подається через шунт, що входить в комплект поставки.

9. Встановити обраний режим роботи за допомогою кнопок  $A_r$  або  $\varphi_r$ .

10. При вимірюванні відносного рівня гармоніки або фази гармоніки струму необхідно встановити номер гармоніки і діапазон вимірювань.

Виміри показників несинусоїдальної напруги та/або струму мережі за допомогою переносного трифазного аналізатору мережі TOPAS-1000 та/або FLUKE-1760 TOPAS.



Рисунок 5.1 – Трифазні аналізатори TOPAS-1000, FLUKE-1760 TOPAS та їх підключення до мережі

Аналізатори TOPAS-1000/FLUKE-1760 складаються з основного блоку, на якому розташовані: індикатори живлення, правильності функціонування та перевантаження, а також органи підключення (роз'єми та клеми), периферійні пристрої, гнучкі перетворювачі струму (LEM-flex), струмові кліщі та кабелі

вимірювання напруги, а також комплект первинних перетворювачів напруги та струму, який формується залежно від вимог.

Аналізатори TOPAS за допомогою 16-розрядних АЦП кожного ізолюваного входу виконують аналогово-цифрове перетворення миттєвих значень гармонійних вхідних сигналів із подальшим обчисленням значень вимірюваних величин із отриманих масивів даних відповідно до програми. Частота вибірки миттєвих значень сигналів становить 6,4 кГц. Вбудована енергонезалежна пам'ять дозволяє здійснювати запис показників якості електричної енергії на часових інтервалах від кількох секунд до 24 годин із регульованою періодичністю вимірювань.

Програмне забезпечення, що постачається з аналізаторами TOPAS, забезпечує їхню сумісність із будь-яким персональним комп'ютером, що працює під керуванням операційної системи Windows. Результати вимірювань можуть відображатися на дисплеї комп'ютера у числовій або графічній формах. Аналізатор TOPAS може використовуватися у складі інформаційно-вимірювальних систем. Варіанти підключення приборів наведено на рисунку 5.2.

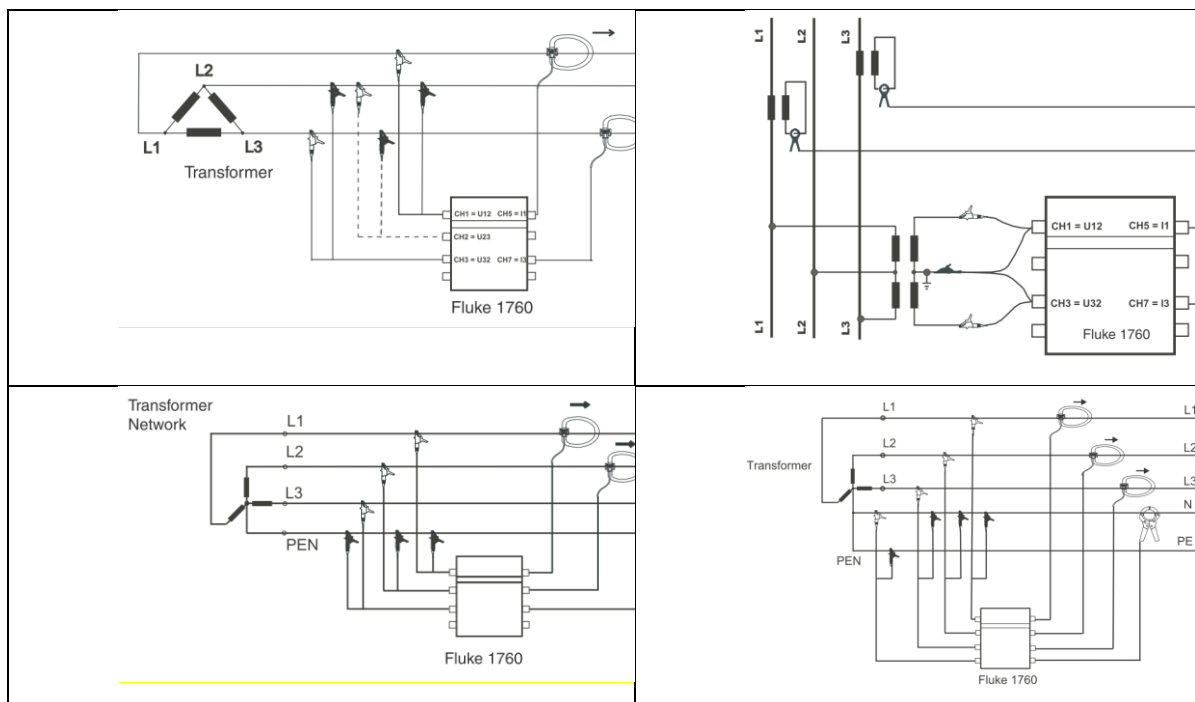


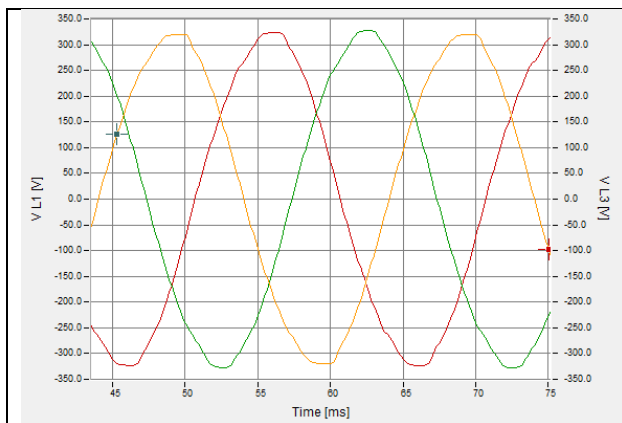
Рисунок 5.2 – Схеми підключення приборів

Підключення приладу для вимірювань може виконуватись без знеструмлення мережі із дотриманням відповідних вимог безпечного виконання робіт.

