

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА СИСТЕМ

«На правах рукопису»  
УДК 621.311

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

В. Косиш  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« 10 » 12 2018 р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Спеціалізація - «Електричні системи та мережі»

на тему: Модернізація та адаптація розрахункової моделі УРМЕС-2М

для моделювання і розрахунків режимів електричних мереж

Виконав: студент 2(6) курсу, групи ЕС-71мп  
(шифр групи)

Гречин Юрій Олегович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Гречин Юрій Олегович  
(підпис)

Науковий керівник завідувач кафедри, професор, д.т.н. Кирик В.В.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Кирик В.В.  
(підпис)

Консультант релейний захист ст. викладач Хлистов В.М.  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Хлистов В.М.  
(підпис)

Консультант охорона праці професор, д.т.н Третьякова Л.Д.  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Третьякова Л.Д.  
(підпис)

Консультант стартап-проект ст. викладач Бахмачук С.В.  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Бахмачук С.В.  
(підпис)

Рецензент к.т.н., професор Бардик В.І.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Бардик В.І.  
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент Гречин Юрій Олегович  
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики  
Кафедра електричних мереж та систем

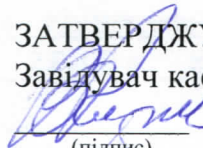
Рівень вищої освіти – магістерський за освітньо-професійною програмою

Спеціальність – **141** Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація – «Електричні системи і мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Кирик В.В.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«27» 11 2018 р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

Гречину Юрію Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Модернізація та адаптація розрахункової моделі УРМЕС-2М для моделювання і розрахунків режимів електричних мереж».

науковий керівник дисертації професор, д.т.н. Кирик Валерій Валентинович,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «7» листопада 2018 р. №4107-С.

2. Строк подання студентом дисертації «10» грудня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження: моделі електричних систем ті їх складових елементів

4. Предмет дослідження: методи та алгоритми досліджень режимів роботи електричних мереж


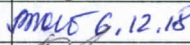


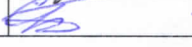

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Провести аналіз літератури за вибраній темі. 2. Розробити цикл лабораторних робіт. 3. Розробити генератор синусоїдальної напруги на мікроконтролері ATMEGA 48. 4. Розробити стартап-проект. 5. Провести аналіз циклу лабораторних робіт. 6. Обрати та розрахувати релейний захист шунтувальних реакторів. 7. Описати охорону праці та техніку безпеки в надзвичайних ситуаціях при експлуатації установки УРМЕС-2М.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1. Дослідження усталених режимів замкнутої електричної мережі. 2. Збирання розрахункової схеми та набір параметрів елементів. 3. Результати

вимірювань та їх оброблення. 4. Перевірка отриманих результаті в MATLAB Simulink. 5. Дослідження оптимального розподілу потужності в електричній мережі. 6. Реконструкція повітряної лінії електропередавання 7. Релейний захист шунтувальних реакторів. 8. Електронно-цифрова генераторна станція на мікроконтролері ATMEGA 48

7.Орієнтований перелік публікацій: Кирик В.В., Халіков В.А. Гречин Ю.О. Удосконалення розрахункової моделі УРМЕС-2М для моделювання режимів електричних мереж // Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. «Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики». – 2018 2. Гречин Ю.О. Аналіз сучасних SCADA-систем в електроенергетиці // Міжнародна наукова конференція «Актуальні наукові дослідження в сучасному світі». – 2018, – с.32-35.

#### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Релейний захист	ст. викладач Хлистов В. М.	 19.10.18	 6.12.18
Охорона праці	професор, д.т.н. Третьякова Л. Д.		
Стартап-проект	ст. викладач Бахмачук С. В.		

#### 9. Дата видачі завдання « 7 » листопада 2018 р.

##### Календарний план

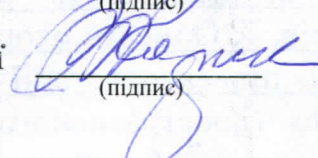
№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літератури по вибраній темі	7.11.2018 – 10.11.2018	
2	Розробка циклу лабораторних робіт	9.11.2018 – 16.11.2018	
3	Розробка генератора мікроконтролері ATMEGA 48 на	17.11.2018 – 24.11.2018	
4	Розроблення стартап-проекту	25.11.2018 – 28.11.2018	
5	Проведення та аналіз циклу лабораторних робіт	29.11.2018 – 01.12.2018	
6	Вибір та розрахунок релейного захисту шунтувальних реакторів	02.12.2018 – 04.12.2018	
7	Охорона праці та безпека під час роботи на установці	05.12.2018 – 06.12.2018	
8	Оформлення отриманих результатів	07.12.2018 – 08.12.2018	
9	Оформлення технічних креслень	08.12.2018 – 09.12.2018	

Студент

  
(підпис)

Ю.О. Гречин  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

  
(підпис)

В.В. Кирик  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки та графічного матеріалу. Пояснювальна записка містить у собі 188 сторінок машинописного тексту формату А4, містить 94 рисунків та 24 таблиць, 20 джерел використаної літератури. Графічна частина складається з 9 аркушів технічних креслень у форматі А1.

В дисертації розглянуто і запропоновано варіант удосконалення універсального лабораторного стенду УРМЕС-2М, розроблено та проведено цикл лабораторних робіт за допомогою програмного комплексу Matlab та проведено моделювання монтажною плати електронно-цифрового генератора.

**Актуальність теми.** Підготовка та вдосконалення висококваліфікованих кадрів, озброєних сучасними знаннями, практичними навичками являється однією з найважливіших завдань навчальних закладів. Одним з напрямків яким має йти це вдосконалення, являється розвиток і зміцнення матеріало-технічної бази навчальних закладів. Лабораторна установка УРМЕС-2М, що призначена для моделювання режимів електричних мереж, являється гарним інструментом для студентів підкріпити теоретичну частину свого навчання, та здобути технічних, професіональних навичок. Але дані установки на сьогодні потребують значної модернізації, оскільки знаходяться у використанні вже досить довгий час. Дане удосконалення являється фінансово доступним варіантом модернізації установки та її адаптацію до сучасних комп'ютерних систем.

**Мета магістерської дисертації** є модернізація універсальної розрахункової моделі УРМЕС-2 та створення основи до подальшого вдосконалення, створення циклу лабораторних робіт по дослідженню режимів роботи електричних мереж, визначення параметрів складних електричних мереж, дослідження оптимальних експлуатаційних схем неоднорідних електричних мереж, дослідження оптимального розподілу потужності .

**Об'єкт дослідження:** моделі електричних систем та мереж та їх складових елементів.

**Предмет дослідження:** методи та алгоритми дослідження режимів роботи електричних мереж.

**Методи дослідження:** описовий, імітаційне та аналогове моделювання, системний підхід.

**Наукова новизна результатів:** створено цикл лабораторних робіт з моделювання енергосистем на УРМЕС-2М для виконання дослідницьких наукових задач та порівняння їх результатів з розрахунками та з результатами моделювання в середовищі MATLAB Simulink. Розроблена генераторна станція на основі мікроконтролера ATMEGA 48, що дало змогу замінити застарілу та ненадійну сельсинову генераторну станцію універсальної розрахункової моделі УРМЕС-2М.

**Публікація за тематикою досліджень:**

1. Кирик В.В., Халіков В.А. Гречин Ю.О. Удосконалення розрахункової моделі УРМЕС-2М для моделювання режимів електричних мереж // Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. «Сучасні проблеми електроенергетикі та автоматики». – 2018

2. Гречин Ю.О. Аналіз сучасних SCADA-систем в електроенергетиці // Міжнародна наукова конференція «Актуальні наукові дослідження в сучасному світі». – 2018, – с.32-35.

УРМЕС-2М, АНАЛОГОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ, РЕЖИМИ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ, ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ, РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ.

## ABSTRACT

The master's dissertation consists of an explanatory note and graphic material. The explanatory note contains 188 pages of typewritten A4 text, contains 94 figures and 24 tables, 20 sources of used literature. Graphic part consists of 9 pieces of technical drawings in the format A1.

In the dissertation the variant of perfection of the universal laboratory stand URMES-2M was considered and proposed, the cycle of laboratory works was developed and conducted with the help of the Matlab software package and the simulation of the electronic-digital generator circuit board was carried out.

**Actuality of theme.** The training and improvement of highly skilled personnel equipped with modern knowledge and practical skills is one of the most important tasks of educational institutions. One of the directions that this improvement is to go is the development and strengthening of the material and technical base of educational institutions. The URMES-2M laboratory, designed to simulate the modes of electric networks, is a good tool for students to reinforce the theoretical part of their training and gain technical and professional skills. But these installations today need to be significantly upgraded, since they are in use for quite some time. This improvement is a financially feasible option for upgrading the installation and its adaptation to modern computer systems.

**The purpose of the master's thesis** is a modernization of the universal calculation model URMES-2 and creation of the basis for further improvement, the creation of a cycle of laboratory work on the study of modes of operation of electric networks, the determination of parameters of complex electrical networks, the study of optimal operating schemes of heterogeneous electrical networks, the study of optimal power distribution.

**Object of research:** models of electric systems and networks and their constituent elements.

**Subject of research:** methods and algorithms of research of operating modes of electric networks.

**Research methods:** descriptive, simulation and analog modeling, system approach.

**Scientific novelty of the results:** a cycle of laboratory works on the modeling of power systems at URMES-2M was created to perform research tasks and compare their results with calculations and simulation results in the MATLAB Simulink environment. A generating station was developed based on the AMEGA 48 microcontroller, which made it possible to replace the obsolete and unreliable generating station of the universal calculation model URMES-2M.

**Publication on research topics:**

1. Kirik V.V., Khalikov V.A., Hrechyn Y.O. Improvement of the calculation model of URMES-2M for the simulation of modes of electric networks // International scientific and technical conference of young scientists, post-graduate students and students. "Modern problems of electric power engineering and automation". – 2018

2. Grechin Y.O. An analysis of modern SCADA systems in electric power engineering // International scientific conference "Actual scientific researches in the modern world". – 2018, – p.3 2-35.

URMES-2M, ANALOGUE MODELING, ENERGY MODELING, ENERGY PERFORMANCE MODES, ENERGY OPTIMIZATION, CALCULATION MODEL.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	10
ВСТУП .....	11
1 АНАЛОГОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ.....	13
1.1 Принцип роботи аналогової обчислювальної машини .....	14
1.2 Аналогова універсальна розрахункова модель енергетичних систем УРМЕС-2М .....	17
1.2.1 Загальна характеристика моделі.....	17
1.2.2 Склад моделі.....	18
1.2.3 Опис основних елементів.....	19
Висновки до розділу.....	28
2 РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ НА УРМЕС-2М ДЛЯ ВИКОНАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКИХ НАУКОВИХ ЗАДАЧ.....	29
2.1 Дослідження режимів роботи лінії електропередавання на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС-2М.....	31
2.2 Дослідження усталених режимів замкнутої електричної мережі .....	36
2.3 Визначення параметрів режиму складної електричної мережі на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС-2М.....	44
2.4 Вибір оптимальної експлуатаційної схеми неоднорідної електричної мережі .....	64
2.5 Оптимальний розподіл потужності в електричній мережі .....	70
Висновки до розділу .....	79
3 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ПЕРЕВІРКА ДОСЛІДНИЦЬКИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ НА УРМЕС-2М.....	81

3.1 Приклад виконання лабораторної роботи та перевірка результатів дослідження режимів роботи лінії електропередавання на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС-2М.....	82
3.2 Приклад виконання лабораторної роботи та перевірка результатів дослідження усталених режимів замкнутої електричної мережі на УРМЕС-2.....	91
3.3 Приклад виконання лабораторної роботи та перевірка результатів дослідження оптимального розподілу потужностей в електричній мережі.....	122
Висновки до розділу .....	141
4 МОДЕРНІЗАЦІЯ УРМЕС-2М ШЛЯХОМ ЗАМІНИ БЛОКУ СЕЛЬСИНОВИХ ГЕНЕРАТОРНИХ СТАНЦІЙ НА ЕЛЕКТРОННО – ЦИФРОВУ ГЕНЕРАТОРНУ СТАНЦІЮ.....	142
4.1 Опис головного контролера. Моделювання плати пристрою генерації сигналу напруги генераторної станції з УРМЕС-2М.....	143
Висновки до розділу .....	151
5 РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ.....	153
5.1 Вступ. Загальні положення .....	153
5.2 Пристрій захисту RET 521.....	153
5.3 Розрахунок та вибір параметрів спрацювання повздовжнього диференційного струмового захисту шунтувального реактору.....	157
5.4 Розрахунок і вибір параметрів спрацювання поперечного диференційного струмового захисту.....	160
Висновки до розділу.....	163
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ УРМЕС-2М .....	164
6.1 Технічні характеристики універсальної розрахункової моделі УРМЕС-2М .....	164

6.2 Дослідження та аналіз умов праці на робочих місцях електротехнічних працівників.....	165
6.3 Вибір і розрахунок технічних засобів і заходів безпеки до електроустановки УРМЕС -2М.....	166
6.3.1 Розрахунок кабелю для живлення розрахункової моделі УРМЕС-2.....	166
6.3.2 Розрахунок УЗО для універсальної розрахункової моделі УРМЕС-2М.....	168
6.4 Вибір заходів і засобів безпеки у надзвичайних ситуацій.....	169
Висновки до розділу.....	171
7 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ УРМЕС-2М.....	171
7.1 Вступ.....	172
7.2 Опис ідеї проекту.....	173
7.3 Технологічний аудит ідеї проекту.....	175
7.4 Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту.....	179
Висновки до розділу.....	181
ВИСНОВКИ.....	182
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	184
Додаток А. Результати перевірки на плагіат.....	186

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

УРМЕС-2М - універсальна розрахункова модель електричних систем

АМ - аналогова модель

НЕ - навантажувальний елемент

АНПВ - апарат постійних вольт-ампер

ТЕ - трансформаторний елемент

ЛЕ - лінійний елемент

РТ - розділювальний трансформатор

КП - комутаційна панель

ПЛО - панель лінійних опорів

ВШ - вимірювальний штекер

СШ - сполучний штекер

КВП - комплект вимірювальних приладів

ЕРС - електрорушійна сила

ПП - підсилювач потужності

ПН - підсилювач напруги

АТ - автотрансформатор

ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач

ПЛК - програмно-логічний контролер

ОЗ - обернений зв'язок

АЛП - аналогово-логічний пристрій

ШР – шунтувальний реактор

МКЛ - мікроконтроллер

## ВСТУП

Енергетика являється однією з найважливіших структурною складовою економіки України, що зумовлює добробут населення і забезпечує життєдіяльність майже майже всіх галузей промисловості. Надійне і стабільне функціонування енергетичного комплексу є основою успішного проведення економічних і соціальних перетворень в країні. На даний час основною метою при розробці енергетичної стратегії являється створення напрямків для найбільш раціонального використання природних енергетичних ресурсів, оптимізація та автоматизація найголовніших процесів в електроенергетиці для покращення виробничих показників і в свою чергу піднесення добробуту населення. Не менш важливим являється також забезпечення безпечних умов для життя населення, а також зниження екологічного впливу від енергетичних підприємств. Для досягнення цієї мети необхідно, щоб енергетична стратегія України була сфокусована не так на визначенні параметрів розвитку паливно-енергетичного комплексу, а на формуванні середовища та умов, за яких цей процес розвивався б в потрібному напрямку. Однією з таких умов є ефективне лабораторно-практичне забезпечення студентів-енергетиків.

Підготовка висококваліфікованих кадрів, озброєних сучасними знаннями, практичними навичками є однією з найважливіших завдань навчальних закладів. Тому на даний час гостро відчувається необхідність вдосконалення змісту навчання, засобів і методів підготовки фахівців.

Одним з напрямків, яким має йти це вдосконалення, є розвиток і зміцнення матеріально-технічної бази навчального закладу. Сюди відносяться, в першу чергу, широке впровадження технічних засобів навчання, обладнання лабораторій і кабінетів обладнанням та приладами, модернізація лабораторних стендів і макетів, з урахуванням останніх досягнень науки і техніки на сучасній компонентній базі.

Виконання студентами лабораторних робіт є важливим засобом більш глибокого засвоєння і вивчення навчального матеріалу, а також придбання практичних навичок з експериментального дослідження та поводження з вимірювальними приладами.

Аналогове моделювання - один з видів моделювання який потребує окремої уваги, заснований по аналогії (у більш точних термінах - ізоморфізмі) явищ, що мають різну природу походження, але описуваних ідентичними математичними (диференціальними, алгебраїчними або іншими) рівняннями. Вищеназваний спосіб дослідження все менше займає місце в дослідженнях енергосистем в зв'язку з появою комп'ютерного моделювання, однак, аналогове моделювання дає можливість спостерігати фізику процесу в енергетичній моделі в реальному часі, що дає змогу дослідникам наочно побачити з чим вони можуть стикнутися в реальних енергосистемах.

Універсальна розрахункова модель енергосистем УРМЕС-2 на змінному струмі призначена для дослідження сталих і перехідних процесів при різних режимах електричних систем.

Виконання лабораторних робіт на універсальній розрахунковій моделі електричних систем сприяє закріпленню у студентів глибокого уявлення про фізичні процеси в дослідженні режимів роботи електричних мереж і систем і набуття ними професійних, а не тільки теоретичних навичок.

Метою даної магістерської дисертації є розробка циклу лабораторних робіт для проведення досліджень електричних мереж на універсальній аналоговій розрахунковій моделі УРМЕС-2М, перевірка отриманих результатів, вдосконалення моделі шляхом впровадження новітніх комп'ютерних технологій.

## 1 АНАЛОГОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Аналогові обчислювальні моделі використовують неперервну форму інформації та аналітичних принципів її переробки, при впровадженні якого кожній аналітичній залежності між математичними змінними відповідає подібний аналітичний опис зв'язку між машинними змінними. Будь-яка проста математична операція в АОМ – додавання, множення, інтегрування і т.д. виконується окремими елементарними блоками машини, в якого аналітичний зв'язок між вхідними і вихідними фізичними величинами подібний до заданої аналітичної залежності.

Неперервна форма надання інформації і аналітичний принцип обробки цієї ж інформації забезпечують безперервне розв'язку математичної задачі на АОМ і високу швидкодю. Але точність роботи АОМ може мати обмеження щодо точності виготовлення її окремих елементарних блоків і стабільністю їх характеристик у процесі розв'язку задачі. Вказані якості АОМ разом з відносно малим часом і простотою підготовки задачі для машинного розв'язку, простотою обслуговування і нескладною конструкцією вигідно вирізняють АОМ від інших обчислювальних машин тих випадках, коли не вимагається високої точності й універсальності.

Особливе значення сучасні АОМ і їх окремі пристрої мають для розв'язку задач моделювання динамічних процесів, що описуються різними типами диференціальних рівнянь високих порядків, та управління цими процесами.

Аналогове моделювання – це процес заміни існуючого логічного чи матеріального оригіналу на аналогову модель. Аналогова модель – матеріальна подібна модель, що описується рівняннями, які зв'язують безперервні величини. Метою вищезазначеного аналогового моделювання являється автоматичне чи напівавтоматичне рішення різних математичних задач.

## 1.1 Принцип роботи аналогової обчислювальної моделі

Моделювання на АОМ відрізняється своєю простотою і не потребує знань в області чисельного аналізу. Воно виконується в такій послідовності:

- а) приведення математичної моделі системи до вигляду зручного для програмування на АОМ;
- б) складання структурної схеми моделі;
- в) вибір масштабів і коефіцієнтів передачі операційних підсилювачів;
- г) розробка схеми набору моделі на комутаційній панелі АОМ;
- д) створення моделі, підключення додаткової – реєструвальної та узгоджувальної апаратури, проведення дослідів. Як реєстраційна апаратура можуть застосовуватися електронні осцилографи різних типів, самопишучі прилади тощо.

Суть аналогового моделювання полягає в наступному. Поставлена задача має математичний опис у вигляді відповідного рівняння. Це рівняння – оригінал, або модельоване рівняння. Для цього підбирається пристрій з аналогічним математичним описом у вигляді схожого рівняння, яке являється машинним, чи моделюючим рівнянням. Змодельоване рівняння пов'язує математичні величини, що являється неперервними, а моделююче – неперервні машинні величини.

Математична аналогія свою чергу змінюється на подібність. При цьому математичні і машинні величини являється пропорційними. Якщо вхідні машинні величини пропорційні математичним, то вихідні машинні величини пропорційні математичним, що і являється розв'язком. Якщо модельоване рівняння розглядається як самостійний об'єкт-оригінал, то пристрій з подібним машинним рівнянням – являється матеріальною моделлю логічного об'єкта. Якщо змодельоване рівняння являється математичним описом, тобто розрахункова модель деякої системи, наприклад системи автоматичного керування, то пристрій з подібним машинним рівнянням – матеріальна модель такого самого об'єкта[1].

Основні особливості аналогового моделювання обчислювальних операцій розглянемо на прикладі. Нехай необхідно здійснити автоматичне відтворення

функції двох змінних  $x_1, x_2$ , що неперервно змінюється в певних межах, причому  $a_1 > 0$ ,  $a_2 > 0$  – сталі величини:

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 \quad (1.1)$$

Цей вираз є в свою чергу математичним описом поставленої задачі-рівняння-оригінал чи модельоване рівняння. Згідно з першою умови подібності двох об'єктів, аналоговою моделлю оригінального об'єкту повинен бути матеріальний об'єкт зі схожим математичним описом. Таким об'єктом являється електрична схема, зображена на рис. 1.1. Математичний опис – вираження вихідної напруги і через вхідні  $u_1, u_2$  :

$$u = a_{M1} \cdot u_1 + a_{M2} \cdot u_2 \quad (1.2)$$

$$a_{M1} = G_1 / (G_0 + G_1 + G_2), \quad a_{M2} = G_2 / (G_0 + G_1 + G_2),$$

де  $G_0, G_1, G_2$  - провідності резисторів  $R_0, R_1, R_2$ .

Вказаний вираз являється машинним, чи моделюючим рівнянням.

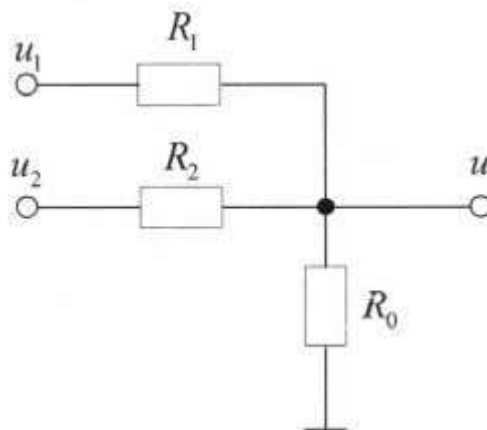


Рисунок 1.1 – Схема АОМ

Згідно з другою умовою подібності, схлжі змінні модельованого і моделюючого рівняння повинні бути зв'язані масштабами. Масштаб, що зв'язує декілька схожих

змінних оригінала  $u$  і моделі  $u_M$ , допустимо приймати у вигляді відношення машинної величини до математичної чи навпаки.

$$m = u / u_M, \quad (1.3)$$

$$M = u_M / u, \quad (1.4)$$

При аналоговому моделюванні перевага надається представленню масштабу у вигляді (1.3). Масштаб при цьому являється ціною одиниці моделюючої машинної змінної до ціні поділки шкали вимірювального пристрою. Величина  $m$ , що визначаються (1.3), називаються масштабами. Обернені величини  $M$  – називаються масштабними коефіцієнтами.

$$m_1 = x_1 / u_1, \quad m_2 = x_2 / u_2, \quad (1.5)$$

Виходячи з третьої умови подібності, числові значення масштабів мають задовольняти відповідним масштабним рівнянням. Для їх отримання представимо (1.1), (1.2) у безмірній формі:

$$1 = \frac{a_1 \cdot x_1}{y} + \frac{a_2 \cdot x_2}{y}, \quad 1 = \frac{a_{M1} \cdot u_1}{y} + \frac{a_{M2} \cdot u_2}{y}.$$

Критерій подібності оригінала і моделі записується у вигляді:

$$\Pi_1 = \frac{a_1 \cdot x_1}{y}, \quad \Pi_2 = \frac{a_2 \cdot x_2}{y}, \quad \Pi_{M1} = \frac{a_{M1} \cdot u_1}{y}, \quad \Pi_{M2} = \frac{a_{M2} \cdot u_2}{y}.$$

Поділивши критерій подібності оригінала на критерій подібності моделі, отримаємо 2 масштабних рівняння, що мають п'ять невідомих  $m_y, m_1, m_2, a_{M1}, a_{M2}$  :

$$\frac{\Pi_1}{\Pi_{M1}} = \frac{a_1 \cdot x_1}{a_{M1} \cdot u_1 \cdot y \cdot u^{-1}} = \frac{a_1 \cdot m_1}{a_{M1} \cdot m_y} = 1,$$

$$\frac{P_2}{P_{M2}} = \frac{a_2 \cdot x_2}{a_{M2} \cdot u_2 \cdot y \cdot u^{-1}} = \frac{a_2 \cdot m_2}{a_{M2} \cdot m_y} = 1.$$

Після вибору доцільних значень  $m_y, m_1, m_2$  однозначно визначимо коефіцієнти  $a_{M1}$  та  $a_{M2}$ , при яких масштаби задовольняють масштабні рівняння. По значеннях  $a_{M1}$  та  $a_{M2}$  знайдемо провідності резисторів схеми (рис. 1.1).

Згідно з четвертою умовою подібності – однозначність розв’язків рівнянь, що представляють опис оригіналу і модель – в даному випадку відпадає, тому що задані значення аргументів  $x_1, x_2, u_1, u_2$  однозначно визначають значення функцій (1.1) та (1.2).

З п’ятої умови подібності - оригінала і моделі підлягають у необхідності подібності відомих функцій, що містяться в їх математичних описаннях [2].

Вплив кожної вихідної дії лінійної системи на її вихідну реакцію можна характеризувати, як відомо з теорії автоматичного керування, коефіцієнтом передачі. Подібність моделюючого і модельованого рівнянь характеризує вплив вихідної дії АОП на вихідну реакцію машинним і математичним коефіцієнтом передачі.

Аналогові обчислювальні машини мають змогу працювати і на змінному струмі, точніше на синусоїдальному струмі постійної частоти.

## **1.2 Аналогова універсальна розрахункова модель енергетичних систем УРМЕС-2М**

### **1.2.1 Загальна характеристика моделі**

Універсальна розрахункова модель (лабораторний стенд) енергосистем УРМЕС-2М змінного струму призначається для аналогового моделювання енергосистем і дослідження режимів їх роботи при проектування та експлуатації.

Дана модель дає змогу досліджувати сталі режими, перехідні електромеханічні та електромагнітні процеси, а саме:

- а) визначити поточкорозподіл і напруги в системах, втрати потужності в мережі і в окремих ланках системи;
- б) визначити оптимальне розташування синхронних компенсаторів та розподіл реактивних потужностей між станціями;
- в) порівняти різні варіанти схем електропередавання і схем електричних систем (блокові та зв'язані схеми, схеми з повздожньою та поперечною компенсацією, кількість ланцюгів та перемикальних пунктів, розташування приймальних та проміжних підстанцій і т.п.);
- г) визначити проміжну спроможність електропередавання та ефективність заходів щодо її збільшення;
- д) визначити запаси статичної та динамічної стійкості системи;
- е) визначити вихідні умови для проектування релейного захисту й лінійної автоматики (швидкість відключення КЗ, допустимий цикл АПВ та ін.);
- ж) визначити необхідні характеристики систем збудження і регуляторів;
- з) визначити струми короткого замикання і відключаючу здатність вимикачів.

На розрахунковій моделі безпосередньо моделюється лише енергетична схема енергетосистеми та опору її елементів. Пристрої автоматики сучасних енергосистем, такі як регулятори швидкості первинних двигунів, регулятори збудження синхронних машин, і т.п., в статичних моделях не моделюється безпосередньо, а їх дія враховується при математичному розрахунку величини і фази перехідної або синхронної ЕРС генератора.

### 1.2.2 Склад моделі

Модель УРМЕС-2М складається з 3-х однотипних стійок з загальним блоком живлення.

Технічні характеристики розрахункової моделі УРМЕС 2:

- а) клас точності – 2,5;
- б) робоча частота – 200 Гц;
- в) живлення від мережі трьох фаз - 220/380 В, 50 Гц;

г) споживана потужність – 1,5 кВ.

До складу моделі входять:

- а) 12 сельсинових генераторних станцій (СГС);
- б) 12 ручних навантажувальних елементів (НЕ);
- в) 12 апаратів постійних вольт-ампер (АНПВ);
- г) 36 трансформаторних елементів (ТЕ);
- д) 84 лінійних елементів (ЛЕ);
- е) 6 ємнісних елементів (СЕ);
- ж) 2 розділових трансформатора (РТ);
- з) 3 комутаційні панелі (КП);
- и) 3 панелі лінійних опорів (ПЛО);
- к) 3 комплекти вимірювальних приладів (ПРМ-2).

### 1.2.3 Опис основних елементів

Розглянемо детальніше генераторну станцію. Сельсин-генераторна станція (рис. 1.2) призначена для моделювання синхронних машин в нормальних і аварійних режимах.

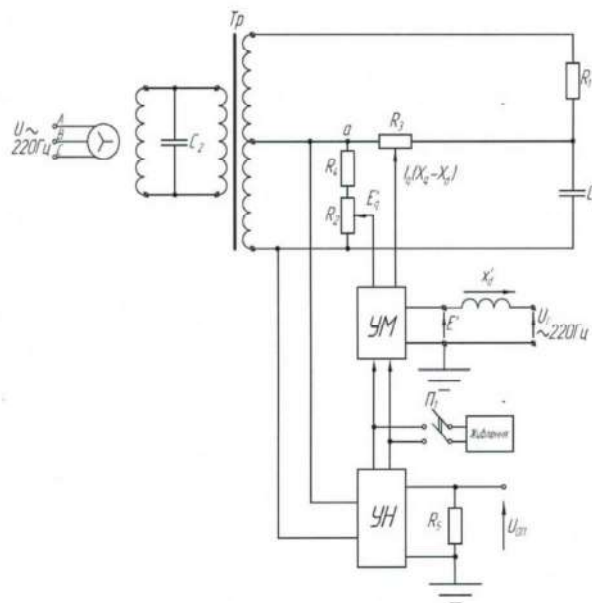


Рисунок 1.2 – Сельсинова генераторна станція

Генераторна станція складається з індуктивних опорів, відтворюючих повздовжній реактивний опір  $x'_d$  і пристрою, що дає змогу відтворити ЕРС  $E'$  за цим реактивним опором враховуючи постійні часу контурів в повздовжній та поперечній осях генератора.

Реактивний опір  $x'_d$  набирається на тридекадному магазині опорів в межах від 0 до 999 Ом.

ЕРС  $E'$  з'являється з результатів векторного додавання ЕРС  $E'_q$  і напруги  $I_q(X_q - X'_d)$ , зміщеної відносно  $E'_q$  на  $90^\circ$ .

Ці напруги знімаються на відповідних потенціометрах  $R_2$  та  $R_3$  по відношенню до точки а і через підсилювач потужності (ПП) через опір  $x'_d$ . Їхня схема подається в досліджувану схему.

Для одержання необхідного зсуву фаз між напругами  $E'_q$  і  $I_q(X_q - X'_d)$ , служить коло  $R_1, C_1$ .

Ручки потенціометрів виведені на лицьову панель, шкали потенціометрів градуйовані в вольтах в межах  $E'_q = 40 \div 80$  В,  $I_q(X_q - X'_d) = 0 \div 30$  В.

Фаза ЕРС  $E'_q$  плавно регулюється від  $0^\circ$  до  $360^\circ$  за допомогою фазообертового пристрою, в якості якого використовується сельсин (С) (загальмований синхронний двигун). Живлення сельсинів генераторних станцій здійснюється трифазною симетричною напругою з частотою 200 Гц від блоку живлення СГС. На виході генераторів Г1 ÷ Г2 отримуємо однофазну напругу тієї ж частоти.

Величина  $(X_q - X'_d)$  визначається розрахунком, а величина  $I_q$  є проекцією струму генератора на вісь "q" і визначається через покази активного ватметра, до кола напруги якого підводиться напруга  $U_{оп} = 10$  В, Ця напруга, що збігається по фазі з  $E'_q$ , подається на підсилювач напруги (ПН). Величина напруги 10В може бути відрегульована опором.

На лицьовій панелі виведений також перемикач полярності струму  $I_q$  ("+"- для синхронного генератора, "-"- для синхронного двигуна і синхронного компенсатора).

При включенні тумблера "Живлення" (П1) подається напруга на підсилювачі станції і загоряється зелена лампочка.

Навантажувальні елементи призначаються для моделювання режиму роботи споживачів енергосистем і являють собою 3-декадний магазин активних і реактивних опорів: 6 елементів мають межі регулювання  $R$  і  $X$  від 0 до 9990 Ом через 10 Ом; 6 елементів - від 0 до 999 Ом через 1 Ом.

Навантаження представлено у вигляді послідовного або паралельного з'єднання  $R$  і  $X$ , в залежності від положення перемикача.

Пристрій АНПВ (рис. 1.3) автоматично підтримує задану активну і реактивну потужність навантаження незалежно від зміни напруги на вході апарата.

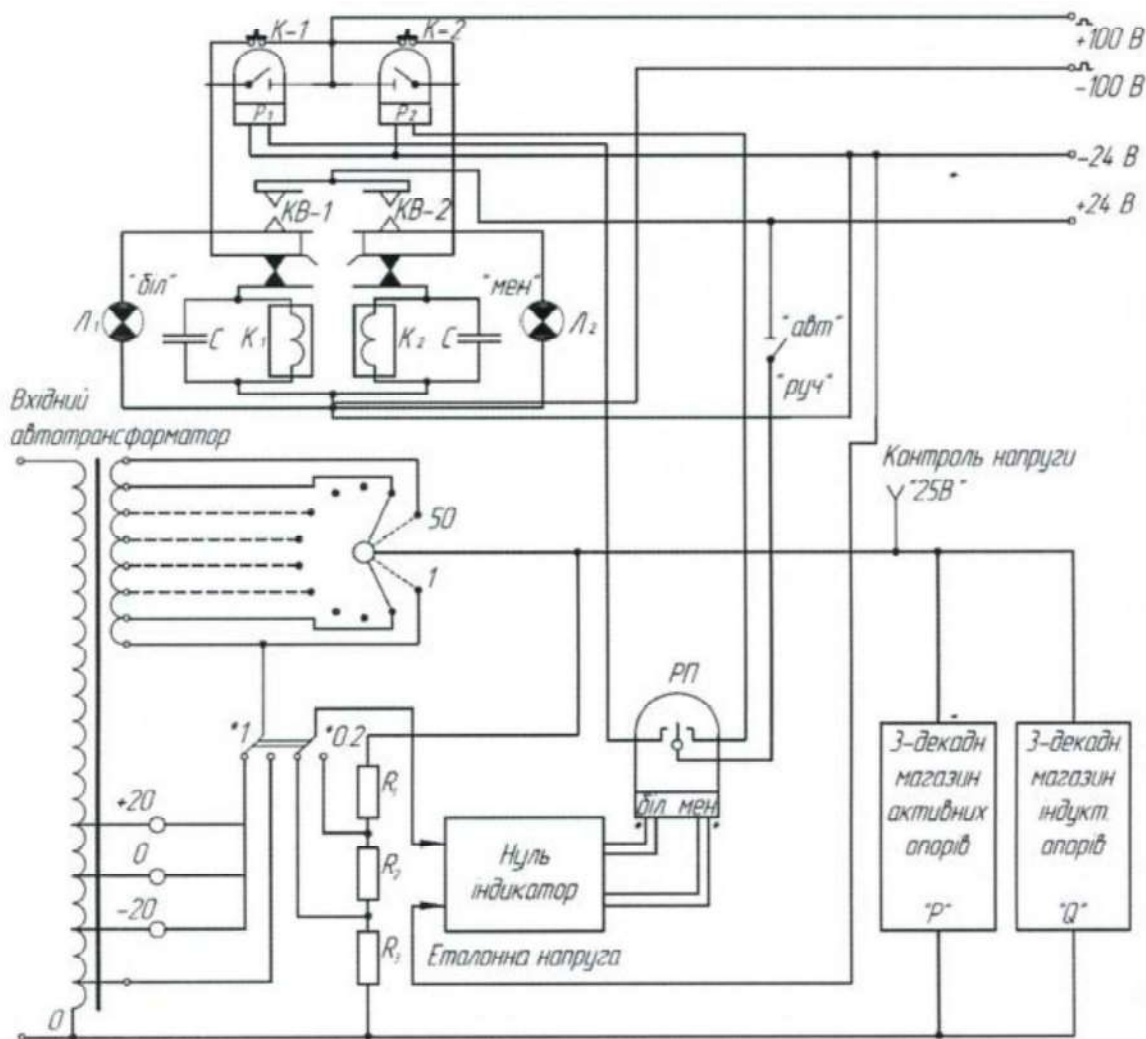


Рисунок 1.3 – Апарат постійних вольт-ампер

Номинальна напруга на вході апарата 50 В.

АНПВ містить два включених паралельно магазини активних і індуктивних опорів "P" і "Q" з трьохдекадним регулюванням Номинальна напруга, підтримувана на магазинах опорів, дорівнює 25 В при масштабі потужності "1" (1:1) і 11.2В при масштабі потужності "0,2" (1:5).

Апарат забезпечує автоматичне підтримування номінальної напруги на магазинах опорів при відхиленні вхідної напруги в межах:

- а)  $\pm 12,5\%$  - при установці меж грубого регулювання  $U_n \%$  в нульове положення;
- б)  $+7,5\% \div +32,5\%$  - при установці меж грубого регулювання  $U_n \%$  в положення "+20 %";
- в)  $- 7,5\% \div +32,5 \%$ — при установці меж грубого регулювання  $U_n \%$  в положення "-20 %".

Це досягається за допомогою чутливого органа (нуль індикатор) і реверсивного крокового шукача, перемикаючого відпайки вхідного трансформатора.

Схема працює в наступний спосіб. На вхід нуль-індикатора надходить еталонна напруга і через дільник  $R_1, R_2, R_3$ , — напруга з магазином опорів "P" і "Q". Якщо ці напруги рівні, то в обмотках поляризованого реле РП протікають струми рівні по величині і протилежно спрямовані. У цьому випадку якір реле РП знаходиться в нейтральному положенні. Якщо напруга на магазинах опорів відмінна від номінальної, то на вхід нуль-індикатора будуть подані дві різні за величиною напруги, баланс струмів в обмотках реле РП порушується і якір реле притягається в ліве або праве положень і подає +24 В на обмотку реле  $P_1$  або  $P_2$ . Реле  $P_1$  і  $P_2$  замикає свої контакти і через нормально закриті контакти кінцевих вимикачів КВ-1 або КВ-2 подає переривчасту напругу +100 В на один з електромагнітів ( $K_1$  або  $K_2$ ) перемикаючого пристрою. При цьому відбувається перемикання відпайки вхідного трансформатора. Якщо при знову обраній відпайці напруга на магазинах опорів стає номінальною, то якір реле РП відпадає і робота перемикаючого механізму припиняється. У разі, якщо в результаті роботи перемикаючого пристрою напруга на магазинах опорів не встановлюється номінальною, то перемикаючий механізм, дійшовши до останньої

відпайки автотрансформатора, розімкне через кінцеві вимикачі ланцюг живлення електромагніт і включить сигнальну лампочку "бол." або "мен."

При перестановці меж грубого регулювання автомат знову включається на автоматичну роботу. Зміна відпайок трансформатора можна проводити також за допомогою кнопок К1 і К2 в ручному режимі "руч".

Лінійні елементи (рис. 1.4) призначені для імітації лінії електропередавання. 50% лінійних елементів виконані по "П" - подібній схемі заміщення з (ємнісними елементами) (рис. 1.4), а 50% - у вигляді послідовно з'єднаних активного і індуктивного опорів (без ємнісних елементів).

Максимальна величина активного опору становить 60% від максимальної величини індуктивного опору.

Елементи "R і X" лінійних елементів виготовлені трьох типів:

- а)  $R = 0 \div 59,9 \text{ Ом}$ ,  $X = 0 \div 99,9 \text{ Ом}$ ;
- б)  $R = 0 \div 59,9 \text{ Ом}$ ,  $X = 0 \div 999 \text{ Ом}$ ;
- в)  $R = 0 \div 59,90 \text{ Ом}$ ,  $X = 0 \div 9990 \text{ Ом}$ .

Межі регулювання ємності у всіх лінійних елементах, виконаних по "П" подібній схемі однакові ( $C = 0,005 + 2,105 \text{ мкФ}$ ).

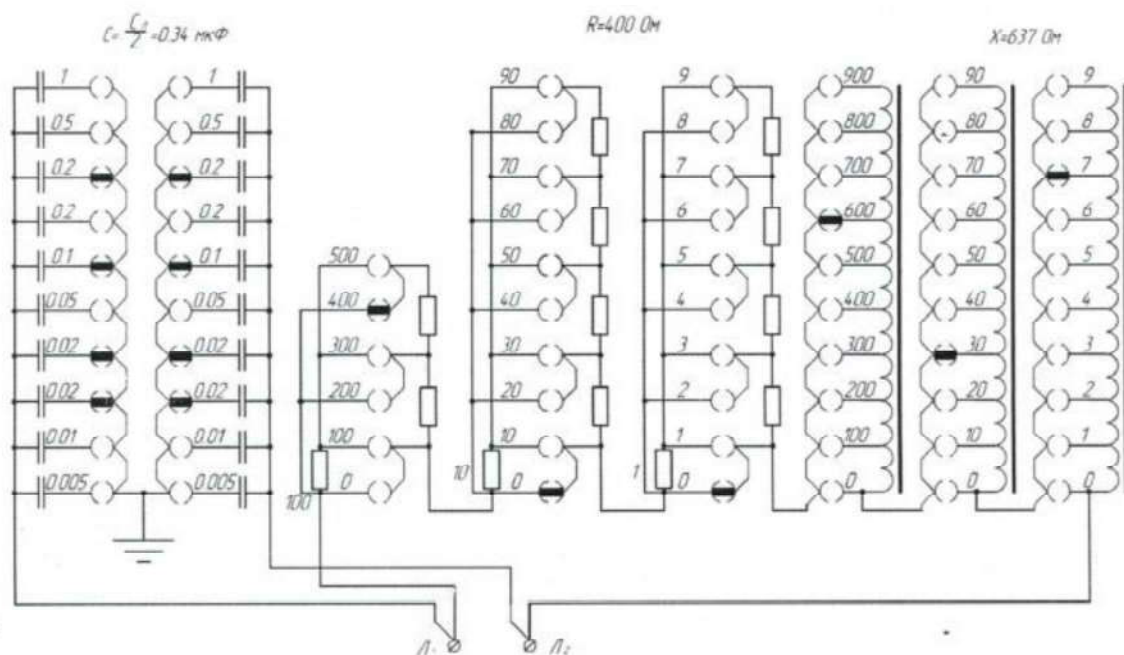


Рисунок 1.4 - Лінійний елемент

Трансформаторні елементи (рис. 1.5) призначені для моделювання трансформаторів досліджуваної енергосистеми.

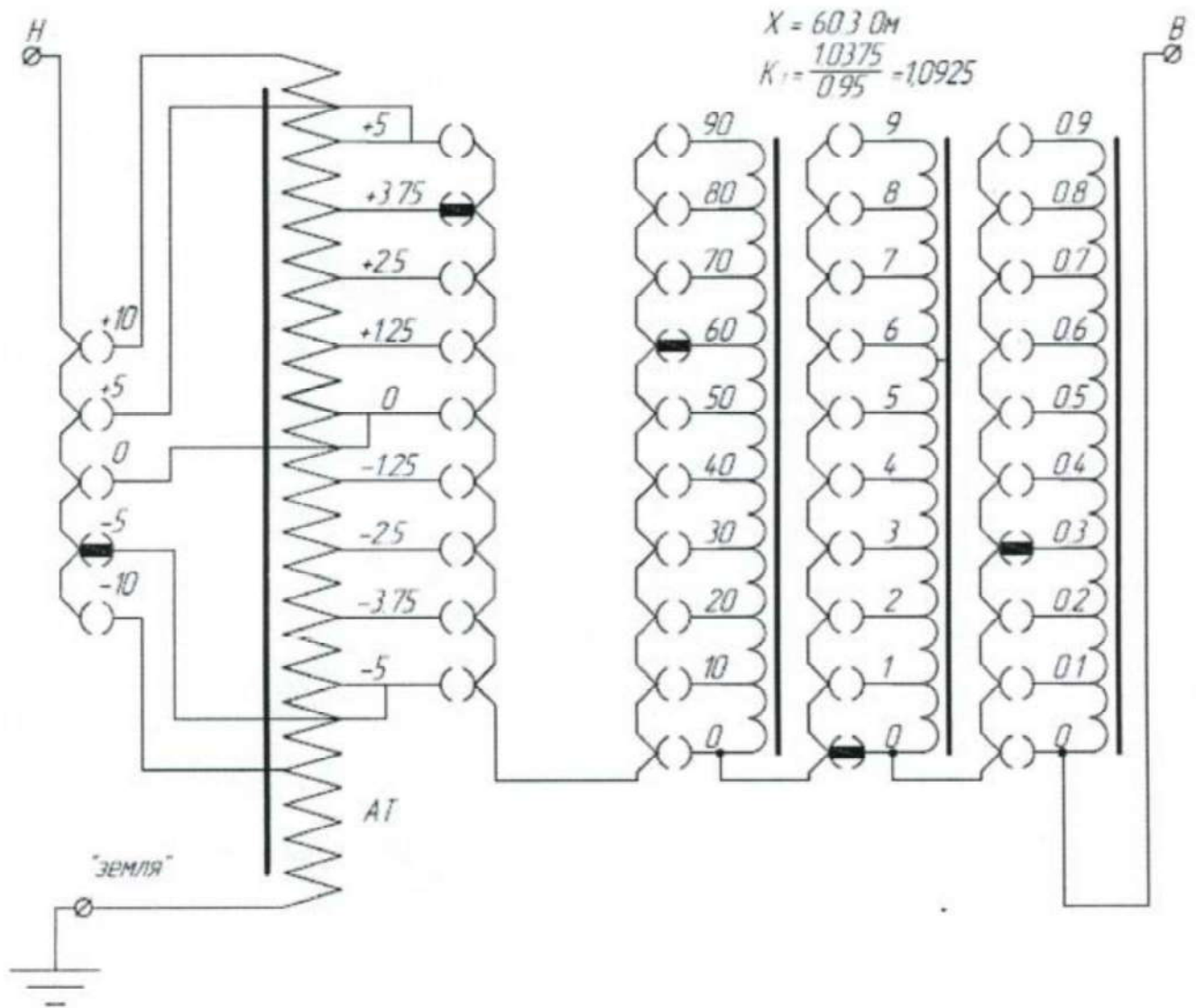


Рисунок 1.5 – Трансформаторний елемент

Кожен трансформаторний елемент складається з:

а) автотрансформатора (АТ) 1 відгалуженнями, що дозволять змінювати коефіцієнт трансформації на  $\pm 5\%$  ступенями через  $1,25\%$  на стороні "В" і  $\pm 10\%$  ступенями по  $5\%$  на стороні "Н" ("В" - сторона вищої напруги, "Н" - сторона нижчої напруги);

б) індуктивних опорів (ІО) - призначених для відтворення реактивного опору розсіювання модельованого трансформатора (в межах  $0 + 99,9 \text{ Ом}$  або  $0 + 999 \text{ Ом}$ ).

Струм холостого ходу АТ моделі становить 1 %, що приблизно відповідає струму холостого ходу модельованих трансформаторів.

Опір короткого замикання автотрансформаторів малий (0,5%) і ним можна знехмувати призначені коефіцієнта трансформації.

Відношення R/X в індуктивних опорах приблизно відношенню R/X в модельованих силових трансформаторах.

При моделюванні трьохобмоткових трансформаторів можна встановлювати різні коефіцієнти трансформації для обох підвищуючих обмоток.

Трансформаторні елементи постійно підключені до гнізд на комутаційних панелях. При наборі схеми досліджуваної системи для їх включення достатньо лише вставити у відповідні гнізда сполучні вилки на комутаційних панелях і штекер "земля" на панелі ТЕ.

У моделі являється 6 ємнісних елементів для поздовжньої компенсації. Вона являє собою один магазин ємностей з наступними номінальними величинами: 0,12; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 2,0; 2,0; 4,0; 4,0; 4,0 мкФ, які можуть набиратися у будь-якій комбінації.

Розділові трансформатори з коефіцієнтом трансформації 1:1 призначаються для аналізу на моделі складних видів пошкоджень (КЗ в 2-х точках, обрив і КЗ та інше).

У моделі встановлюються два РТ, обмотки яких виводяться на панель лінійних опорів.

Комутаційні панелі призначаються для зборки досліджуваної схеми і можливості проводити вимірювання в її окремих точках. На кожній КП встановлено ряд гнізд, до яких підключені вихідні кінці генераторних станцій трансформаторних і навантажувальних елементів, шини із з'єднувальними шнурами, а також ряд вимірювальних гнізд, за допомогою яких можна виміряти струм, напругу та потужності в будь-якому елементі схеми. Для наочності комутаційні панелі мають мнемічну схему, яка полегшує складання схеми і виконання вимірювань.

У верхній частині панелі розташовуються перемикач для вибору вимірюваної величини і вимірювальні шнури.

У середній частині ПЛЮ розташована система гнізд, до яких підключені лінійні та ємнісні елементи. Ємнісні елементи за допомогою сполучних вилок можуть підключатися до нульової шини моделі.

У нижній частині панелі розташовані гнізда трансформаторних шин, що зв'язують між собою блоки. За допомогою цих шин будь-який з елементів кожного блоку може бути включений в будь-яку точку іншого блоку.

На цих панелях розташовані тумблери для підключення генераторних станцій в досліджувану схему і включення живлення приладів ПРМ-2.

В якості вимірювальних приладів на моделі використовуються спеціальні електродинамічні прилади з підсилювачами на транзисторах.

У кожному блоці встановлюється по одному комплекту приладів, що складається з вольтметра, амперметра, ватметра і вольтамперметра реактивної потужності.

Прилади мають шкалу зі світловим відліком. Основна похибка вимірювальних приладів з приладовими підсилювачами 0,5% від повного відхилення покажчика.

Комплект приладів має межі вимірів: по напрузі- 7,5 В; 15 В; 30 В; 75 В; 150 В; 300 В; по струму - 0,02 А; 0,05 А; 0,1 А; 0,2 А; 0,5 А; 1 А.

Схема включення вимірювальних приладів дозволяє виконувати 4 види вимірювань. Вид вимірювань визначається положенням перемикача вибору вимірюваної величини, встановленого на панелі лінійних опорів.

При вимірі напруги, струму та потужності перемикач "Выбор изм. величини" встановлюється в положенні U, I, P, Q і вимірювальний штекер вставляється в гніздо, в якому необхідно провести вимірювання.

На прилади, в цьому випадку, подається напруга між даною точкою і нулем моделі та струм, що протікає через даний ланцюг.

Вимірювання втрат в лінії якого-небудь іншого ланцюга здійснюється при установці перемикача вибору вимірюваної величини в положенні СШ. При цьому

вимірі вимірювальний штекер вставляється в вимірювальне гніздо того ланцюга, в якому вимірюються втрати, а сполучні штекера подають на вимірювальні прилади падіння напруги на досліджуваній ділянці ланцюга.

Для визначення величини  $I_q$  перемикач "Выбор изм. величини" встановлюється в положення  $I_q, I_d$  а вимірювальний штекер вставляється в гніздо  $I_q, I_d$ , розташоване на комутаційній панелі. При цьому на прилади подається струм, генераторної станції  $I$  і опорна напруга  $U_{оп}$  даної СГС рівня 10 В. Величина  $I_q, I_{ген}$  будучи проекцією струму генератора  $I_{ген}$  на вісь  $q$  - визначиться за показання ватметра.

Для вимірювання проекції струму у даному колі на вектор напруги компенсаційної станції (Г4) перемикач "Выбор изм. величини" встановлюється в положення  $I \angle U_{оп}$ . У цьому випадку на вимірювальні прилади подається напруга компенсаційної станції (Г4) і струм вимірюваного ланцюга. .

За показами активного і реактивного ватметрів може бути визначений фазовий кут по відношенню до напруги  $U_{оп}$ , базисної (компенсаційної) станції.

В якості компенсаційної станції прийнята генераторна станція Г4, у якій зроблений додатковий вивід з виходу підсилювача напруги  $U_{оп} = 10$  В.

ПРИМІТКИ: За позитивний напрямок потоку потужності  $S = P + j \cdot Q$  (активно-індуктивне навантаження) в моделі прийнято (рис. 1.6):

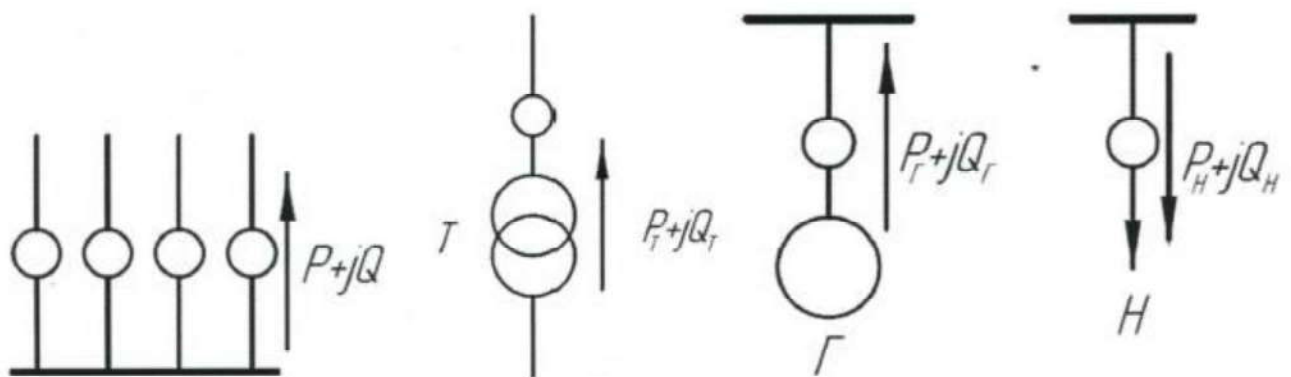


Рисунок 1.6 – Додатні напрямки потоку потужності

- а) для генераторних станцій - від виводів генераторів до шин;
- б) для трансформаторів - від виводів вищої напруги до шин;
- в) для навантажень від шин живлення до навантажень; .
- г) у збірок шин вищої напруги - від шин до комутованих ланцюгів.

Живлення моделі здійснюється від двох блоків- блоку живлення сельсинів трансформаторних станцій і блоку живлення підсилювачів генераторних станцій і апаратів постійних вольт-ампер.

Обидва блоки живлення живляться від трифазної мережі 380/220 В через вимикач, запобіжники і магнітний пускач, встановлених у шафі розподільного щита.

Для підгонки напруги розжарення ламп моделі використаний додатковий регульовальний автотрансформатор, встановлений у блоку живлення підсилювачів генераторних станцій і апаратів постійних вольт-ампер.

У шафі розподільного щита, від якого живиться модель, змонтований захист від обриву фаз, який відключає магнітний пускач при обриві однієї або двох фаз живлення від мережі 380/220 В.

### **Висновки до розділу**

Аналогове моделювання являється хорошим засобом для створення лабораторних установок з наочним відображенням процесів, які протікають в реальних енергосистемах або ж їх частинах. Створена лабораторна установка на базі аналогово-обчислювальної розрахункової моделі буде хорошим інструментом в руках викладачів, для навчання студентів та в допомозі розвитку їх практичних навичок в області керування режимами роботи енергосистемами та уявлення про фізичні процеси, які протікають під час роботи енергоустановок.

Виконання лабораторних робіт на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС -2 сприяє закріпленню у студентів глибокого фізичного уявлення про режими роботи електричних мереж і систем і набуття ними досліджувальних навичок.

## **2 РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ НА УРМЕС-2 ДЛЯ ВИКОНАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКИХ НАУКОВИХ ЗАДАЧ**

Використання апаратних засобів і методів інформаційних технологій створює нові перспективи у втіленні ідей розвивального навчання, особливо при проведенні лабораторних практикумів з предметів спеціалізованого спрямування. Необхідність використання в практиці педагогічної діяльності лабораторних робіт і практикумів обумовлено і тим, що експериментальний метод є засобом отримання інформації, головні властивості його - навчання в діяльності, доказовість науки, наочність джерела знань про довкілля. Таким чином, практикуми є важливою умовою активізації процесів розумової діяльності студентів, виховання стійкого інтересу до предметів, що вивчаються, а також формування уявлень про практичне застосування отриманих теоретичних знань.

При традиційному (на лекціях і, частково, на практичних заняттях) вивченні моделей основна увага студентів концентрується на представлені суб'єктивних труднощів математичного апарата. При цьому поведінка досліджуваної моделі повинно відтворюватися в уявному експерименті, який практично не піддається контролю з боку викладача на відміну від математичних викладок. При виконанні уявного експерименту у студентів відсутня можливість опори на матеріальну діяльність, на переважно розвинений у студентів технічного вузу предметно-діяльний стиль мислення. Таким чином, діяльнісне вивчення моделі обривається на півдорозі, у студентів не виникає закінченою взаємозв'язку теоретичних концепцій, математичних викладок з поведінкою деякого фізичного об'єкта. Очевидно, що для повноцінного (активно-діяльнісного) вивчення теоретичних моделей необхідно формувати навички уявного експерименту і пов'язане з ним розуміння фізичних процесів і явищ, вправляючись у зовнішній, контрольованій ззовні і викладачем, і студентами, діяльності з об'єктом тій же мірі ідеалізації, яка закладена в теорії і

математичних викладах. Таким об'єктом, за допомогою якого навчання уявному експерименту відбувається у зовнішній матеріалізованій діяльності, якою можна керувати, є аналогова модель.

При проектуванні енергетичних об'єктів, що є системними утвореннями, характерні невизначеність вихідної інформації і її неоднозначність, неможливість дослідження в достатньому обсязі натурних об'єктів, використання традиційних методів проектування. Це веде до здійснення неоптимальних варіантів з подальшим їх доведенням до проектних параметрів, тобто, до необхідності "післядії", заморожування значних засобів, нераціонального використання трудових ресурсів і зниження темпів розвитку галузі.

Аналогове моделювання - один з найважливіших видів моделювання, заснований на аналогії (у більш точних термінах - ізоморфізмі) явищ, що мають різну фізичну природу, але описуваних однаковими математичними (диференціальними, алгебраїчними або іншими) рівняннями. Значення аналогового моделювання значно зменшилося, оскільки комп'ютерне моделювання має великі переваги у точності та універсальності. Однак у досить фіксованих і спеціальних задачах свої переваги (простота і дешевизна технічного виконання) має і аналогове моделювання або спільне використання обох методів.

Даний спосіб дослідження все менше знаходить місце в дослідженнях енергосистем в зв'язку з появою комп'ютерного моделювання, однак, аналогове моделювання дає можливість спостерігати фізичні процеси в енергетичній моделі в реальному часі, що дає змогу дослідникам наочно побачити з чим вони можуть стикнутися в реальних енергосистемах.

Розроблений в дисертації комплекс лабораторних робіт для використання аналогових обчислювальних машин УРМЕС-2 при виконанні дослідницьких робіт значно активізує навчально-пізнавальну діяльність студентів, сприяє підвищенню якості знань і зростання їх інформованості про методи отримання в науці цих знань.

## 2.1 Дослідження режимів роботи лінії електропередавання на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС-2М

Загальні відомості. В симетричній трифазній лінії при однаковому навантаженні фаз струми в дротах лінії рівні між собою і мають однаковий зсув по фазі відносно відповідних фазних напруг. Тому при розрахунку трифазних електричних мереж і побудові векторних діаграм можна користуватися фазними величинами.

Розглянемо повітряну лінію електропередавання напругою 35 кВ. Схема заміщення такої лінії представлена на рис. 2.1.

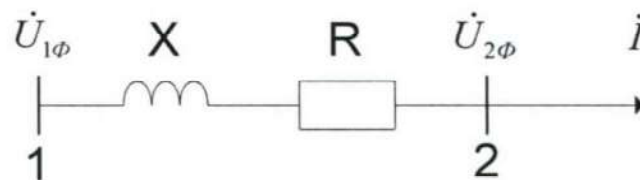


Рисунок 2.1 – Схема заміщення лінії 35 кВ

Фазна напруга на початку лінії  $\dot{U}_{1\phi}$  відрізняється по величині від напруги в кінці лінії  $\dot{U}_{2\phi}$  і зсунута по фазі на кут  $\delta$ . Геометрична різниця між векторами  $\dot{U}_{1\phi}$  та  $\dot{U}_{2\phi}$  називається падінням напруги в лінії, а алгебраїчна різниця - втратою напруги. В лінії протікає струм навантаження  $\dot{I}$ , що зсунутий, в загальному випадку, на кут  $\varphi_2$  від напруги  $\dot{U}_{2\phi}$ .

Векторна діаграма величин  $\dot{U}_{1\phi}$  і кута  $\delta$  між векторами  $\dot{U}_{1\phi}$  та  $\dot{U}_{2\phi}$  представлена на рис. 2.2.

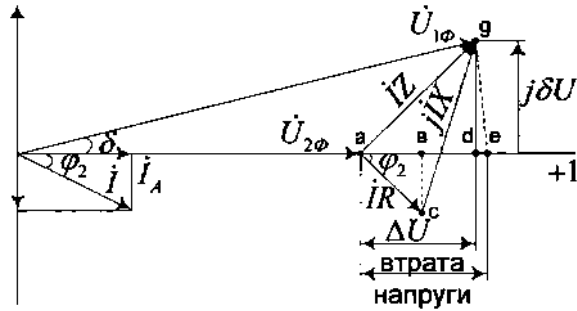


Рисунок 2.2 – Векторна діаграма лінії електропередавання 35 кВ

З'єднуємо вектор  $\dot{U}_{2\phi}$  з віссю дійсних величин. Під заданим кутом  $\varphi_2$ , відкладаємо вектор струму  $\dot{I}$ . Від кінця вектора  $\dot{U}_{2\phi}$  відкладаємо, вектор падіння напруги на активному опорі лінії  $\dot{I}R$ . Як відомо, він співпадає по напрямку з вектором  $\dot{I}$ .

Вектор падіння напруги на індуктивному опорі  $\dot{I}X$  випереджає вектор струму на  $90^\circ$ . З'єднуючи початок координат з точкою г, отримуємо фазну напругу на початку лінії  $\dot{U}_{1\phi}$ . Вектор аг називається падінням напруги в лінії.

Розкладемо вектор падіння напруги в лінії  $\dot{I}Z$  на поздовжню  $\Delta U$  та поперечну  $\delta U$  складові. Із трикутника adg знаходимо:

$$ad = ab + bd = \dot{I}R \cos \varphi_2 + \dot{I}X \sin \varphi_2 = \dot{I}_A R + \dot{I}_P X \quad .$$

Із трикутника cgf:

$$dg = gf - df = \dot{I}X \cos \varphi_2 - \dot{I}R \sin \varphi_2 = \dot{I}_A X - \dot{I}_P R$$

Таким чином:

$$\dot{U}_{1\phi} = \dot{U}_{2\phi} + \Delta U + j\delta U = \dot{U}_{2\phi} + (\dot{I}_A R + \dot{I}_P X) + j(\dot{I}_A X - \dot{I}_P R)$$

Як правило, навантаження споживачів електроенергії задається активним і реактивним навантаженнями, а напруга лінії — лінійною напругою.

Використовуючи співвідношення  $U_1 = \sqrt{3}U_\phi$  та  $I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$ , отримуємо:

$$\dot{U}_1 = U_2 + \Delta U + j\delta U = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \quad (2.1)$$

Формула (2.1) визначає напругу на початку лінії по відомим напрузі і потужності в кінці. Із трикутника  $agd$  на векторній діаграмі  $\operatorname{tg} \delta = \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U}$ .

Звідси кут між векторами напруг  $\delta = \operatorname{arctg} \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U}$ .

Аналогічно до формули (2.1) можливо знайти напруги в кінці лінії по відомій напрузі та потужності на початку:

$$\dot{U}_2 = U_1 - \Delta U - j\delta U = U_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} - j \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1}.$$

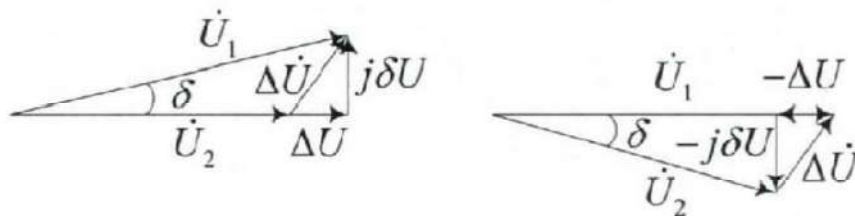


Рисунок 2.3 – Векторні діаграми, що побудовані по поздовжній і поперечній складовим

Векторні діаграми, що побудовані по поздовжній і поперечній складовим, приведені на рис. 2.3 [4].

Розглянемо повітряну лінію електропередавання напругою 110 кВ, П-подібна схема заміщення якої приведена на рис. 2.4. Вектор струму навантаження  $\dot{I}_2$  відстає від напруги  $\dot{U}_{2\phi}$  на кут  $\varphi_2$ . Струм  $\dot{I}_{C2}$ , що обумовлений половиною ємності лінії в кінці її схеми заміщення, випереджає вектор напруги  $\dot{U}_2$  на  $90^\circ$  (рис. 2.5)

Через активний  $R$  і реактивний  $X$  опори схеми заміщення лінії протікає струм  $\dot{I}$ , що дорівнює сумі струмів  $\dot{I}_2$  та  $\dot{I}_{C2}$ . Трикутники падіння напруги в лінії від струму  $\dot{I}_2$  і струму  $\dot{I}_{C2}$  побудуємо окремо. Як видно з діаграми, наявність ємнісного струму в лінії зменшує величину поздовжньої складової напруги і збільшує поперечну складову  $U$ .

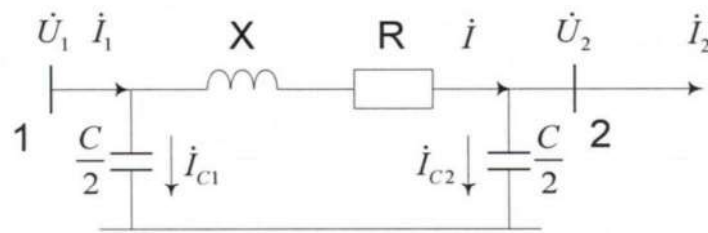


Рисунок 2.4 – П-подібна схема заміщення лінії 110 кВ

Оскільки поперечна складова падіння напруги для лінії 110 кВ помітно не впливає на режим напруги, то можна зазначити, що ємність лінії позитивно впливає на режим напруги лінії в нормальному режимі роботи.

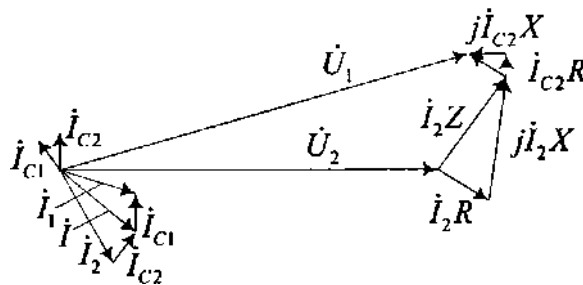


Рисунок 2.5 – Векторна діаграма основних параметрів лінії електропередавання 110 кВ в режимі навантаження

Розглянемо векторну діаграму лінії в режимі холостого ходу, тобто при струмі навантаження  $\dot{I}_2 = 0$ . В цьому випадку по лінії буде протікати струм, обумовлений ємністю лінії  $\dot{I}_{c2}$ . Тому, в режимі холостого ходу, напруга на розімкненому кінці лінії більша, ніж напруга на початку (рис. 2.6).

Це призводить до того, що для ліній вищих класів номінальних напруг з великими ємнісними струмами режим холостого ходу може бути небезпечним через значне підвищення напруги в кінці лінії [5].

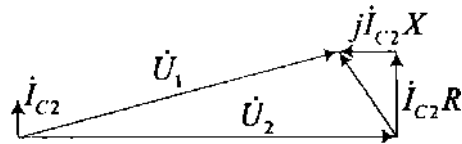


Рисунок 2.6 – Векторна діаграма основних параметрів лінії електропередавання 110кВ на холостому ході

Порядок виконання роботи.

- а) розрахувати параметри схеми заміщення для заданої ЛЕП;
- б) обрати масштабні коефіцієнти і визначити параметри моделі;
- в) скласти схему набору моделі і нанести на неї величини параметрів моделі і номери складових елементів, що використовуються в схемі;
- г) набрати параметри моделі на складових елементах і скласти схему на комутаційній панелі;
- д) після перевірки схеми викладачем та включення моделі провести заміри напруг, потужностей та струмів початків та кінців ЛЕП. Дані замірів занести до таблиці;
- е) побудувати векторні діаграми для досліджених режимів.

Зміст звіту.

Звіт повинен містити докладний опис наступних положень:

- а) Призначення і ціль роботи.
- б) Розрахункові параметри схеми заміщення повітряної лінії, що досліджується.
- в) Схему заміщення досліджуваної повітряної лінії та схему набору на моделі з нанесеними величинами параметрів і номерами елементів, що використовуються.
- г) Таблицю результатів вимірів.
- д) Побудовані векторні діаграми режимів

Таблиця 2.1 – Результати вимірювання

	$I_1$	$P_1$	$U_1$	$Q_1$	$I_1$	$P_2$	$U_2$	$Q_2$
	под.	под.	под.	под.	под.	под.	под.	под.
	А	Вт	В	Вар	А	Вт	В	Вар
Режим активного навантаження								
Режим активно-індуктивного навантаження								
Режим індуктивного навантаження								
Режим холостого ходу								

## 2.2 Дослідження ustalених режимів замкнутої електричної мережі

Мета даної лабораторної роботи – дослідити експериментально рівні напруги і коефіцієнти трансформації, сумарні втрати і перетоки потужності в електричній мережі при мінімальних і максимальних навантаженнях, а також у аварійних режимах.

Теоретичні відомості. При розрахунку сталого режиму як початкова (задана) використовується нормальна схема електричних з'єднань елементів системи при максимальних навантаженнях (рис.2.7). Відомими є максимальні (пікові) потужності навантажень  $\dot{S}_H$  активні потужності станцій  $P_G$ , напруга на генераторних шинах  $U_G$  і опорного вузла  $U_C$ , марки проводів  $\mu$  і довжини ділянок  $l$ , а також типи трансформаторів Т2 і Т3. Вкажемо, що замість модуля напруги на шинах джерела може бути задана реактивна потужність генерації.

Для того, щоб визначити параметри сталого режиму необхідно спочатку розрахувати параметри схеми заміщення.

Тут ЛЕП представляємо П-подібною схемою заміщення, параметри якої визначаються питомими виразами:

$$R_{Л} = r_0 l; \quad X_{Л} = x_0 l; \quad B_{Л} = b_0 l,$$

де  $r_0, x_0, b_0$  - погонні параметри лінії;

$l$  - довжина лінії;

Відмітимо, що для лінії напругою 35 кВ і нижче величина ємнісної погонної провідності  $b_0 = 0$ .

Трансформатори на УРМЕС-2М моделюються реактивними опорами і коефіцієнтами трансформації.

Для двообмоткового трансформатора величина  $x_T$  визначається за виразом:

$$x_T = \frac{U_{K\%} U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}},$$

де  $U_{K\%}$  — напруга короткого замикання;

$U_{НОМ}, S_{НОМ}$  — відповідно номінальна напруга 10 кВ і номінальна потужність (МВА) трансформатора.

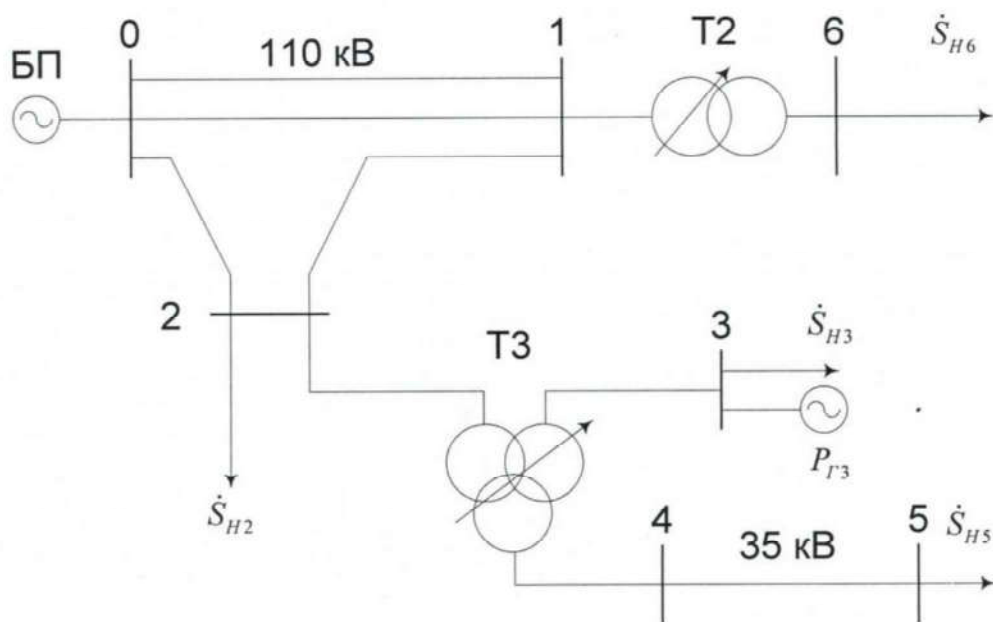


Рисунок 2.7 – Принципова схема з'єднання елементів електричної мережі.

Для трьохобмоткового трансформатора слід визначити реактивні опори обмоток високої, середньої та низької напруг за виразами:

$$x_B = \frac{U_{KB\%} U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}};$$

$$x_C = \frac{U_{KC\%} U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}};$$

$$x_H = \frac{U_{KH\%} U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}},$$

де

$$U_{KB} = 0,5(U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)} + U_{K(C-H)});$$

$$U_{KC} = U_{K(B-C)} - U_{KB};$$

$$U_{KH} = U_{K(B-H)} - U_{KB}.$$

Коефіцієнти трансформації задають у відносних одиницях, для першого наближення слід вибрати коефіцієнт для всіх трансформаторів  $K_T = 1$ .

Навантаження у вузлах електричної мережі представляються заданою постійною потужністю. Навантаження на шинах станцій, напруга яких не змінюється, можуть бути представлені постійними опорами. При цьому, якщо  $R_H$  і  $X_H$  включені послідовно, ТО:

$$\dot{Z}_H = \frac{U_H^2}{S_H}.$$

При паралельному з'єднанні  $R_H$  і  $X_H$ :

$$R_H = \frac{U_H^2}{P_H}; \quad X_H = \frac{U_H^2}{Q_H}.$$

Наступним кроком приводяться параметри схеми мережі до одного ступеня напруги. Для схеми на рис. 2.7 основним ступенем напруги прийнято напругу 110 кВ. Лінія 4-5 має номінальну напругу 35 кВ і її опір приведений до напруги 110 кВ:

$$Z'_{45} = Z_{45} \frac{110^2}{35^2}.$$

Схема заміщення електричної мережі показана на рис. 2.8.

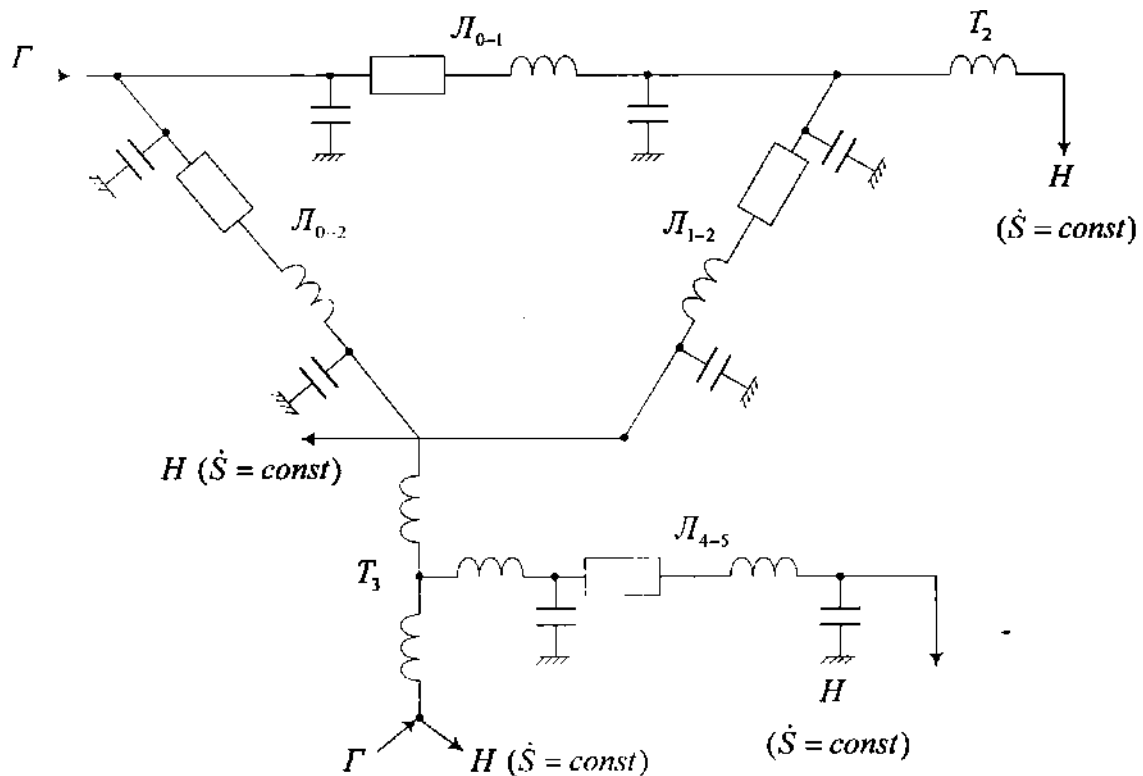


Рисунок 2.8 – Схема заміщення електричної мережі

Розрахункова схема заміщення мережі виконується на моделі відповідно до рис. 2.8 [6]. Для визначення параметрів розрахункової схеми використовуються масштабні множники. Масштаби струму і напруги:

$$m_I = \frac{I_{MAXC}}{I_{MAXM}} = \left[ \frac{kA}{A} \right]$$

$$m_U = \frac{U_{MAXC}}{U_{MAXM}} = \left[ \frac{kB}{B} \right]$$

В якості максимального струму мережі можна прийняти:

$$I_{MAXC} = \frac{S_{MAXC}}{U_{НОМ C}} \approx \frac{S_{H MAX}}{U_{НОМ C}}$$

де  $S_{H MAX}$  - найбільша повна потужність навантаження відповідно до варіанту завдання лабораторної роботи.

Масштаби потужності, опорів і ємностей визначаються на основі вибраних значень  $m_I$  і  $m_U$  МВА/ВА:

$$\begin{aligned} m_S &= m_0 m_I; \\ m_Z &= m_0 / m_I; \\ m_C &= m_I / m_0; \end{aligned}$$

Ємкість лінії, що набирається на моделі, знаходиться з виразу:

$$C_M = \frac{B_{\mathcal{L}}}{4\pi f_M} : m_S,$$

де  $f_M = 200$  Гц - частота змінного струму УМЕС-2М.

Набір розрахункової схеми заміщення проводиться за схемою рис.2.8 При цьому використовуються лінійні елементи (ЛЕ), дво- і трьохобмоткові трансформатори (ТЕ), елементи (НЕ) навантажень і генераторні станції (СГС). Елементи навантажень можуть змоделювати два типи навантаження:  $S_H = const$  моделюється за допомогою АНПВ (наприклад, Н-11 — автоматичне навантаження постійних вольт-ампер, що знаходиться на лицевій панелі УРМЕС-2М) і  $\dot{Z}_H = const$  (наприклад, Н-12 — аналогове навантаження, що знаходиться на лицевій панелі УРМЕС-2М ).

Найбільша потужність навантаження, що заміщається на АНПВ, дорівнює 9,99 Вт або ВАр. Якщо розрахункові потужності навантаження складають менш 1 ВА, тумблер зміни масштабу необхідно перемкнути з положення "1" у положення 0,2. Слід зауважити, що індуктивні котушки АНПВ споживають активну потужність  $\Delta P = 0,2Q_{HM}$ . Тому, наприклад, якщо  $\dot{S}_{HM} = 2 + j3$ , активну потужність слід встановити не 2, а  $2 - 0,2 \cdot 3 = 1,4$  Вт. Постійність потужності АНПВ забезпечує в режимі "А" при зміні в пункті живлення навантаження в межах +10%.

Встановлення заданих навантажень, потужностей генераторних станцій і їх напруг виконують методом послідовних наближень з почерговим регулюванням потужності СГС і опорів навантажень[4].

Активну потужність станцій регулюють фазовим кутом, а реактивну (якщо задана реактивна потужність станції) - зміною  $E_G$ .

Заміщення навантажень за допомогою АНПВ значно прискорює процес балансування режиму. Якщо в процесі балансування спалахує ліва лампочка, то грубий ступінь регулювання змінюється на +20% і постійність потужності забезпечується в діапазоні зміни напруги пункту навантаження в межах 30...10%.

При спалахуванні правої лампочки слід включити ступінь регулювання -20% і тоді постійність потужності забезпечуватиметься в діапазоні зміни напруги -30.. .-10%.

При включенні на АНПВ тумблера в положення "Р" задана потужність регулюється вручну кнопками "Б" (більше) або "М" (менше).

Після завершення балансування режиму вимірюється напруга у вузлах, перетоки і втрати потужності в ділянках. Якщо напруги в деяких пунктах виходять за межі допустимих, необхідно змінити коефіцієнти трансформації трансформаторів Т2 і Т3.

Режим мінімальних навантажень отримують на моделі аналогічно після множення активних і реактивних потужностей або опорів всіх навантажень на коефіцієнт  $\alpha$ . Визначення параметрів режиму для післяаварійної схеми починають з відключення найбільш завантаженої ділянки (лінії або трансформатора). Якщо ця ділянка складається з декількох паралельних елементів, то відключається один з них[5].

Порядок виконання роботи.

- а) отримати у викладача один з варіантів (табл.2.2-2.4). Напругу опорного вузла прийняти  $U_0 = 115$  кВ ;
- б) розрахувати параметри схеми заміщення (рис.2.8);
- в) вибрати масштаби величин і визначити параметри елементів моделі;

г) зібрати розрахункову схему і після перевірки викладачем ввести модель в роботу;

Таблиця 2.2 – Дані ділянок

Номер варіанту	Переріз дротів АС, мм <sup>2</sup>				Тип трансформаторів	
	0-1	0-2	1-2	4-5	Т2	Т3
1	185	95	120	95	2хТДТН-80000	2хТД-40000
2	185	95	95	95	2хТДТН-80000	2хТД-40000
3	185	120	95	95	2хТДТН-80000	2хТД-40000
4	120	95	120	95	2хТДТН-80000	2хТРДН-25000
5	120	95	95	95	2хТДТН-63000	2хТРДН-25000
6	120	120	95	95	2хТДТН-63000	2хТРДН-25000

д) провести балансування заданого режиму.

Зміною коефіцієнтів трансформації трансформаторів Т2 і Т3 домогтися, щоб напруги на шинах споживачів знаходилися в допустимих межах. При необхідності встановити в потрібній точці КП і визначити його мінімальну потужність. Це можна зробити шляхом підключення ємнісних елементів, які власне і використовуються для поздовжньої компенсації, що конструктивно розташовані на одній панелі з трансформаторним елементом, та зміною їхньої ємності (діапазон ємності, яку можна змоделювати складає  $0,125=19,875$  мкФ з інтервалом регулювання  $0,125$  мкФ);

е) заміряти рівні напруги, перетікання потужності, втрати в елементах і сумарні втрати потужності в мережі;

Таблиця 2.3 – Довжини ділянок

Номер варіанту	Довжини ділянок, км			
	0-1	0-2	1-2	4-5
1	27	22	33	10
2	50	25	35	20
3	30	20	30	10
4	40	30	20	20
5	50	35	25	10
6	30	30	20	20

Таблиця 2.4 – Дані про навантаження, МВт, МВАр

Номер варіанту	$\dot{S}_{Г3}$	$\dot{S}_{H2}$	$\dot{S}_{H5}$	$\dot{S}_{H6}$
1	16- j15	80- j40	20- j10	65- j20
2	20 - j15	70 - j45	15 - j10	60 - j20
3	20- j20	90- j20	15- j5	50- j30
4	Z8-j15	40-j30	15-j5	50-j20
5	20-j15	50-j20	10-j10	60-j20
6	20- j10	50- j30	20- j5	60- j30

ж) зменшити навантаження споживачів, прийнявши коефіцієнт  $\alpha = 0,5$  і визначити режим мінімальних навантажень;

з) промоделювати післяаварійний режим шляхом відключення лінії 1-2 та провести заміри параметрів розрахункової схеми відповідно до цього режиму.

Зміст звіту.

Звіт повинен містити докладний опис наступних положень:

а) мета роботи.

б) розрахункова схема мережі, основні формули і результати попередніх обчислень.

в) таблиці змодельованих і фактичних параметрів режимів максимальних, мінімальних навантажень і післяаварійного із вказаними відмінностями.

г) висновки по роботі.

Контрольні запитання.

а) як визначити параметри моделі ЛП 35 кВ?

б) назвіть послідовність етапів балансування режиму.

в) як визначити сумарні втрати потужності в мережі?

г) як зміниться розрахункова схема в аварійному режимі?

д) як визначити фактичні рівні напруги в пунктах 3-6?

### **2.3 Визначення параметрів режиму складної електричної мережі на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС-2М**

Загальні відомості. Задача розрахунку режиму складної електричної мережі зводиться до визначення потоків потужності, струмів в гілках і напруг у вузлах багатоконтурної схеми заміщення. Дані розрахунки являються трудомісткими. Кількість розрахункових операцій різко підвищується зі збільшенням кількості замкнутих контурів в схемі заміщення мережі. Велика складність електричних мереж сучасних електричних систем, схеми заміщення яких містять десятки контурів та сотні вузлів, ставить практично неподоланні перешкоди виконання розрахунків вручну. Ці складнощі призвели до широкого використання обчислювальної техніки, особливо цифрових обчислювальних машин і спеціальних моделей (столів змінного і постійного струму).

Розрахункові столи змінного струму дозволяють достатньо точно і швидко відтворювати режими мереж змінного струму. Моделі постійного струму простіші і дешевші, але вони використовують тільки активні опори, тому на них неможливо повністю відтворювати схеми заміщення елементів електричної мережі, що містять в загальному випадку, поряд з активними, також і індуктивні опори, а для ліній високих класів напруг, крім того, і ємності.