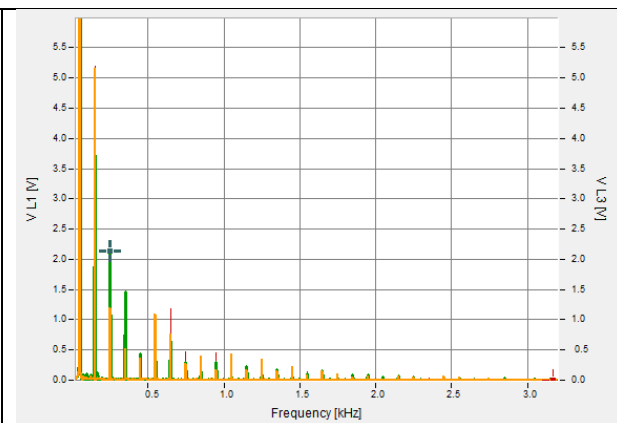
Порядок роботи з приладом:

- 1) Приєднати до приладу необхідні аксесуари вимірювання струму та напруги, кабель живлення.
- 2) Під'єднати зовнішнє джерело живлення від мережі 85 – 265 В, 45 – 65 Гц або постійної напруги 100 – 375 В.
- 3) Увімкнути перемикач живлення, розблокувавши його легко тягнувши догори.
- 4) Під'єднати прилад до мережі для проведення вимірів, застосовуючи одну із наведених схем (рис. 5.2) (у разі, якщо проводяться виміри лише напруги, дозволяється приєднати лише вимірювачі напруги).
- 5) Під'єднати прилад до комп'ютера (можна використовувати пряме підключення Ethernet, або підключення через локальну мережу)
- 6) На комп'ютері запустити програмне забезпечення та завантажити необхідну конфігурацію приладу (може бути заготовлена заздалегідь, або на місці вимірів), вказати використану схему підключення до мережі, значення коефіцієнтів трансформації, номінальні параметри мережі, режим вимірів, параметри фіксації вимірювальних значень. Перевірити та/або встановити налаштування годинника у приладі.
- 7) Перевірити коректність величин, що вимірюються, та схеми приєднання, знявши та переглянувши векторну діаграму.
- 8) У разі необхідності провести ініціалізацію внутрішньої пам'яті приладу.
- 9) Провести виміри на протязі необхідного інтервалу.
- 10) Завантажити данні вимірів на локальний комп'ютер.
- 11) Провести аналіз вимірянних значень.

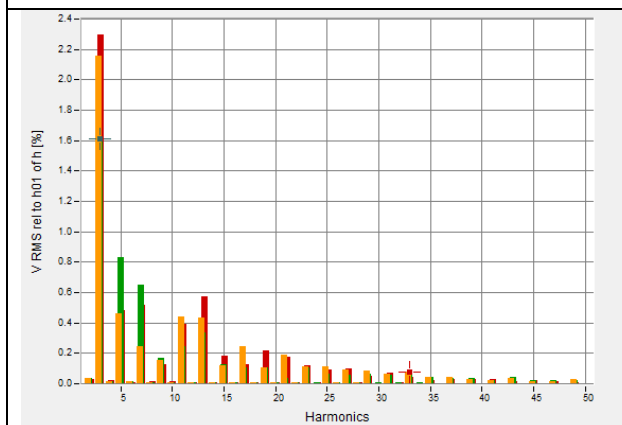
Під час аналізу вимірів, в розрізі несинусоїдальності, можемо аналізувати наступне:



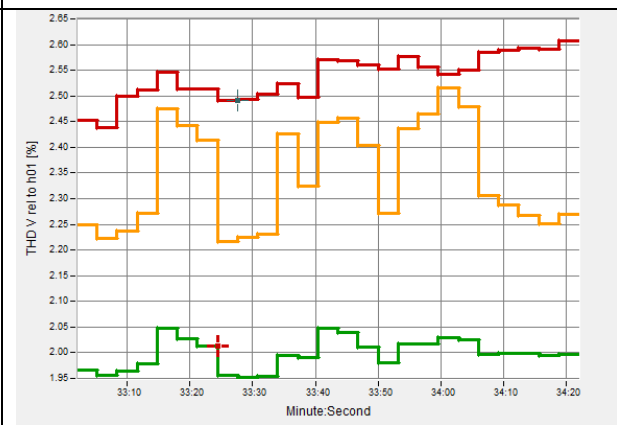
Вигляд осцилограми



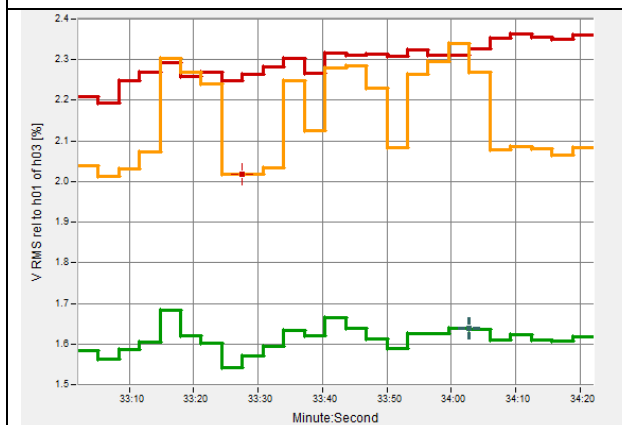
Спектральний аналіз осцилограми



Рівні (середні або максимальні) 2-50 вищих гармонійних складових (у відношенні до 1-ї, номінального значення, або в абсолютній величині).