В цих умовах, не застосовуючи яких-небудь спеціальних прийомів, на розрахункових столах постійного струму вдається відтворювати розрахункові схеми кабельних місцевих електричних мереж, лінії яких в розрахунках можуть представлятися тільки своїми активними опорами. Для мереж, що мають як активні, так і індуктивні опори, розрахунок може здійснюватися на базі розгалужених схем, що знижує точність розрахунків.

Тому на столах постійного струму виконуються наближені розрахунки. Точні розрахунки проводяться за допомогою ЦОМ і столів змінного струму[7].

Зміст роботи та порядок виконання розрахунків.

Для прикладу розглянемо визначення поточкорозподілу в мережі, зображеної на рис.2.9, параметри навантажень якої вказані в табл. 2.5. В даній мережі є дві електростанції ЕС-1 і ЕС-2, сполучені лініями Л-1 +Л-4 напругою 220 кВ з центрами живлення (п/ст. 1, 2) розподільчої мережі напругою 110 кВ. 3 шин ВН електростанцій ЕС-1 і ЕС-2 живляться місцеві споживачі. На п/ст.1 і п/ст.2 встановлені автотрансформатори з регулюванням напруги під навантаженням (РПН) в межах  $\pm 6 \times 2\%$  від номінальної. РПН встановлені зі сторони СН автотрансформатора.

Для зменшення втрат в мережі і регулювання напруги на шинах п/ст. на п/ст.2 встановлений СК потужністю 50 мВАр. У даній роботі потрібно досліджувати два режими роботи мережі:

- а) режим максимальних навантажень;
- б) відключення лінії Л-5 в режимі максимальних навантажень.

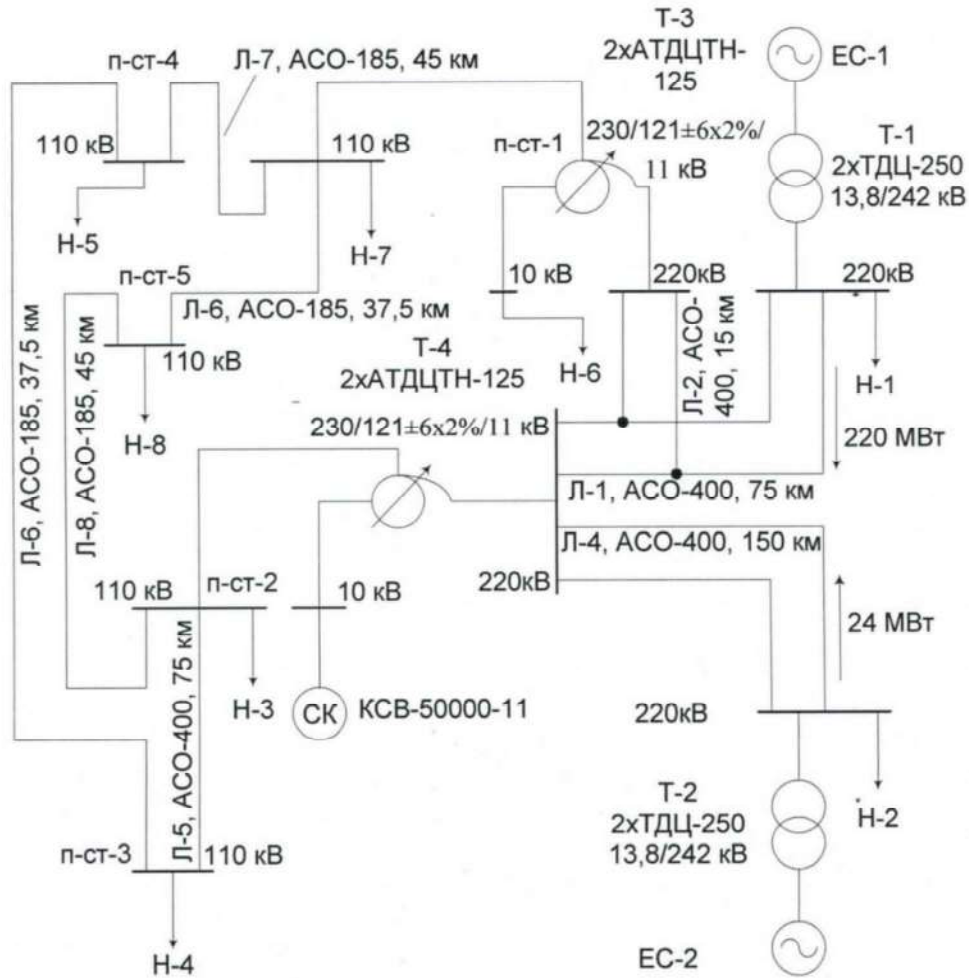


Рисунок 2.9 – Схема мережі

Таблиця 2.5 – Параметри навантажень

Навантаження	Н-1	Н-2	Н-3	Н-4	Н-5	Н-6	Н-7	Н-8
P, МВт	200	100	80	30	15	7	90	32
Q, МВАр	100	50	40	15	7,5	3,5	45	16

Початкові умови для розрахунку.

а) На шинах ВН електростанцій ЕС-1 і ЕС-2 підтримується напруга  $1,08 \cdot U_H = 237,5$  кВ (умови зустрічного регулювання). ЕС-1 і ЕС-2 видають в мережу задану величину активної потужності (див. рис. 2.9).

б) Синхронний компенсатор включений і видає в мережу реактивну потужність.

Для виконання розрахунків на моделі необхідно :

- а) скласти схему заміщення мережі і розрахувати її параметри;
- б) вибрати масштабні коефіцієнти;
- в) скласти схему для набору на моделі і розрахувати її параметри;
- г) набрати схему на моделі;
- д) встановити досліджуваний режим і виміряти перетоки потужностей в гілках і напруги у вузлах модельної схеми заміщення мережі;
- е) використовуючи масштабні коефіцієнти, розрахувати дійсні перетоки потужностей в лініях і напруги у вузлах схеми досліджуваної мережі. Складання схеми заміщення мережі (рис. 2.10 ) і розрахунок її параметрів.

Генератори:

При розрахунку сталих режимів зазвичай не розглядаються процеси, що відбуваються всередині генератора. Цікавлять тільки напруга на його шині і активна та реактивна потужності, що видаються в мережу. Тому генератор представляємо у вигляді ідеального джерела напруги.

Трансформатори:

Представляються Г-подібною схемою заміщення. Опори приводяться до напруги  $U = 230$  кВ. Двообмоткові трансформатори (Т-1, Т-2) типу ТДЦ-250- 242/13,8 мають наступні паспортні дані:



$$U_{K3} = 11 \% ; \Delta P_{K3} = 650 \text{ кВт}; , \Delta P_{XX} = 240 \text{ кВт}; I_{XX} = 0,45 \%$$

$$X_T = \frac{U_{K\%} U_{HOM}^2}{100 \cdot n \cdot S_{HOM}} = \frac{11 \cdot 230^2}{110 \cdot 2 \cdot 250} = 11,7 \text{ Ом},$$

де  $n$  - кількість трансформаторів, що включені паралельно.

Автотрансформатори:

(Т-3,Т-4) типу АТДЦТН-125-230/121/11 мають наступні паспортні дані:

$$U_{K(B-C)} = 11 \% ; U'_{K(B-H)} = 11 \% ; U_{K(C-H)} = 11 \% ;$$

$$\Delta P_{K3} = 290 \text{ кВт}; , \Delta P_{XX} = 85 \text{ кВт}; I_{XX} = 0,5 \%$$

Коефіцієнт вигідності:

$$\alpha = 1 - \frac{U_{C(HOM)}}{U_{B(HOM)}} = 1 - \frac{121}{230} = 0.474;$$

$$U_{K(B-C)} = 11\%;$$

$$U_{K(B-H)} = \frac{U'_{K(B-H)}}{\alpha} = \frac{31}{0.474} = 65.6\%;$$

$$U_{K(B-C)} = \frac{U_{K(B-C)}}{\alpha} = \frac{19}{0.474} = 40\%;$$

$$U_{KB} = 0,5(U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)} + U_{K(C-H)}) = 0,5(65,5 + 11 - 40) = 17,7\%;$$

$$U_{KC} = 0,5(U_{K(C-H)} + U_{K(B-C)} + U_{K(B-H)}) = 0,5(40 + 11 - 65,5) = 0\%;$$

$$U_{KH} = 0,5(U_{K(B-H)} + U_{K(C-H)} + U_{K(B-C)}) = 0,5(65,5 + 40 - 11) = 47,3\%;$$

$$x_{TB} = \frac{U_{KB\%} U^2}{100 \cdot n \cdot S_H} = \frac{17,7 \cdot 230^2}{100 \cdot 2 \cdot 125} = 37,5 \text{ Ом}; ;$$

$$x_{TC} = 0 \text{ Ом}; ;$$

$$x_{TH} = \frac{U_{KH\%} U^2}{100 \cdot n \cdot S_H} = \frac{47,3 \cdot 230^2}{100 \cdot 2 \cdot 125} = 100 \text{ Ом}.$$

У моделі УРМЕС-2М автотрансформатори трансформаторних елементів (див. рис. 2.9) мають втрати х.х. менше 1%, що приблизно відповідає втратам х.х. у реальних трансформаторах. Крім того, в дроселях, моделюється реактивний опір розсіювання, співвідношення активного і реактивного опорів також відповідає

цьому співвідношенню в реальних трансформаторах, тому немає необхідності розраховувати активні опори і параметри шунту намагнічування, оскільки вони враховані вже в самому трансформаторному елементі.

Лінії:

Лінії представляємо П-подібною схемою заміщення.

Активний опір лінії електропередавання приймається рівним омичному, і визначається по відповідних таблицях для конкретної марки проводів.

Ємнісна провідність ЛЕП обумовлена зарядними ємкостями між проводами сусідніх фаз лінії, а також проводами лінії і землею. Величина ємкісної провідності лінії визначається радіусом фазного дроту і геометричними параметрами взаємного розташування проводів ЛЕП в просторі. Погонна ємнісна провідність прямої послідовності ЛЕП визначається по виразу:

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{CP}}{r_e}},$$

Активна провідність обумовлена величиною середньорічних втрат потужності на корону. Вона залежить від типу і діаметру проводів лінії, стану поверхні проводів, габаритів і робочої напруги в лінії, а також метеорологічних умов уздовж траси ЛЕП.

$$g_0 = \frac{\Delta P_{k0} \cdot 10^{-6}}{U_H^2},$$

де  $\Delta P_{k0}$  - питомі середньорічні втрати потужності лінії на корону кВт/км;  $U_H$  - номінальна напруга електропередавання [4].

Індуктивний опір однолінійної схеми заміщення ЛЕП залежить від відстані між проводами сусідніх фаз в просторі і визначається по співвідношенню теореми Піфагора. Відповідно значення погонного індуктивного опору має наступний вигляд:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot D_{CP}}{d \cdot 10^{-3}} + 0,016,$$

де  $D_{CP} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}$  середньгеометрична відстань між проводами сусідніх фаз.

Параметри схеми заміщення ЛЕП визначаються по виразах:

$$r=r_0l, \quad x=x_0l, \quad g=g_0l, \quad b=b_0l,$$

де  $l$ - довжина лінії, км.

Навантаження являються споживачами з незмінними активними і реактивними потужностями.

Вибір масштабних коефіцієнтів.

Масштабний коефіцієнт являє собою відношення параметрів і координат режиму в реальній мережі до однорідних величин в моделі.

$$m_A = \frac{A_{OP}}{A_M}$$

При моделюванні усталених режимів використовуються 5 масштабних коефіцієнтів  $m_U, m_I, m_S, m_Z, m_C$ . Із них 2 масштабних коефіцієнта незалежні від інших, а три інших зв'язані між собою рівняннями:

$$m_I = \frac{m_S}{\sqrt{3}m_U}; \quad m_Z = \frac{m_U}{\sqrt{3}m_I}; \quad m_C = \frac{4}{m_Z}.$$

Зазвичай в якості незалежних масштабних коефіцієнтів беруться  $m_U$  та  $m_S$ .

Для зручності розрахунку ці масштаби виражаються цілими числами.

Масштаби повинні бути вибрані так, щоб струм в елементах схеми не перевищував 0,3 А. Величини напруг повинні бути в межах від 40 до 80 В. Проте слід враховувати, що при використанні автоматичних елементів навантажень, номінальна напруга на вході яких 50 В, апарат забезпечує автоматичну підтримку заданих величин активної і реактивної потужності в певних межах:

- а) при встановленні регулювання " $U_H$  %" у положення "0" при змінювані напруги == 12 %;
- б) при встановленні грубого регулювання на +20% - при зміні напруги в межах + 33,5% ÷ +7,5;

в) при встановленні грубого регулювання на -20% - при зміні напруги в межах -75% ÷ +32,5;

При виборі масштабів струми перевіряються в найбільш перевантажених елементах в режимі максимальних навантажень. Якщо струм в елементах схеми є більшим ніж 0,3А необхідно збільшувати масштаб потужності чи зменшувати масштаб напруги.

Якщо струм перевищує 0,3 А тільки в деяких елементах схеми, можна замість одного елемента схеми включити в схему два паралельно з'єднаних з відповідним його подвоєнням опорів елемента і зменшенням його провідностей.

Вибираємо масштаби для досліджуваної схеми. Задаємося  $U_{OP} = 242$  кВ,  $U_M = 50$  В, тоді:

$$m_U = \frac{242 \cdot 10^3}{50} = 4,85 \cdot 10^3 \approx 5 \cdot 10^3;$$

Задаємося  $S_{OP} = 300$  МВт,  $S_M = 50 \cdot 0,3 = 15$  Вт, тоді:

$$m_S = \frac{300 \cdot 10^6}{15} = 2 \cdot 10^7.$$

Із рівнянь зв'язку находимо

$$m_I = \frac{m_S}{\sqrt{3}m_U} = \frac{2 \cdot 10^7}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 10^3} = 2,31 \cdot 10^3;$$

$$m_Z = \frac{m_U}{\sqrt{3}m_I} = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,31 \cdot 10^3} = 1,25;$$

$$m_C = \frac{4}{m_Z} = \frac{4}{1,25} = 3,2.$$

Перевіряємо струм в трансформаторах Т-1, Т-2 і лінії Л-1.

Через трансформатор Т-1 протікає потужність  $P = 220 + 200 = 420$  МВт.

Повна потужність  $S \approx 500$  мВт. Таким чином, струм через трансформатор

$$I_{OP} = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{500 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 237,5 \cdot 10^3} = 1220 \text{ А};$$

$$I_M = \frac{I_{OP}}{m_I} = \frac{1220}{2,31 \cdot 10^3} = 0,528 \text{ А};$$

В лінії Л-1 буде протікати потужність  $S= 250$  МВА,

$$I_{Л1_{OP}} = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{250 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 237,5 \cdot 10^3} = 609 \text{ A};$$

$$I_{Л1_M} = \frac{I_{Л1_{OP}}}{m_I} = \frac{609}{2,31 \cdot 10^3} = 0,264 \text{ A};$$

Аналогічно для трансформатора Т-4:

$S \approx 150$  МВА;

$$I_{T4_{OP}} = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{150 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 237,5 \cdot 10^3} = 365 \text{ A};$$

$$I_{T4_M} = \frac{I_{T4_{OP}}}{m_I} = \frac{365}{2,31 \cdot 10^3} = 0,158 \text{ A};$$

Як видно з наведених вище розрахунків, струм в трансформаторі Т-1, перевищує допустимий, тоді як в решти елементів схеми він менше допустимого. Тому візьмемо 2 паралельно сполучених трансформаторних елемента, в наслідок чого струм через трансформатор Т-1 знизиться до 0,264 А. Вибрані масштаби придатні для набору схеми[5].

Розрахунок параметрів моделі і набір схеми.

Параметри моделі отримують шляхом ділення параметрів схеми заміщення мережі на вибрані масштаби:

$$A_M = \frac{A_{OP}}{m_A}.$$

Отримані параметри наносяться на схему набору (рис. 2.11).

Далі за допомогою з'єднувальних вилок і штекерів на комутаційній панелі виконуємо з'єднання елементів моделі відповідно до схеми набору. При цьому на схему набору (рис. 2.11) наносимо позначення використовуваних елементів моделі, номери з'єднувальних і трансформаторних шин. При наборі схеми необхідно в першу чергу використовувати елементи з меншими межами. Наприклад, якщо опір

трансформаторного елементу  $X = 99 \text{ Ом}$ , його слід набирати на трансформаторному елементі з межами  $100 \text{ Ом}$ , а не  $1000 \text{ Ом}$ .

Після набору схеми на панелях вибраних елементів моделі встановлюються їх параметри.

При наборі опорів в елементах моделі в кожній з декад магазинів опорів повинен знаходитися один штекер, оскільки декади сполучені послідовно. Забороняється вставляти 2 штекери в одну декаду опорів, оскільки це приводить до виткового замикання в дроселі.

У магазинах ємностей конденсатори включаються паралельно, тому необхідна величина ємності набирається як сума ємностей паралельно включених конденсаторів.

У трансформаторних елементах відгалуження трансформаторів встановлюються в нульові положення, що відповідає спочатку вибраному коефіцієнту трансформації, по якому опори схеми заміщення були приведені до одного ступеня напруги. Крім того, для підключення трансформаторного елементу до комутаційної панелі потрібно вставити штекер "земля" на цьому елементі.

При використанні автоматичних елементів навантажень потрібно враховувати паразитні активні втрати в котушках індуктивності і в обмотках трансформаторів. Величина паразитної потужності прийнята рівною  $P = 0,2Q_{\text{встановл}}$ .

Якщо потужності навантажень не перевищують  $1 \text{ Вт}$ , доцільно користуватися масштабом  $m = 0,2$ , який встановлюється відповідним тумблером на панелі АННВ. Наприклад, якщо потужність навантаження  $S = 0,8 + j 0,4 \text{ ВА}$  в масштабі моделі, то  $P_{\text{параз.}} = 0,2Q_{\text{встановл}} = 0,2 \cdot 0,4 = 0,08 \text{ Вт}$ , і величину активної потужності, яку потрібно набрати потрібно зменшити на величину  $P_{\text{параз.}}$

$$P_{\text{набр.}} = 0,8 - 0,08 = 0,72 \text{ Вт}; \quad S = 0,72 + j 0,4;$$

При  $m = 0,2$  необхідно набирати потужність

$$S_{\text{набору}} = \frac{S}{m} = \frac{0,72 + j0,4}{0,2} = 3,6 + j2 \text{ ВА.}$$

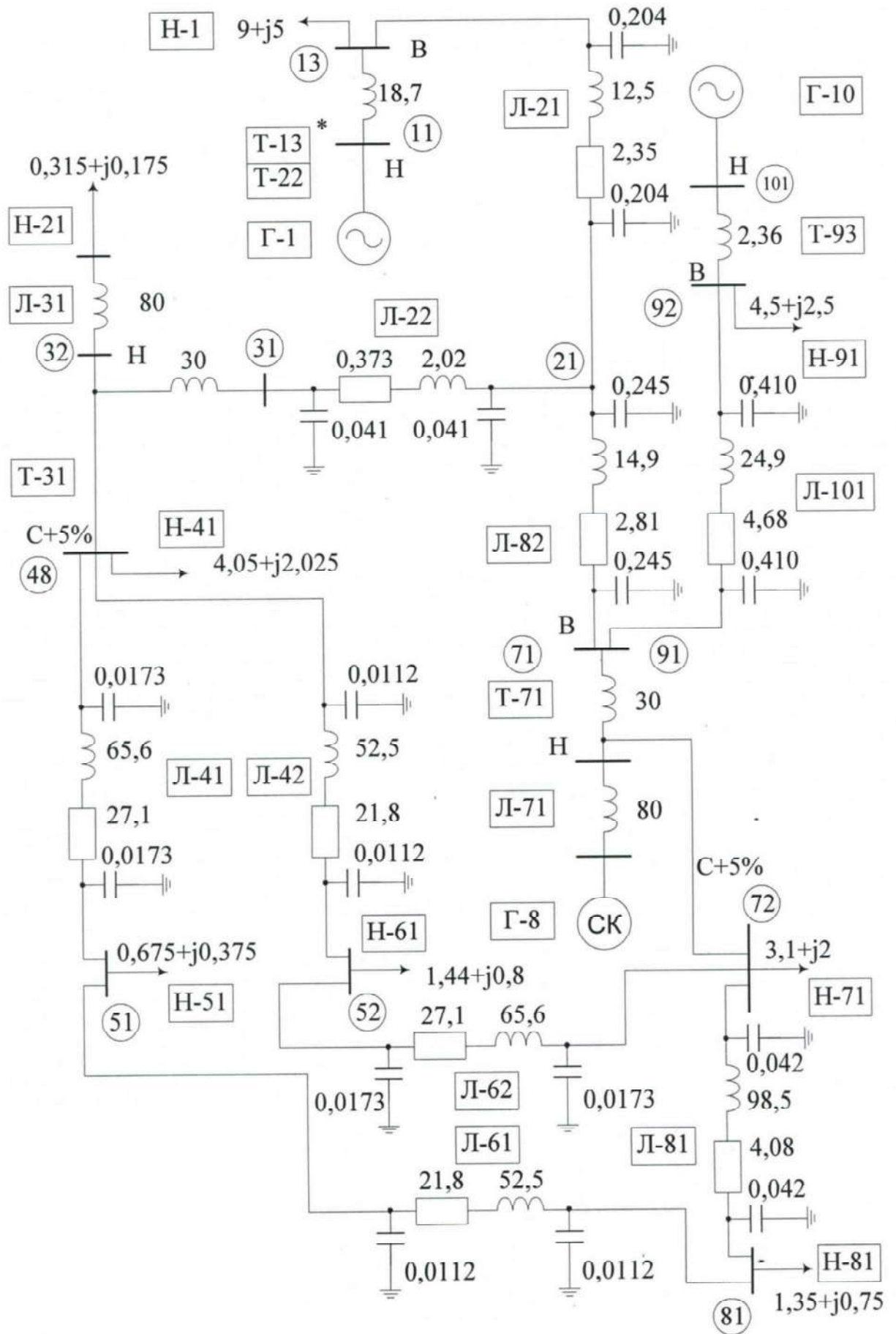


Рисунок 2.11 – Схема набора

При дослідженні усталених режимів модуль напруги на шинах генератора змінюється тумблером "Е", фаза - тумблером "фаза". При цьому виставляють  $x'_d = 0$ ,  $I_q(x_q - x'_d) = 0$ . Генератори підключаються до комутаційної панелі відповідним тумблером на панелі лінійних опорів.

На панелі елементів моделі всі опори вказані в Омах, ємності в мкФ, потужності Р та Q в Вт та ВАр відповідно.

Включення моделі.

Живлення моделі включається тумблером "живлення моделі". При цьому над тумблером спалахує зелена лампочка. Всі апарати АННВ повинні знаходитися в режимі "руч". Тумблери генераторних станцій на панелі лінійних опорів, а також тумблери "живлення" генераторних станцій і "живлення приладів" повинні знаходитися у відключеному положенні.

Вимірювальні прилади повинні бути включені на найбільші межі вимірювань.

Після включення загального живлення моделі включається живлення задіяних генераторних станцій і живлення приладів. Включення генераторних станцій в схему здійснюється тумблером на панелі лінійних опорів. Перед включенням необхідно встановити мінімальну ЕРС станції  $E'_q = 40 \text{ В}$ ,  $I_q(x_q - x'_d) = 0$ . фазу ЕРС Е потрібно встановити на 0. При включенні генераторних станцій у схему потрібно стежити, щоб струми в найбільш навантажених елементах тривало не перевищували 0,3 А (за винятком генераторних станцій, які допускають струми до 0,6=0,7 А).

Встановлення досліджуваного режиму і визначення поточкорозподілу в мережі і напруг у вузлах схеми.

Для отримання досліджуваного режиму потрібно встановити задані величин и активної потужності, що потрібно видати і напруги на шинах ВН станцій. Змінюючи величину ЕРС  $E'_q$  регулюємо напругу на шинах станцій (і тим самим видачу реактивній потужності в мережу), змінюючи фазу ЕРС  $E'_q$ , регулюємо видачу активної потужності станцій. Проте слід враховувати, що при зміні видаваної активної потужності дещо змінюється напруга станцій та видача реактивної потужності і навпаки. Тому регулювання режиму потрібно проводити комплексно.

Для моделювання синхронного компенсатора використовується генераторна станція, яка видає чи споживає реактивну потужність (залежно від величини ЕРС СК) за відсутності видачі або споживання активної потужності.

Приблизно встановивши необхідний режим переводим АНПВ в режим "авт". Після припинення роботи реверсивних крокових шукачів АННВ проводимо додаткове регулювання режиму генераторних станцій. Якщо відхилення напруги на вході АННВ перевищує допустиму величину, при якій апарат ще забезпечує постійне навантаження загоряється лампочка "більше" чи "менше". В цьому випадку потрібно перевести АНПВ в режим "руч." і змінити межі грубого регулювання  $U$  %. Після цього апарат переводиться в режим "авт". Лампочка гасне, якщо напруга на вході АННВ відповідає знов вибраним межах регулювання.

Якщо після установки режиму виявиться, що напруга на навантаженнях не відповідає умовам зустрічного регулювання, необхідно переставити відгалуження на трансформаторних елементах Т-31, Т-71, добитися бажаних рівнів напруги на навантаженнях. Враховуючи, що зазвичай у трансформаторах РПН встановлюється на стороні СН, зміну відгалужень слід насамперед проводити по стороні СН трансформаторного елемента. Якщо меж регулювання виявиться недостатньо, потрібно змінити відгалуження на стороні НН трансформаторного елемента на ту ж величину, що й відгалуження ВН. При перемиканні відгалужень АНПВ переводиться в режим "руч". Після перестановки відгалужень в трансформаторних елементах необхідно провести коректування режиму генераторних станцій.

Після точного встановлення режиму АНПВ переводиться в режим "руч" і перевіряються величини потужностей навантажень. Якщо ці потужності дещо відрізняються від заданих, то за допомогою відповідних кнопок "більше" або "менше" добавляються відповідності цих потужностей.

Остаточо встановивши режим, приступають до вимірювань напруги 1 перетоків потужностей у елементах моделі. Підключення вимірювальних приладів здійснюється включенням вимірювального штекера "ВШ" в відповідне гніздо на комутаційній панелі.

Перемикач "вибір вимірюваної величини" на панелі лінійних опорів встановлюється в положення "I,U, P,Q"[4].

За позитивний напрям потоків активної і реактивної потужностей прийнято:

- а) для генераторних станцій - від генераторів у схему;
- б) для трансформаторів - до шин вищої напруги (на стороні ВН трансформаторів встановлені вимірювальні гнізда);
- в) для навантажень - співпадає із стрілкою на комутаційній панелі;
- г) для сполучних шин - від шин.

Відповідно до цього необхідно виконувати підключення вимірювальних гнізд.

Для уникнення зашкалювань приладів перед включенням штекера у вимірювальне гніздо необхідно встановити перемикач меж вимірювання приладів у максимальне положення, а перемикач " $\pm$ " - відповідно до очікуваного напрямку потоків потужності.

Для здійснення прив'язки приладів необхідно вставити з'єднувальну вилку в гнізда "0" - на панелі лінійних опорів.

На рис. 2.12, 2.13 показаний поточкорозподіл для нормального режиму 1 при відключенні лінії Л-81 при різних напругах, підтримуваних на кантурі протікає зрівнювальна потужність, що викликає додаткові втрати в мережі (див. рис. 2.12, 2.13). Точки поточкорозподілу по активній і реактивній потужності не співпадають.

При рівності напруг, що підтримуються на стороні СН трансформаторів Т-31, Т-71, зрівнювальна потужність не протікає і втрати менші (див. рис. 2.14, 2.15).

При відключенні лінії Л-81 зменшується напруга на шинах віддалених споживачів. Втрати в такому режимі більше, ніж в режимі з включеною лінією Л-81. На схемах 2.12-2.15 приведені перетоки потужності і напруги, що перераховані для реальної мережі. Потужності підраховуються безпосередньо через масштаб потужності  $m_S$ , як  $S_{OP} = m_S S_M$ , а напруга спочатку приводиться до сторони 220 кВ через масштаб  $m_{Uz}$ :  $U_{OP} = m_{Uz} U_M$ , як, а потім через коефіцієнт трансформації

$K = \frac{230}{115}$  приводиться до сторони 110 кВ. Маючи напруги на стороні знаючи коефіцієнти трансформації реальних трансформаторів і діапазони

регулювання напруги за допомогою РНН або ПБВ трансформаторів, можна вибрати відгалуження трансформаторів для забезпечення отриманих рівнів напруги в реальній мережі.

Порядок вимикання моделі.

- а) перевести автоматичні елементи навантажень в режим "промінь".
- б) відключити генераторні станції тумблерами на панелі лінійних опорів і тумблерами "Живлення" на панелі генераторних станцій.
- в) відключити живлення приладів.
- г) тумблер "живлення моделі" поставити у положення «відкл» Зелена лампочка при цьому гасне.

Виконання робіт на моделі УРМЕС-2 студентам дозволяється тільки у присутності викладача, що проводить заняття. Проводити включення і виключення моделі дозволяється також тільки у присутності викладача та при його дозволі.

Зміст звіту по лабораторній роботі.

- а) дати коротку характеристику моделі типу цРМЕС-2М і визначити мету виконання лабораторної роботи.
- б) намалювати і привести в звіті схему заданої мережі; вказати на схемі тип встановлюваних трансформаторів; тип дроту і довжину ліній, потужності навантажень.
- в) виконати розрахунок: параметрів схеми заміщення мережі, масштабних коефіцієнтів, параметрів схеми набору. Результати розрахунків привести в пояснювальній записці.
- г) намалювати схему мережі і вказати на ній отримані на моделі потоки потужності в гілках і напруги у вузлах схеми (для моделі і для оригіналу).
- д) зробити висновки і рекомендація по досліджуваному режиму.

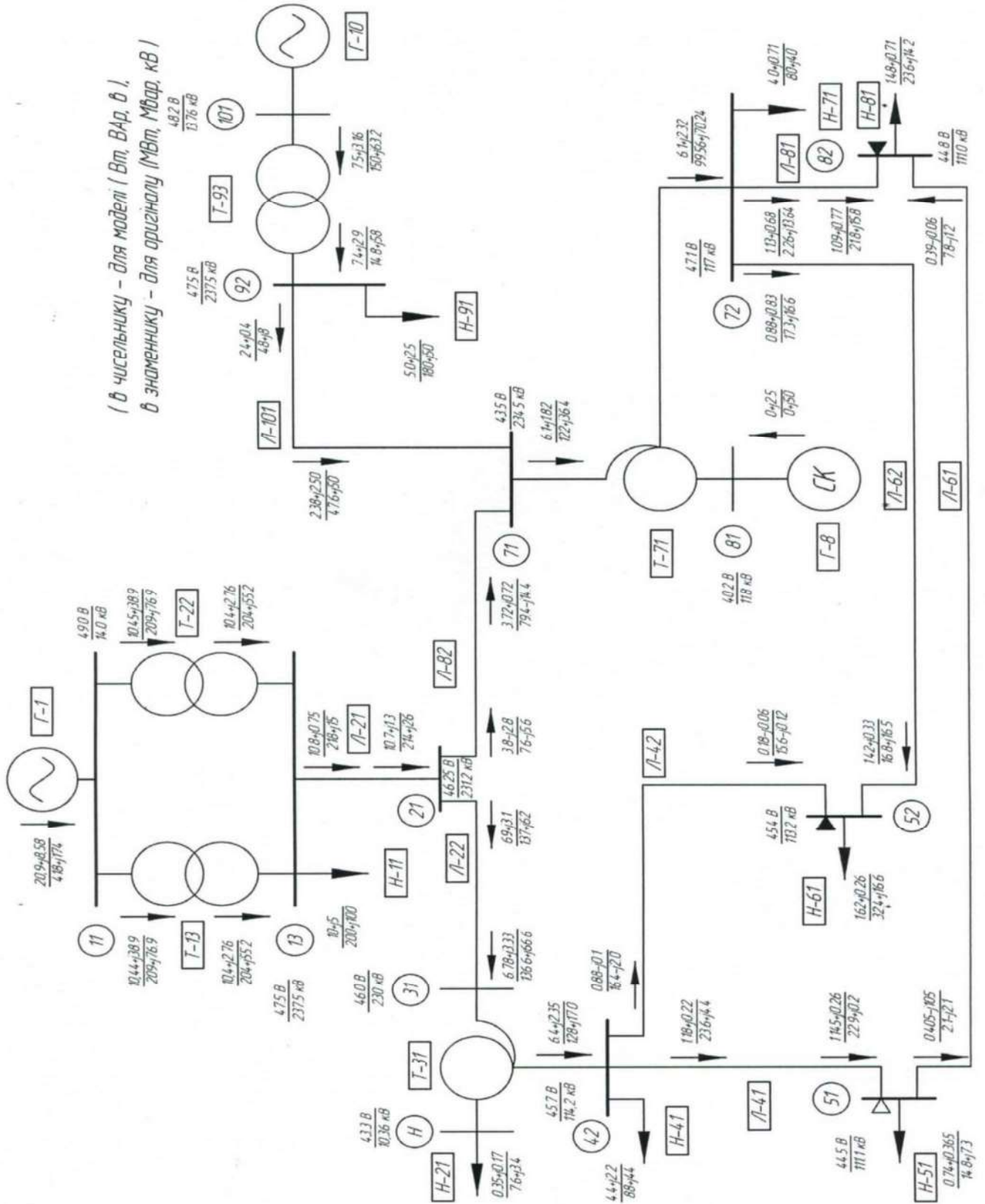


Рисунок 2.12 – Перетоки потужності в вітках і напруги в вузлах мережі в режимі максимальних навантажень (1 варіант)

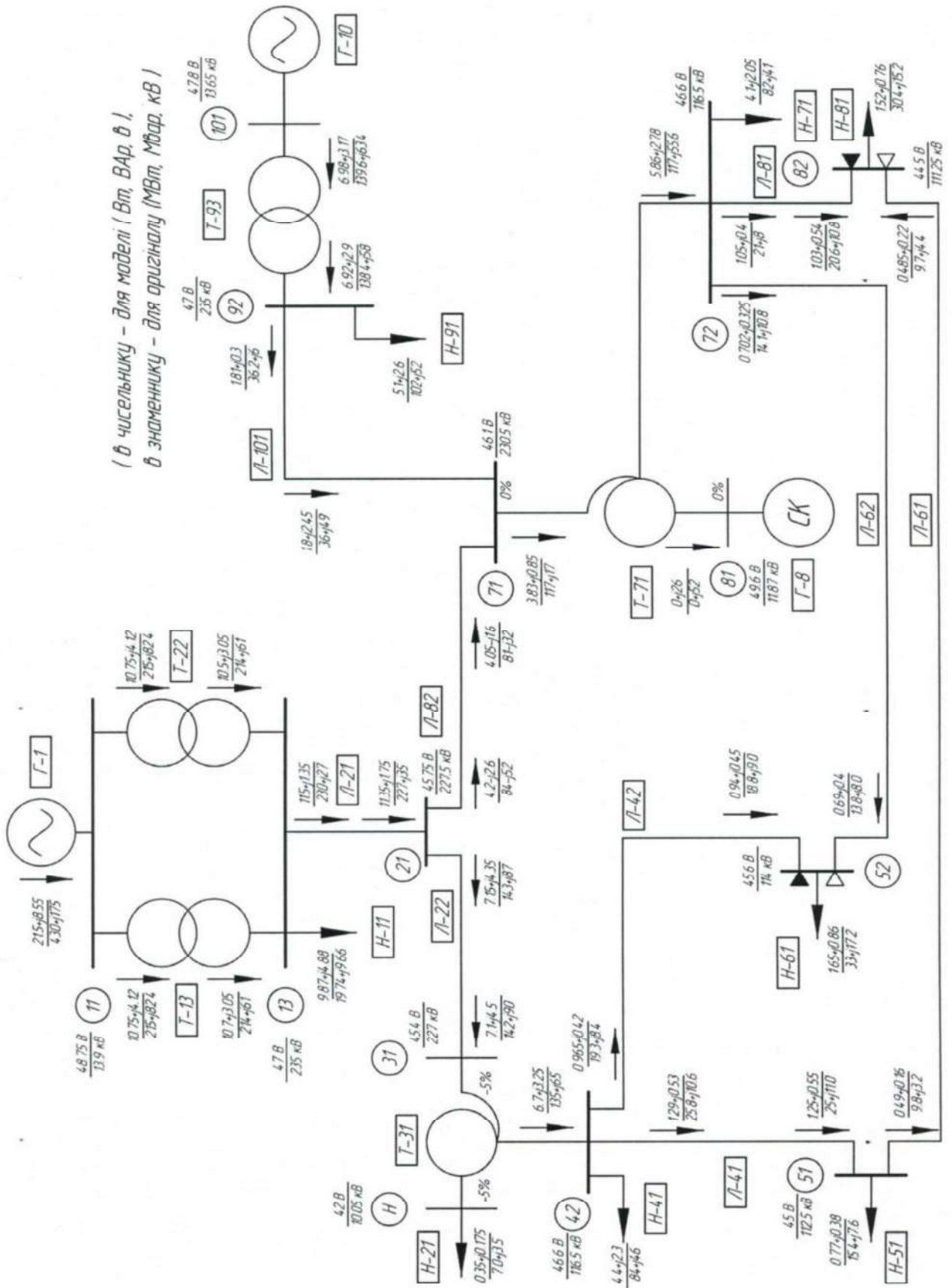


Рисунок 2.13 – Перетоки потужності в вітках і напруги в вузлах мережі в режимі максимальних навантажень (2 варіант)

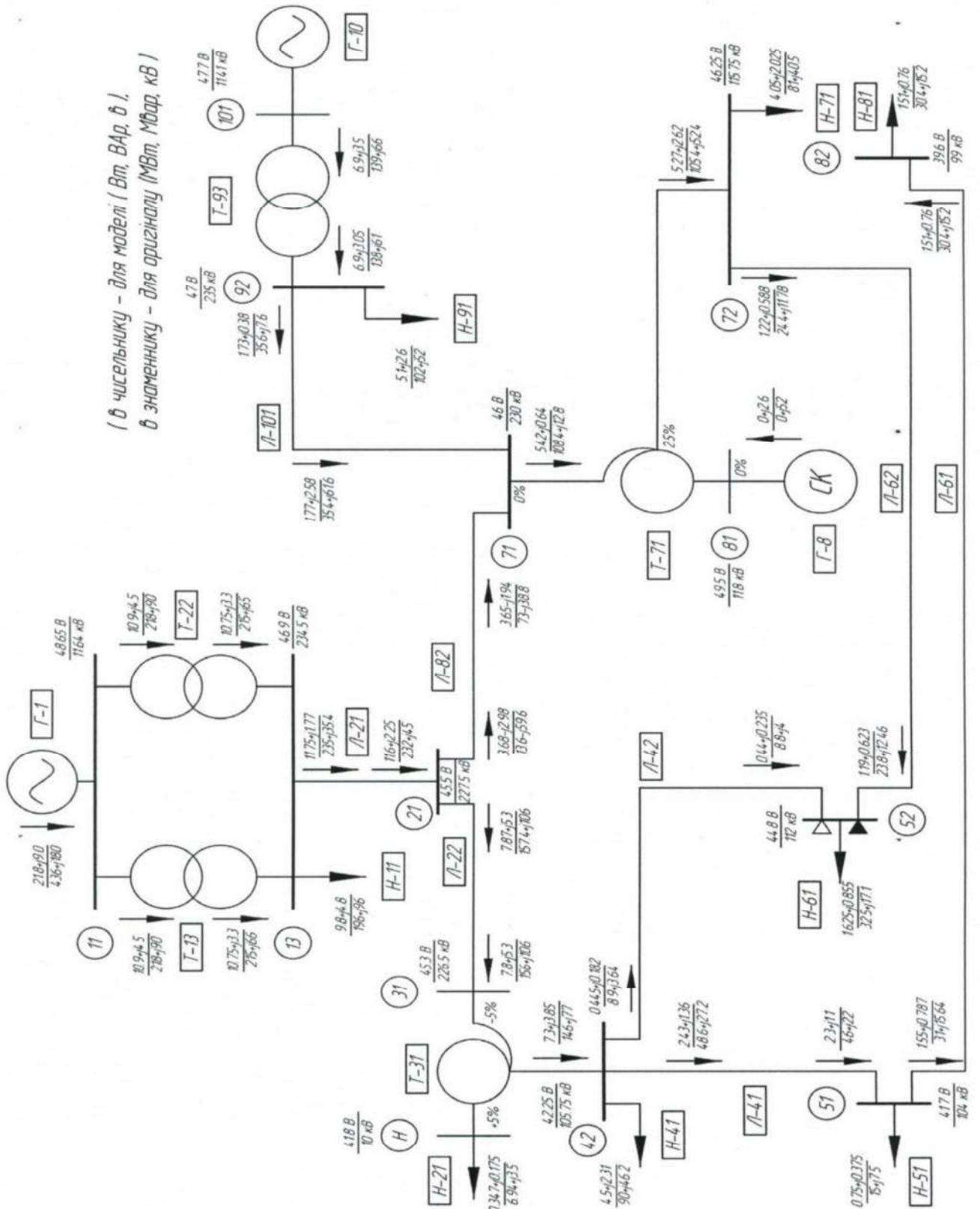


Рисунок 2.14 – Перетоки потужності в вітках і напруги в вузлах мережі при відключенні лінії Л-81 (1 варіант)

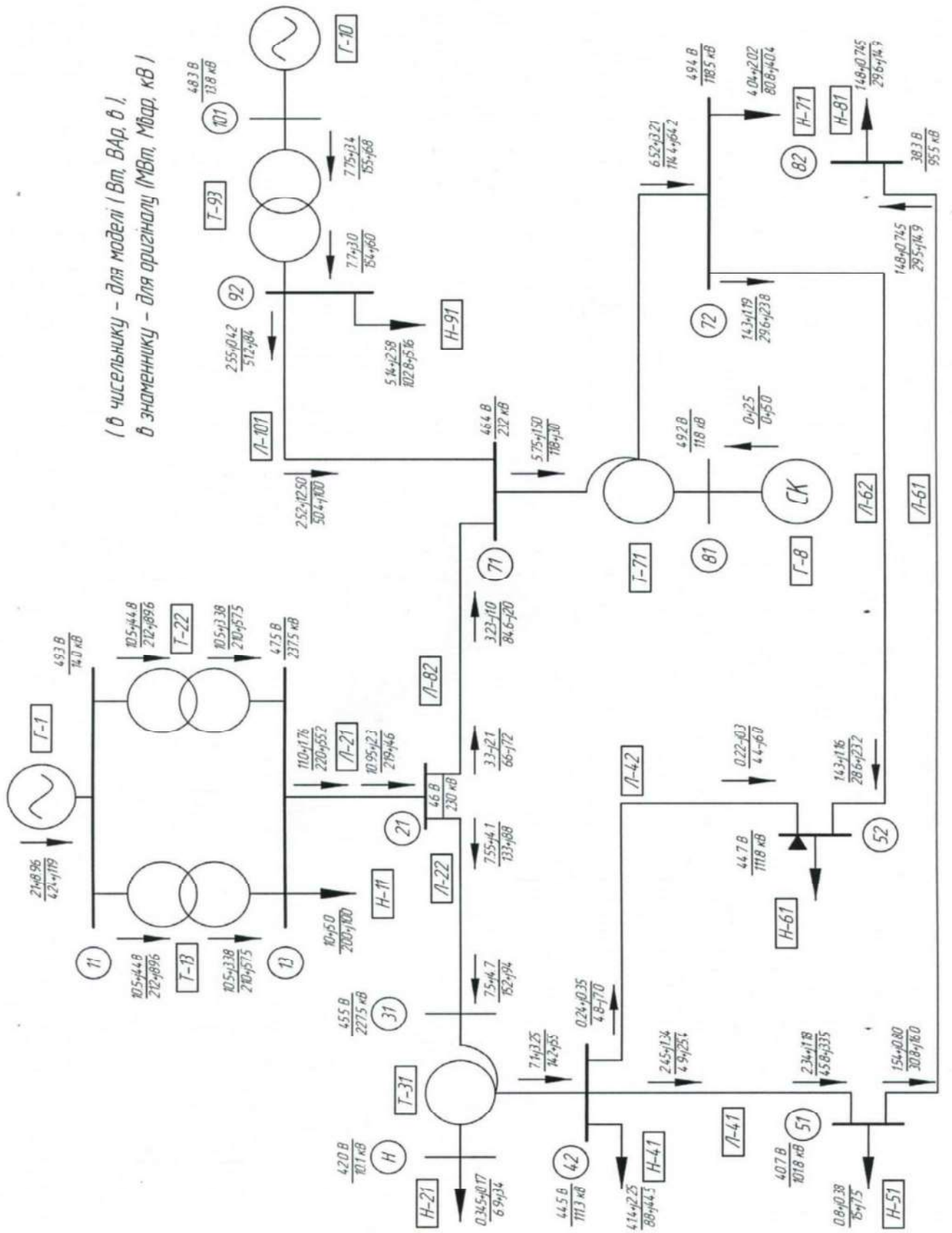


Рисунок 2.15 – Перетоки потужності в вітках і напруги в вузлах мережі при відключенні лінії Л-81 (2 варіант)

## 2.4 Вибір оптимальної експлуатаційної схеми неоднорідної електричної мережі

Мета роботи – досліджувати економічність роботи замкнутої неоднорідної електричної мережі і її підвищення шляхом розмикання контурів в найбільш оптимальних точках.