Значення THD (відносного, або абсолютного) за обраний проміжок часу.



Значення окремої гармонійної складової за обраний проміжок часу.

EN50160 - Harmonics

Results

☐ Statistics - Tolerance 95% ☒ 95%-Values ☐ Maximal Values

Total quantity of values: 4 4 4

| hXX | Tolerance    | L1    | L2    | L3    |
|-----|--------------|-------|-------|-------|
| THD | 0.00 - 8.00% | 2.31% | 2.00% | 2.59% |
| h02 | 0.00 - 2.00% | 0.10% | 0.06% | 0.06% |
| h03 | 0.00 - 5.00% | 2.12% | 1.62% | 2.31% |
| h04 | 0.00 - 1.00% | 0.02% | 0.02% | 0.02% |
| h05 | 0.00 - 0.50% | 0.46% | 0.61% | 0.56% |
| h06 | 0.00 - 0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| h07 | 0.00 - 0.50% | 0.21% | 0.07% | 0.06% |
| h08 | 0.00 - 0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| h09 | 0.00 - 0.75% | 0.14% | 0.10% | 0.17% |
| h10 | 0.00 - 0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| h11 | 0.00 - 3.50% | 0.01% | 0.24% | 0.40% |
| h12 | 0.00 - 0.20% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| h13 | 0.00 - 3.00% | 0.40% | 0.33% | 0.58% |
| h14 | 0.00 - 0.20% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| h15 | 0.00 - 0.20% | 0.15% | 0.15% | 0.23% |
| h16 | 0.00 - 0.20% | 0.00% | 0.01% | 0.01% |
| h17 | 0.00 - 2.00% | 0.23% | 0.08% | 0.11% |
| h18 | 0.00 - 0.20% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| h19 | 0.00 - 1.50% | 0.10% | 0.11% | 0.21% |
| h20 | 0.00 - 0.20% | 0.01% | 0.00% | 0.01% |
| h21 | 0.00 - 0.20% | 0.15% | 0.03% | 0.18% |
| h22 | 0.00 - 0.20% | 0.01% | 0.00% | 0.01% |
| h23 | 0.00 - 1.50% | 0.08% | 0.14% | 0.11% |
| h24 | 0.00 - 0.20% | 0.00% | 0.00% | 0.01% |
| h25 | 0.00 - 1.50% | 0.12% | 0.06% | 0.10% |

Analysis period: 1 Week = 1008 values

Close

Досліджувати відповідність рівня гармонійних складових та THD стандарту, або заданим лімітам.

Рисунок 5.3 – Вихідні характеристики та діаграми для аналізу

Є можливість автоматичної генерації протоколів вимірів за шаблоном.

## 5.7 Порядок виконання роботи

За вказівкою викладача потрібно підключити одне з навантажень на стенді: тиристорний регулятор (ТР), нелінійне навантаження (НН); вентильний перетворювач (ВП), до джерела живлення ДЖ.

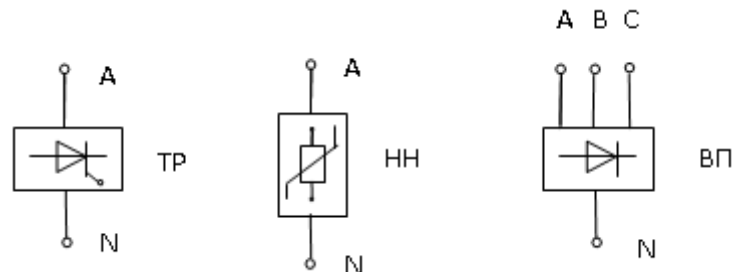


Рисунок 5.4 – Навантаження, що використовується в лабораторній роботі

Підключивши аналізатор гармонік, наприклад, до виходу тиристорного регулятора, на вході «U» вимірюють по чергові коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги і відносні значення кожної з тридцяти дев'яти гармонік. За вказівкою викладача кількість дослідних гармонік може бути зменшена до 13.

Показники приладу записати в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 – Показники приладу

| Величина,<br>що<br>вимірюється | Номер гармоніки, $\nu$ |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
|--------------------------------|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
|                                | 1                      | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| $K_{нс}$                       |                        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| $K_{U(\nu)} A_r$               |                        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |
| $(I_\nu) U_\nu$                |                        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |

Вимірювання несинусоїдальної напруги проводять для різноманітних кутів регулювання напруги регулятора ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ). Кут регулювання задається викладачем.

Для отриманих значень порахувати додаткові втрати в трансформаторі при живленні несинусоїдальним навантаженням по виразу (5.8). Вихідні дані для розрахунку використовувати з таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вихідні дані для розрахунку

| Тип і потужність трансформатора | Напруга, кВ | $\Delta P_{к.з.}$ , кВт | $\Delta P_{х.х.}$ , кВт | $U_{к.з.}$ , % |
|---------------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| ТМ-630                          | 10/0,4      | 7,6                     | 2,27                    | 5,5            |
| ТМ-1000                         | 10/0,4      | 11,6                    | 3,3                     | 5,5            |
| ТМ-1600                         | 10/0,4      | 16,5                    | 4,5                     | 5,5            |
| ТМ-2500                         | 10/0,4      | 23,5                    | 6,2                     | 5,5            |

Потужність трансформатора вказується викладачем.