Теоретичні положення.

Електрична мережа, для всіх ділянок якої справедливе співвідношення  $x_i / r_i = const$  являється електрично однорідною. Дана властивість є ідеалізацією, яка в тому або іншому ступені може вважатися справедливою для деяких типів реальних електричних мереж. Так, цілком однорідною може вважатися мережа однієї напруги, виконана або кабелями однієї марки, або ЛЕП з проводами одного перетину. Практично зазвичай всяка мережа характеризується певним ступенем неоднорідності. Чисто кабельні або повітряні лінії однієї напруги можна віднести до категорії мереж з помірною неоднорідністю. До мереж з високим ступенем неоднорідності відносяться змішані кабельно-повітряні мережі однієї напруги, а також мережі з трансформаторними зв'язками у складі замкнутих контурів. Ступінь неоднорідності електричних мереж безперервно зростає внаслідок появи зв'язків підвищеної напруги, що накладаються на замкнуті мережі нижчої напруги.

Розподіл потужностей по ділянках замкнутої електричної мережі називається економічним, якщо він забезпечує мінімум сумарних втрат активної потужності в мережі при заданих потужностях навантаження і генерації у вузлах.

Доведено, що природний (тобто без стороннього втручання) поточкорозподіл в замкнутій однорідній мережі співпадає з поточкорозподілом в R-схемі і являється економічним. Необхідно відзначити, що сумарні реактивні втрати потужності за цих умов також виявляються мінімальними.

У неоднорідній електричній мережі природний режим розподілу потужностей, що встановлюється під дією законів Ома і Кірхгофа, відрізняється від економічного, що пов'язано зі збільшенням втрат активної потужності в мережі. Для визначення економічного розподілу потужностей у вузлах по ділянках мережі і відповідних

цьому розподілу сумарних втрат активної потужності необхідно для всіх ділянок прийняти  $X = 0$  і розрахувати сталий режим R схеми. Якщо отриманий економічний поточкорозподіл (рис. 2.16, а) накласти на початкову Z -схему (рис. 2.16,б), то при цьому порушиться другий закон Кірхгофа. Небаланс потенціалів у кожному контурі:

$$\Delta \dot{U}_K = \sum_{i \in K} \dot{I}_i \dot{Z}_i,$$

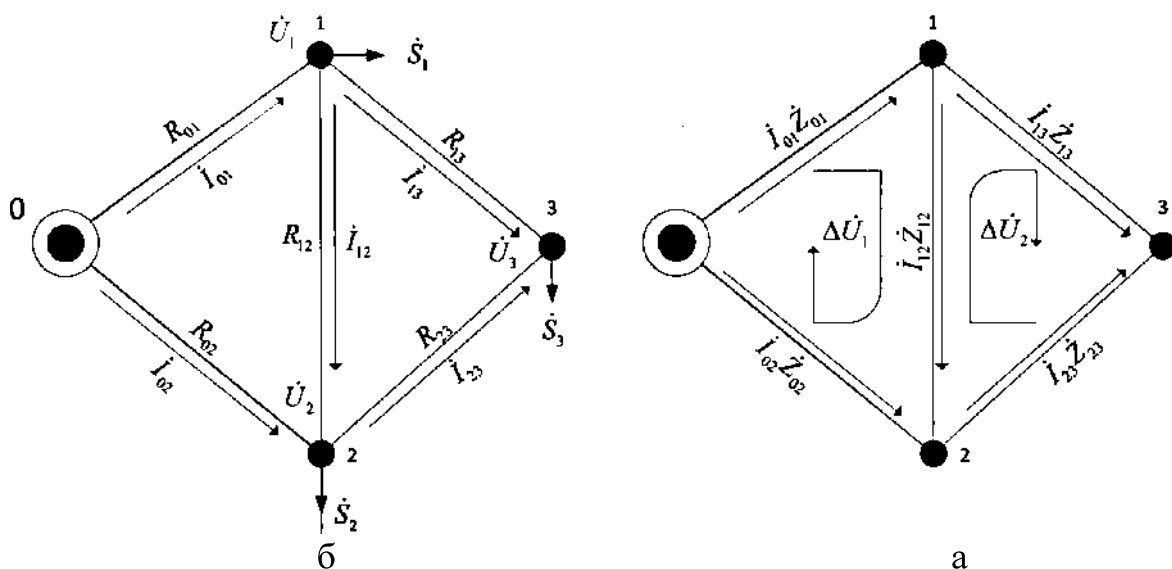
де  $i, \kappa$ - відповідно індекси ділянок і контурів мережі. Відповідно до рис. 2.16,а:

$$\sum_{i \in K} \dot{I}_i R_i = 0,$$

Тоді :

$$\Delta \dot{U}_K = \sum_{i \in K} j \dot{I}_i X_i,$$

Таким чином, щоб забезпечити економічний розподіл потужностей на ділянках замкнутої неоднорідної електричної мережі, необхідно штучно створити деякі додаткові ЕРС в кожному контурі мережі  $\dot{E}_{qk} = \Delta \dot{U}_K$  (рис. 2.16,в). Слід зауважити, що при цьому, на жаль, збільшуються сумарні втрати реактивної потужності в мережі, що приводить до погіршення режиму напруги.



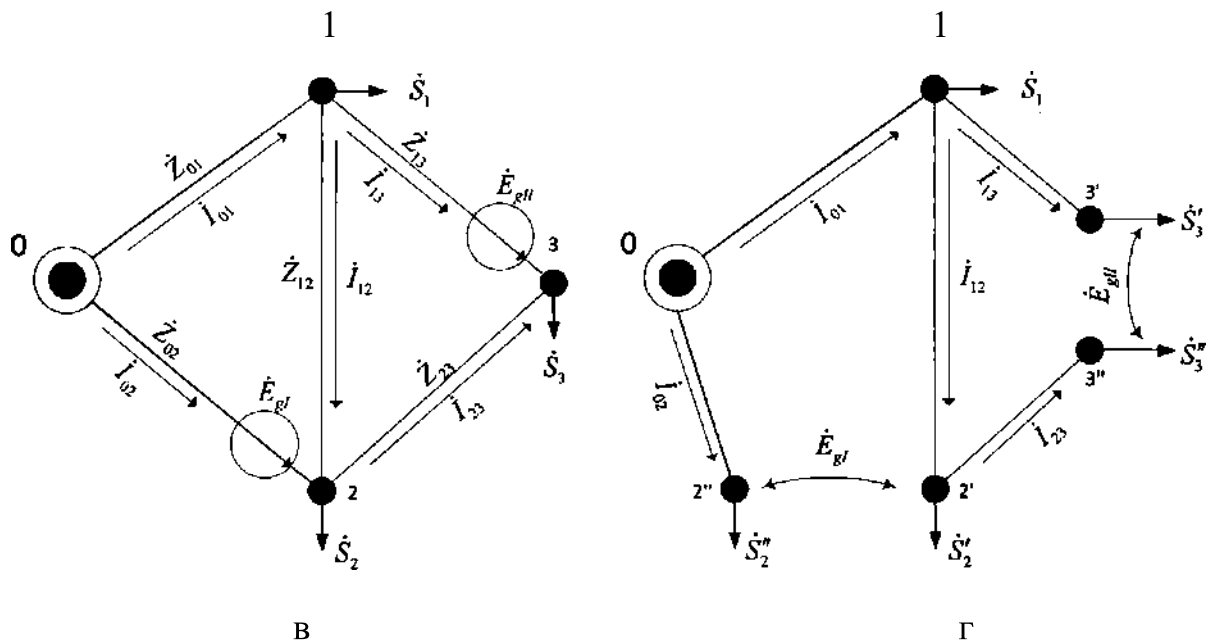


Рисунок 2.16 – Економічний поточкорозподіл в розімкнутій неоднорідній мережі

Оптимізація розподілу потужностей по ділянках мережі шляхом штучного створення врівноважуючих ЕРС контурів може бути реалізована різними способами:

- включенням в контури мережі поздовжньо-поперечних вольтододаткових (ВДТ), ЕРС яких повинна бути близька до тієї, що врівноважує;
- включенням в контури мережі установок подовжньої компенсації (УПК) у вигляді статичних конденсаторів, що врізаються в ділянки з підвищеною індуктивністю, або груп реакторів, що врізаються в ділянки із зниженою індуктивністю;
- розмиканням контурів мережі і переходом на розімкнену схему.

У розвинених мережах з великою кількістю неоднорідних контурів основним способом оптимізації є розмикання мережі. Він є експлуатаційним заходом і не вимагає додаткових капіталовкладень. Найбільш економічний розподіл потужностей на ділянках розімкненої мережі може бути досягнуто тільки при розділених мережі по вузлах і відповідному секціонуванні навантажень підстанцій (рис. 2.16,г). В результаті між точками розрізу встановиться різниця потенціалів, що дорівнює згаданій зрівноважуючій ЕРС.

У реальних мережах секціонування навантаження в довільному співвідношенні неможливе. Розмикання, як правило, проводиться шляхом відключення найменш завантажених в R-схемі ділянок.

Таким чином, процес оптимізації експлуатаційної схеми складнозамкненої неоднорідної електричної мережі в простому вигляді може бути реалізованих у відповідності з наступною методикою.

а) визначаємо поточкорозподіл потужностей на ділянках R-схеми.

б) знаходимо контури, які можна розімкнути, їх точки поточкорозподілу і ділянки, що примикають до них з найменшими перетоками потужності, які потім відключаємо.

в) визначаємо поточкорозподіл, режим напруги і сумарні втрати потужності розімкненої схеми. Якщо рівні напруги в деяких вузлах виходять за межі допустимих, необхідно провести відповідне їх регулювання зміною напруги на шинах джерел і коефіцієнтів трансформації трансформаторів зв'язку. Якщо вказане регулювання не може забезпечити необхідного рівня напруги в якій-небудь точці роз'єднання мережі, то відповідну відключену ділянку необхідно повернути в початковий стан.

Слід зауважити, що можливість секціонування навантаження деяких підстанцій дозволяє отримати більш оптимальне рішення. В цьому випадку повинно бути відоме навантаження на кожній секції шин[8].

Порядок виконання роботи.

а) отримати у викладача варіант початкових даних (табл. 2.6, 2.7) для схеми, показаної на рис. 2.17.

б) вибрати масштаби величин і визначити параметри елементів моделі.

в) зібрати розрахункову схему і встановити необхідні параметри елементів моделі.

г) після перевірки розрахункової схеми викладачем ввести модель в роботу. Провести балансування початкового режиму замкнутої мережі, виконати заміри отриманого режиму. Визначити сумарні втрати активної і реактивної потужності в мережі.

д) провести вибір оптимальної експлуатаційної схеми електричної мережі відключенням деяких ділянок. Визначити мінімальні втрати активної потужності  $R$  - схемі мережі (теоретичний мінімум), також відповідні втрати реактивної потужності.

е) провести балансування оптимального режиму розімкненої схеми, виконати необхідні заміри, визначити сумарні втрати активної та реактивної потужності.

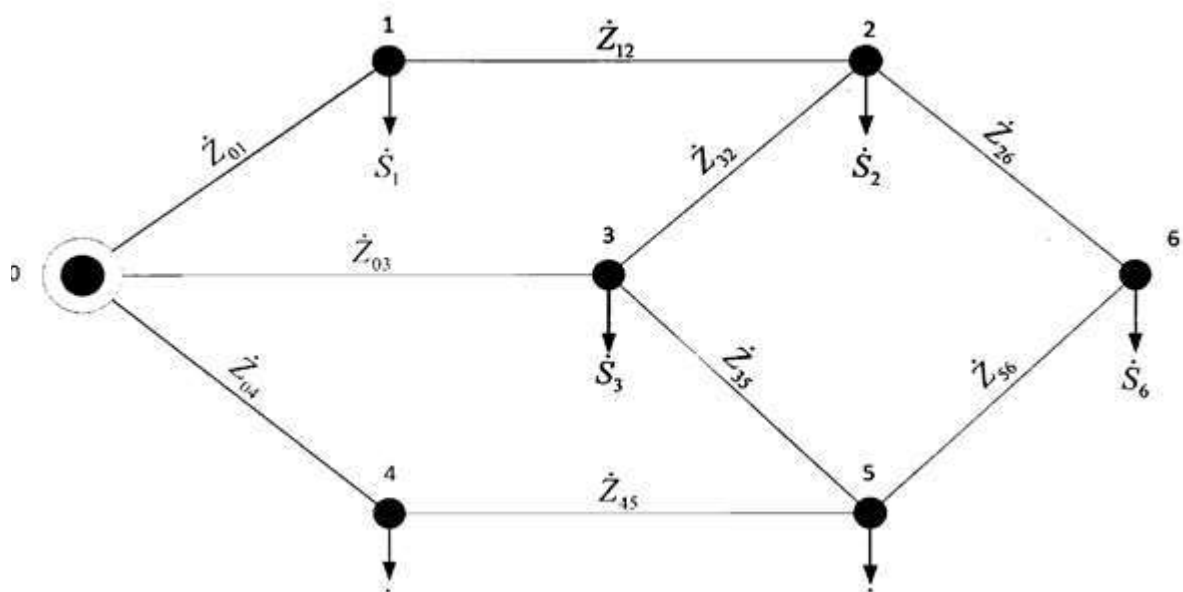


Рисунок 2.17 – Розрахункова схема заміщення електричної мережі

Зміст звіту:

- а) мета роботи.
- б) методика виконання роботи.
- в) розрахункова схема замкнутої мережі і її параметри.
- г) результати розрахунку на моделі початкового режиму.
- д) оптимальна розімкнена схема.
- е) результати оптимізації.
- ж) результати розрахунку на моделі режиму оптимальної розімкненої схеми.
- з) таблиця втрат активної і реактивної потужності в вихідній замкнутій мережі, розімкненої мережі (технічний оптимум) і економічних втрат (теоретичний оптимум).

и) висновки по роботі.

Контрольні запитання.

а) яка мережа називається однорідною?

б) як визначити економічний поточкорозподіл неоднорідної мережі?

Таблиця 2.6 - Дані про ділянки

Номер Варіанта.	Опір ділянок схеми, Ом								
	$\dot{Z}_{01}$	$\dot{Z}_{12}$	$\dot{Z}_{26}$	$\dot{Z}_{04}$	$\dot{Z}_{45}$	$\dot{Z}_{56}$	$\dot{Z}_{03}$	$\dot{Z}_{32}$	$\dot{Z}_{35}$
1	1,1+ j1,6	1,3+ j1,9	1,7+ j0,3	1,3+ j1,9	0,8+ j1,3	2,1+ j0,4	1,8+ j0,6	1,7+ j0,3	1,3+ j0,3
2	1,3+ j1,9	1,7+ j0,3	1,3+ j1,9	0,8+ j1,3	2,1+ j0,4	1,8+ j0,6	1,7+ j0,3	1,3+ j0,3	1,1+ j1,6
3	1,7+ j0,3	1,3+ j1,9	0,8+ j1,3	2,1+ j0,4	1,8+ j0,6	1,7+ j0,3	1,3+ j0,3	1,1+ j1,6	1,3+ j1,9
4	1,3+ j1,9	0,8+ j1,3	2,1+ j0,4	1,8+ j0,6	1,7+ j0,3	1,3+ j0,3	1,1+ j1,6	1,3+ j1,9	1,7+ j0,3
5	0,8+ j1,3	2,1+ j0,4	1,8+ j0,6	1,7+ j0,3	1,3+ j0,3	1,1+ j1,6	1,3+ j1,9	1,7+ j0,3	1,3+ j1,9
6	2,1+ j0,4	1,8+ j0,6	1,7+ j0,3	1,3+ j0,3	1,1+ j1,6	1,3+ j1,9	1,7+ j0,3	1,3+ j1,9	0,8+ j1,3

Таблиця 2.7 - Дані про навантаження

Номер варіанту	Напруга БП, кВ	Потужності навантажень у вузлах схеми, МВт, МВАр					
		$\dot{S}_1$	$\dot{S}_2$	$\dot{S}_3$	$\dot{S}_4$	$\dot{S}_5$	$\dot{S}_6$
1	10	1- j0,6	2- j1,6	3- j2,2	1- j0,6	3- j2,2	1,2- j0,8
2	10	2- j1,6	3- j2,2	1- j0,6	3- j2,2	1,2- j0,8	1- j0,6
3	10	3- j2,2	1- j0,6	3- j2,2	1,2- j0,8	1- j0,6	2- j1,6
4	10	1- j0,6	2- j1,6	3- j2,2	1- j0,6	3- j2,2	1,2- j0,8
5	10	2- j1,6	3- j2,2	1- j0,6	3- j2,2	1,2- j0,8	1- j0,6
6	10	3- j2,2	1- j0,6	3- j2,2	1,2- j0,8	1- j0,6	2- j1,6

## 2.5 Оптимальний розподіл потужності в електричній мережі

Мета роботи - дослідити залежність напруги і сумарних втрат активної потужності в мережі від величини реактивної потужності джерел і освоїти методику покоординатного спуску при оптимальному розподілі реактивних потужностей.

Теоретичні відомості. Умовою стаціонарності режиму є баланс активної реактивної потужності в енергосистемі. Порушення балансу веде до зміни параметрів режиму. При цьому, як відомо, дефіцит активної потужності завжди викликає зниження частоти. Дефіцит реактивної потужності завжди пов'язаний із пониженням рівнів напруги у вузлах мережі. З іншого боку, зміна ЕРС (напруги) джерел нерозривно пов'язана зі зміною видаваною ними реактивної потужності. Так, збільшення ЕРС генератора приводить до збільшення реактивної потужності, що генерується. Збільшення ж фази ЕРС пов'язано переважно зі збільшенням видачі активної потужності.

Пункти споживання і генерування реактивної потужності в системі (рис. 2.18) можна розділити на пункти з фіксованою і регульованою реактивною потужністю. Всі навантаження відносяться до пунктів з фіксованою активною і реактивною потужністю. Джерела представляються зазвичай фіксованими активними потужностями і мають можливість шляхом зміни ЕРС регулювання в певних межах реактивних потужностей. При повному використанні резерву реактивної потужності джерела переводяться до розряду пунктів з фіксованою реактивною потужністю. Переведення окремих пунктів із однієї категорії в іншу доводиться часто проводити і в процесі розподілу реактивних потужностей між вузлами по мірі уточнення режиму роботи електричної мережі.

Граничне значення видаваної генератором реактивної потужності визначається максимальним струмом перевантаження статора. При активних навантаженнях генератора нижче номінального можливе деяке збільшення межі по реактивній потужності (рис. 2.19). Проте повна потужність генератора при цьому зменшується (ділянка кривої  $AB$  лежить нижче за окружність  $AB'$ ) через розмагнічуючу дію реакції

якоря. При необхідності (у режимі мінімальних навантажень) деякі генератори, що працюють в блоці з трансформаторами переводяться в режим недозбудження, а синхронні компенсатори - на роботу з негативним збудженням, споживаючи при цьому надлишкову реактивну потужність з мережі[9].

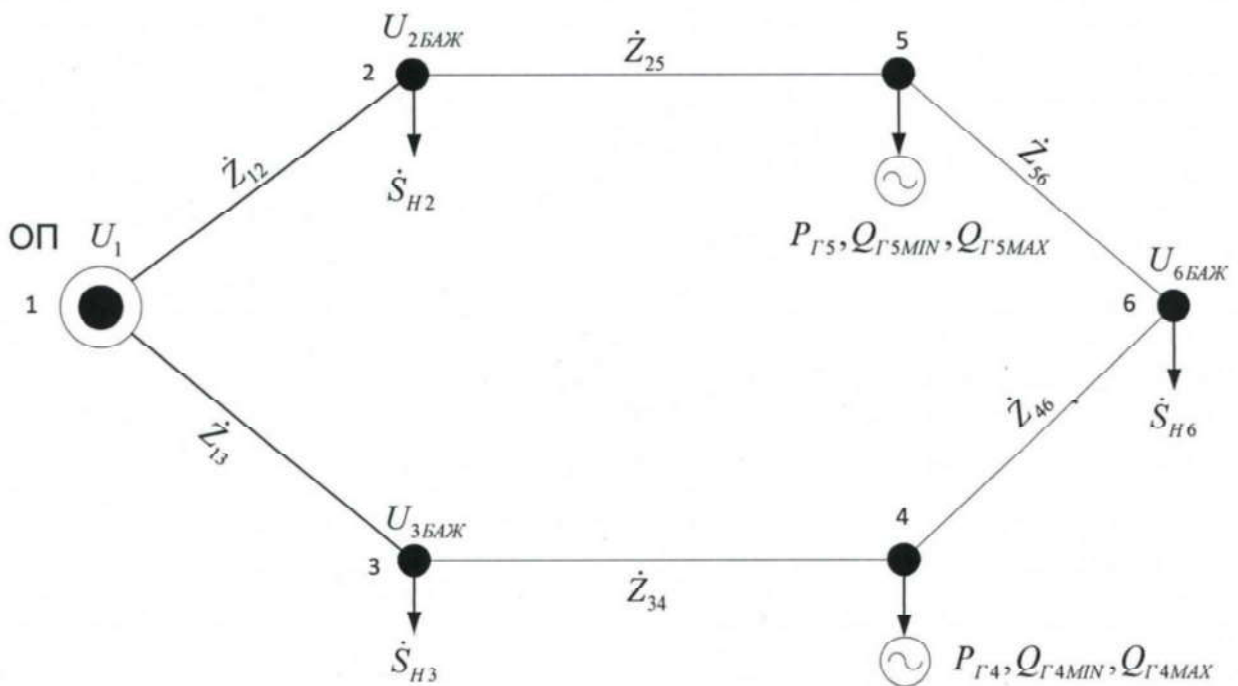


Рисунок 2.18 – Розрахункова схема електричної мережі

Кількість пунктів з регульованою реактивною потужністю визначає число ступенів свободи регулювання даної системи. В якості цілі регулювання можуть бути вибрані :

- зниження сумарних втрат активної потужності в мережі ;
- забезпечення бажаного режиму напруги.

Можлива комбінація вказаних цілей.

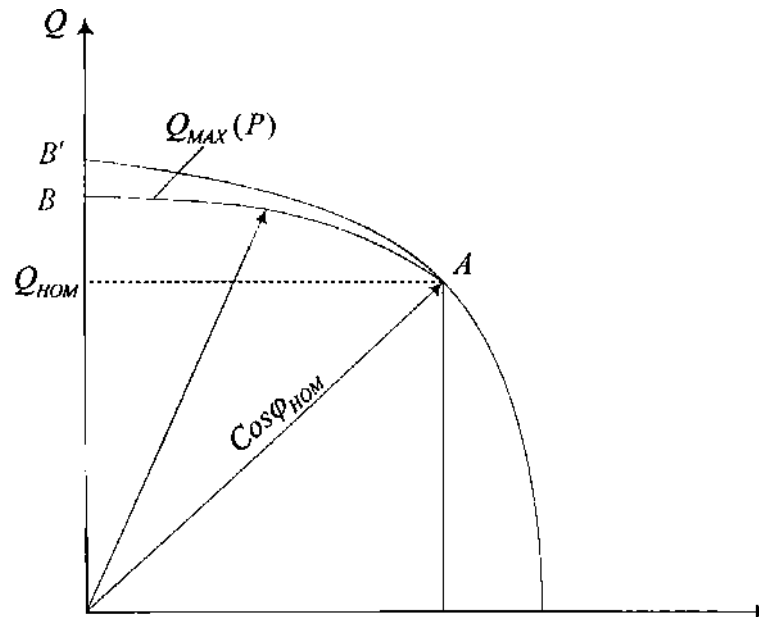


Рисунок 2.19 – Залежність межі по реактивній потужності від активного навантаження

Рішення задачі оптимального розподілу реактивної потужності між джерелами ставиться наступним чином. Задані параметри електричної мережі: активні і реактивні потужності навантажень і деяких джерел, активні потужності і діапазони можливої зміни реактивних потужностей решти джерел, напруга опорного пункту. Потрібно визначити значення реактивних потужностей регульованих джерел, що забезпечують мінімум цільової функції:

$$\psi(Q_i) = \min.$$

В першому випадку функція  $\psi$  являє собою сумарні втрати в мережі і визначається співвідношенням:

$$\psi = \Delta P_{\Sigma} = \sum_{\Gamma} P_{\Gamma} - \sum_{H} P_H + P_0,$$

де  $\sum_{\Gamma} P_{\Gamma}, \sum_{H} P_H$  - сума активних потужностей джерел і навантажень;

$P_0$  - активна потужність балансуєчого (опорного) пункту.

В другому випадку цільова функція  $\psi$  повинна відображати якість режиму напруги мережі. Вираз для знаходження  $\psi$  набуває вигляду:

$$\psi = \Delta P_{\Sigma} = \sum_{K \in p} \alpha_K \frac{|U_K - U_{КБАЖ}|}{U_{КБАЖ}},$$

де  $K \in p$  - кількість вузлів електричної мережі, в яких регулюється напруга;

$U_K, U_{КБАЖ}$  - фактичний і бажаний рівні напруги в вузлах, що регулюються;

$\alpha_K$  - вагові коефіцієнти (коефіцієнт пріоритетності вузлів).

В найпростішому випадку приймають  $\alpha_K = 1/m_p$ , де  $m_p$  - кількість вузлів в яких регулюється напруга. Один із ефективних методів рішення задачі  $\psi(Q_i) = \min$ . може бути представлений наступним алгоритмом: по черзі розглядаються всі змінні  $Q_i$ ; при цьому дана змінна (наприклад,  $Q_1$ ) послідовно змінюється у напрямі убавання цільової функції до тих пір, поки не буде досягнуте ц мінімальне значення (точка 1, рис.2.20,а). Решта всіх змінних ( $Q_2$ ) залишається незмінною. Після цього аналогічно змінюється змінна  $Q_2$  (точка 2, рис. 2.20,а) і так далі. Процес продовжується до тих пір, поки не буде отриманий абсолютний мінімум цільової функції (точка 3, рис.2.20,а). Вказаний метод носить назву покоординатного спуску.

Для визначення оптимального значення змінної  $Q_i$  на черговому кроці виконується три пробних експерименти. На моделі встановлюються режим при встановлюється режим при  $Q_i = Q_{i0}$  і обчислюється відповідне значення цільової функції  $\psi_0$ . Далі аналогічно встановлюється режим при

$$Q_{i-} = Q_{i0} - \Delta Q_i;$$

$$Q_{i+} = Q_{i0} + \Delta Q_i,$$

і вираховуються значення цільової функції відповідно  $\psi_-$  і  $\psi_+$ .

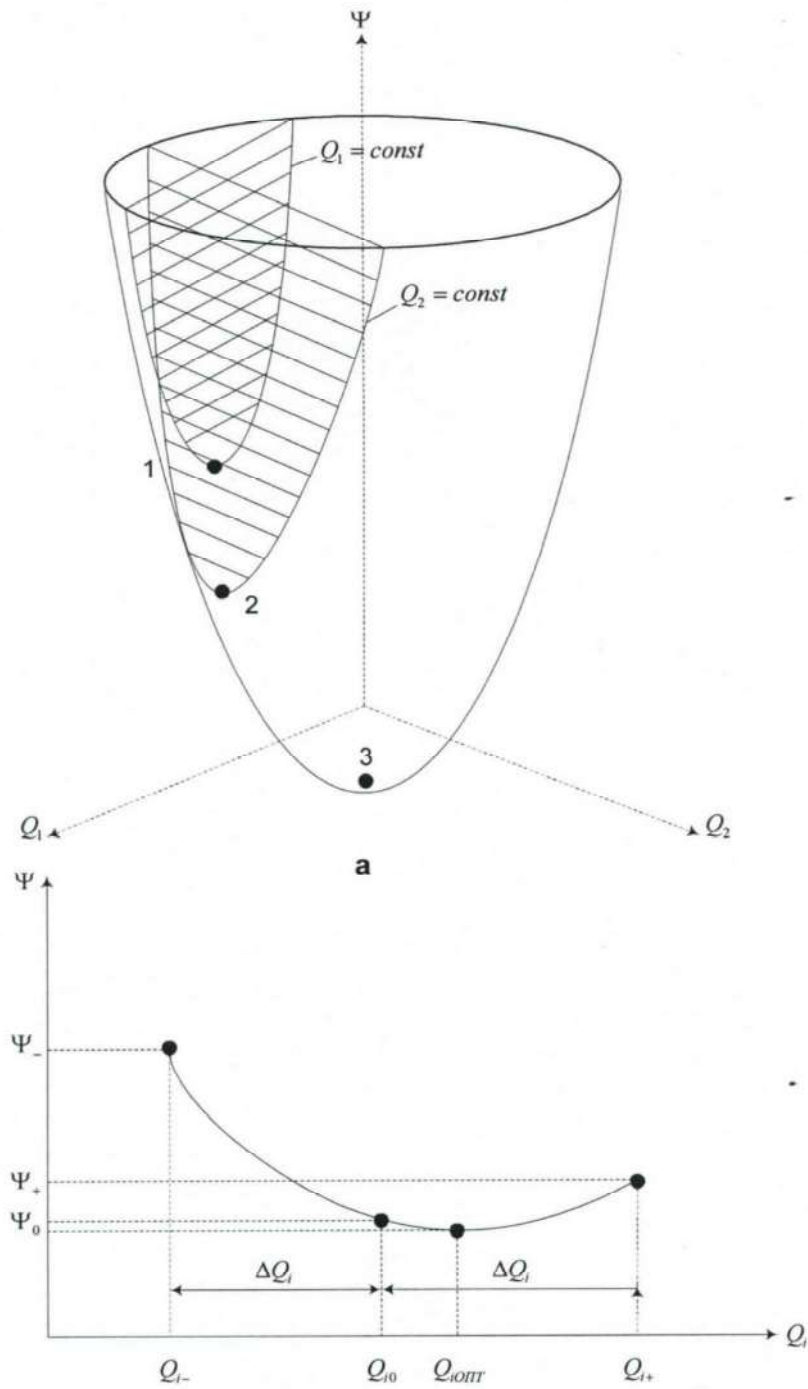


Рисунок 2.20 – Метод покоординатного спуску

Із умови екстремуму  $d\psi / dQ_i = 0$  знаходимо

$$Q_{\text{опт}} = -\frac{b}{2c}.$$

Коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$  легко визначаються із системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \psi_- &= a + b(Q_{i0} - \Delta Q_i) + c(Q_{i0} - \Delta Q_i)^2, \\ \psi_0 &= a + bQ_{i0} + cQ_{i0}^2, \\ \psi_+ &= a + b(Q_{i0} + \Delta Q_i) + c(Q_{i0} + \Delta Q_i)^2, \end{aligned} \right\}$$

звідки

$$b = \frac{\psi_+ - \psi_-}{2\Delta Q_i} + \frac{2\psi_0 - \psi_- - \psi_+}{\Delta Q_i^2} Q_{i0};$$

$$c = \frac{2\psi_0 - \psi_- - \psi_+}{\Delta Q_i^2}.$$

Таким чином, оптимальне значення змінної після трьох пробних експериментів ви являється рівним

$$Q_{iOPT} = Q_{i0} + \frac{\Delta Q_i}{2} \cdot \frac{\psi_+ - \psi_-}{2\psi_0 - \psi_- - \psi_+}$$

Початкове значення  $Q_{i0}$  і інтервал варіювання  $\Delta Q_i$  кожної змінної можна отримати з виразів:

$$Q_{i0} = \frac{Q_{iMAX} + Q_{iMIN}}{2};$$

$$\Delta Q_i = \frac{Q_{iMAX} - Q_{iMIN}}{2},$$

де  $Q_{iMAX}, Q_{iMIN}$  - межі вимірювання реактивної потужності джерела.

Далі  $Q_{i0}$  приймається рівним оптимальному значенню із попереднього кроку, а  $\Delta Q_i$  при цьому зменшується в 2 рази. Якщо на попередньому кроці значення  $Q_{iOPT}$  виявилось за межами  $Q_{i0} \pm \Delta Q_i$ , то інтервал варіювання  $\Delta Q_i$  цієї змінної необхідно залишити без змін [ 10] .

Порядок виконання роботи.

а) для схеми на рис. 2.18 отримати у викладача варіант вихідних даних (табл.2.8-2.11). Вибрати масштаби величин, використовуючи для цього вирази:

$$m_U \cong \frac{U_{MAX}[kB]}{50[B]},$$

$$m_I \cong \frac{S_{MAX}[MVA]}{U_{MAX}[kB] \cdot 0,3 [A]},$$

$$m_Z = \frac{m_U}{m_I},$$

$$m_S = \frac{m_I}{m_U}.$$

де  $S_{MAX}$  - найбільш можлива потужність джерел у вузлі 1, 4 або 5, з урахуванням максимальної реактивної потужності. Визначити модельні значення параметрів.

б) зібрати на моделі задану схему. Початкові значення навантажень встановити рівними половині заданим з урахуванням паразитних активних втрат, ЕРС генераторних станцій у вузлах 1, 4 і 5 встановити рівними  $U_I$ , а фази - 0; ємкості лінійних елементів повинні дорівнювати 0.

в) після перевірки набраної схеми викладачем включити генераторні станції в мережу і виконати балансування початкового режиму. Для цього, змінюючи по черзі спочатку модулі і фази ЕРС генераторних станцій, добитися, щоб активні потужності були рівні заданим, а реактивні відповідали виразу  $Q_{i0} = \frac{Q_{iMAX} + Q_{iMIN}}{2}$ ;

Після цього приступити до поперечної компенсації  $\dot{Z}_{II}$  так, щоб потужності навантажень стали рівними заданим. Потім знову повернутися до генераторних станцій і так далі. 4дночасно стежити, щоб  $U_{OП}$ , була рівна заданій.

Г) використовуючи розглянуту методику покоординатного спуску, оптимально розподілити реактивні потужності з урахуванням мінімуму сумарних втрат активної потужності в мережі. Результати розрахунків занести в табл. 2.12.

д) виконати оптимальний відносно якості напруги в вузлах 2, 3 і 6 розподіл реактивних потужностей станцій. Як початковий режим можна використовувати отриманий в п.4 оптимальний по втратах активної потужності режим.

е) виконати оптимальний розподіл реактивних потужностей без урахування обмежень. При цьому необхідно стежити, щоб не було перевантаження генераторних станцій по струму.

Таблиця 2.8 – Дані про ділянки

Номер варіанту	$\dot{Z}_{12}$	$\dot{Z}_{12}$	$\dot{Z}_{12}$	$\dot{Z}_{12}$	$\dot{Z}_{12}$	$\dot{Z}_{12}$
1	5,2+j16,1	2,4+j9,1	4,8+j15,2	1,2+j7,7	5,4+j10,3	2,2+j7,1
2	4,8+j18,4	2,6+j8,4	2,4+j14,7	2,4+j7,6	4,6+j14,2	2,7+j10,1
3	3,1+j6,8	4,3+j14,2	1,1+j4,7	5,7+j15,1	5,0+j7,2	1,2+j3,4

Таблиця 2.9 – Дані про навантаження

Номер варіанту	$\dot{S}_{H2}$	$\dot{S}_{H3}$	$\dot{S}_{H6}$
1	50- j20	70- j30	40- j40
2	60- j20	60- j40	50- j20
3	50- j40	70 – j30	60 - j20

Таблиця 2.10 – Дані про джерела

Номер варіанту	$P_{Г4}$	$Q_{Г4MIN}$	$Q_{Г4MAX}$	$P_{Г5}$	$Q_{Г5MIN}$	$Q_{Г5MAX}$
1	105	0	50	100	0	100
2	70	-30	70	50	-20	50
3	90	15	80	100	25	75

Таблиця 2.11 – Бажані рівні напруг у вузлах

Номер варіанту	$U_1$	$U_{2Ж}$	$U_{3Ж}$	$U_{6Ж}$
1	110	115	110	115
2	115	110	115	110
3	115	115	110	115

Зміст звіту.

Звіт повинен містити докладний опис наступних положень:

- а) мета роботи.
- б) основний зміст теоретичної частини і розрахункові формули.
- в) розрахункова схема і початкові дані, масштаби і модельні параметри.
- г) результати оптимізації.
- д) висновки по роботі.

Контрольні запитання.

- а) як впливають модуль і фаза ЕРС джерела на видачу в мережу активної і реактивної потужності?
- б) якими параметрами представляються джерела при аналізі сталих режимів?
- в) чому необхідно знижувати активне навантаження генератора при збільшенні його реактивного навантаження понад номінальне?
- г) які можуть бути межі регулювання реактивної потужності джерел?
- д) поясніть суть методу покоординатного спуску?

Таблиця 2.12 – Оптимальний розподіл реактивної потужності

Крок	$\Delta Q_4$	$\Delta Q_4$	$Q_4$	$Q_5$	$\psi$	$Q_{OPT4}$	$Q_{OPT5}$
1		-		-			-
				-			
				-			
2	-		-			-	
			-				
			-				
3		-		-			-
				-			
				-			
4	-		-			-	
			-				
			-				

## Висновки за розділом

Загальне навчально-методичне завдання при виконанні лабораторних робіт полягає в розширенні і закріпленні знань, отриманих при вивченні найбільш трудомістких і складних теоретичних розділів курсу. Розглядається основи розрахункового подання (моделювання) електричних мереж та практичного застосування інженерних методів для розрахунку та аналізу усталених режимів розімкнутих і замкнутих мереж. Метою виконання справжніх лабораторних робіт є дослідження властивостей електричних мереж, підготовка розрахункових складових елементів і схеми заміщення мережі, вивчення і застосування найбільш ефективних методів вирішення поставленого завдання.

Проведення критичного аналізу та практична оцінка одержуваних результатів у підсумку формують навички інженерного аналізу робочих режимів електричних мереж. Всі лабораторні роботи, включені в даний розділ, носять дослідницький характер.

Виконання вищенаведених лабораторних робіт на аналоговій універсальній розрахунковій моделі порівняно з комп'ютерним практикумом дозволяє студентам краще засвоїти та зрозуміти фізичний зміст теоретичного матеріалу отриманого на лекціях, оскільки розрахунок, збирання та вимірювання параметрів схеми виконується на дійсних елементах.

Лабораторний практикум включає 5 лабораторних робіт на основі яких може бути в процес навчання введений лабораторний практикум по дослідженню параметрів, режимів роботи, статичної та динамічної стійкості електричних мереж у всіх можливих їхніх схемних варіантах.

### **3 ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ПЕРЕВІРКА ДОСЛІДНИЦЬКИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ НА УРМЕС-2**

Перевірка результатів навчання одночасно є показником якості роботи і викладача і студента. Перевірка результатів навчання визнається складним, багатоскладним процесом, який згідно своєму призначенню і функціям займає одне з центральних місць у процесі навчання, так як є одночасно завершальним і початковим етапом нових освітніх процесів.

Підвищення ефективності та комфортності процесу перевірки результатів навчання досягається шляхом заміни традиційних на інноваційні способи, а їх оптимального поєднання, що можливо на основі амбівалентного підходу.

Система інженерних і наукових розрахунків (матрична лабораторія) MATLAB здатна вирішувати задачі лінійної алгебри, інтегральні і диференціальні рівняння, виконувати перетворення Лапласа і Фур'є, Z-перетворення і т.д. Графічні можливості пакета дозволяють будувати двох і тривимірні графіки в різних координатах. Передбачено вирішення статистичних і оптимізаційних завдань. Завдяки програмі Simulink є можливість аналізу і синтезу сучасних систем управління в тимчасовій і частотній областях, а також у просторі станів. Безліч пакетів розширень (Toolbox), у тому числі по нейронних мережах, нечіткій логіці, генетичним алгоритмам та біоінформатики, роблять цей пакет незамінним при автоматизованому проектуванні систем управління промисловими об'єктами.

Таким чином перевірка правильності отриманих результатів є також значною складовою навчального процесу.

Отже, приведемо приклади виконання лабораторних робіт перевіriamo отримані дослідницькі результати за допомогою звичайного прорахунку та використовуючи середовище програмування та моделювання Matlab

### 3.1 Приклад виконання лабораторної роботи та перевірка результатів дослідження режимів роботи лінії електропередавання на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС-2М

Необхідно дослідити режим роботи повітряної лінії електропередавання напругою 110 кВ, що виконана проводами марки АС-120, довжиною 120 км, живить навантаження  $P_2 = 40$  МВт,  $\cos \varphi = 0,8$ .

Розраховуємо параметри схеми заміщення лінії.

Питомі параметри лінії:

$$r_0 = 0,27 \text{ Ом/км};$$

$$x_0 = 0,428 \text{ Ом/км};$$

$$b_0 = 2,69 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}.$$

Повний опір та провідність лінії:

$$R = r_0 l = 32,4 \text{ Ом}; X = x_0 l = 50,8 \text{ Ом};$$

$$B = 322,9 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Обираємо П-подібну схему заміщення.

Знаходимо половину ємності лінії:

$$0,5C = \frac{B}{2\omega} = 0,52 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 0,52 \text{ мкФ}$$

Знайдені величини наносять на симетричну П-подібну схему заміщення повітряної лінії (рис. 3.1).