### 5.8. Порядок роботи з використанням віртуальної лабораторії у програмному забезпеченні Simulink MATLAB

В Simulink MATLAB запускаємо модель віртуальної лабораторії, яка моделює процеси в системі електропостачання при роботі електролізних установок з використанням тиристорних випрямлячів (рис. 5.5.). За допомогою блоків тиристорного випрямляча та Harmonic source регулюється присутність гармонік в мережі системи електропостачання, що призводить до спотворення синусоїдальної напруги та струму в мережі. Для контролю і спостереження струму та напруги в мережі використовуємо блок Powergui (блок «powergui» - Apps – FFT Analyzer). Натиснувши на FFT Analyzer, отримуємо, наприклад, аналіз напруги мережі на присутність інших гармонік (рис. 5.6). Наступним кроком, натиснувши кнопку Export, отримуємо результат для кожної гармоніки – значення напруги мережі по гармоніках (рис. 5.7). Значення напруги по гармоніках представлені у відсотках від основної гармоніки (100%), тому в таблиці 5.4. показаний перерахунок напруги в вольтах.

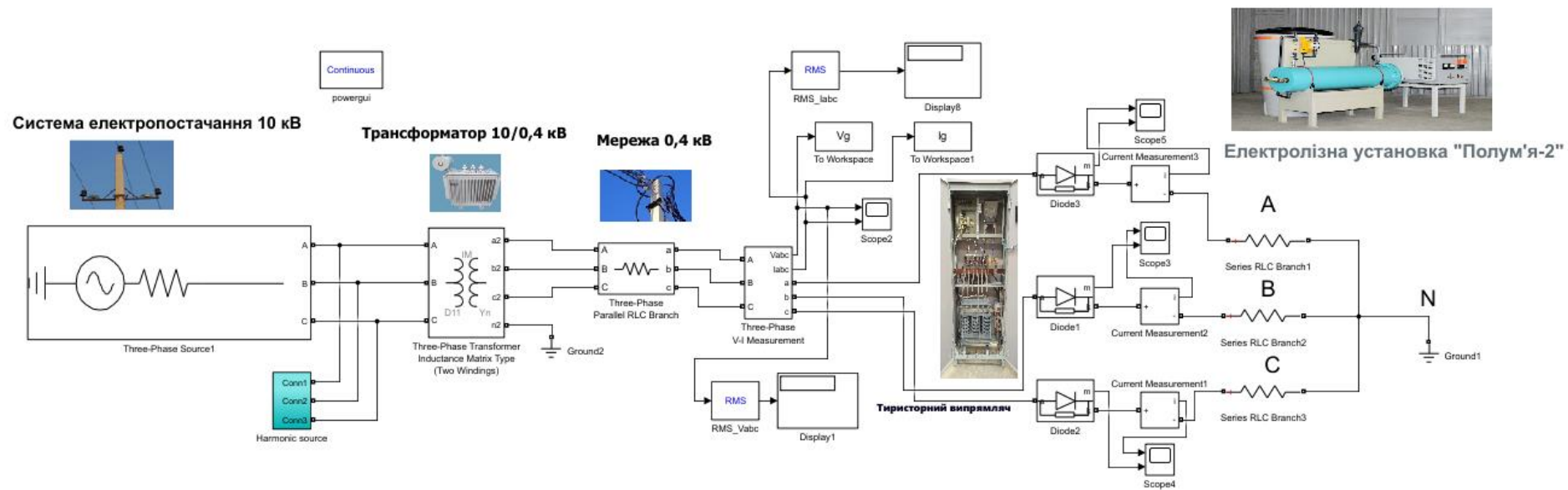


Рисунок 5.5 – Мережа системи електропостачання для живлення електролізної установки.