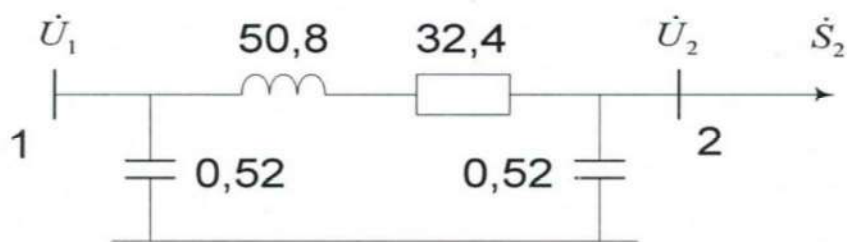


Рисунок 3.1 – параметри П-подібною схеми заміщення розрахункової лінії

Для визначення параметрів моделі вибираємо масштабні коефіцієнти. Масштаб по напрузі приймаємо рівним:

$$m_U = \frac{110kV}{50V} = 2,2 \cdot 10^3.$$

Вибираємо масштаб по потужності:

$$m_S = \frac{10MBm}{1Bm} = 10^7.$$

Тоді масштабні коефіцієнти визначаються так:

$$m_I = \frac{m_S}{\sqrt{3}m_U} = \frac{10^7}{\sqrt{3} \cdot 2,2 \cdot 10^3} = 2,62 \cdot 10^3;$$

$$m_Z = \frac{m_U^2}{m_S} = \frac{(2,2 \cdot 10^3)^2}{10^7} = 0,484;$$

$$m_C = \frac{4}{m_Z} = \frac{4}{0,484} = 8,28.$$

Розрахуємо параметри схеми моделі

$$R_M = \frac{R}{m_Z} = \frac{32,4}{0,484} = 67 \text{ Ом};$$

$$X_M = \frac{X}{m_Z} = \frac{50,8}{0,484} = 105 \text{ Ом};$$

$$; C_M = \frac{C}{m_C} = \frac{1,04}{8,28} = 0,0628 \text{ мкФ};$$

$$P_M = \frac{P}{m_S} = \frac{40 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6} = 4 \text{ Вт};$$

$$Q_M = \frac{Q}{m_S} = \frac{P}{\text{tg}\varphi_2} \cdot m_S \frac{40 \cdot 10^6}{\text{tg}(37,87)} \cdot 10 \cdot 10^6 = 3 \text{ ВАр}.$$

Для моделювання навантаження обираємо апарат постійних вольт-ампер (АНВ), що автоматично підтримує задану активну і реактивну потужність навантаження незалежно від зміни напруги на вході апарата.

Схема набору з величинами параметрів моделі і умовними параметрами складових елементів приведена на рис. 3.2.

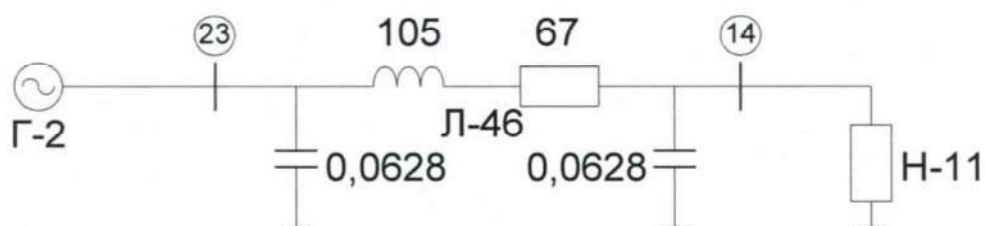


Рисунок 3.2 – Схема набору з величинами параметрів моделі і умовними параметрами складових елементів

За допомогою з'єднувальних шнурів та відповідних роз'ємів на основній комутаційній панелі збираємо схему (рис. 3.3) та виставляємо необхідні значення параметрів елементів:

На елементі Л-46 виставляємо значення активної, індуктивної та ємнісної складових (рис. 3.4).

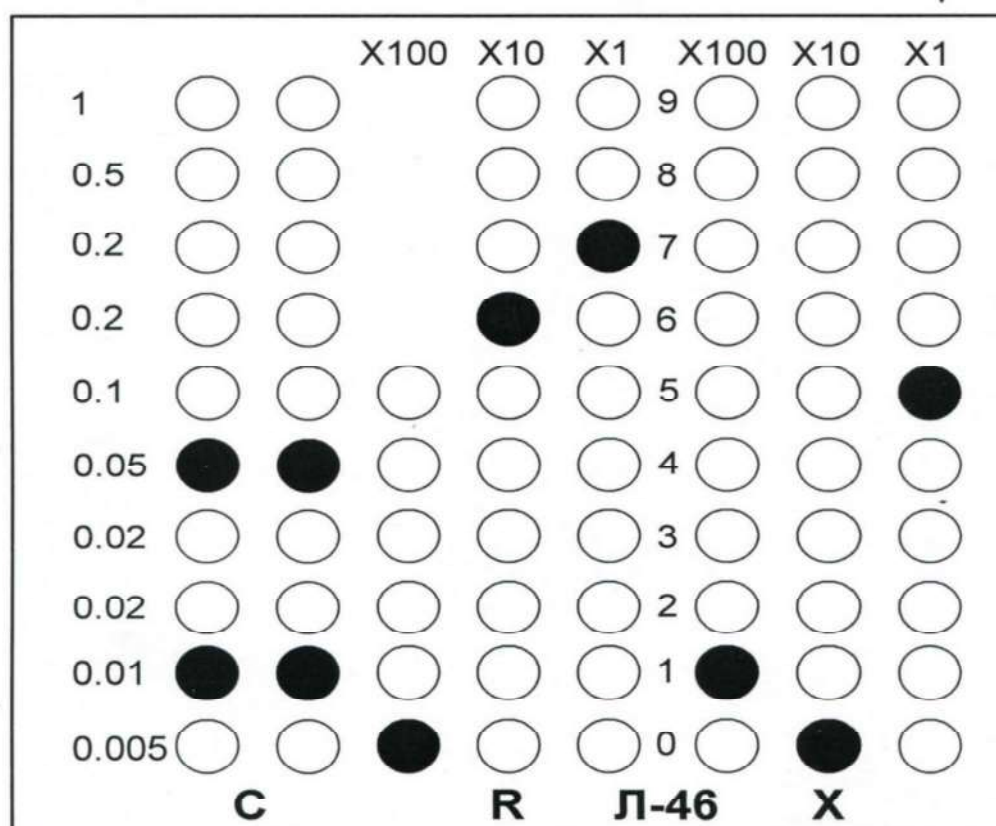


Рисунок 3.4 – Схема набору лінії Л-46

На елементі навантаження Н-11 для режиму активного навантаження виставляємо значення активної потужності (рис. 3.5).

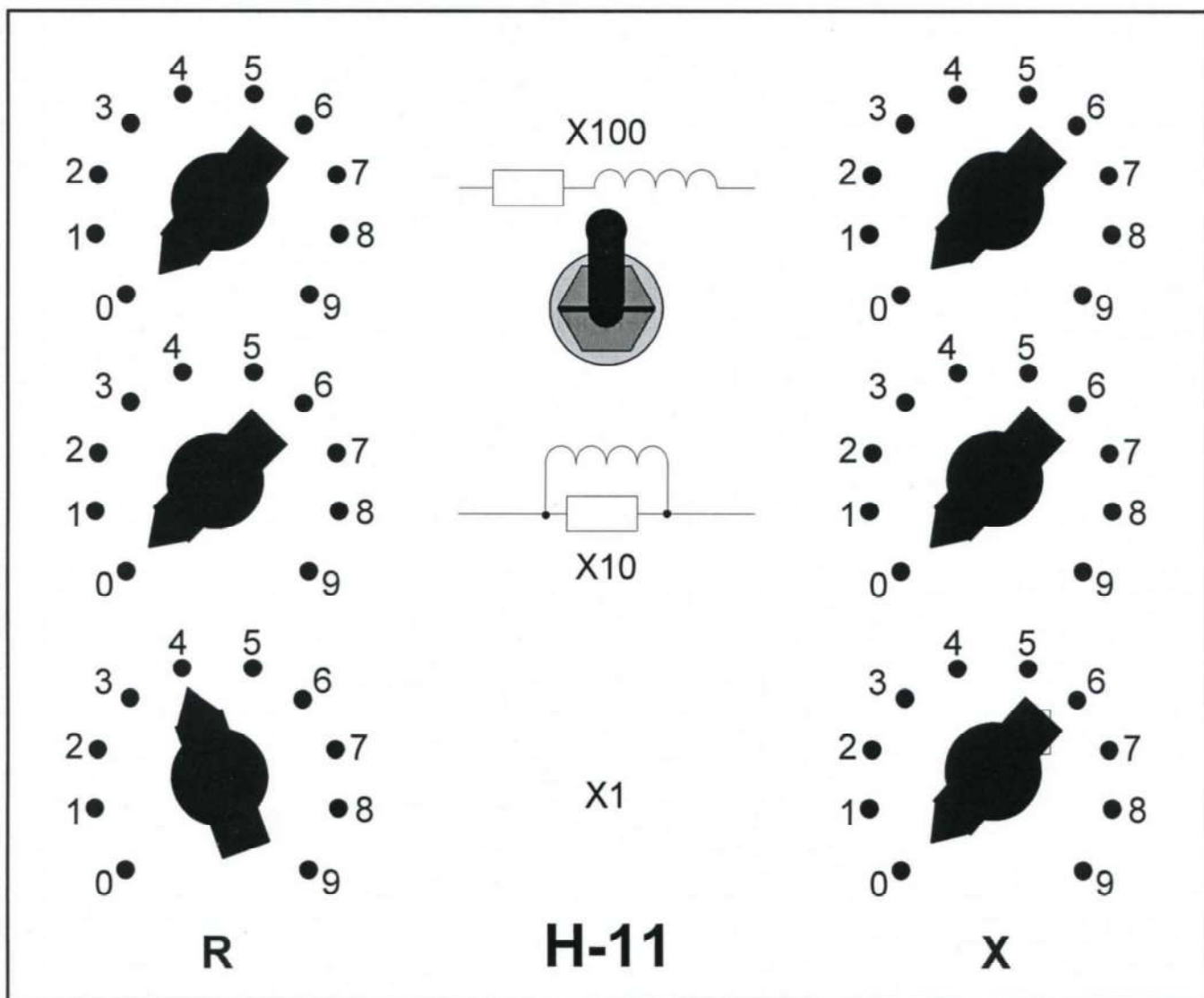


Рисунок 3.5 – Схема набору навантаження Н-11

Вмикаємо модель та прогріваємо її протягом двох хвилин. На основній комутаційній панелі вмикаємо тумблери "Г-1" та "ПРИБОРЫ", а також, виставляємо внутрішній опір генератора №1 10 Ом та вмикаємо його.

Лицева панель з набраним внутрішнім опором генератора №1 показана на рис. 3.6.

Вставляємо вимірювальний щуп в гніздо заміру параметрів генератора N 1 та за допомогою рукоятки регулювання  $E'_q$  виставляємо рівень напруги в 110 кВ (для моделі відповідно до масштабних коефіцієнтів 50В).

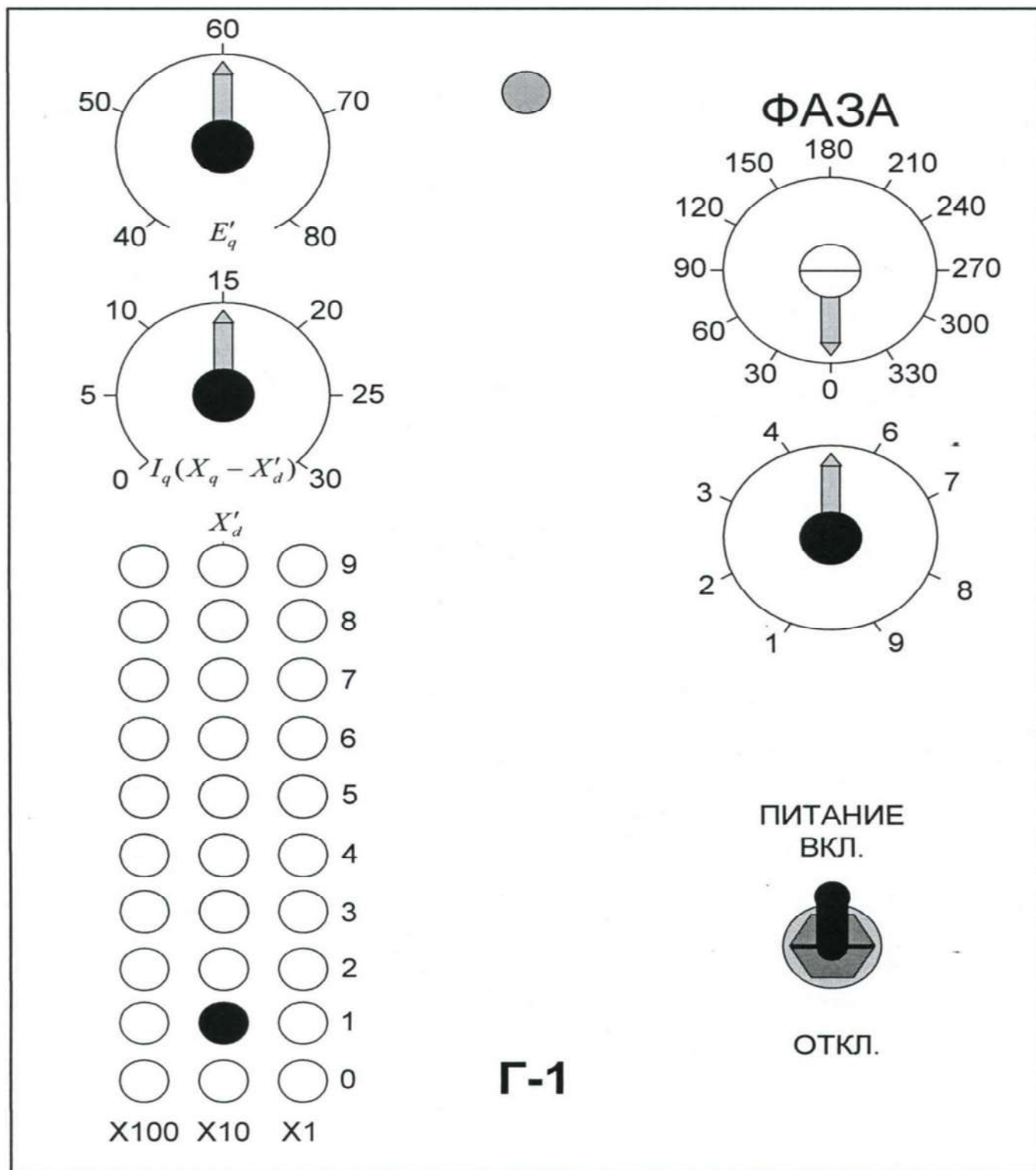


Рисунок 3.6 – Схема набору генератора Г-1

За допомогою вимірального щупу по показам приладів замірюємо рівні напруг, струмів, потужностей в началі та вкінці лінії та заносимо значення до таблиці. Також виконати необхідні заміри для режиму активно- індуктивного навантаження, режиму індуктивного навантаження, та холостого ходу змінюючи відповідно параметри навантаження Н-11.

Виконавши заміри для необхідних режимів роботи лінії отримуємо наступні значення параметрів (табл. 3.1):

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання

	$I_1$	$P_1$	$U_1$	$Q_1$	$I_2$	$P_2$	$U_2$	$Q_2$
	под.	под.	под.	под.	под.	под.	под.	под.
	А	Вт	В	Вар	А	Вт	В	Вар
Режим активного навантаження	50	39	100	0,5	50	38,5	99,5	0
Режим активно- індуктивного навантаження	50	40,5	100	31	50	40	99	30
Режим індуктивного навантаження	50	0,5	100	30,5	50	0	99,5	30
Режим холостого ходу	3	0	100	0	0	0	100,5	0

Під час виконання лабораторної роботи на вимірювальних приладах були встановлені наступні значення меж вимірювання:

а) вольтметр - 75В (на шкалі приладу 150 поділок)

б) амперметр - 0,2А (на шкалі приладу 100 поділок)

Таким чином, знайдемо ціну поділок приладів:

$$ЦП_U = \frac{75}{150} = 0,5 \frac{В}{под.},$$

$$ЦП_I = \frac{0,2}{100} = 0,002 \frac{А}{под.}.$$

Оскільки, ватметр і ватметр мають на своїх шкалах по 150 поділок, а ціни поділок для них залежать від встановлених значень меж вимірювання вольтметра та амперметра, то, використовуючи метрологічну формулу отримуємо:

$$ЦП_P = ЦП_Q = \frac{0,2 \cdot 75}{150} = 0,1 \frac{Вт}{под.}, \frac{Вар}{под.}.$$

Використовуючи ціни поділок та масштабні коефіцієнти моделі знайдемо дійсні параметри лінії при різних режимах її роботи:

Режим активного навантаження:

$$I_1 = 50 \cdot ЦП_I \cdot m_I = 50 \cdot 0,002 \cdot 2,62 \cdot 10^3 = 262 \text{ А};$$

$$P_1 = 39 \cdot ЦП_P \cdot m_S = 39 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 39 \text{ МВт};$$

$$U_1 = 100 \cdot ЦП_U \cdot m_U = 100 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 110 \text{ кВ};$$

$$Q_1 = 0,5 \cdot ЦП_Q \cdot m_S = 0,5 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 0,5 \text{ МВар};$$

$$I_2 = 50 \cdot ЦП_I \cdot m_I = 50 \cdot 0,002 \cdot 2,62 \cdot 10^3 = 262 \text{ А};$$

$$P_2 = 38,5 \cdot ЦП_P \cdot m_S = 38,5 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 38,5 \text{ МВт};$$

$$U_2 = 99,5 \cdot ЦП_U \cdot m_U = 99,5 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 109,45 \text{ кВ};$$

$$Q_2 = 0 \cdot ЦП_Q \cdot m_S = 0 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 0 \text{ МВар}.$$

Режим активно-індуктивного навантаження:

$$I_1 = 50 \cdot ЦП_I \cdot m_I = 50 \cdot 0,002 \cdot 2,62 \cdot 10^3 = 262 \text{ А};$$

$$P_1 = 40,5 \cdot ЦП_P \cdot m_S = 40,5 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 40,5 \text{ МВт};$$

$$U_1 = 100 \cdot ЦП_U \cdot m_U = 100 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 110 \text{ кВ};$$

$$Q_I = 0,31 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 31 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 31 \text{ МВар};$$

$$I_2 = 50 \cdot \text{ЦП}_I \cdot m_I = 50 \cdot 0,002 \cdot 2,62 \cdot 10^3 = 262 \text{ А};$$

$$P_2 = 40 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 40 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 40 \text{ МВт};$$

$$U_2 = 99 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 99 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 108,9 \text{ кВ};$$

$$Q_2 = 0,3 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 30 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 30 \text{ МВар}$$

Режим індуктивного навантаження:

$$I_1 = 50 \cdot \text{ЦП}_I \cdot m_I = 50 \cdot 0,002 \cdot 2,62 \cdot 10^3 = 262 \text{ А};$$

$$P_1 = 0,5 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 0,5 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 39 \text{ МВт};$$

$$U_1 = 100 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 100 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 110 \text{ кВ};$$

$$Q_I = 30,5 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 30,5 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 0,5 \text{ МВар};$$

$$I_2 = 50 \cdot \text{ЦП}_I \cdot m_I = 50 \cdot 0,002 \cdot 2,62 \cdot 10^3 = 262 \text{ А};$$

$$P_2 = 0 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 0 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 0 \text{ МВт};$$

$$U_2 = 99,5 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 99,5 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 109,45 \text{ кВ};$$

$$Q_2 = 30 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 30 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 10^6 = 30 \text{ МВар}.$$

Режим холостого ходу:

$$I_1 = 50 \cdot \text{ЦП}_I \cdot m_I = 50 \cdot 0,002 \cdot 2,62 \cdot 10^3 = 262 \text{ А};$$

$$U_1 = 100 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 100 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 110 \text{ кВ};$$

$$U_2 = 100,5 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 100,5 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 110,55 \text{ кВ}.$$

Перевіримо правильність отриманих результатів теоретичними розрахунками:

Режим активного навантаження:

Напруга в кінці лінії:

$$U_2 = \sqrt{U_1^2 - 2P_2 r_0} = \sqrt{110^2 - 2 \cdot 40 \cdot 0,27} = 109,9 \text{ кВ}.$$

Напруга середини лінії:

$$U_C = \sqrt{U_1^2 - P_2 r_0} = \sqrt{110^2 - 40 \cdot 0,27} = 109,95 \text{ кВ}.$$

Втрати потужності :

$$\Delta P = \frac{P_2^2 \cdot r_0}{U_C^2} = \frac{40^2 \cdot 0,27}{109,95^2} = 0,04 \text{ МВт}.$$

Таким чином, потужність, що протікає на початку лінії:

$$P_1 = P_2 + \Delta P = 40 + 0,04 = 40,04 \text{ МВт.}$$

Отже:

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi} = \frac{40,04}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0,8} = 0,263 \text{ кА.}$$

Режим активно-індуктивного навантаження:

Розрахуємо реактивну потужність:

$$Q_2 = P_2 \operatorname{tg} \varphi = 40 \cdot \operatorname{tg}(36,87) = 30 \text{ МВАр.}$$

Напруга в кінці лінії:

$$U_2 = \sqrt{U_1^2 - 2 \cdot (P_2 r_0 - Q_2 x_0)} = \sqrt{110^2 - 2 \cdot (40 \cdot 0,27 - 30 \cdot 0,428)} = 109,785 \text{ кВ}$$

Напруга середини лінії:

$$U_C = \sqrt{U_1^2 - (P_2 r_0 - Q_2 x_0)} = \sqrt{110^2 - (40 \cdot 0,27 - 30 \cdot 0,428)} = 109,892 \text{ кВ}$$

Втрати потужності:

$$\Delta S = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_C^2} (r_0 - jx_0) = \frac{40^2 + 30^2}{109,892^2} \cdot (0,27 - j0,428) = 0,056 - j0,089 \text{ МВА.}$$

Таким чином, потужність, що протікає на початку лінії:

$$S_1 = S_2 + \Delta S = 40 - j30 + 0,056 - j0,089 = 40,056 - j30,089 \text{ МВА.}$$

Отже:

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{40,056 - j30,089}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,21 - j0,158 \text{ кА.}$$

ж. Режим індуктивного навантаження:

Напруга в кінці лінії:

$$U_2 = \sqrt{U_1^2 - 2Q_2 x_0} = \sqrt{110^2 - 2 \cdot 30 \cdot 0,428} = 109,883 \text{ кВ}$$

Напруга середини лінії:

$$U_C = \sqrt{U_1^2 - Q_2 x_0} = \sqrt{110^2 - 30 \cdot 0,428} = 109,942 \text{ кВ}$$

Втрати потужності:

$$\Delta Q = \frac{Q_2^2 \cdot x_0}{U_C^2} = \frac{30^2 \cdot 0,428}{109,942^2} = 0,032 \text{ МВт.}$$

Таким чином, потужність, що протікає на початку лінії:

$$Q_1 = Q_2 + \Delta Q = 30 + 0,032 = 30,032 \text{ МВАр.}$$

Отже:

$$I = \frac{Q_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \sin \varphi} = \frac{30,032}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot \sin(36,87)} = 0,263 \text{ кА.}$$

### 3.2 Приклад виконання лабораторної роботи та перевірка результатів в дослідження усталених режимів замкнутої електричної мережі на УРМЕС-2

Необхідно дослідити режим роботи замкнутої електричної мережі відповідно до варіанту №1 завдання. Активну потужність власних потреб станції приймаємо рівною  $S_{Г3}^* = 16 - j15$ , напругу опорного вузла  $U_0 = 115$  кВ.

Розраховуємо параметри схеми заміщення ліній.

В даному варіанті схеми використовуються 3 марки проводів: АС-95, АС-120, АС-185 для ліній 110 кВ та АС-95 для лінії 35 кВ. Для визначення їх параметрів необхідно обчислити середньгеометричну відстань між провідниками. Для ЛЕП 110 кВ обираємо опори марки ПС 11 ОП-1 М, відстані між фазними провідниками яких зображені на рис.3.7.

$$D_{12} = \sqrt{(3,5 + 3,5)^2 + 4^2} = 8,062 \text{ м,}$$

$$D_{13} = \sqrt{(5 - 3,5)^2 + 4^2} = 4,272 \text{ м,}$$

$$D_{23} = 3,5 + 5 = 8,5 \text{ м.}$$

Таким чином, середньгеометрична відстань між провідниками ЛЕП 110 кВ:

$$D_{12} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} = 6,64 \text{ м.}$$

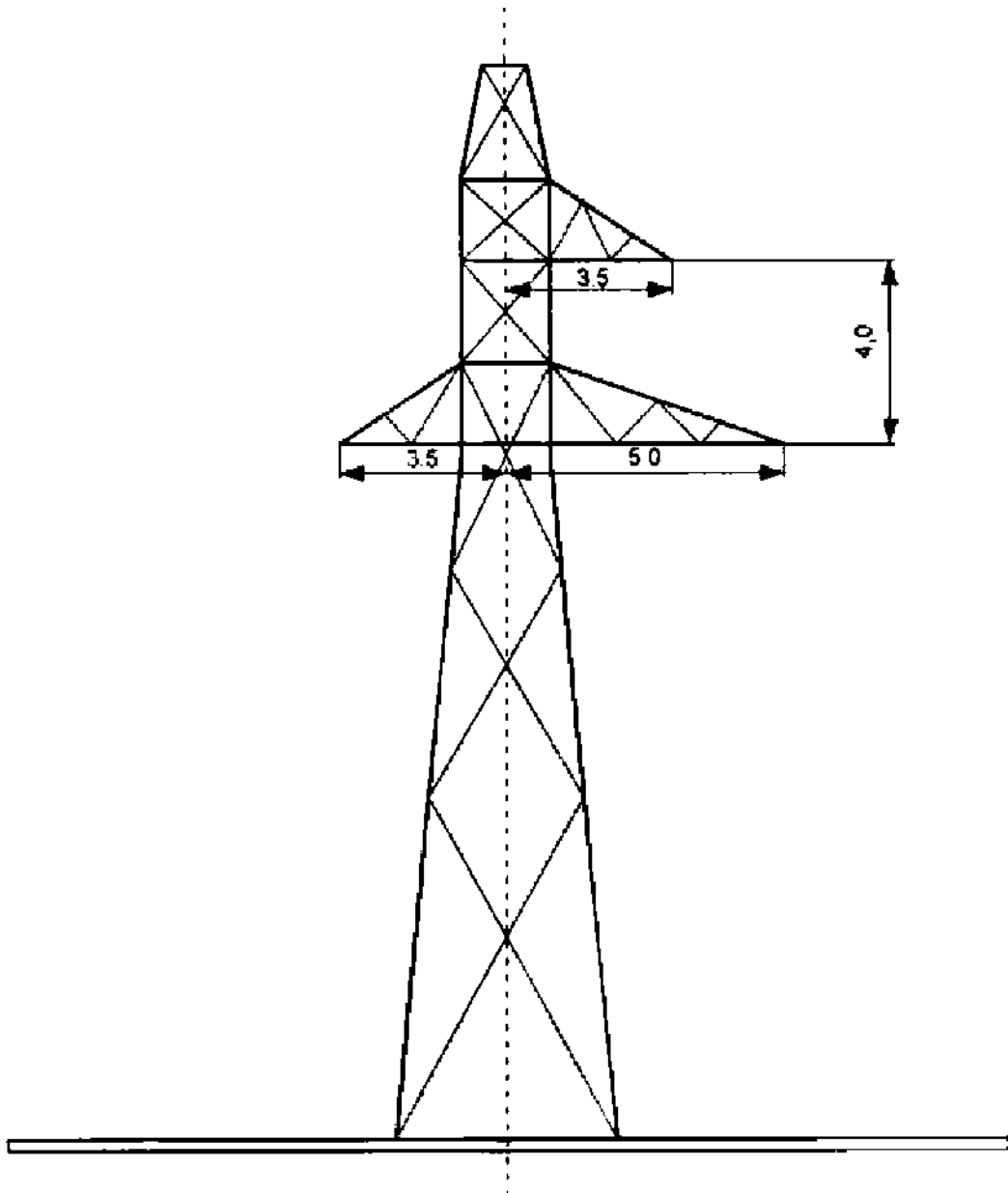


Рисунок 3.7 – Відстань між фазними провідниками опори ПС 11-П-1М

Погонні опори для проводу АС-95 для ЛЕП 110 кВ:

$$d_{AC-95} = 13,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad r_{0,AC-95} = 0,306 \text{ Ом / км},$$

$$x_{0,AC-95} = 0,144 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot D_{CP}}{d_{AC-95}}\right) + 0,016 = 0,144 \log\left(\frac{2 \cdot 6,64}{13,5 \cdot 10^{-3}}\right) + 0,016 = 0,447 \text{ Ом / км},$$

$$b_{0,AC-95} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{2 \cdot D_{CP}}{d_{AC-95}}\right)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{2 \cdot 6,64}{13,5 \cdot 10^{-3}}\right)} = 2,533 \cdot 10^{-6} \text{ См / км}.$$

Розрахуємо погонні параметри для лінії 0-2:  $l_{12} = 22 \text{ км}$

$$R_{02} = l_{02} \cdot r_{0,AC-95} = 22 \cdot 0,306 = 6,732 \text{ Ом},$$

$$X_{02} = l_{02} \cdot x_{0,AC-95} = 22 \cdot 0,447 = 9,833 \text{ Ом},$$

$$B_{02} = l_{02} \cdot b_{0,AC-95} = 22 \cdot 2,533 \cdot 10^{-6} = 5,572 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Погонні опори для проводу АС-120 для ЛП 110 кВ:

$$d_{AC-120} = 15,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad r_{0,AC-120} = 0,249 \text{ Ом / км},$$

$$x_{0,AC-120} = 0,144 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot D_{CP}}{d_{AC-120}}\right) + 0,016 = 0,144 \log\left(\frac{2 \cdot 6,64}{15,2 \cdot 10^{-3}}\right) + 0,016 = 0,44 \text{ Ом / км},$$

$$b_{0,AC-120} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{2 \cdot D_{CP}}{d_{AC-120}}\right)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{2 \cdot 6,64}{15,2 \cdot 10^{-3}}\right)} = 2,577 \cdot 10^{-6} \text{ См / км}.$$

Розрахуємо погонні параметри для лінії 1-2:  $l_{12} = 22 \text{ км}$

$$R_{12} = l_{12} \cdot r_{0,AC-120} = 33 \cdot 0,249 = 8,217 \text{ Ом},$$

$$X_{12} = l_{12} \cdot x_{0,AC-120} = 33 \cdot 0,44 = 14,505 \text{ Ом},$$

$$B_{12} = l_{12} \cdot b_{0,AC-120} = 33 \cdot 2,577 \cdot 10^{-6} = 8,504 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Погонні опори для проводу АС-185 для ЛЕП 110

$$d_{AC-185} = 18,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad r_{0,AC-95} = 0,162 \text{ Ом / км},$$

$$x_{0,AC-185} = 0,144 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot D_{CP}}{d_{AC-185}}\right) + 0,016 = 0,144 \log\left(\frac{2 \cdot 6,64}{18,8 \cdot 10^{-3}}\right) + 0,016 = 0,426 \text{ Ом / км},$$

$$b_{0,AC-185} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{2 \cdot D_{CP}}{d_{AC-185}}\right)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{2 \cdot 6,64}{18,8 \cdot 10^{-3}}\right)} = 2,661 \cdot 10^{-6} \text{ См / км}.$$

Розрахуємо погонні параметри для лінії 0-1:  $l_{01} = 27 \text{ км}$

$$R_{01} = l_{01} \cdot r_{0,AC-185} = 27 \cdot 0,162 = 4,374 \text{ Ом},$$

$$X_{01} = l_{01} \cdot x_{0,AC-185} = 27 \cdot 0,426 = 11,509 \text{ Ом},$$

$$B_{01} = l_{01} \cdot b_{0,AC-185} = 27 \cdot 2,661 \cdot 10^{-6} = 7,183 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Оскільки лінія 0-1 виконана двома гілками проводами АС-185, то результуючі погонні параметри:

$$R_{01PE3} = \frac{R_{01}}{2} = \frac{4,374}{2} = 2,187 \text{ Ом},$$

$$X_{01PE3} = \frac{X_{01}}{2} = \frac{11,509}{2} = 5,755 \text{ Ом},$$

$$B_{01PE3} = 2 \cdot 7,183 \cdot 10^{-6} = 14,366 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Для ЛЕП 35 кВ обираємо опори марки ПС35П-4ТМ, відстані між фазними провідниками яких зображені на рис.3.8.

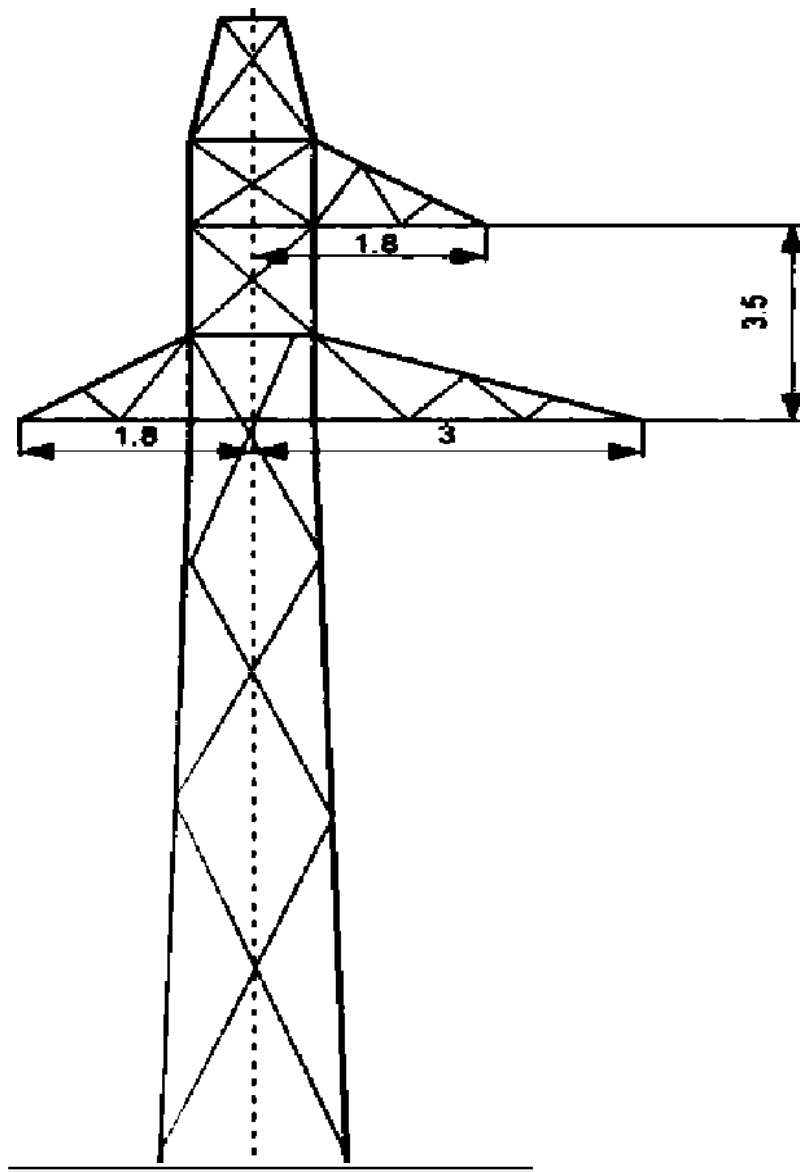


Рисунок 3.8 – Відстань між фазними провідниками опори ПС35П-4ТМ

$$D_{12} = \sqrt{(1,8 + 1,8)^2 + 3,5^2} = 5,02 \text{ м},$$

$$D_{13} = \sqrt{(3 - 1,8)^2 + 3,5^2} = 3,7 \text{ м},$$

$$D_{23} = 1,8 + 3 = 4,8 \text{ м}.$$

Таким чином, середньгеометрична відстань між провідниками ЛЕП 35 кВ :

$$D_{12} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} = 4,467 \text{ м}.$$

Погонні опори для проводу АС-95 для ЛП 35 кВ:

$$d_{AC-95} = 13,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad r_{0AC-95} = 0,306 \text{ Ом / км},$$

$$x_{0AC-95} = 0,144 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot D_{CP}}{d_{AC-95}}\right) + 0,016 = 0,144 \log\left(\frac{2 \cdot 4,467}{13,5 \cdot 10^{-3}}\right) + 0,016 = 0,422 \text{ Ом / км},$$

$$b_{0AC-95} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{2 \cdot D_{CP}}{d_{AC-95}}\right)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log\left(\frac{2 \cdot 4,467}{13,5 \cdot 10^{-3}}\right)} = 2,678 \cdot 10^{-6} \text{ См / км}.$$

Розрахуємо погонні параметри для лінії 4-5:  $l_{45} = 10 \text{ км}$

$$R_{45} = l_{45} \cdot r_{0AC-95} = 10 \cdot 0,306 = 3,06 \text{ Ом},$$

$$X_{45} = l_{45} \cdot x_{0AC-95} = 10 \cdot 0,422 = 4,22 \text{ Ом},$$

$$B_{45} = l_{45} \cdot b_{0AC-95} = 10 \cdot 2,678 \cdot 10^{-6} = 2,678 \cdot 10^{-5} \text{ См}.$$

Приведемо параметри лінії 35 кВ до 110 кВ :

$$R'_{45} = R_{45} \cdot \frac{110^2}{35^2} = 3,06 \cdot \frac{110^2}{35^2} = 30,23 \text{ Ом},$$

$$X'_{45} = X_{45} \cdot \frac{110^2}{35^2} = 4,22 \cdot \frac{110^2}{35^2} = 41,683 \text{ Ом},$$

$$B'_{45} = B_{45} \cdot \frac{110^2}{35^2} = 2,678 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{110^2}{35^2} = 25,02 \cdot 10^{-5} \text{ См}.$$

Розраховуємо параметри схеми заміщення трансформаторів.

В даному варіанті схеми використовуються 2 блоки по два паралельно працюючих трансформаторів 2хТДТ80000 та 2хТД40000.

Визначимо параметри схеми заміщення блоку із двох паралельно працюючих двообмоткових силових трансформаторів типу ТД40000. Паспортні дані одного трансформатора:

$$U_{0B} = 115 \text{ кВ}; U_{\kappa(b-c)} = 10.5 \%;$$

$$U_{\kappa3} = 10.5 \%; \quad \Delta P_{\kappa3} = 160 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{нх}} = 50 \text{ кВт}; \quad I_{\text{нх}} = 0.65 \%.$$

Визначимо параметри одного двообмоткового трансформатора.

Активний опір обмоток:

$$r_T = \frac{\Delta P_{\kappa3} \cdot U_{0B}^2}{S_T^2 \cdot 10^{-3}} = \frac{160 \cdot 115^2 \cdot 10^3}{40000^2} = 1,32 \text{ Ом}.$$

Реактивний індуктивний опір обмоток трансформатора:

$$x_T = \frac{U_{\kappa3} \cdot U_{0B}^2 \cdot 10}{S_T} = \frac{10,5 \cdot 115^2 \cdot 10}{40000} = 34,71 \text{ Ом}.$$

Поперечна активна провідність трансформатора:

$$g_T = \frac{\Delta P_{\text{нх}} \cdot 10^{-3}}{U_{0B}^2} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{115^2} = 3,78 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Поперечна індуктивна провідність трансформатора:

$$b_T = -\frac{I_{\text{нх}} \% \cdot S_T \cdot 10^{-5}}{U_{0B}^2} = -\frac{0,65 \cdot 40000 \cdot 10^{-5}}{115^2} = -19,66 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Визначимо еквівалентні параметри схеми заміщення блоку, що складається з двох паралельно працюючих двообмоткових трансформаторів.

Еквівалентний активний опір блоку:

$$r_{TE} = \frac{r_T}{2} = \frac{1,35}{2} = 0,66 \text{ Ом}.$$

Еквівалентний реактивний індуктивний опір блоку:

$$x_{TE} = \frac{x_T}{2} = \frac{34,71}{2} = 17,36 \text{ Ом}.$$

Еквівалентна активна провідність блоку трансформаторів:

$$g_{TE} = 2g_T = 2 \cdot 3,78 \cdot 10^{-6} = 7,56 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Еквівалентна реактивна індуктивна провідність блоку трансформаторів:

$$b_{TE} = 2b_T = -2 \cdot 19,66 \cdot 10^{-6} = -39,66 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Визначимо параметри схеми заміщення блоку із двох паралельно працюючих три обмоткових силових трансформаторів типу ТДТН80000 з відношенням потужностей обмоток 1 00: 1 00: 1 00. Паспортні дані одного трансформатора:

$$U_{0B} = 115 \text{ кВ}; \quad U_{K(B-C)} = 10,5 \%;$$

$$U_{K(B-H)} = 18,5 \%; \quad U_{K(C-H)} = 7 \%;$$

$$\Delta P_{K3} = 390 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{HX} = 82 \text{ кВт};$$

$$I_{HX} = 0,6 \%.$$

Визначаємо параметри одного триобмоткового трансформатора:

Активний опір кожної з обмоток вищої, середньої і нижчої напруг триобмоткового трансформатора:

$$r_B = r_C = r_H = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_{0B}^2}{2S_T^2 \cdot 10^{-3}} = \frac{390 \cdot 115^2 \cdot 10^3}{2 \cdot 80000^2} = 0,402 \text{ Ом.}$$

Фіктивні напруги короткого замикання відповідних обмоток трансформатора:

$$U_{KB} \% = 0,5(U_{K(B-C)} \% + U_{K(B-H)} \% - U_{K(C-H)} \%) = 0,5(11 + 18,5 - 7) = 11,25\%,$$

$$U_{KC} \% = U_{K(B-C)} \% - U_{KB} \% = 11 - 11,25 = -0,25\%,$$

$$U_{KH} \% = U_{K(B-H)} \% - U_{KB} \% = 18,5 - 11,25 = 7,25\%.$$

Реактивні індуктивні опори кожної з обмоток вищої, середньої та нижчої напруг трансформатора:

$$x_{TB} = \frac{U_{KB} \cdot U_{0B}^2 \cdot 10}{S_T} = \frac{11,25 \cdot 115^2 \cdot 10}{80000} = 18,597 \text{ Ом.}$$

$$x_{TC} = 0 \text{ Ом.}$$

$$x_{TH} = \frac{U_{KH} \cdot U_{0B}^2 \cdot 10}{S_T} = \frac{7,25 \cdot 115^2 \cdot 10}{80000} = 11,985 \text{ Ом.}$$

Поперечна активна провідність триобмоткового трансформатора:

$$g_T = \frac{\Delta P_{HX} \cdot 10^{-3}}{U_{0B}^2} = \frac{82 \cdot 10^{-3}}{115^2} = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Поперечна індуктивна провідність триобмоткового трансформатора:

$$b_T = -\frac{I_{HX} \% \cdot S_T \cdot 10^{-5}}{U_{0B}^2} = -\frac{0,6 \cdot 80000 \cdot 10^{-5}}{115^2} = -36,2 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Визначимо еквівалентні параметри схеми заміщення блоку, що складається з двох паралельно працюючих три обмоткових трансформаторів.

Еквівалентний активний опір кожної з обмоток блоку:

$$r_{BE} = r_{CE} = r_{HE} = \frac{r_T}{2} = \frac{0,402}{2} = 0,201 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний реактивний індуктивний опір кожної з обмоток блоку:

$$x_{BE} = \frac{x_{TB}}{2} = \frac{18,597}{2} = 9,29 \text{ Ом.}$$

$$x_{HE} = \frac{x_{TH}}{2} = \frac{11,985}{2} = 5,99 \text{ Ом.}$$

Еквівалентна активна провідність блоку трансформаторів:

$$g_{TE} = 2g_T = 2 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} = 12,4 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Еквівалентна реактивна індуктивна провідність блоку трансформаторів:

$$b_{TE} = -2b_T = -2 \cdot 36,2 \cdot 10^{-6} = -72,4 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Таким чином схема заміщення мережі набуває вигляду (рис.3.9).

Для визначення параметрів моделі вибираємо масштабні коефіцієнти.

Масштаб по напрузі приймаємо рівним:

$$m_U = \frac{110 \text{ кВ}}{50 \text{ В}} = 2,2 \cdot 10^3 .$$

Вибираємо масштаб по потужності:

$$m_S = \frac{90 \text{ МВт}}{10 \text{ В}} = 9 \cdot 10^6 .$$

Тоді масштабні коефіцієнти визначаються так:

$$m_l = \frac{m_s}{\sqrt{3}m_U} = \frac{9 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 2,2 \cdot 10^3} = 2,362 \cdot 10^3;$$

$$m_z = \frac{m_U^2}{m_s} = \frac{(2,2 \cdot 10^3)^2}{9 \cdot 10^6} = 0,54;$$

Розрахуємо параметри схеми моделі. Реактивний опір обмоток середньої та нижчої напруг, активний опір, активну і реактивну провідність обмоток трансформаторів розраховувати не будемо, оскільки УРМСС-2М не адаптований на введення цих параметрів.

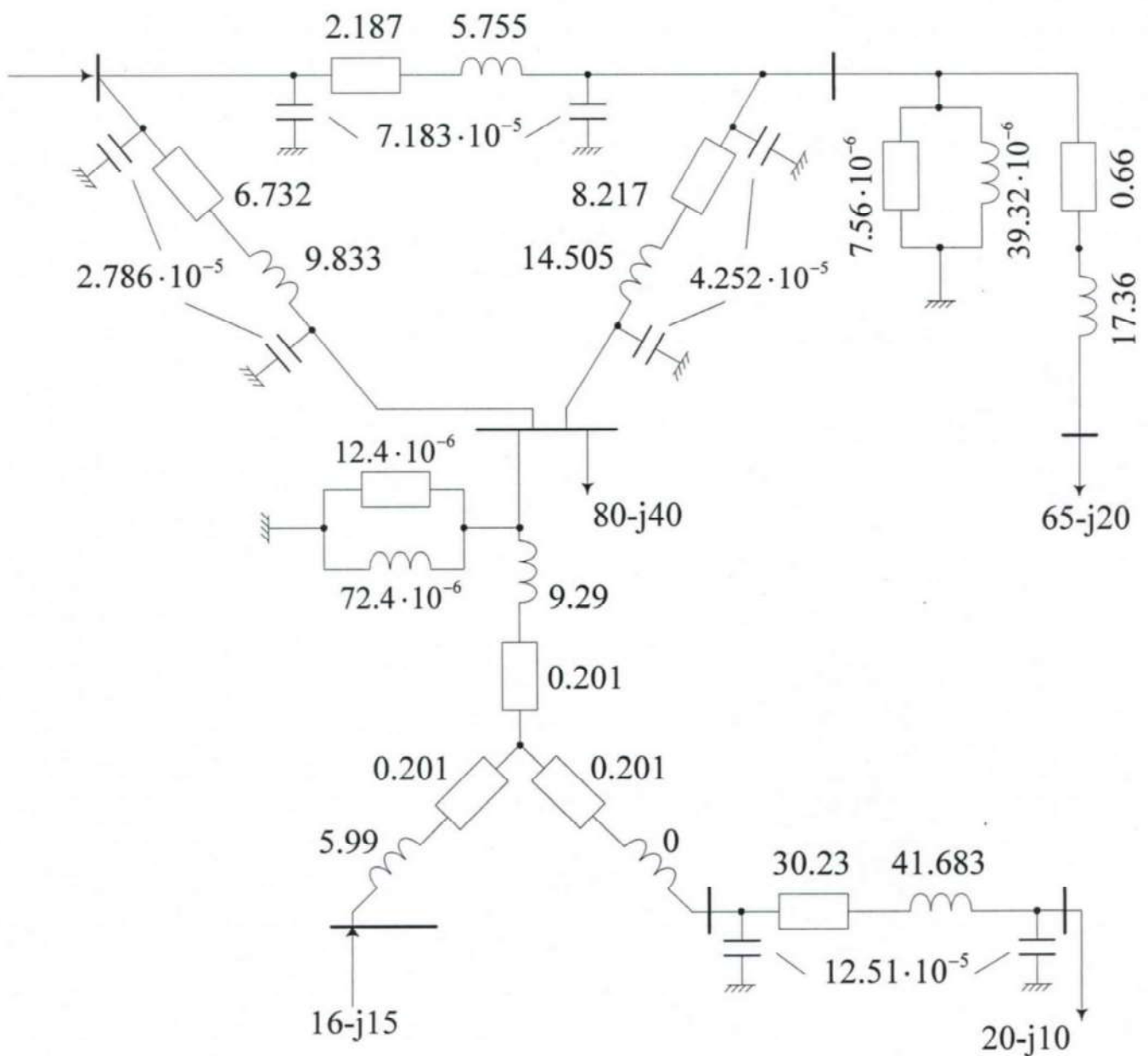


Рисунок 3.9 – Розрахункова схема мережі

$$R_{M01} = R_{01} / m_Z = 2,187 / 0,54 = 4,05 \text{ Ом};$$

$$X_{M01} = X_{01} / m_Z = 5,755 / 0,54 = 10,66 \text{ Ом};$$

$$C_{M01} = \frac{B_{01}}{4\pi f_M} : m_S = \frac{14,366 \cdot 10^{-5}}{4\pi \cdot 300} : 9 \cdot 10^6 = 0,0064 \text{ мкФ};$$

$$R_{M02} = R_{02} / m_Z = 6,732 / 0,54 = 12,46 \text{ Ом};$$

$$X_{M02} = X_{02} / m_Z = 9,833 / 0,54 = 18,21 \text{ Ом};$$

$$C_{M02} = \frac{B_{02}}{4\pi f_M} : m_S = \frac{5,572 \cdot 10^{-5}}{4\pi \cdot 300} : 9 \cdot 10^6 = 0,00246 \text{ мкФ};$$

$$R_{M12} = R_{12} / m_Z = 8,217 / 0,54 = 15,22 \text{ Ом};$$

$$X_{M12} = X_{12} / m_Z = 14,505 / 0,54 = 26,86 \text{ Ом};$$

$$C_{M12} = \frac{B_{12}}{4\pi f_M} : m_S = \frac{8,504 \cdot 10^{-5}}{4\pi \cdot 300} : 9 \cdot 10^6 = 0,00376 \text{ мкФ};$$

$$R_{M45} = R_{45} / m_Z = 30,23 / 0,54 = 55,98 \text{ Ом};$$

$$X_{M45} = X_{45} / m_Z = 41,683 / 0,54 = 77,19 \text{ Ом};$$

$$C_{M45} = \frac{B_{45}}{4\pi f_M} : m_S = \frac{25,02 \cdot 10^{-5}}{4\pi \cdot 300} : 9 \cdot 10^6 = 0,011 \text{ мкФ};$$

$$x_{MT} = x_T / m_Z = 17,36 / 0,54 = 32,15 \text{ Ом};$$

$$x_{MBE} = x_{BE} / m_Z = 17,8 / 0,54 = 32,96 \text{ Ом};$$

$$\dot{S}_{MH2} = \dot{S}_{H2} / m_S = (80 \cdot 10^6 - j40 \cdot 10^6) / 9 \cdot 10^6 = 8,88 - j4,44 \text{ ВА};$$

$$\dot{S}_{MH5} = \dot{S}_{H5} / m_S = (20 \cdot 10^6 - j10 \cdot 10^6) / 9 \cdot 10^6 = 2,22 - j1,11 \text{ ВА};$$

$$\dot{S}_{MH6} = \dot{S}_{H6} / m_S = (65 \cdot 10^6 - j20 \cdot 10^6) / 9 \cdot 10^6 = 7,22 - j2,22 \text{ ВА};$$

$$\dot{S}_{MH3} = \dot{S}_{I3} / m_S = (16 \cdot 10^6 - j15 \cdot 10^6) / 9 \cdot 10^6 = 1,77 - j1,66 \text{ ВА};$$

Таким чином схема набору набуває вигляду ( рис. 3.10).

Збираємо розрахункову схему та на панелях вибраних елементів встановлюємо їх параметри (рис. 3.11-3.16). При наборі опорів в елементах моделі в кожній з декад магазинів опорів повинен знаходитися один штекер, оскільки декади сполучені послідовно. Забороняється вставляти 2 штекери в одну декаду опорів, оскільки це приводить до виткового замикання в дроселі. У магазинах ємностей конденсатори включаються паралельно, тому необхідна величина ємності набирається як сума ємностей паралельно включених конденсаторів.

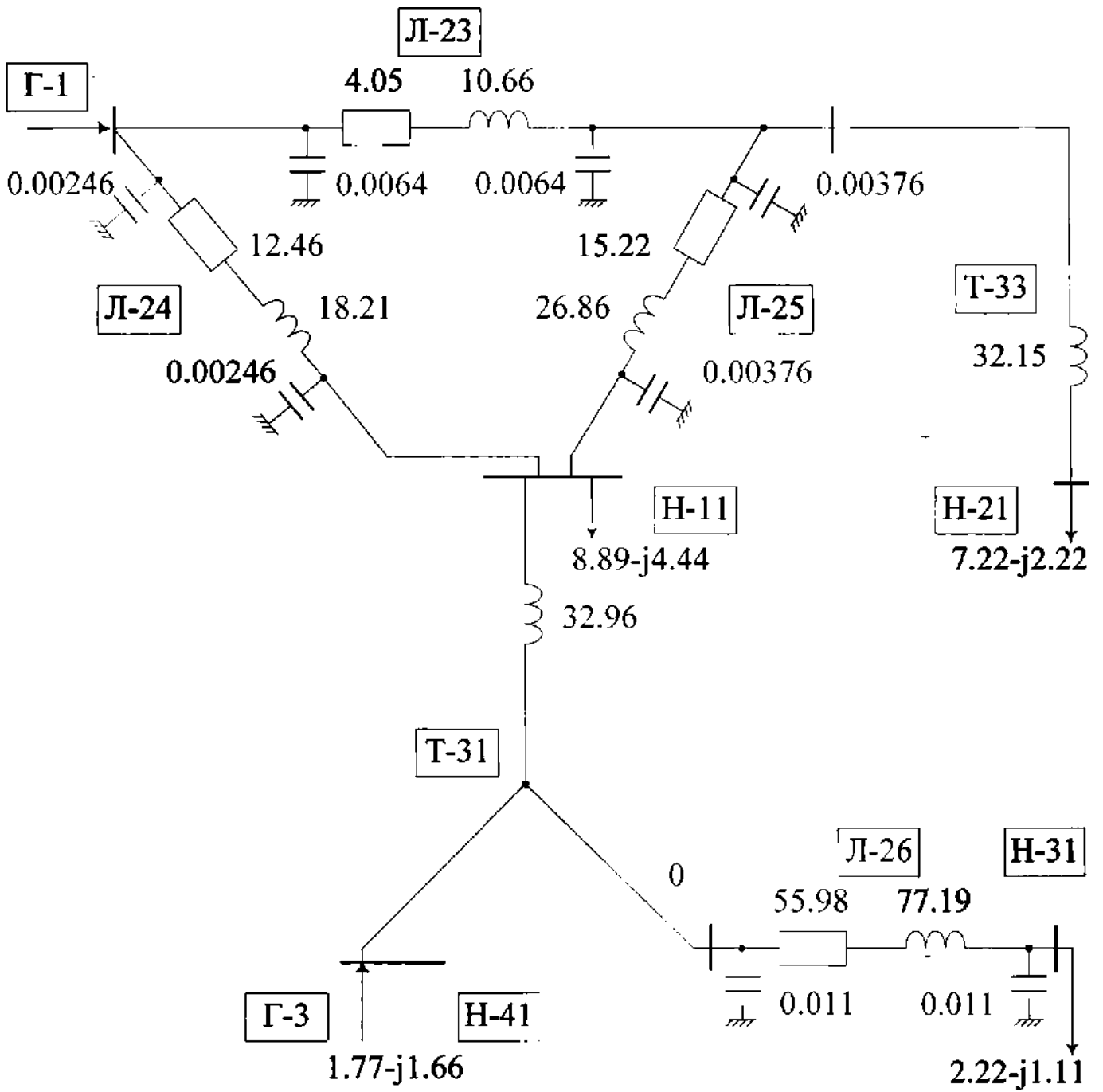


Рисунок 3.10 – Схема набора

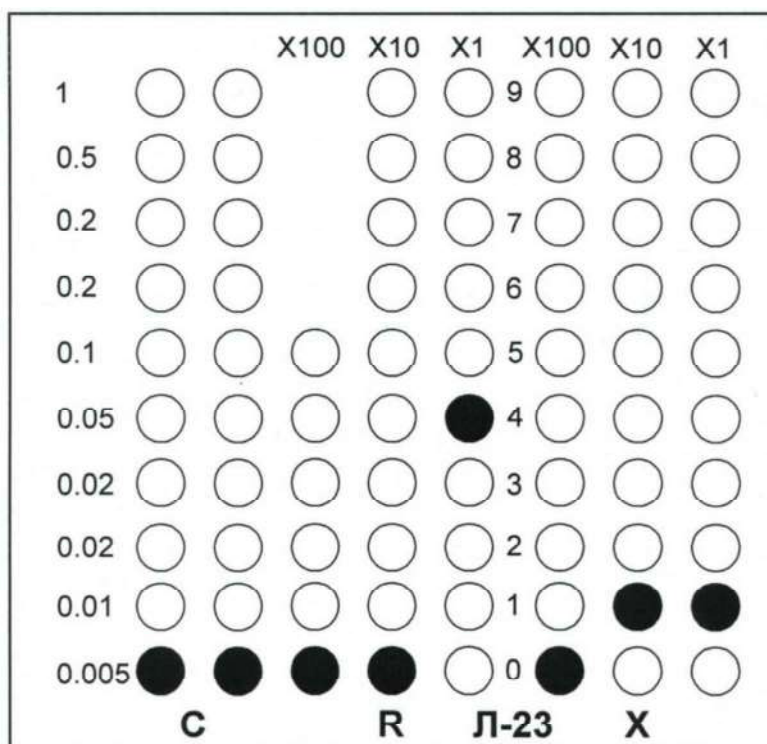


Рисунок 3.11 – Схема набору лінії Л-23

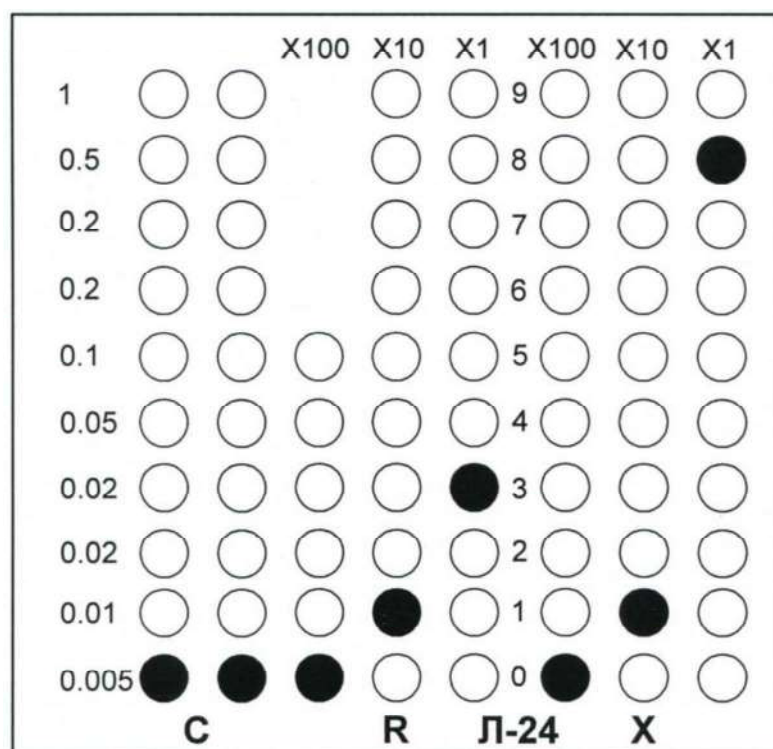


Рисунок 3.12 – Схема набору лінії Л-24

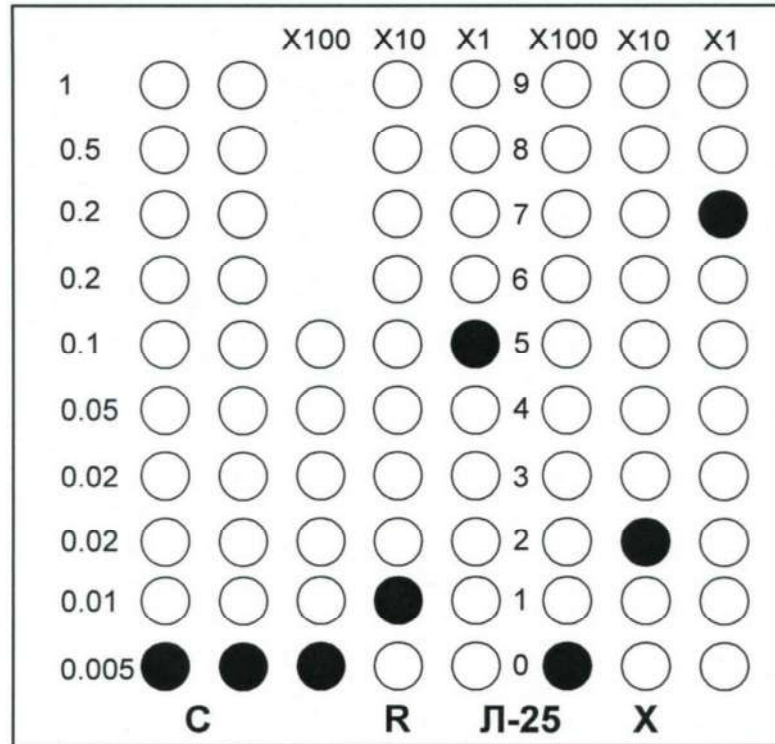


Рисунок 3.13 – Схема набору лінії Л-25

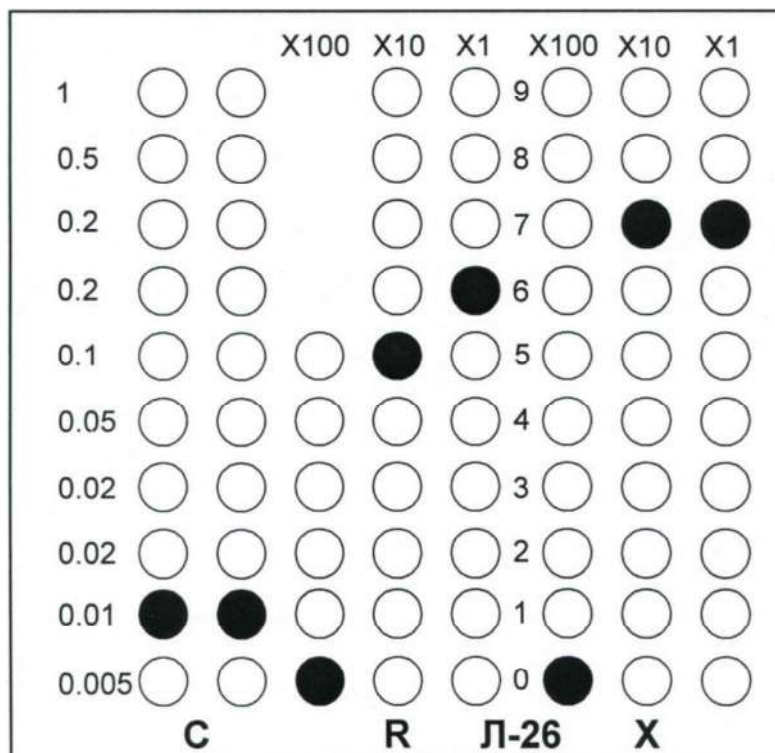


Рисунок 3.14 – Схема набору лінії Л-26

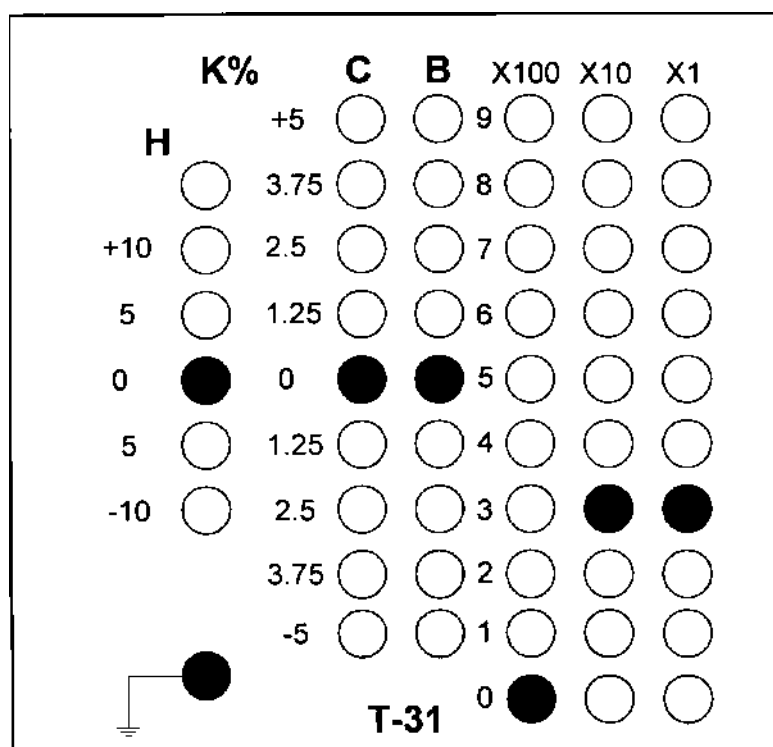


Рисунок 3.15 – Схема набора T-31

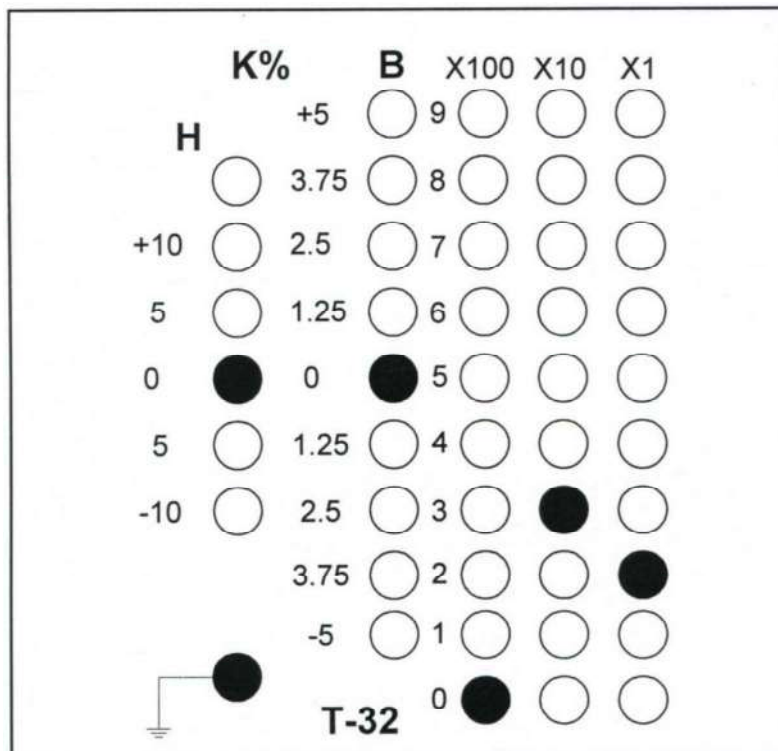


Рисунок 3.16 – Схема набора T-32

У трансформаторних елементах відгалуження трансформаторів встановлюються в нульові положення, що відповідає спочатку вибраному коефіцієнту трансформації, по якому опори схеми заміщення були приведені до одного ступеня напруги. Крім того, для підключення трансформаторного елемента до комутаційної панелі потрібно вставити штекер "земля" на цьому елементі.

Оскільки використовуються автоматичні елементи навантажень (Н-11, Н-21, Н-31), то потрібно враховувати паразитні активні втрати в котушках індуктивності і в обмотках трансформаторів. Величина паразитної потужності приймаємо рівною  $P = 0,2Q_{\text{встановл}}$ .

Задані потужності перевищують 1 Вт, отже доцільно користуватися масштабом  $m=1$ , який встановлюється відповідним тумблером на панелі АНПВ.

Перерахуємо потужності АНПВ із врахуванням паразитних активних втрат:

$$\dot{S}_{\text{МН}2\text{параз}} = (P_{\text{МН}2} - 0,2Q_{\text{МН}2}) - jQ_{\text{МН}2} = (8,89 - 0,2 \cdot 4,44) - j4,44 = 8 - j4,44 \text{ ВА};$$

$$\dot{S}_{\text{МН}5\text{параз}} = (P_{\text{МН}5} - 0,2Q_{\text{МН}5}) - jQ_{\text{МН}5} = (2,22 - 0,2 \cdot 1,11) - j1,11 = 1,998 - j1,11 \text{ ВА};$$

$$\dot{S}_{\text{МН}6\text{параз}} = (P_{\text{МН}6} - 0,2Q_{\text{МН}6}) - jQ_{\text{МН}6} = (7,22 - 0,2 \cdot 2,22) - j2,22 = 6,776 - j2,22 \text{ ВА};$$

На рис. 3.17 представлена схема набору АНПВ Н-11.

Збираємо схему (рис. 3.18). Після остаточної перевірки вмикаємо модель тумблером "живлення моделі". При цьому над тумблером спалахує зелена лампочка. Всі апарати АНПВ повинні знаходитися в режимі "руч". Тумблери генераторних станцій на панелі лінійних опорів, а також тумблери "живлення" генераторних станцій "живлення приладів" повинні знаходитися у відключеному положенні. Вимірювальні прилади повинні бути включені на найбільші межі вимірювань.

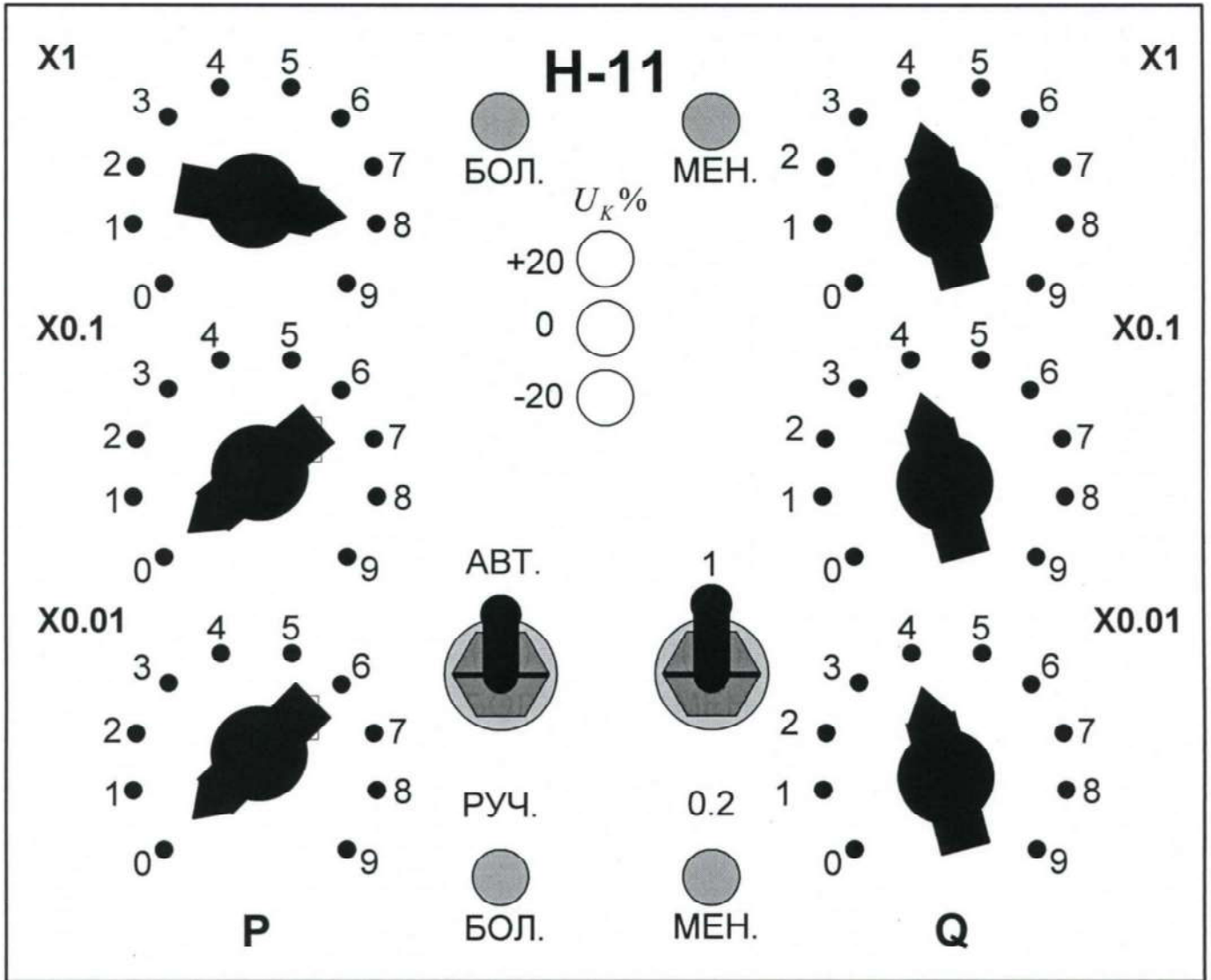


Рисунок 3.17 – Схема набору Н-11

Приблизно встановивши необхідний режим роботи Г 1 та ГЗ та виставивши навантаження Н-11, Н-21, Н-31 переводим АНПВ в режим "авт". Після припинення роботи реверсивних крокових шукачів АНПВ проводимо додаткове регулювання режиму генераторних станцій. Якщо відхилення напруги на вході АНПВ перевищує допустиму величину, при якій апарат ще забезпечує постійне навантаження загоряється лампочка "більше" чи "менше". В цьому випадку потрібно перевести АНПВ в режим "руч." і змінити межі грубого регулювання  $U \sim \%$ . Після цього апарат

переводиться в режим "авт". Лампочка гасне, якщо напруга на вході А1-ПВ відповідає знов вибраним межам регулювання.

Якщо після установки режиму виявиться, що напруга на навантаженнях не відповідає умовам зустрічного регулювання, необхідно переставити відгалуження на трансформаторних елементах Т-31, Т-33, добитися бажаних рівнів напруги на навантаженнях. Враховуючи, що зазвичай у трансформаторах РПН встановлюється на стороні СН, зміну відгалужень слід насамперед проводити по стороні СН трансформаторного елемента. Якщо меж регулювання виявиться недостатньо, потрібно змінити відгалуження на стороні НН трансформаторного елемента на ту ж величину, що й відгалуження ВН. При перемиканні відгалужень АНПВ переводиться в режим "руч". Після перестановки відгалужень в трансформаторних елементах необхідно провести коректування режиму генераторних станцій.

Після точного встановлення режиму АНПВ переводиться в режим "руч" і перевіряються величини потужностей навантажень. Якщо ці потужності дещо відрізняються від заданих, то за допомогою відповідних кнопок "більше" або "менше" добавляються відповідності цих потужностей.

Остаточо встановивши режим, приступають до вимірювань напруги і перетоків потужностей у елементах моделі. Підключення вимірювальних приладів здійснюється включенням вимірювального штекера "ВШ" в відповідне гніздо на комутаційній панелі.

Перемикач "вибір вимірюваної величини" на панелі лінійних опорів встановлюється в положення "I,U, P,Q".

Для забезпечення рівнів напруги в допустимих межах при встановленні режиму на ПВВ НН Т2 було виставлено відгалуження +5%, на РПН ВН Т3 -3,75%, на ПВВ СН - +5%, НН - -5%. На генераторі Г2 була встановлена напруга 10,5 кВ та для забезпечення відповідного рівня генерацій кут фази 80°.

В режимі мінімальних навантажень для забезпечення рівнів напруги в допустимих межах були змінені відгалуження ПВВ НН Т2 на +2,5% та ПВВ СН Т3 на +2,5%. Післяаварійний режим моделюємо шляхом відключення лінії 1-2. Відгалуження РПН і ПВВ залишаються без змін.

Виконавши заміри для необхідних режимів роботи лінії отримуємо наступні значення параметрів (табл. 3.2):

Таблиця 3.2 – Результати вимірювання режимних параметрів на УРМЕС-2М

Позначення	Одиниці виміру	Нормальний режим	Режим мінімальних навантажень	Післяаварійний режим
$U_{БП}$	под. / В	105	105	105
$P_{БП}$	под. / Вт	150	73	76
$Q_{БП}$	под. / Вар	109	59	59
$U_{S2}$	под. / В	97,5	101	100
$P_{S2}$	под. / Вт	84,5	45	44
$Q_{S2}$	под. / Вар	42	22,5	22
$U_{S5}$	под. / В	31	33	33
$P_{S5}$	под. / Вт	19	11	10,5
$Q_{S5}$	под. / Вар	9,5	5	5
$U_{S6}$	под. / В	9	9	9,5
$P_{S6}$	под. / Вт	75	38,5	39
$Q_{S6}$	под. / Вар	23	12	12
$U_{ГЗ}$	под. / В	9,5	9,5	9,5
$P_{ГЗ}$	под. / Вт	18	19	18,5
$Q_{ГЗ}$	под. / Вар	17	17	17

Під час виконання лабораторної роботи на вимірювальних приладах були встановлені наступні значення меж вимірювання:

а) вольтметр — 75В (на шкалі приладу 150 поділок);

б) амперметр - 0,2А (на шкалі приладу 100 поділок).

Таким чином, знайдемо ціну поділок приладів:

$$\text{ЦП}_U = \frac{75}{150} = 0,5 \frac{B}{\text{под.}};$$

$$\text{ЦП}_I = \frac{0,2}{150} = 0,002 \frac{A}{\text{под.}}.$$

Оскільки, ватметр і варметр мають на своїх шкалах по 150 поділок, а ціни поділок для них залежать від встановлених значень меж вимірювання вольтметра та амперметра, то, використовуючи метрологічну формулу отримуємо:

$$\text{ЦП}_P = \text{ЦП}_Q = \frac{0,2 \cdot 75}{150} = 0,1 \frac{Вт}{\text{под.}}, \frac{Вар}{\text{под.}}.$$

Використовуючи ціни поділок та масштабні коефіцієнти моделі знайдемо дійсні параметри схеми при різних режимах її роботи:

Нормальний режим:

$$U_{БП} = 105 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 105 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 115,5 \text{ кВ},$$

$$P_{БП} = 150 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 150 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 135 \text{ МВт},$$

$$Q_{БП} = 109 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 109 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 98,1 \text{ МВАр},$$

$$U_{S2} = 97,5 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 97,5 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 107,25 \text{ кВ},$$

$$P_{S2} = 84,5 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 84,5 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 76,05 \text{ МВт},$$

$$Q_{S2} = 42 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 42 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 37,8 \text{ МВАр},$$

$$U_{S5} = 31 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 31 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 34,1 \text{ кВ},$$

$$P_{S5} = 19 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 19 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 17,1 \text{ МВт},$$

$$Q_{S5} = 9,5 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 9,5 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 8,55 \text{ МВАр},$$

$$U_{S6} = 9 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 9 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 9,9 \text{ кВ},$$

$$P_{S6} = 75 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 75 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 67,5 \text{ МВт},$$

$$Q_{S6} = 23 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 23 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 20,7 \text{ МВАр},$$

$$U_{Г3} = 9,5 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 9,5 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 10,45 \text{ кВ},$$

$$P_{Г3} = 18 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 18 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 16,2 \text{ МВт},$$

$$Q_{Г3} = 17 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 17 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 15,3 \text{ МВАр},$$

б. Режим мінімальних навантажень:

$$U_{\text{БП}} = 105 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 105 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 115,5 \text{ кВ},$$

$$P_{\text{БП}} = 73 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 73 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 65,7 \text{ МВт},$$

$$Q_{\text{БП}} = 59 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 59 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 53,1 \text{ МВАр},$$

$$U_{S2} = 101 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 101 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 111,1 \text{ кВ},$$

$$P_{S2} = 45 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 45 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 40,5 \text{ МВт},$$

$$Q_{S2} = 22,5 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 22,5 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 20,25 \text{ МВАр},$$

$$U_{S5} = 33 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 33 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 36,3 \text{ кВ},$$

$$P_{S5} = 11 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 11 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 9,9 \text{ МВт},$$

$$Q_{S5} = 5 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 5 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 4,5 \text{ МВАр},$$

$$U_{S6} = 9 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 9 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 9,9 \text{ кВ},$$

$$P_{S6} = 38,5 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 38,5 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 34,65 \text{ МВт},$$

$$Q_{S6} = 12 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 12 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 10,8 \text{ МВАр},$$

$$U_{Г3} = 9,5 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 9,5 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 10,45 \text{ кВ},$$

$$P_{Г3} = 19 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 19 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 17,1 \text{ МВт},$$

$$Q_{Г3} = 17 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 17 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 15,3 \text{ МВАр},$$

Післяаварійний режим:

$$U_{\text{БП}} = 105 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 105 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 115,5 \text{ кВ},$$

$$P_{\text{БП}} = 76 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 76 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 68,4 \text{ МВт},$$

$$Q_{\text{БП}} = 59 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 59 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 53,1 \text{ МВАр},$$

$$U_{S2} = 100 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 100 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 110 \text{ кВ},$$

$$P_{S2} = 44 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 44 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 39,6 \text{ МВт},$$

$$Q_{S2} = 22 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 22 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 19,8 \text{ МВАр},$$

$$U_{S5} = 33 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 33 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 36,3 \text{ кВ},$$

$$P_{S5} = 10,5 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 10,5 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 9,45 \text{ МВт},$$

$$Q_{S5} = 5 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 5 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 4,5 \text{ МВАр},$$

$$U_{S6} = 9,5 \cdot \text{ЦП}_U \cdot m_U = 9,5 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 10,45 \text{ кВ},$$

$$P_{S6} = 39 \cdot \text{ЦП}_P \cdot m_S = 39 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 35,1 \text{ МВт},$$

$$Q_{S6} = 12 \cdot \text{ЦП}_Q \cdot m_S = 12 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 10,82 \text{ МВАр},$$

$$U_{Г3} = 9,5 \cdot ЦП_U \cdot m_U = 9,5 \cdot 0,5 \cdot 2,2 \cdot 10^3 = 10,45 \text{ кВ},$$

$$P_{Г3} = 18,5 \cdot ЦП_P \cdot m_S = 18,5 \cdot 0,1 \cdot 9 \cdot 10^6 = 16,65 \text{ МВт},$$

$$Q_{Г3} = 17 \cdot ЦП_Q \cdot m_S = 17 \cdot 0,1 \cdot 2,2 \cdot 10^6 = 15,3 \text{ МВАр},$$

Для пересвідчення вірності виконаних замірів і розрахунків за допомогою засобів розрахункової моделі УРМЕС-2М і для розширення знань в області комп'ютерного моделювання виконаємо розрахунок режиму роботи мережі в програмі MATLAB .

Оскільки в мережі присутні тільки симетричні навантаження і не мають місце неповно фазні режими приймається рішення виконати моделювання в однофазному виконанні.

Балансуючий вузол, тобто вузол безкінечної потужності з усталеним режимом напруги буде змодельований за допомогою джерела змінної напруги (AC Voltage Source)(рис. 3.19):



Рисунок 3.19 – Параметри генератора Г1

Оскільки для ЛВП ми використовуємо П-подібну схему заміщення, то електропередавання задаються двома елементами послідовними RL вітками (Series RLC Branch) та C вітками (Series RLC Load), де вказується повний активний опір в

омах і повна індуктивність лінії та ємнісне додаткове навантаження, що викликане зарядними потужностями відповідно (рис 3.20-3.24).