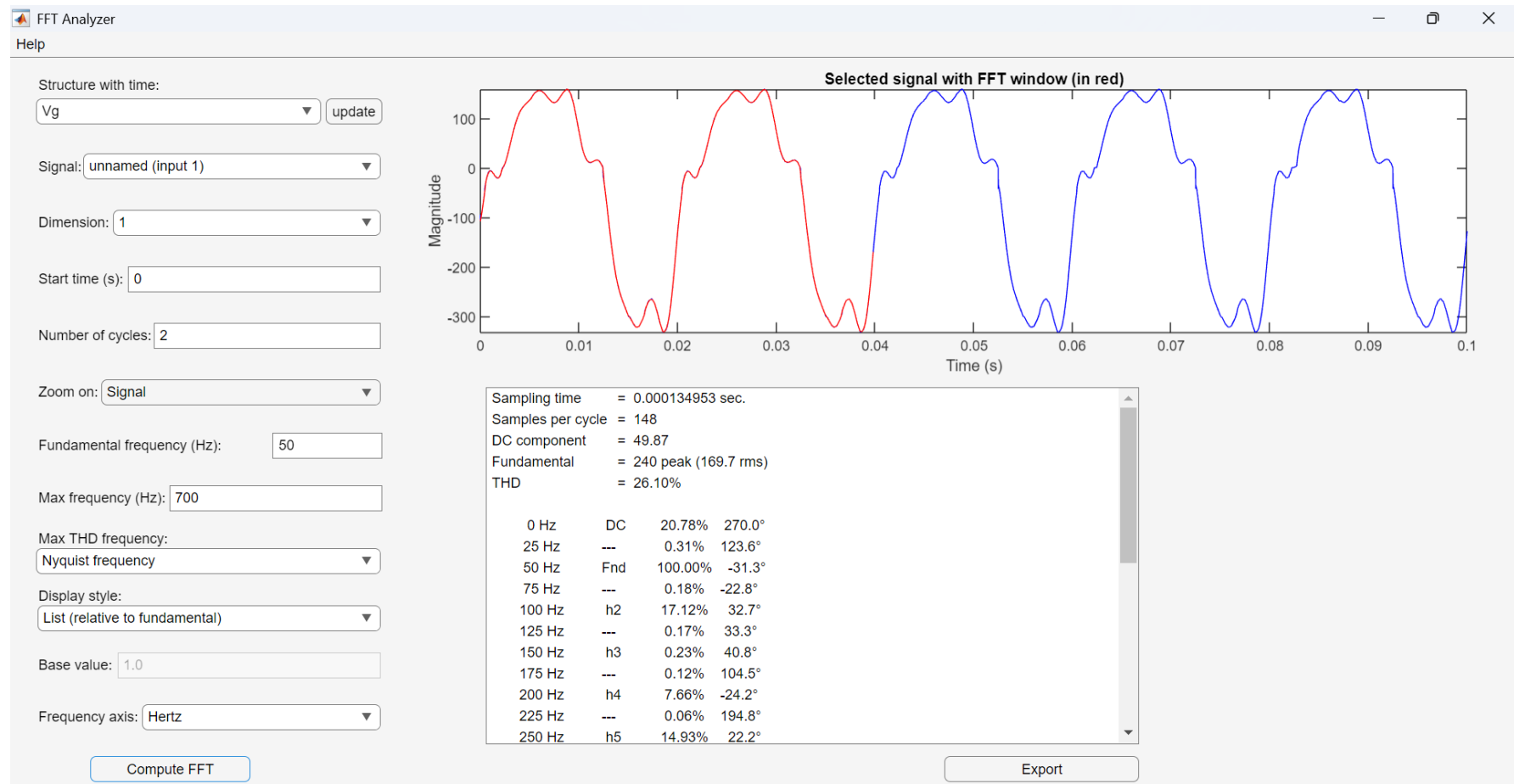


Рисунок 5.6 – Аналіз напруги мережі на присутність інших гармонік

$\{\{100\}_{\text{h2}'} \quad \{\{17.1227\} \quad \{\{32.6569\}$   
 $\{\{125\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.1656\} \quad \{\{33.3001\}$   
 $\{\{150\}_{\text{h3}'} \quad \{\{0.2349\} \quad \{\{40.8410\}$   
 $\{\{175\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.1154\} \quad \{\{104.4873\}$   
 $\{\{200\}_{\text{h4}'} \quad \{\{7.6633\} \quad \{\{-24.2063\}$   
 $\{\{225\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.0555\} \quad \{\{194.8302\}$   
 $\{\{250\}_{\text{h5}'} \quad \{\{14.9256\} \quad \{\{22.2209\}$   
 $\{\{275\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.2643\} \quad \{\{25.5988\}$   
 $\{\{300\}_{\text{h6}'} \quad \{\{2.5458\} \quad \{\{31.9393\}$   
 $\{\{325\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.1089\} \quad \{\{71.7471\}$   
 $\{\{350\}_{\text{h7}'} \quad \{\{9.5343\} \quad \{\{18.9624\}$   
 $\{\{375\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.3135\} \quad \{\{19.2381\}$   
 $\{\{400\}_{\text{h8}'} \quad \{\{2.4200\} \quad \{\{80.3241\}$   
 $\{\{425\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.2467\} \quad \{\{40.9286\}$   
 $\{\{450\}_{\text{h9}'} \quad \{\{0.0822\} \quad \{\{35.9518\}$   
 $\{\{475\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.1784\} \quad \{\{52.7631\}$   
 $\{\{500\}_{\text{h10}'} \quad \{\{0.7294\} \quad \{\{13.2151\}$   
 $\{\{525\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.1619\} \quad \{\{39.8593\}$   
 $\{\{550\}_{\text{h11}'} \quad \{\{0.0723\} \quad \{\{15.9346\}$   
 $\{\{575\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.1725\} \quad \{\{55.4617\}$   
 $\{\{600\}_{\text{h12}'} \quad \{\{0.7835\} \quad \{\{-55.8173\}$   
 $\{\{625\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.1263\} \quad \{\{44.8945\}$   
 $\{\{650\}_{\text{h13}'} \quad \{\{0.2663\} \quad \{\{36.8037\}$   
 $\{\{675\}_{\text{'--}'} \quad \{\{0.1419\} \quad \{\{44.6270\}$   
Fundamental  $\text{240 peak (169.7 rms)}$

Рисунок 5.7 – Значення напруги мережі по гармоніках

Таблиця 5.4 – Перерахунок напруги по гармоніках

| Гармоніки | Основна гармоніка, В (50 Гц) | Відсотки від основної, % | Напруга, В $U_i$ |
|-----------|------------------------------|--------------------------|------------------|
| h =2      | 169,7                        | 17.1                     | 29.0             |
| h =3      | 169,7                        | 0                        | 0.0              |
| h =4      | 169,7                        | 7.7                      | 13.1             |
| h =5      | 169,7                        | 14.9                     | 25.3             |
| h =6      | 169,7                        | 2.5                      | 4.2              |
| h =7      | 169,7                        | 9.5                      | 16.1             |
| h =8      | 169,7                        | 2.4                      | 4.1              |
| h =9      | 169,7                        | 0                        | 0.0              |
| h =10     | 169,7                        | 0.7                      | 1.2              |
| h =11     | 169,7                        | 0                        | 0.0              |
| h =12     | 169,7                        | 0.8                      | 1.4              |
| h =13     | 169,7                        | 0.3                      | 0.5              |

Наступним кроком відкриваємо за допомогою провідника у Matlab файл



Vtratu\_transf\_data\_2.m

. Це MATLAB код для розрахунку втрат потужності в трансформаторах системи електропостачання  $P_{тр}$ . В програмі знаходимо рядок – %. Введення значень  $U_v$  (вектор від  $v = 2$  до  $v = 13$ ). Вводимо значення напруги  $U_i$  з таблиці 5.4 в програму. Отримаємо рядок в програмі:  $U_v = [29\ 0.0\ 13.1\ 25.3\ 4.2\ 16.1\ 4.1\ 0.0\ 1.2\ 0.0\ 1.4\ 0.5]$  (рис. 5.8). Відповідно до п. 1.8.4. запускаємо модель за допомогою кнопки Run (зелена стрілка вгорі вікна моделі). Виконується розрахунок і ми отримуємо результат. Втрати потужності в трансформаторі електропостачання складають 13765 Вт. (рис. 5.9).