Визначимо додаткові навантаження від зарядних потужностей лінії електропередавання:

$$\dot{S}_{\text{ДОД}01} = j \frac{1}{2} B_{01} \cdot U_{\text{НОМ}01}^2 = j \frac{1}{2} 14,366 \cdot 10^{-5} \cdot 110^2 = 0,862488 \text{ МВАр},$$

$$\dot{S}_{\text{ДОД}02} = j \frac{1}{2} B_{02} \cdot U_{\text{НОМ}02}^2 = j \frac{1}{2} 5,572 \cdot 10^{-5} \cdot 110^2 = 0,337106 \text{ МВАр},$$

$$\dot{S}_{\text{ДОД}12} = j \frac{1}{2} B_{12} \cdot U_{\text{НОМ}12}^2 = j \frac{1}{2} 8,504 \cdot 10^{-5} \cdot 110^2 = 0,514492 \text{ МВАр},$$

$$\dot{S}_{\text{ДОД}45} = j \frac{1}{2} B_{45} \cdot U_{\text{НОМ}45}^2 = j \frac{1}{2} 2,533 \cdot 10^{-5} \cdot 35^2 = 0,015521 \text{ МВАр},$$

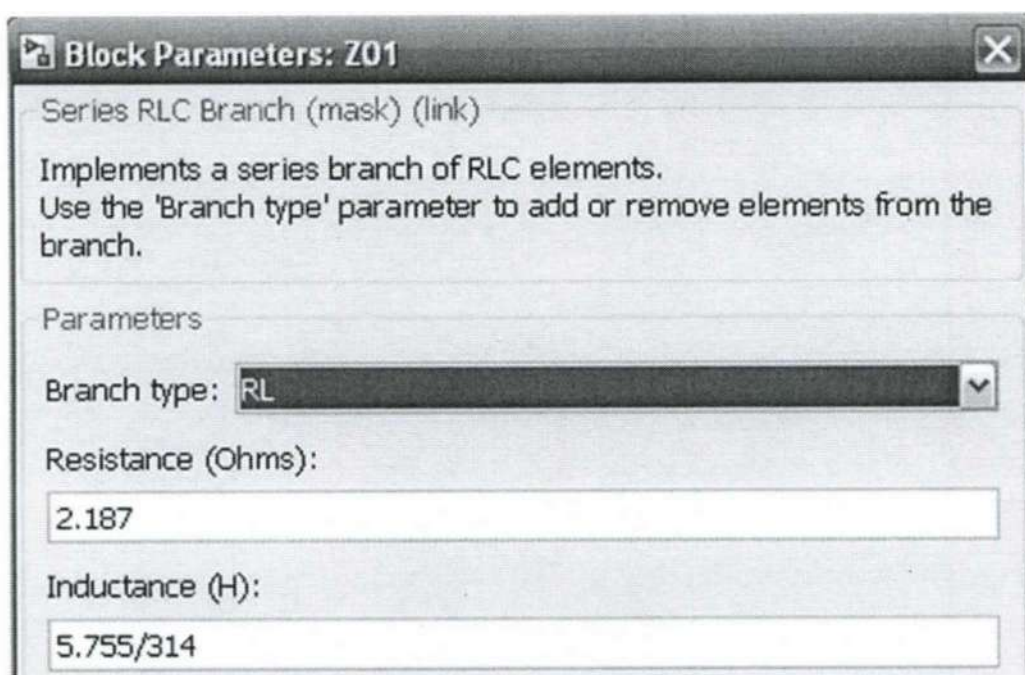


Рисунок 3.20 – Параметри активного та індуктивного опорів лінії 0-1

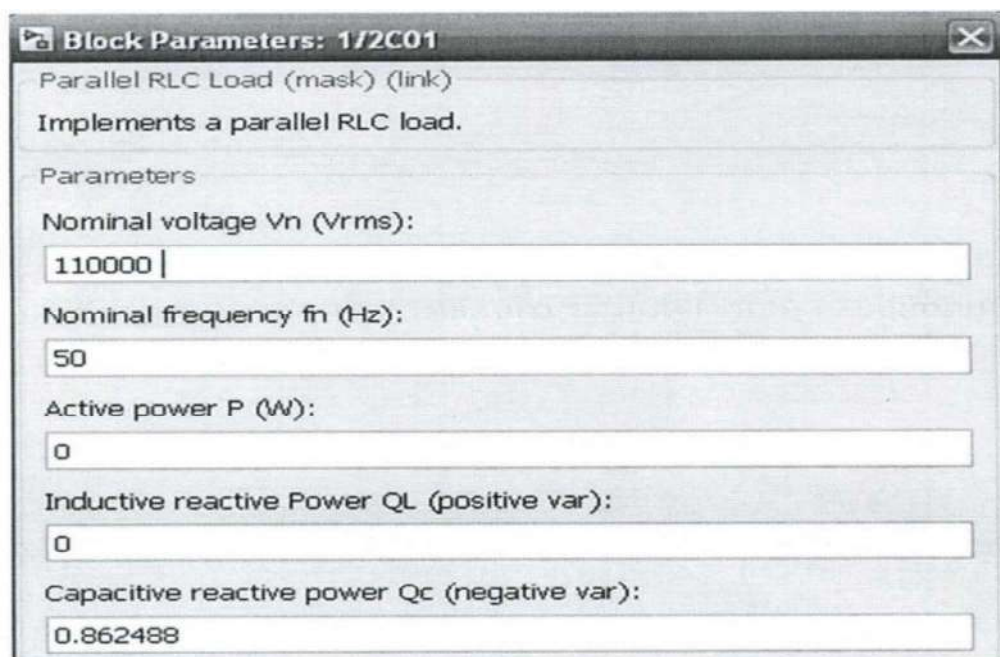


Рисунок 3.21 – Параметри половини ємнісного додаткового навантаження, що викликане зарядними потужностями лінії 0-1

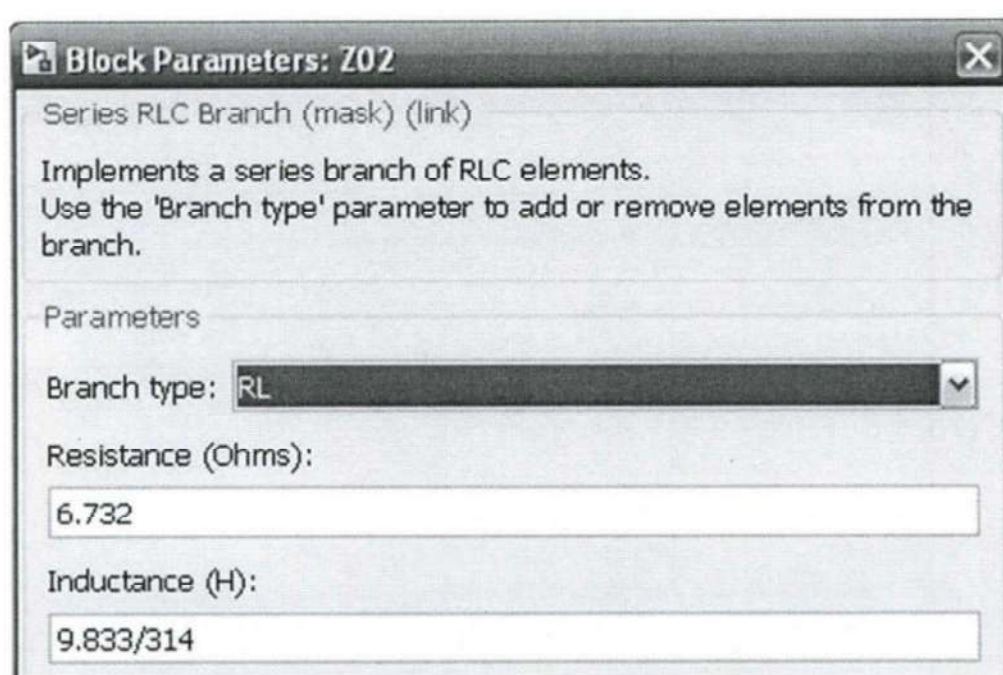


Рисунок 3.22 – Параметри активного та індуктивного опорів лінії 0-2

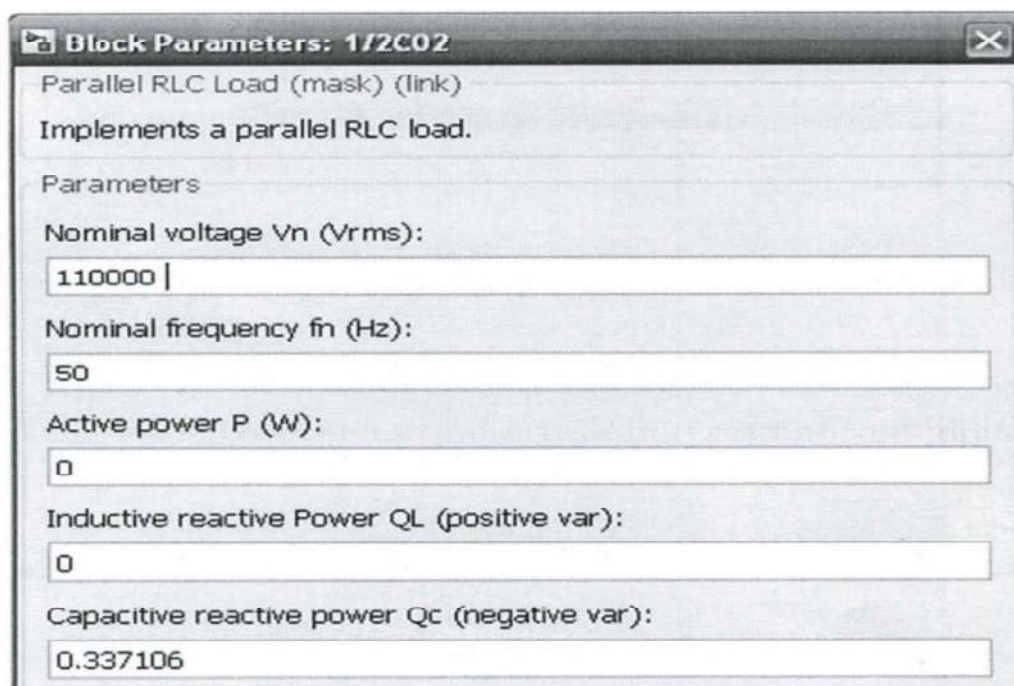


Рисунок 3.23 – Параметри половини ємнісного додаткового навантаження, що викликане зарядними потужностями лінії 0-2

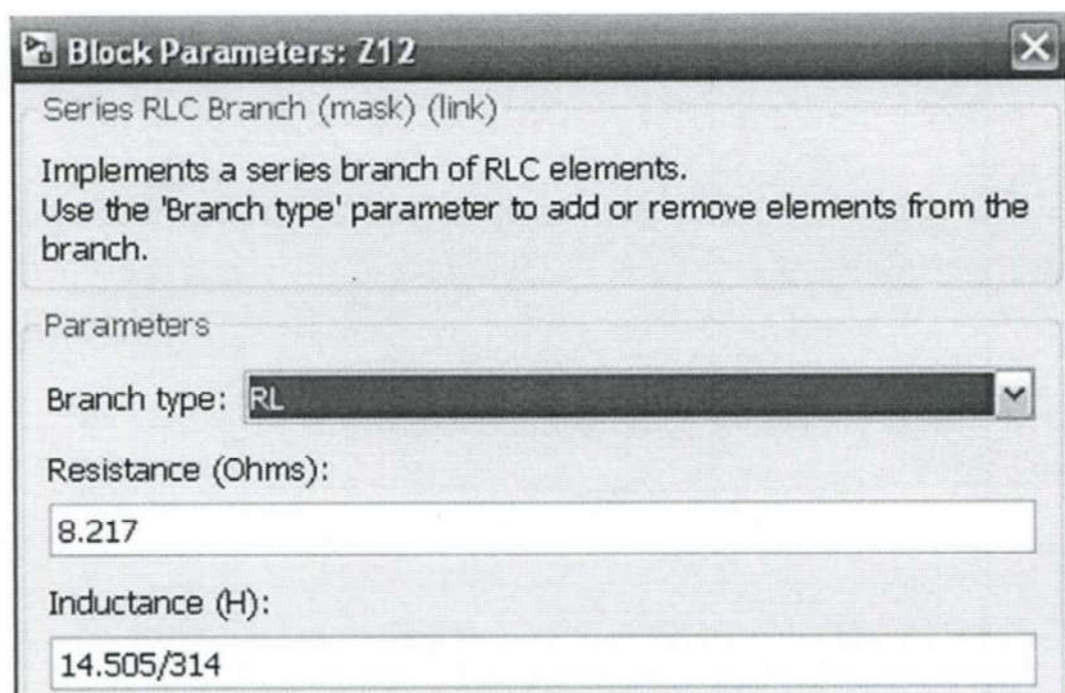


Рисунок 3.24 – Параметри активного і індуктивного опорів лінії 1-2

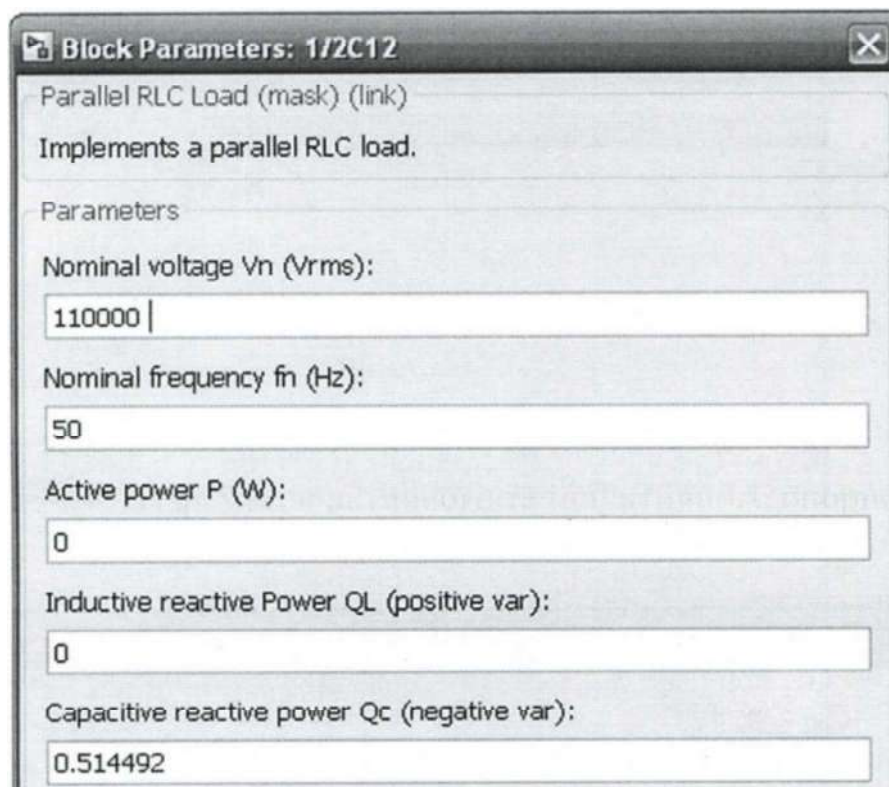


Рисунок 3.25 – Параметри половини ємнісного додаткового навантаження, що викликане зарядними потужностями лінії 1-2

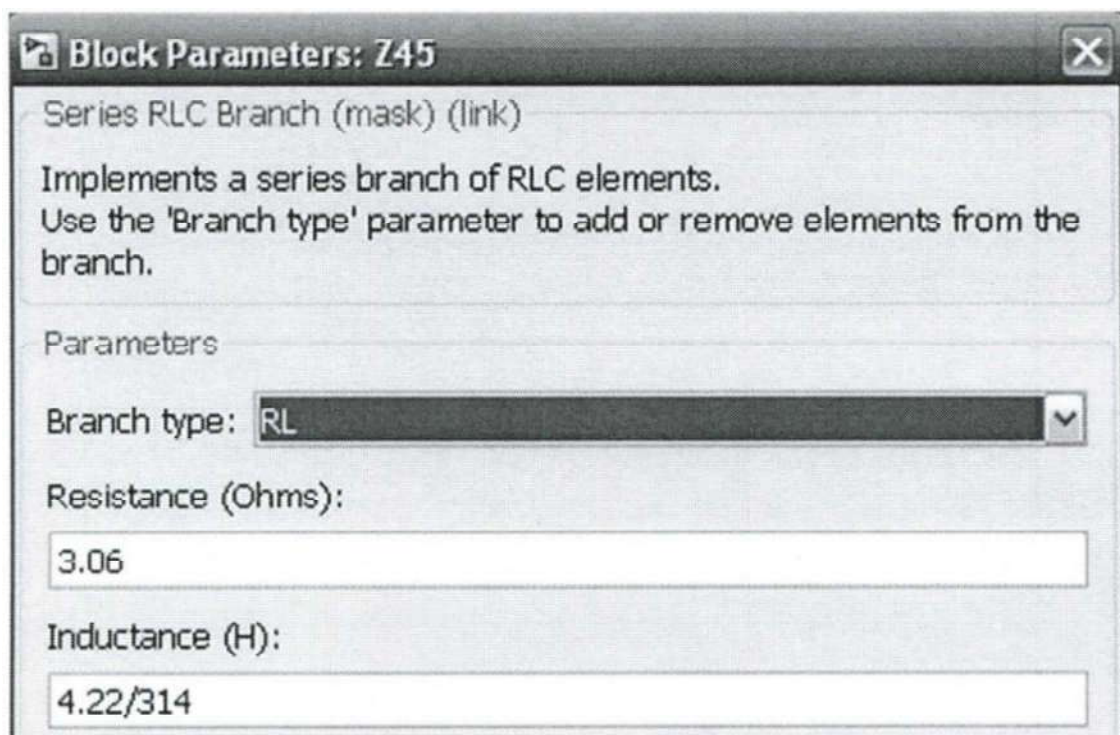


Рисунок 3.26 – Параметри активного і індуктивного опорів лінії 4-5

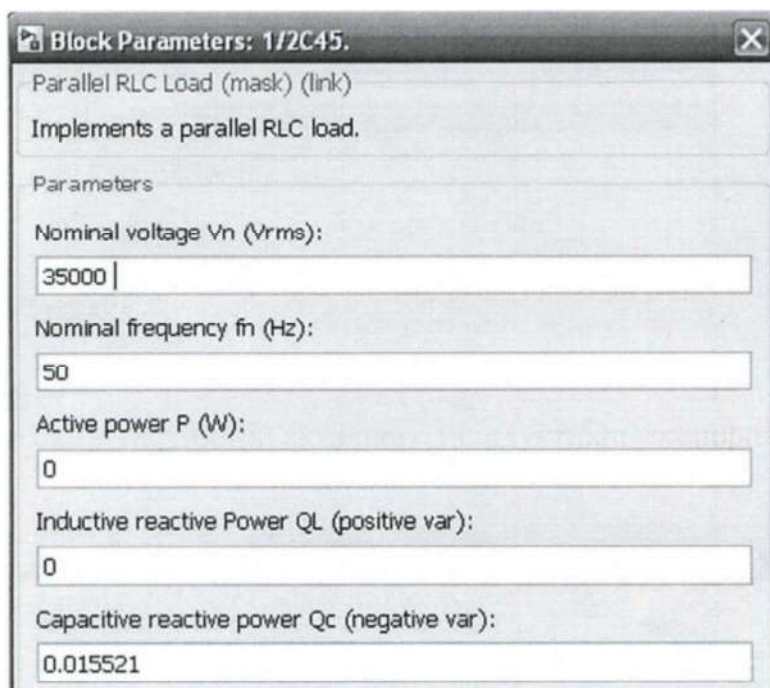


Рисунок 3.27 – Параметри половини ємнісного додаткового навантаження, що викликане зарядними потужностями лінії 4-5

Навантаження в вузлах моделюється послідовним RLC навантаженням (Series RLC Load). Приклад введення параметрів навантажень показаний на рис. 3.28-3.30

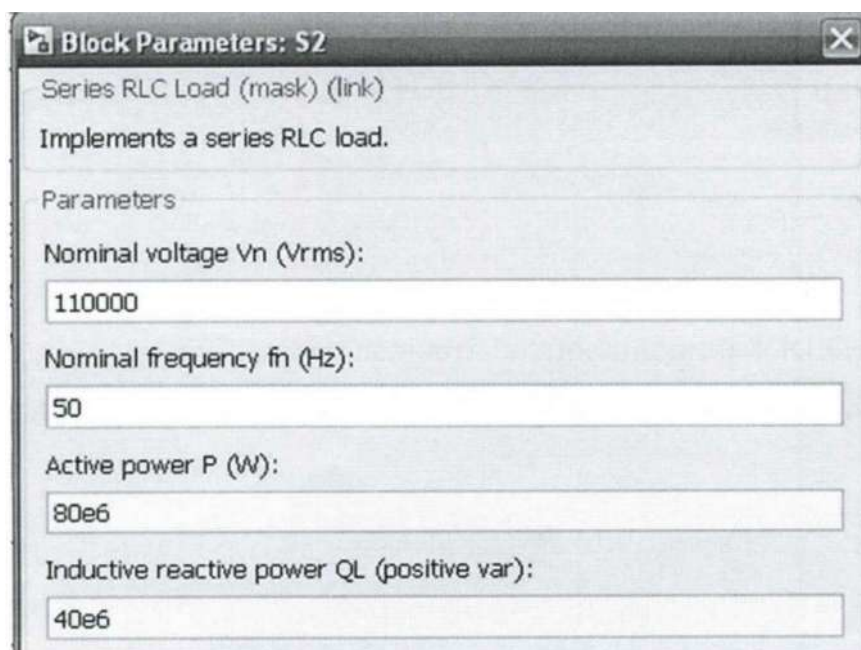
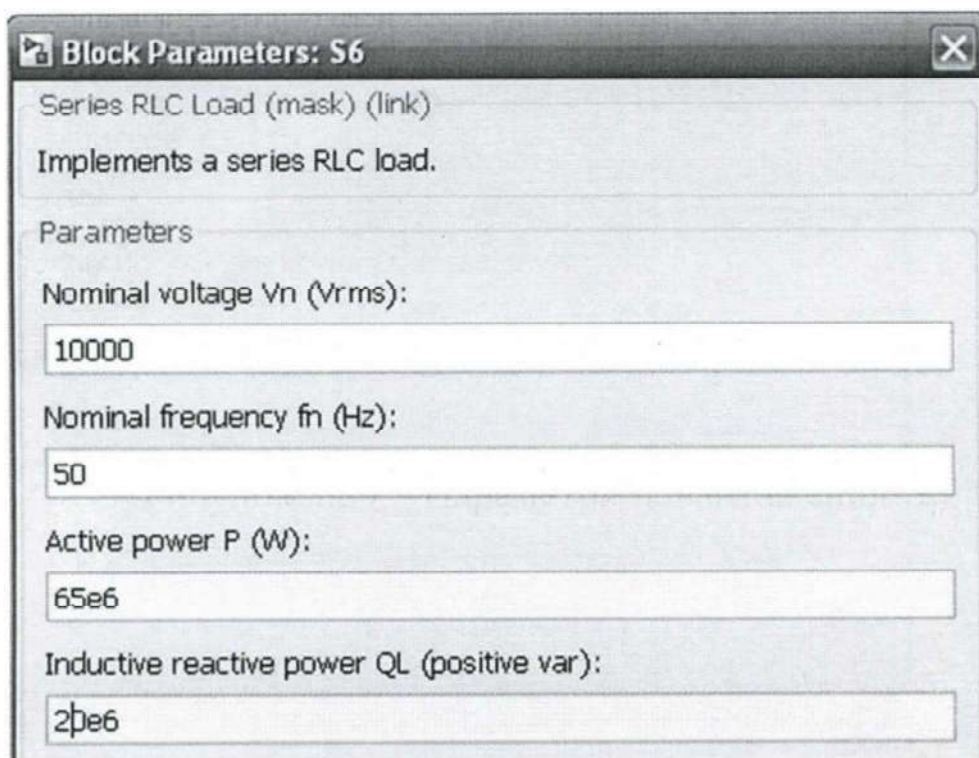
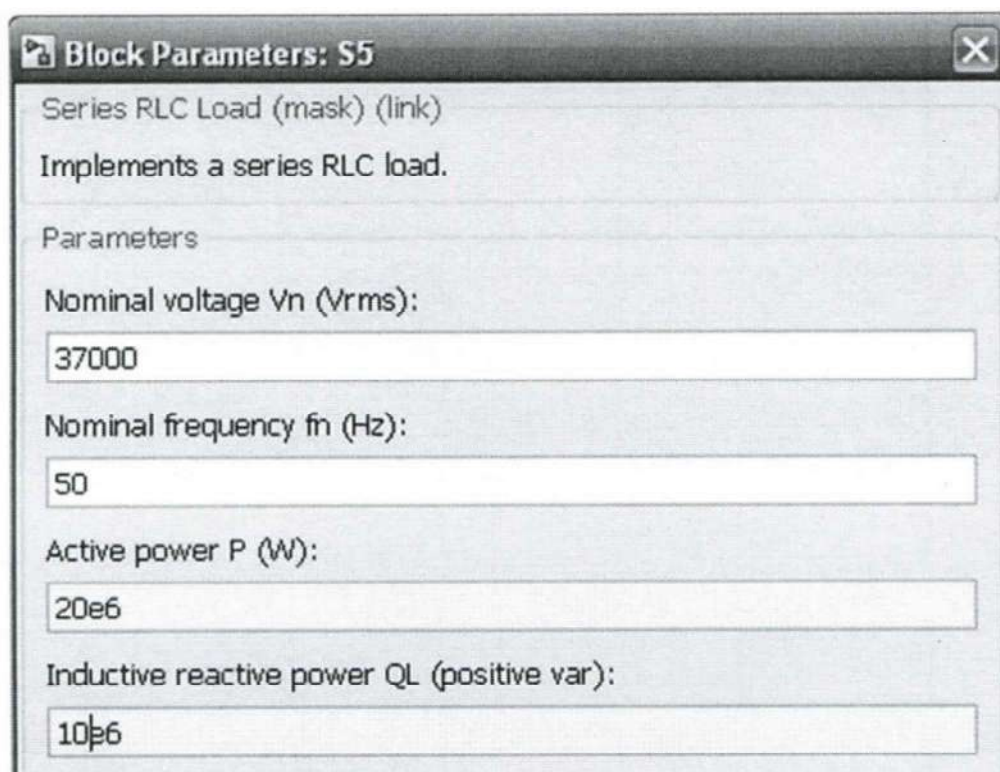


Рисунок 3.28 – Параметри навантаження  $\dot{S}_{H2}$

Рисунок 3.29 – Параметри навантаження  $\dot{S}_{H5}$ Рисунок 3.30 – Параметри навантаження  $\dot{S}_{H6}$

Двообмотковий трансформатор T2 моделюється за допомогою елементу Linear Transformer, де вказується номінальна потужність в ВА, частота в Гц, напруга (в вольтах), активний (в омах) та реактивний (в омах) опори первинної обмотки та напруга (в вольтах), активний (в омах) та реактивний (в омах) опори вторинної обмотки (рис. 3.31). Зміна коефіцієнту трансформації здійснюється зміною напруг обмоток. Оскільки на ПБВ НН T2 було виставлено відгалуження +5%, то відповідно змінюємо напругу на вторинній обмотці:

$$U_{HH} = U_{НОМ} \cdot 1,05 = 10000 \cdot 1,05 = 10500 \text{ В.}$$

Таким чином вводимо наступні параметри елементу:

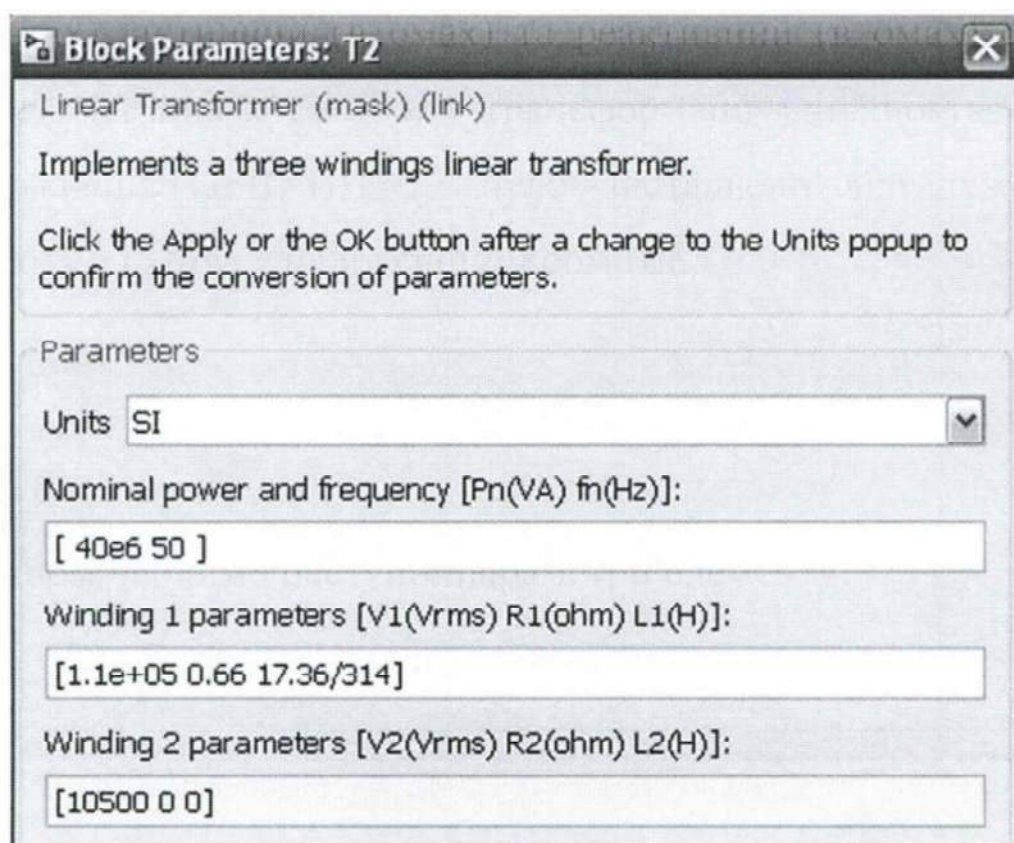


Рисунок 3.31 – Параметри трансформатора T2

Триобмотковий трансформатор T3 також моделюється за допомогою елементу Linear Transformer. Додатково вказується напруга (в вольтах), активний (в омах) та реактивний (в омах) опори обмотки середньої напруги.

Розрахуємо напруги з урахуванням відгалужень РПН ВН -3,75%, та ПБВ СН-+5%, НН- -5%:

$$U_{BH} = U_{НОМВН} \cdot 0,9625 = 110000 \cdot 0,9625 = 105875 \text{ В},$$

$$U_{HH} = U_{НОМНН} \cdot 1,05 = 35000 \cdot 1,05 = 36750 \text{ В},$$

$$U_{HH} = U_{НОМНН} \cdot 0,95 = 10000 \cdot 0,95 = 9500 \text{ В}.$$

Таким чином вводимо наступні параметри елемента (рис. 3.32):

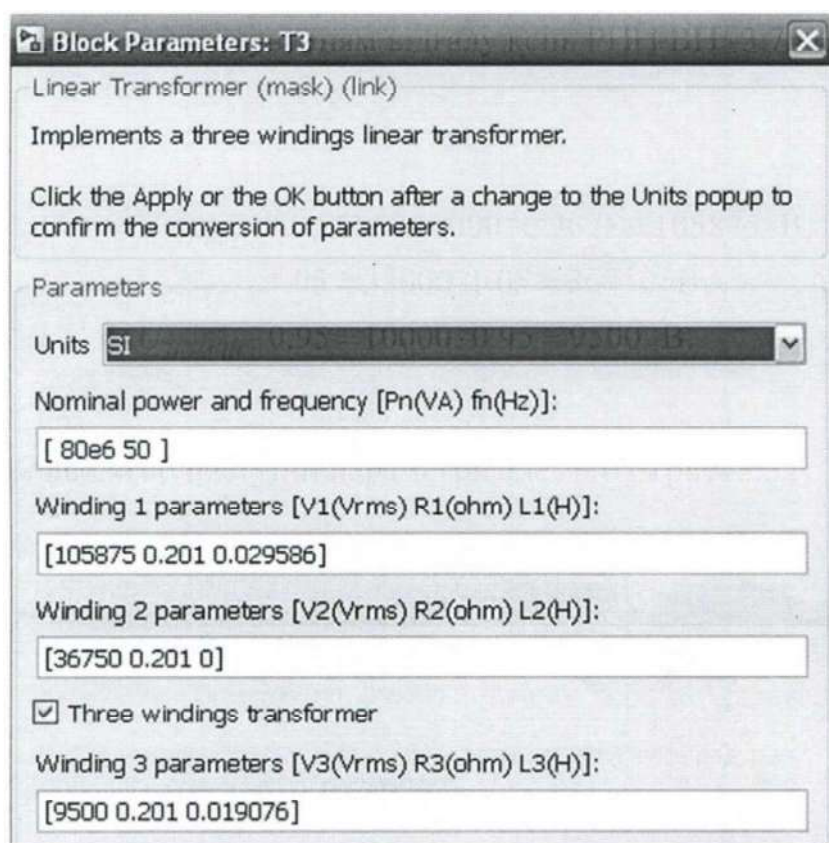


Рисунок 3.32 – Параметри трансформатора Т3

Вимірювання напруг в вузлах здійснюється за допомогою вимірювачів навантаження (Voltage measurement). Перетоки потужності вимірюються шляхом подачі вимірів струму на ділянках, які знімаються з вимірювачів струму (Current measurement) і напруги з початку ділянок на пристрій (Power), який множить струм і напругу і розраховує потужність, яка протікає по ділянці.

Схема моделі, для розрахунку основного поточкорозподілу, в програмі MATLAB представлена на рис. 3.33.

Після складання схеми запускаємо процес моделювання режиму роботи електричної мережі на час 10 с після увімкнення.

Прорахувавши режим мережі за допомогою програми MATLAB отримуємо наступні значення параметрів (табл. 3.3):

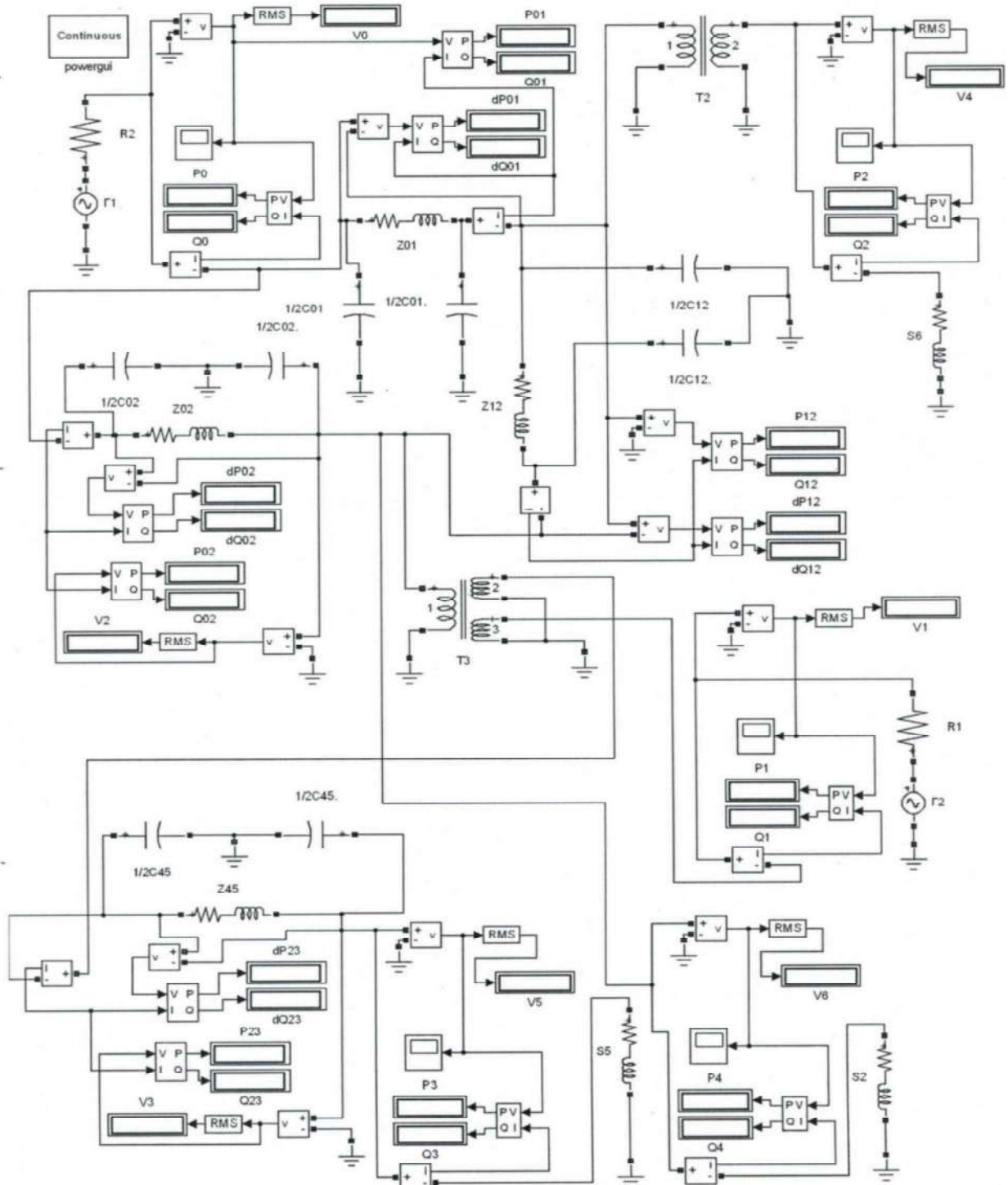


Рисунок 3.33 – Схема моделі, для розрахунку основного поточкорозподілу в програмі MATLAB

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання режимних параметрів в програмі MATLAB

Позначення	Одиниці виміру	Нормальний режим	Режим мінімальних навантажень	Післяаварійний режим
$U_{БП}$	кВ	115	115	115
$P_{БП}$	МВт	138,2	65,4	68,44
$Q_{БП}$	МВар	98,04	52,92	52,8
$U_{S2}$	кВ	107,121	110,886	109,55
$P_{S2}$	МВт	75,94	40,65	39,68
$Q_{S2}$	МВар	37,93	20,32	19,84
$U_{S5}$	кВ	34,273	36,25	35,816
$P_{S5}$	МВт	17,18	9,6	9,371
$Q_{S5}$	МВар	8,58	4,8	4,686
$U_{S6}$	кВ	10,166	10,33	10,401
$P_{S6}$	МВт	67,23	34,7	35,16
$Q_{S6}$	МВар	20,67	10,68	10,82
$U_{Г3}$	кВ	10,495	10,5	10,5
$P_{Г3}$	МВт	16,19	16,76	16,56
$Q_{Г3}$	МВар	15,6	15,05	15,03

Зіставивши режимні параметри мережі отримані за допомогою УРМЕС-2М та пакета прикладних програм для вирішення завдань технічних обчислень MatLab переконуємось, що вони майже однакові. Різницю можна пояснити похибками вимірювальних приладів.

### 3.3 Приклад виконання лабораторної роботи та перевірка результатів дослідження оптимального розподілу потужності в електричній мережі

Розглянемо приклад розрахунку лабораторної роботи, набору елементів універсальної моделі УРМЕС-2М та дослідимо залежність напруги і сумарних втрат активної потужності в мережі від величини реактивної потужності джерел схеми відповідно до першого варіанту завдання.

Розрахункова схема електричної мережі першого варіанту завдання має вигляд (рис. 3.34):

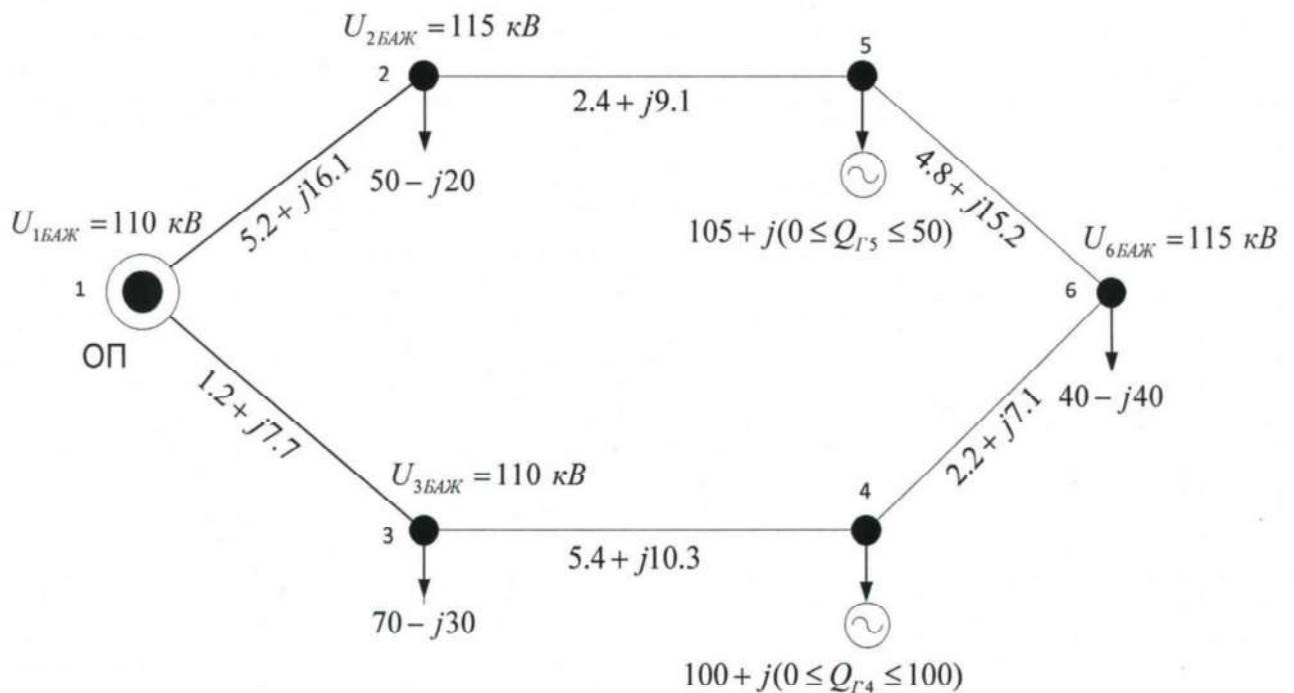


Рисунок 3.34 – Розрахункова схема електричної мережі першого варіанту завдання

Для визначення параметрів моделі вибираємо масштабні коефіцієнти.

Масштаб по напрузі приймаємо рівним:

$$m_U = \frac{U_{MAX}}{50} = \frac{115кВ}{50В} = 2,3 \cdot 10^3.$$

Вибираємо масштаб по струму:

$$m_I \cong \frac{S_{MAX}}{U_{MAX} \cdot 0,3} = \frac{150 \cdot 10^6}{115 \cdot 10^3 \cdot 0,3} = 4347 \approx 5000.$$

Тоді масштабні коефіцієнти визначаються так:

$$m_S = m_U m_I = 2,3 \cdot 10^3 \cdot 5000 = 1,15 \cdot 10^7,$$

$$m_s = \frac{m_U^2}{m_S} = \frac{(2,3 \cdot 10^3)^2}{1,15 \cdot 10^7} = 0,46.$$

Розрахуємо параметри схеми моделі

$$R_{M12} = R_{12} / m_Z = 5,2 / 0,46 = 11,3 \text{ Ом};$$

$$X_{M12} = X_{12} / m_Z = 16,1 / 0,46 = 35 \text{ Ом};$$

$$R_{M13} = R_{13} / m_Z = 1,2 / 0,46 = 2,61 \text{ Ом};$$

$$X_{M13} = X_{13} / m_Z = 7,7 / 0,46 = 16,74 \text{ Ом};$$

$$R_{M25} = R_{25} / m_Z = 2,4 / 0,46 = 5,22 \text{ Ом};$$

$$X_{M25} = X_{25} / m_Z = 9,1 / 0,46 = 19,78 \text{ Ом};$$

$$R_{M56} = R_{56} / m_Z = 4,8 / 0,46 = 10,43 \text{ Ом};$$

$$X_{M56} = X_{56} / m_Z = 15,2 / 0,46 = 33 \text{ Ом};$$

$$R_{M34} = R_{34} / m_Z = 5,4 / 0,46 = 11,74 \text{ Ом};$$

$$X_{M34} = X_{34} / m_Z = 10,3 / 0,46 = 22,39 \text{ Ом};$$

$$R_{M46} = R_{46} / m_Z = 2,2 / 0,46 = 4,78 \text{ Ом};$$

$$X_{M46} = X_{46} / m_Z = 7,1 / 0,46 = 15,43 \text{ Ом};$$

$$\dot{S}_{MH2} = \dot{S}_{H2} / m_S = (50 \cdot 10^6 - j20 \cdot 10^6) / 1,15 \cdot 10^7 = 4,35 - j1,74 \text{ ВА};$$

$$\dot{S}_{MH3} = \dot{S}_{H3} / m_S = (70 \cdot 10^6 - j30 \cdot 10^6) / 1,15 \cdot 10^7 = 6,09 - j2,61 \text{ ВА};$$

$$\dot{S}_{MH6} = \dot{S}_{H6} / m_S = (40 \cdot 10^6 - j40 \cdot 10^6) / 1,15 \cdot 10^7 = 3,48 - j3,48 \text{ ВА}.$$

Схема набору з величинами параметрів моделі і умовними параметрами складових елементів приведена на рис.3.35.

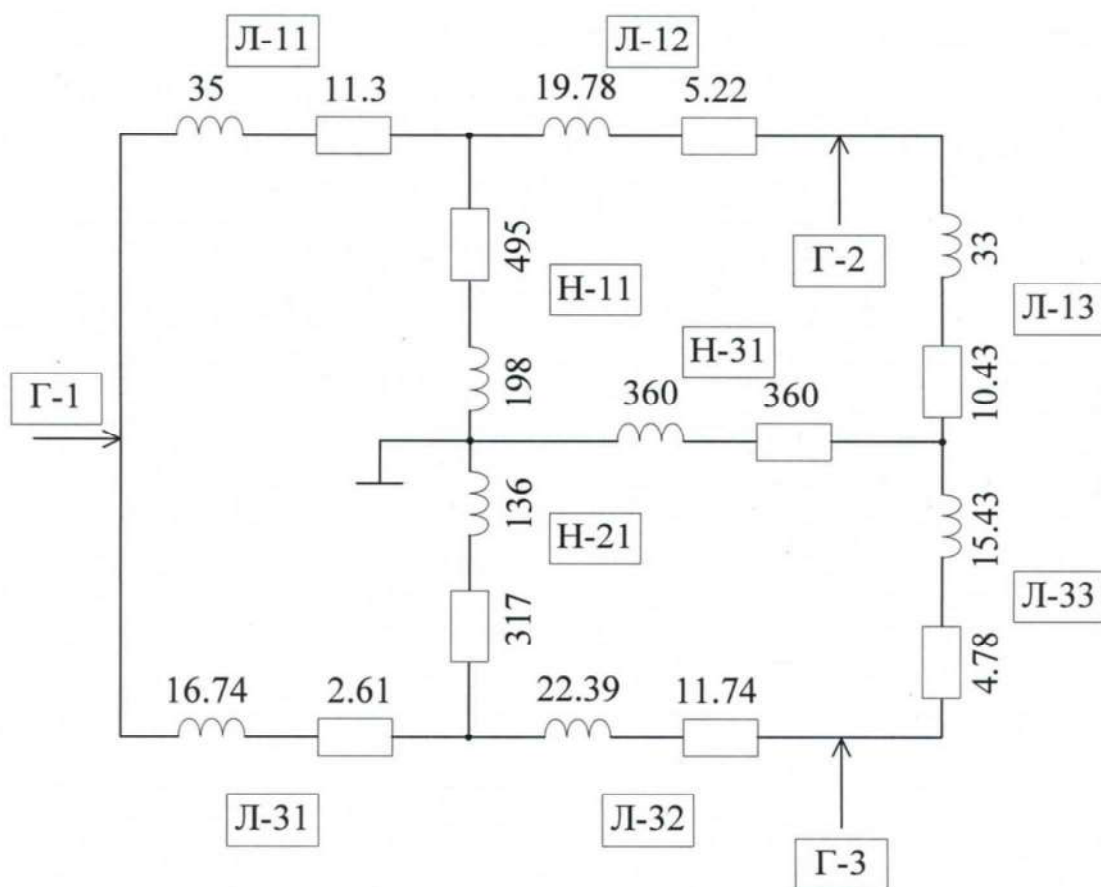


Рисунок 3.35 – Схема набору з величинами параметрів моделі і умовними параметрами складових елементів

За допомогою з'єднувальних шнурів та відповідних роз'ємів на основній комутаційній панелі збираємо схему (рис. 3.36) та виставляємо необхідні значення параметрів елементів:

На елементах Л-11, Л-12, Л-13, Л-31, Л-32, Л-33 виставляємо значення активної, індуктивної складових (рис. 3.37-3.42).