Для отримання втрат в лінії мережі алгоритм такий же як і при отриманні втрат в трансформаторі. Використовуємо блок Powergui (блок «powergui» - Apps – FFT Analyzer). Натискаємо на FFT Analyzer, отримуємо аналіз струму мережі на присутність інших гармонік (рис. 5.10). Зверніть увагу, що у вікні Structure with time повинен бути встановлений струм  $I_q$ . Наступним кроком, натиснувши кнопку Export, отримуємо результат для кожної гармоніки – значення струму мережі по гармоніках (рис. 5.11). Значення струму по

гармоніках представлені у відсотках від основної гармоніки (100%), тому в таблиці 5.5 показаний перерахунок струму в амперах.



Відкриваємо за допомогою провідника у Matlab файл Vtratu\_power\_line.m .

Це MATLAB код для розрахунку втрат потужності в лінії системи електропостачання. Відкриваємо цей файл і отримуємо код програми. В програмі знаходимо рядок і вводимо значення струму  $I_{nu}$  (вектор від  $v = 2$  до  $v = 13$ ) із таблиці 5.5. Запускаємо програму для розрахунку і отримуємо втрати потужності в лінії електропостачання 639,37 Вт (рис. 5.12).

```

Editor - G:\Мій диск\work\Lab_3\2023\Vtratu_transf_data_2.m
Vtratu_power_line.m  PowerLossCalculator.m  Vtratu_transf_data_2.m  +
1  % MATLAB код для розрахунку втрат потужності в трансформаторах системи електропостачання Pmp
2  % Введення даних
3  Px = 4.5 % input(Введіть значення Px)
4  Pk = 16.3 % input(Введіть значення Pk)
5  Uk = 5.5 % input(Введіть значення Uk)
6
7  % Введення значень Uv (вектор від v=2 до v=13)
8  Uv = [29 0.0 13.1 25.3 4.2 16.1 4.1 0.0 1.2 0.0 1.4 0.5] % input(Введіть значення Uv у вигляді вектора [U2 U3 ...U13])
9
10 % Перевірка коректності довжини вектора Uv
11 if length(Uv) ~= 12
12     error('Повинно бути рівно 12 значень для Uv (від v=2 до v=13).');
13 end
14
15 % Розрахунок першої суми: (Uv^2) для v=2:13
16 sum_Uv2 = sum(Uv.^2);
17
18 % Розрахунок другої суми: (1 + 0.05*v^2 / sqrt(v) * Uv^2) для v=2:13
19 v = 2:13; % Індеси від 2 до 13
20 term = (1 + 0.05 * v.^2 ./ sqrt(v)) .* Uv.^2;
21 sum_term = sum(term);
22
23 % Підсумковий розрахунок Pmp
24 Pmp = Px * sum_Uv2 + 0.607 * (Pk / Uk) * sum_term;
25
26 % Виведення результату
27 fprintf('Розраховане значення Pmp: %.4f\n', Pmp);

```

Рисунок 5.8 – Лістинг програми в Matlab для розрахунку втрат в трансформаторі

```

Command Window
Pk = 16.3 % input(Введіть значення Pk)
Uk = 5.5 % input(Введіть значення Uk)

% Введення значень Uv (вектор від v=2 до v=13)
Uv = [29 0.0 13.1 25.3 4.2 16.1 4.1 0.0 1.2 0.0 1.4 0.5] % input(Введіть значення Uv у вигляді вектора [U2 U3 ...U13])

% Перевірка коректності довжини вектора Uv
if length(Uv) ~= 12
    error('Повинно бути рівно 12 значень для Uv (від v=2 до v=13).');
end

% Розрахунок першої суми: (Uv^2) для v=2:13
sum_Uv2 = sum(Uv.^2);

% Розрахунок другої суми: (1 + 0.05*v^2 / sqrt(v) * Uv^2) для v=2:13
v = 2:13; % Індеси від 2 до 13
term = (1 + 0.05 * v.^2 ./ sqrt(v)) .* Uv.^2;
sum_term = sum(term);

% Підсумковий розрахунок Pmp
Pmp = Pk * sum_Uv2 + 0.607 * (Pk / Uk) * sum_term;

% Виведення результату
fprintf('Розраховане значення Pmp: %.4f\n', Pmp);

Pk =

    16.3000

Uk =

    5.5000

Uv =

    29.0000     0.0000    13.1000    25.3000     4.2000    16.1000     4.1000     0.0000     1.2000     0.0000     1.4000     0.5000

Розраховане значення Pmp: 13765.9168
fx >> |

```

Рисунок 5.9 – Результат розрахунку втрати електроенергії в трансформаторі електропостачання

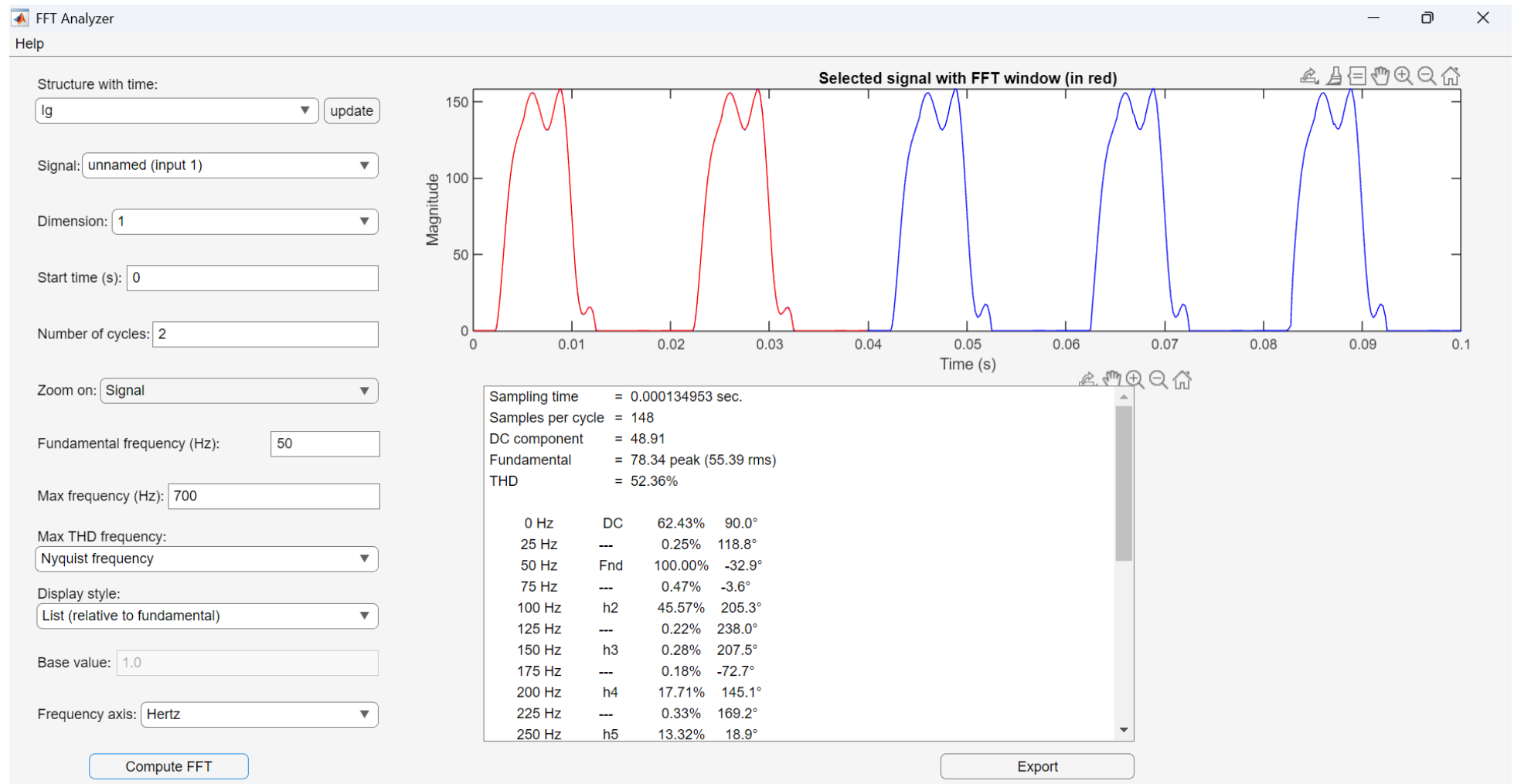


Рисунок 5.10 – Аналіз струму мережі на присутність інших гармонік

```

[ 0]  {'DC' } {[62.4325]} {[ 90]}
{[ 25]} {'---'} {[ 0.2497]} {[118.8281]}
{[ 50]} {'Fnd'} {[ 100]} {[ -32.9383]}
{[ 75]} {'---'} {[ 0.4740]} {[ -3.6451]}
{[100]} {'h2' } {[45.5745]} {[205.2887]}
{[125]} {'---'} {[ 0.2205]} {[238.0389]}
{[150]} {'h3' } {[ 0.2841]} {[207.4923]}
{[175]} {'---'} {[ 0.1785]} {[ -72.6603]}
{[200]} {'h4' } {[17.7055]} {[145.0637]}
{[225]} {'---'} {[ 0.3334]} {[169.2039]}
{[250]} {'h5' } {[13.3153]} {[ 18.9061]}
{[275]} {'---'} {[ 0.1923]} {[ 25.7674]}
{[300]} {'h6' } {[ 5.6997]} {[188.9170]}
{[325]} {'---'} {[ 0.2143]} {[170.3439]}
{[350]} {'h7' } {[ 9.5586]} {[ 13.0765]}
{[375]} {'---'} {[ 0.2946]} {[ 25.9363]}
{[400]} {'h8' } {[ 6.4469]} {[238.2204]}
{[425]} {'---'} {[ 0.1253]} {[250.7884]}
{[450]} {'h9' } {[ 0.3292]} {[ -6.0399]}
{[475]} {'---'} {[ 0.0609]} {[ -38.4543]}
{[500]} {'h10'} {[ 2.3079]} {[164.5906]}
{[525]} {'---'} {[ 0.0557]} {[196.4034]}
{[550]} {'h11'} {[ 0.2619]} {[ 27.7054]}
{[575]} {'---'} {[ 0.0390]} {[187.6699]}
{[600]} {'h12'} {[ 0.8548]} {[ 78.6775]}
{[625]} {'---'} {[ 0.0264]} {[ 38.8117]}
{[650]} {'h13'} {[ 0.2124]} {[159.7806]}
{[675]} {'---'} {[ 0.0471]} {[154.6387]}

```

Рисунок 5.11 – Лістинг програми в Matlab для розрахунку струму в лінії

Таблиця 5.5 – Перерахунок струму по гармоніях

| Гармоніки | Основна гармоніка, A (50 Гц) | Відсотки від основної, % | Струм, A $I_i$ |
|-----------|------------------------------|--------------------------|----------------|
| h =2      | 55.4                         | 45.6                     | 25.3           |
| h =3      | 55.4                         | 0.3                      | 0.2            |
| h =4      | 55.4                         | 17.7                     | 9.8            |
| h =5      | 55.4                         | 13.3                     | 7.4            |
| h =6      | 55.4                         | 5.7                      | 3.2            |
| h =7      | 55.4                         | 9.6                      | 5.3            |
| h =8      | 55.4                         | 6.4                      | 3.5            |
| h =9      | 55.4                         | 0.3                      | 0.2            |
| h =10     | 55.4                         | 2.3                      | 1.3            |
| h =11     | 55.4                         | 0.3                      | 0.2            |
| h =12     | 55.4                         | 0.9                      | 0.5            |
| h =13     | 55.4                         | 0.2                      | 0.1            |

```
% Визначення параметрів втрати потужності в лінії електропостачання
harmonics = 2:13; % Гармоніки від 2 до 13
I_nu = [25.3 0.2 9.8 7.4 3.2 5.3 3.5 0.2 1.3 0.2 0.5 0.1]; % Введіть значення струму
вручну (в A)
r = 1; % Введіть значення опору (в Ом)

% Перевірка коректності введення
total_harmonics = length(harmonics);
if length(I_nu) ~= total_harmonics
    error('Кількість введених струмів має збігатися з числом гармонік');
end

% Розрахунок потужності лінії
P_LEP = 0.47 * sum(I_nu.^2 .* r .* sqrt(harmonics));

% Виведення результату
fprintf('Потужність втрат в лінії: %.4f Вт\n', P_LEP);
>> Vtratu_power_line

Потужність втрат в лінії: 639.3737 Вт
```



Рисунок 5.12 – Лістинг програми в Matlab для розрахунку втрат в лінії мережі 0,4 кВ

## **5.9 Оформлення звіту**

Звіт повинен вміщувати параметри вимірювань однієї з включених навантажень за вказівкою викладача.

Розрахункові дані по додатковим втратам трансформатора при живленні несинусоїдальною напругою. Потужність трансформатору, що використовується, вказується також викладачем. Висновки повинні вміщувати аналіз отриманих результатів, способи і методи покращення якості напруги.

### **Контрольні запитання**

1. На які групи діляться ПЯЕ?
2. Назвіть основні ПЯЕ?
3. Як визначається несинусоїдальність кривої напруги?
4. Як впливає несинусоїдальність напруги на роботу окремих електроприймачів?
5. Які параметри вимірює аналізатор гармонік електричної мережі?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-23:2010. Державні будівельні норми України. Проектування електрообладнання житлових і громадських будівель і споруд. – На заміну ДБН В.2.5-23-2003 ; чинний від 2010–10–01. – Київ : Державний комітет України з будівництва та архітектури, 2010. – 104 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: [https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/v.2.5-23\\_2010.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/v.2.5-23_2010.pdf), вільний).
2. Правила улаштування електроустановок : офіційне видання. – Чинне від 21.07.2017. – Київ : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> , вільний).
3. Хоцкіна В. Б. Робота в пакеті MATLAB : навч. посіб. / В. Б. Хоцкіна, І. Н. Вдовиченко. – Кривий Ріг : Державний університет економіки і технологій, 2023. – 130 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: <https://api.dspace.duet.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3b0ebf90-2636-4c70-b6dd-2bf29b04b64a/content>, вільний).
4. MATLAB, Simulink, Simpowersystem. Основи програмування: лабораторний практикум [Електрон. ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з дисципліни «Пакети прикладних програм», ч. I, спеціалізація "Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії" / О. І. Толочко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8241 кБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 226 с – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/832b39bc-9b5e-4dc0-a8ba-fa40c783ed15/content>, вільний (дата звернення: 23.10.2025). – Назва з екрана.
5. Шкрабець Ф. П. Електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро : НГУ, 2015. – 540 с. – Існує електрон. версія. (Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/132413036.pdf>, вільний).

6. Василега П. О. Електропостачання : підручник / П. О. Василега. – Суми : СумДУ, 2019. – 521 с – Існує електрон. версія. (Режим доступу: <https://www.essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/72467>, вільний).

7. Бурбело М. Й. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навч. посіб. / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с. – Існує електрон. версія. Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/11784/Burbelo%20Elektropostachannya%202012.pdf?sequence=1>, вільний).

8. Методичні рекомендації до виконання курсової роботи «Електропостачання міст та промислових підприємств» з курсу «Електропостачання міст та промислових підприємств» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної, заочної та дистанційної форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання») [Електрон. ресурс] / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. В. Ф. Харченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 67 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/66800/1/2024%20270%D0%9C%20%D0%A0%D0%B5%D0%BF%D0%BE%D0%B7.%20%D0%A5%D0%B0%D1%80%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92.%D0%A4..pdf> , вільний (дата звернення: 23.10.2025). – Назва з екрана.

*Електронне навчальне видання*

Методичні рекомендації  
до виконання лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни

**«Електропостачання міст та промислових підприємств»**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної, заочної та дистанційної форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»)*

Укладачі: **ХАРЧЕНКО** Віктор Федорович  
**КУЗНЕЦОВ** Анатолій Іванович  
**ПЛАКСІН** Дмитро Едуардович

Відповідальний за випуск *В. Є. Плюгін*

Редактор *О. А. Норик*

Комп'ютерне верстання *Т. Ю. Четверікова*

План 2025, поз. 289М

---

Підп. до друку 23.10.2025. Формат 60 × 84/16.  
Ум. друк. арк. 5,1.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Чорноглазівська, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: office@kname.edu.ua  
Свідцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 8386 від 14.07.2025.