При наборі опорів в елементах моделі в кожній з декад магазинів опорів повинен знаходитися один штекер, оскільки декади сполучені послідовно. Забороняється вставляти 2 штекери в одну декаду опорів, оскільки це приводить до виткового замикання в дроселі.

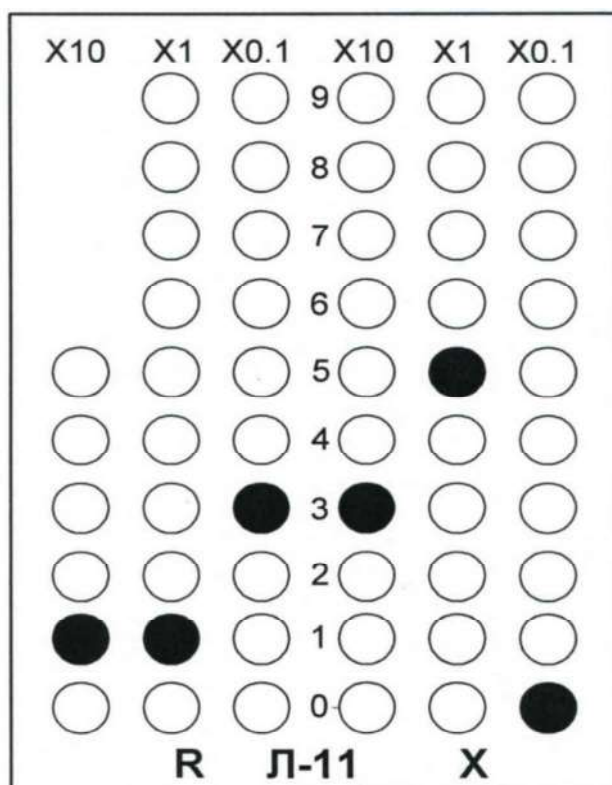


Рисунок 3.37 – Схема набору лінії Л-11

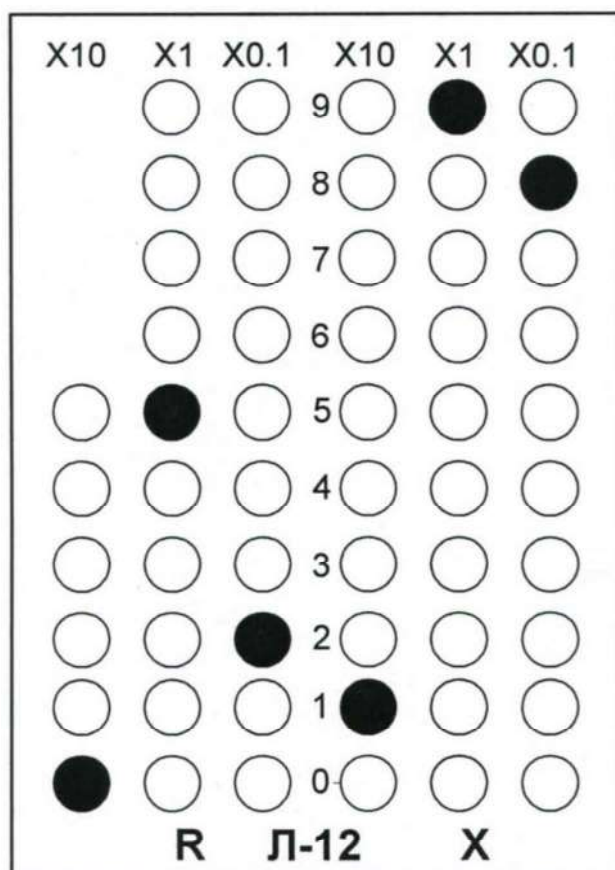


Рисунок 3.38 – Схема набору лінії Л-12

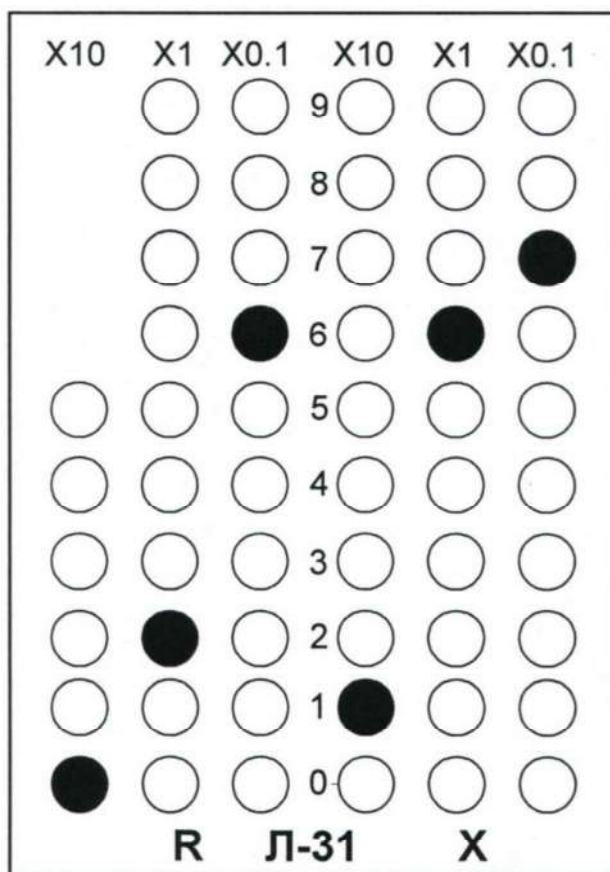


Рисунок 3.39 – Схема набору лінії Л-13

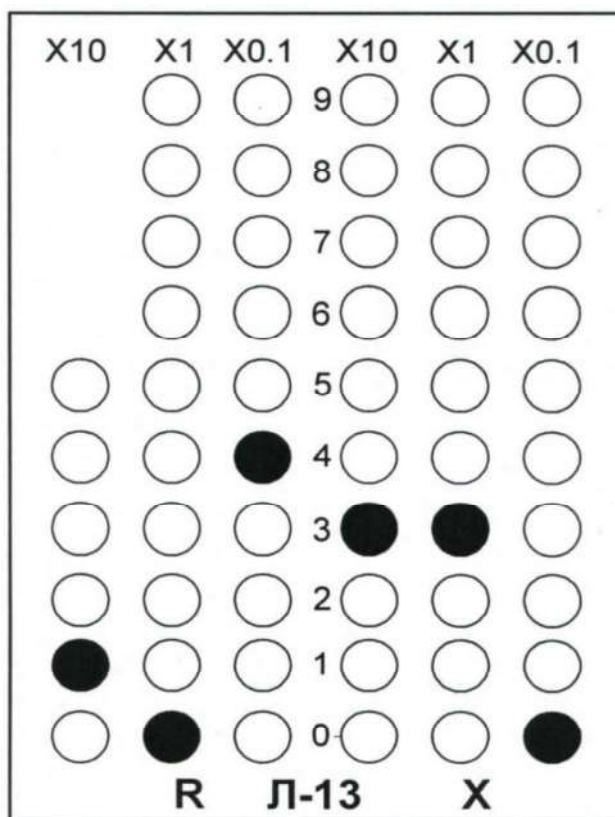


Рисунок 3.40 – Схема набору лінії Л-31

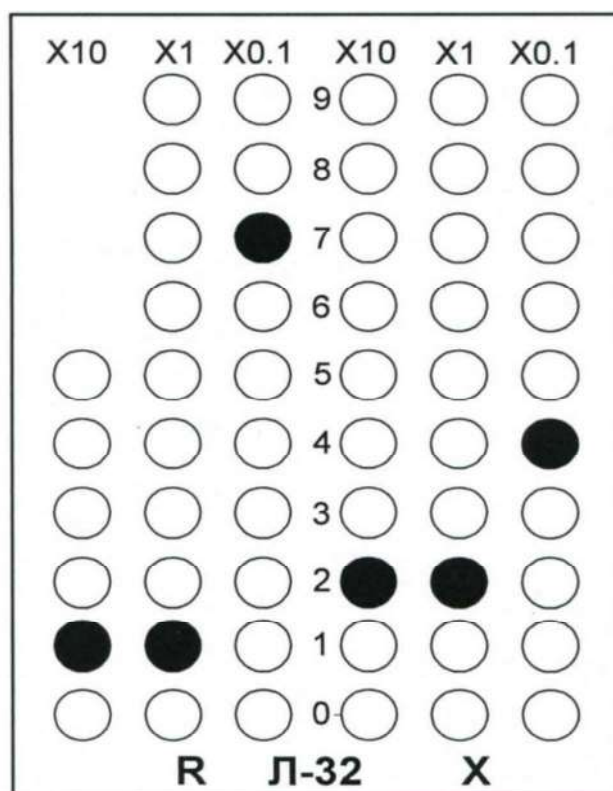


Рисунок 3.41 – Схема набору лінії Л-32

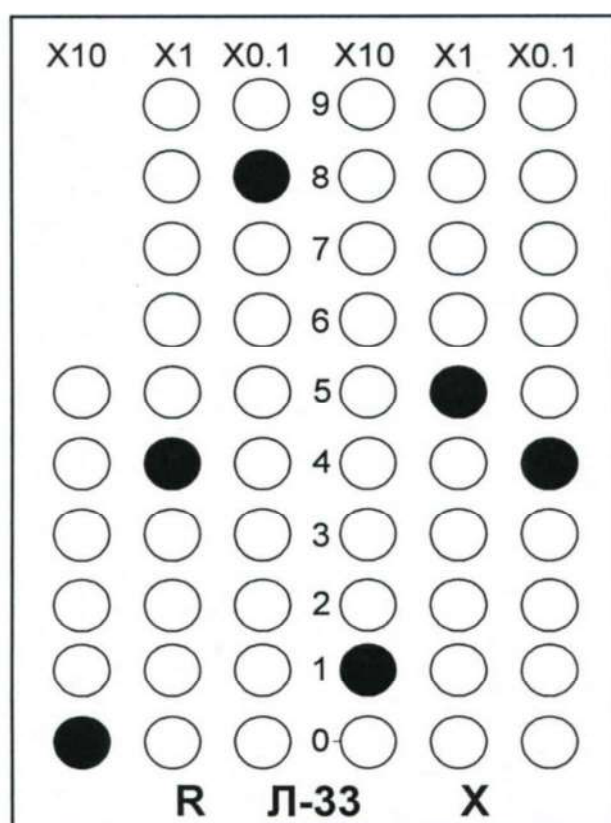


Рисунок 3.42 – Схема набору лінії Л-33

Початкові значення навантажень встановлюємо рівними половині заданим з урахуванням паразитних активних втрат.

Задані потужності перевищують 1 Вт, отже доцільно користуватися масштабом  $\tau=1$ , який встановлюється відповідним тумблером на панелі АННВ.

Перерахуємо потужності АННВ із врахуванням паразитних активних втрат:

$$\frac{\dot{S}_{MH2\text{параз}}}{2} = \frac{(P_{MH2} - 0,2 \cdot Q_{MH2}) - jQ_{MH2}}{2} = \frac{(4,35 - 0,2 \cdot 1,74) - j1,74}{2} = 2 - j0,87 \text{ ВА};$$

$$\frac{\dot{S}_{MH3\text{параз}}}{2} = \frac{(P_{MH3} - 0,2 \cdot Q_{MH3}) - jQ_{MH3}}{2} = \frac{(6,09 - 0,2 \cdot 2,61) - j2,61}{2} = 2,79 - j1,31 \text{ ВА};$$

$$\frac{\dot{S}_{MH6\text{параз}}}{2} = \frac{(P_{MH6} - 0,2 \cdot Q_{MH6}) - jQ_{MH6}}{2} = \frac{(3,48 - 0,2 \cdot 3,48) - j3,48}{2} = 1,39 - j1,74 \text{ ВА};$$

Встановлюємо відповідні значення навантажень на АННВ Н-11, Н-21, Н-31 (рис. 3.43-3.45):

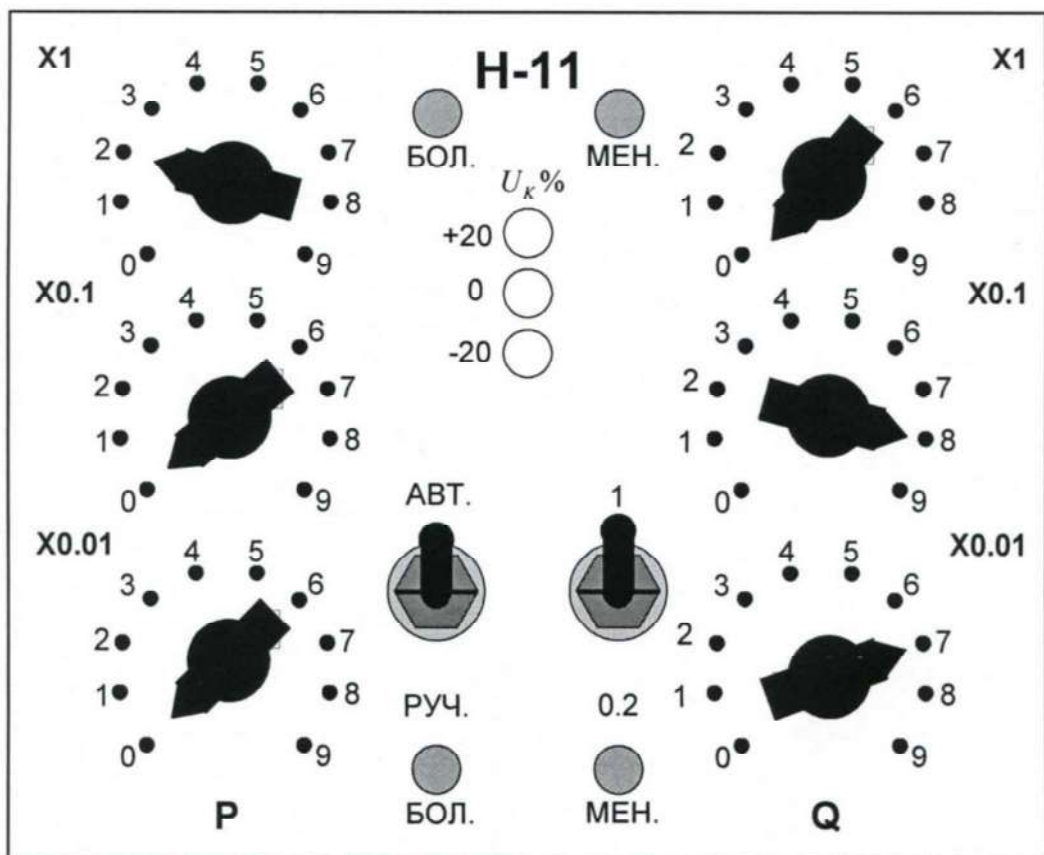


Рисунок 3.43 – Схема набору початкового значення навантаження Н-11

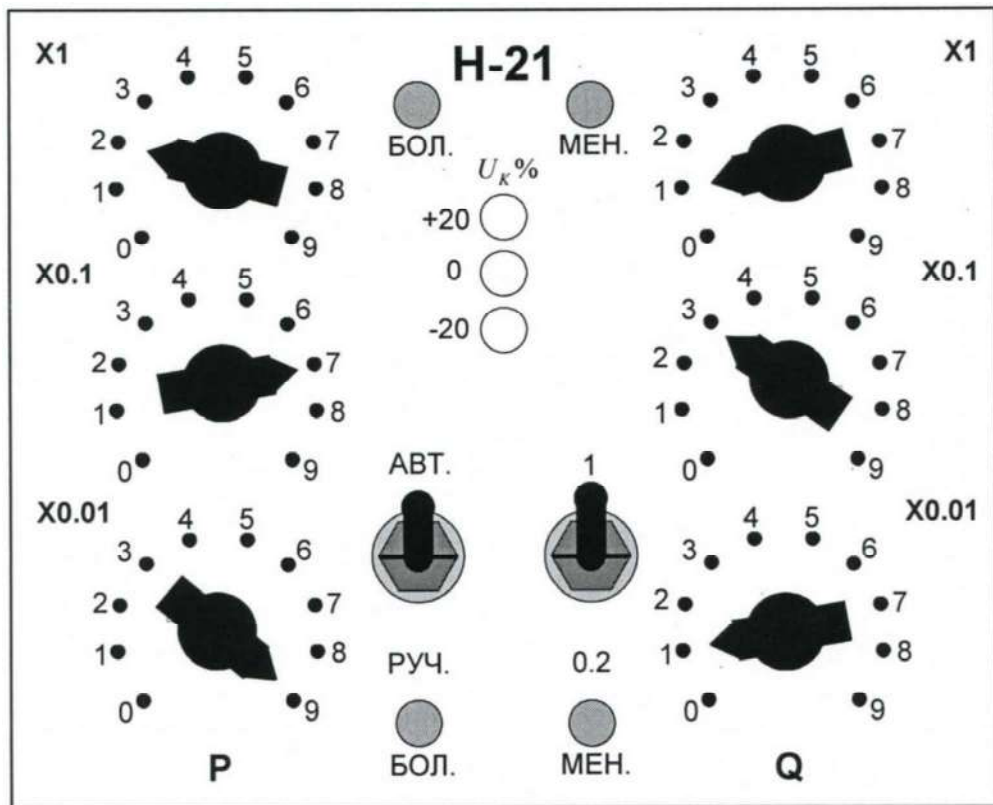


Рисунок 3.44 – Схема набора начаткового значения навантаження Н-21

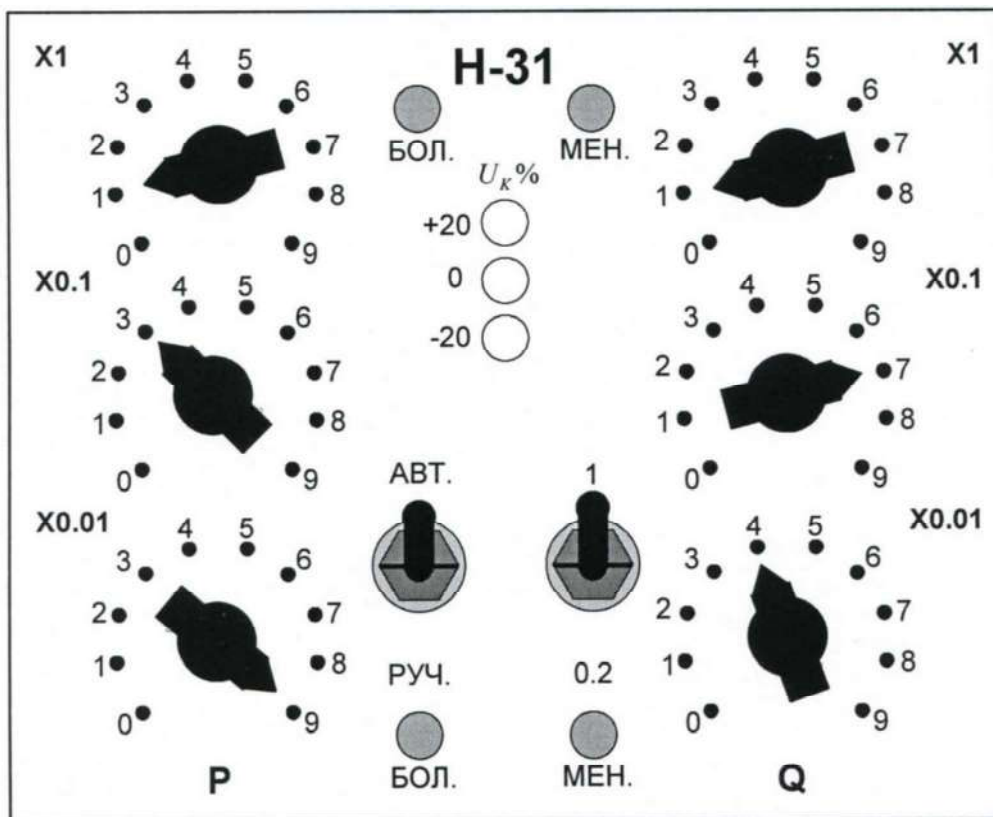


Рисунок 3.45 – Схема набора начаткового значения навантаження Н-31

ЕРС генераторних станцій у вузлах 1, 4 і 5 встановити рівними  $U$ , (рис. 3.46):

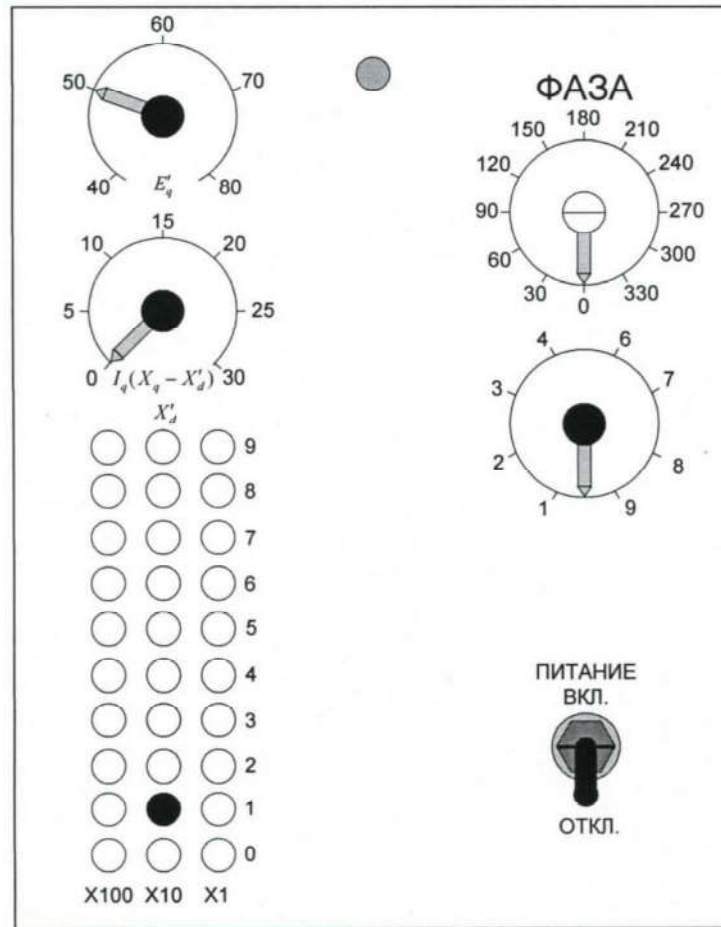


Рисунок 3.46 – Схема набору початкового значення напруг на Г1, Г2, Г3

Після перевірки набраної схеми викладачем включаємо модель та генераторні станції в мережу і виконуємо балансування початкового режиму.

Переводим АНПВ в режим "авт". Після припинення роботи реверсивних крокових шукачів АНПВ проводимо додаткове регулювання режиму генераторних станцій. Якщо відхилення напруги на вході АНПВ перевищує допустиму величину, при якій апарат ще забезпечує постійне навантаження загоряється лампочка "більше" чи "менше". В цьому випадку потрібно перевести АНПВ в режим "руч." і змінити межі грубого регулювання  $U_H$  %.

Після цього апарат переводиться в режим "авт". Лампочка гасне, якщо напруга на вході АНПВ відповідає знов вибраним межам регулювання.

Після точного встановлення режиму АНПВ переводиться в режим "руч" х перевіряються величини потужностей навантажень. Якщо ці потужності дещо відрізняються від заданих, то за допомогою відповідних кнопок "більше" або "менше" добавляються відповідності цих потужностей.

Підключення вимірювальних приладів здійснюється включенням вимірювального штекера "ВШ" в відповідне гніздо на комутаційній панелі. Перемикач "вибір вимірюваної величини" на панелі лінійних опорів встановлюється в положення "I,U, P,Q".

Приєднуємо вимірювальний шуп у гнізда генераторних станцій Г2, Г3 та змінюючи по черзі спочатку модулі і фази ЕРС генераторних станцій, по вимірювальним приладам добиваємося, щоб активні потужності були рівні заданим, а реактивні відповідали виразу  $Q_{i0} = \frac{Q_{iMAX} + Q_{iMIN}}{2}$ .

Після цього корегуємо значення  $\dot{Z}_H$  так, щоб потужності навантажень стали рівними заданим. Потім знову повернутися до генераторних станцій і так далі. Одночасно стежити, щоб була рівна заданій.

Для визначення оптимального значення змінної  $Q_i$  на черговому кроці виконуємо три пробних експерименти. На моделі встановлюється режим при  $Q_i = Q_{i0}$  і обчислюється відповідне значення цільової функції  $\psi_0$ . Далі аналогічно встановлюється режим при

$$Q_{i-} = Q_{i0} - \Delta Q_i;$$

$$Q_{i+} = Q_{i0} + \Delta Q_i.$$

і враховуються значення цільової функції відповідно  $\psi_-$  і  $\psi_+$

В результаті виконання лабораторної роботи було виконано 4 кроки, результати виконання лабораторної роботи з величинами переведеними в дійсні приведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Оптимальний розподіл реактивної потужності для першого варіанту завдання

Крок	$\Delta Q_4$	$\Delta Q_5$		$Q_4$	$Q_5$	$\psi$	$Q_{OPT4}$	$Q_{OPT5}$
1	25	-	-	0	-	0,34	25	-
			0	25	-	0,015		
			+	50	-	0,4		
2	-	50	-	-	0	0,31	-	100
			0	-	50	0,22		
			+	-	100	0,13		
3	0	-	-		-		25	-
			0	25		0,015		
			+		-			
4	-	25	-	-	75	0,001	-	75
			0	-	100	0,13		
			+	-	125	0,24		

Таким чином оптимальними значеннями реактивної потужності при яких досягається мінімум сумарних втрат активної потужності, а також забезпечуються бажані рівні напруги в пунктах е:

$$Q_{Г4OPT} = 25 \text{ МВАр},$$

$$Q_{Г5OPT} = 75 \text{ МВАр}.$$

При цьому на Г4 встановлена напруга 116 кВ та фаза 5°, на Г5 120 кВ та фаза 5°.

Для пересвідчення вірності виконаних заміріврезультуючого поточкорозподілу та режимних параметрів і розрахунків за допомогою засобів розрахункової моделі УРМЕС-2М і для розширення знань в області комп'ютерного моделювання виконаємо розрахунок режиму роботи мережі в програмі MATLAB.

Оскільки в мережі присутні тільки симетричні навантаження і не мають місце неповно фазні режими приймається рішення виконати моделювання в однофазному виконанні.

Балансуючий вузол, тобто вузол безкінечної потужності з усталеним режимом напруги буде змодельований за допомогою джерела змінної напруги (AC Voltage Source) (рис. 3.47-3.49):

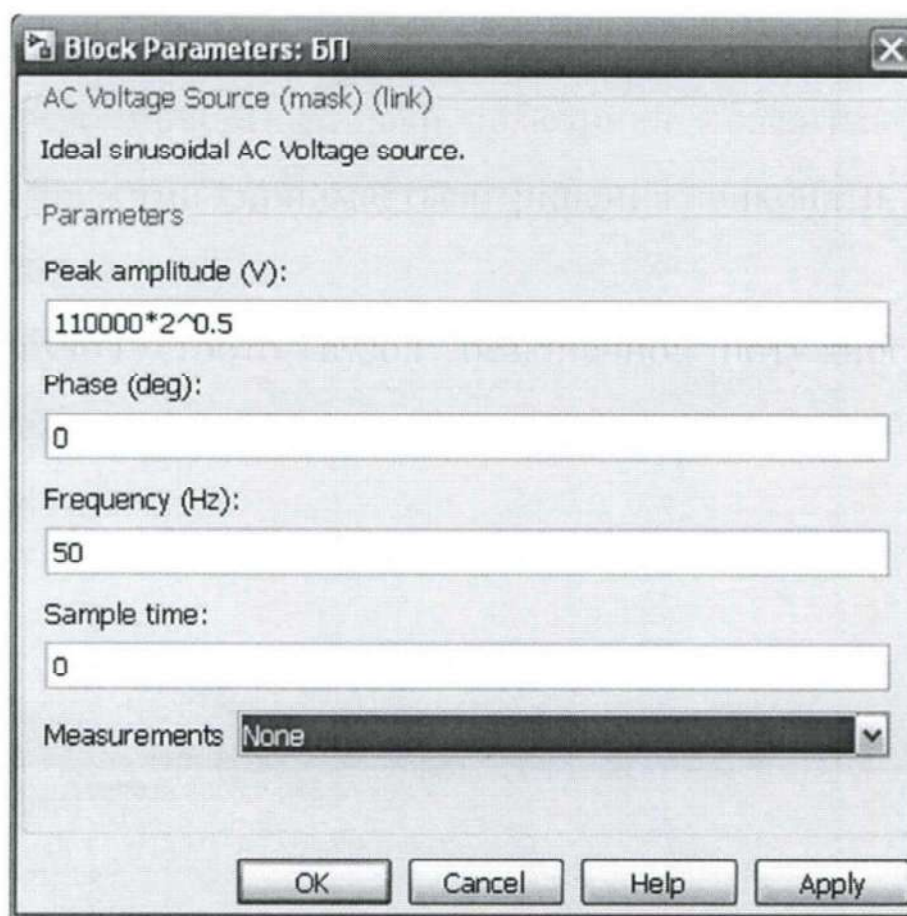


Рисунок 3.47 – Параметри генератора балансуєчого пункту

Відповідно Г4, та Г5:



Рисунок 3.48 – Параметри генератора Г4



Рисунок 3.49 – Параметри генератора Г5

ЛЕП моделюємо RL вітками (Series RLC Branch), де вказується повний активний опір в омах і повна індуктивність лінії (рис. 3.50-3.55).

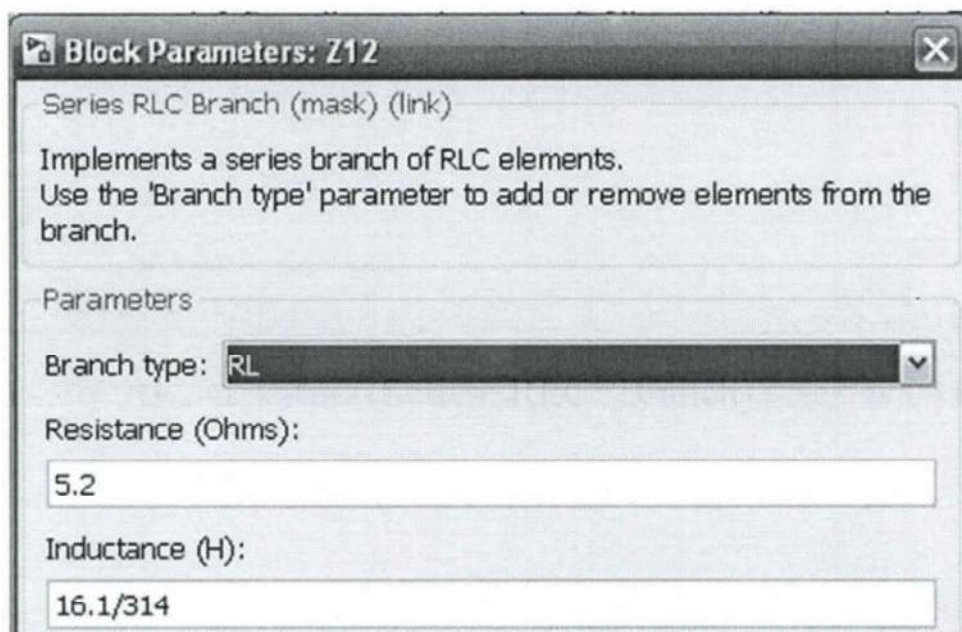


Рисунок 3.50 – Параметри лінії 1-2

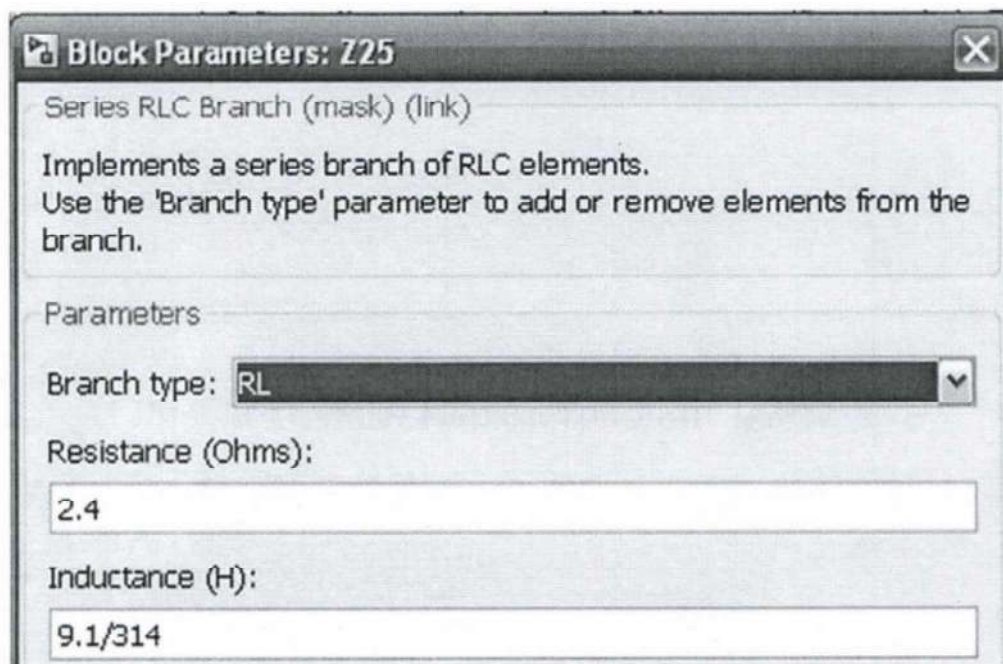


Рисунок 3.51 – Параметри лінії 2-5

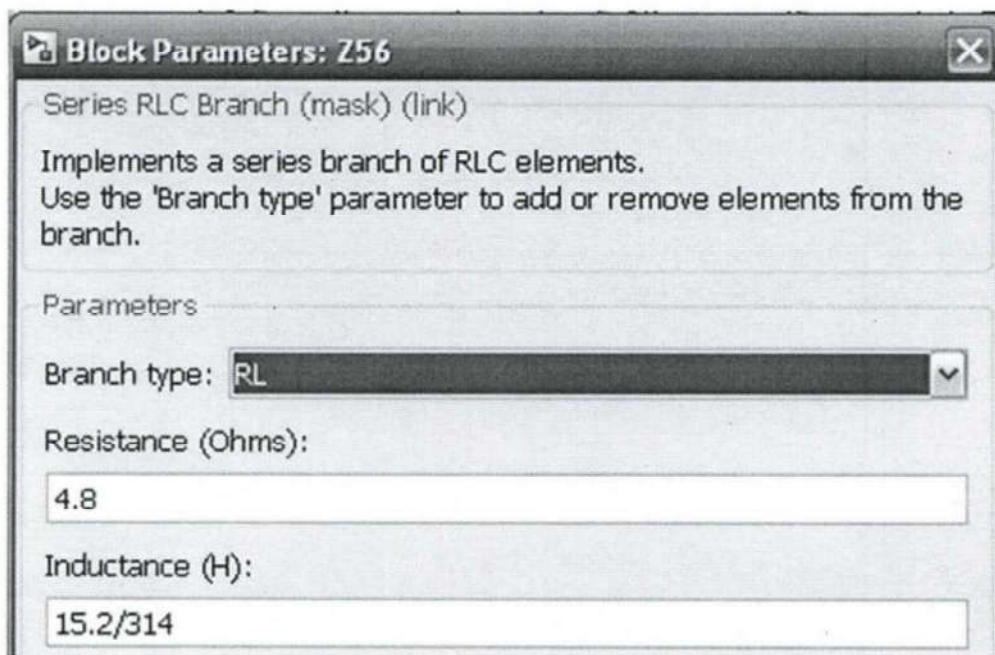


Рисунок 3.52 – Параметри лінії 5-6

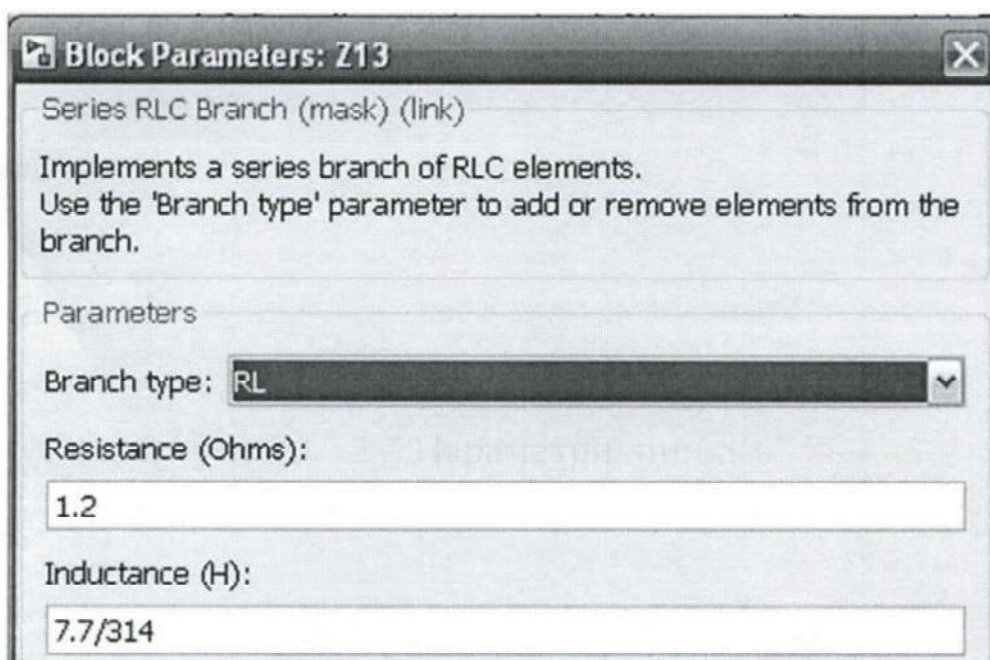


Рисунок 3.53 – Параметри лінії 1-3

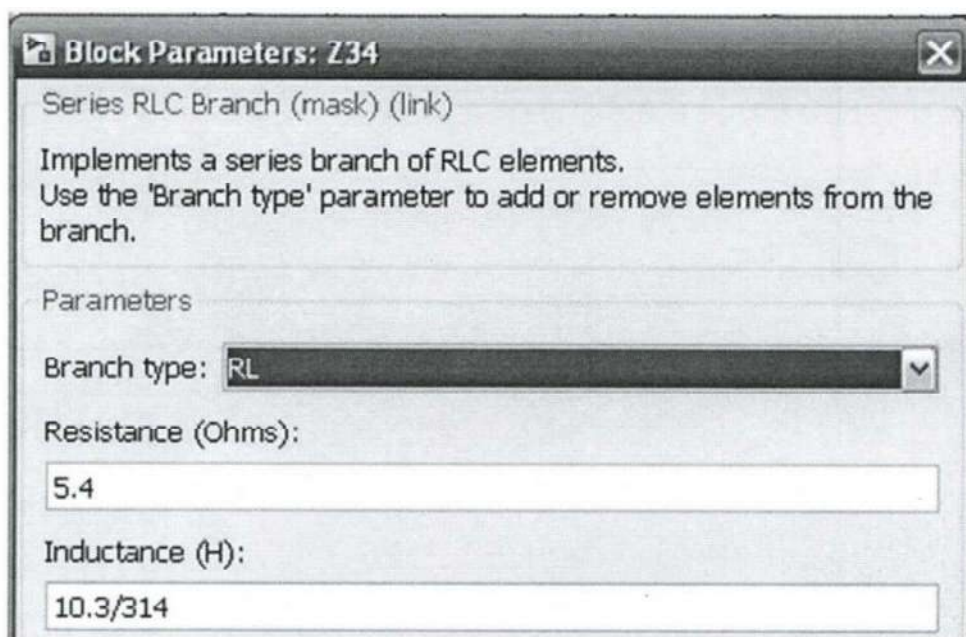


Рисунок 3.54 – Параметри лінії 3-4

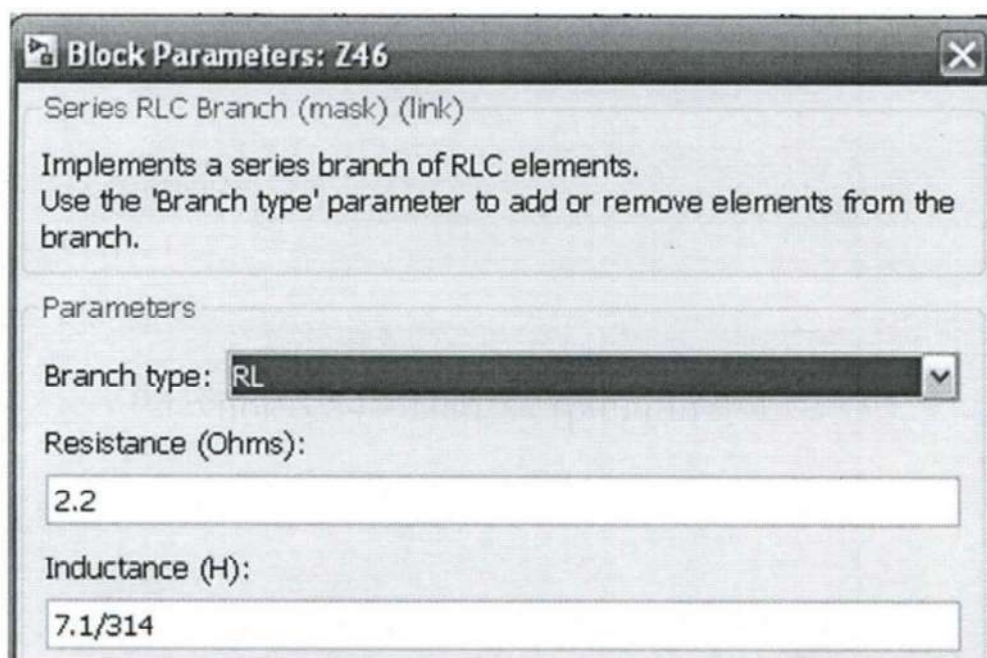


Рисунок 3.55 – Параметри лінії 4-6

Навантаження в вузлах моделюється послідовним RLC навантаженням (Series RLC Load) (рис. 3.56-3.58):

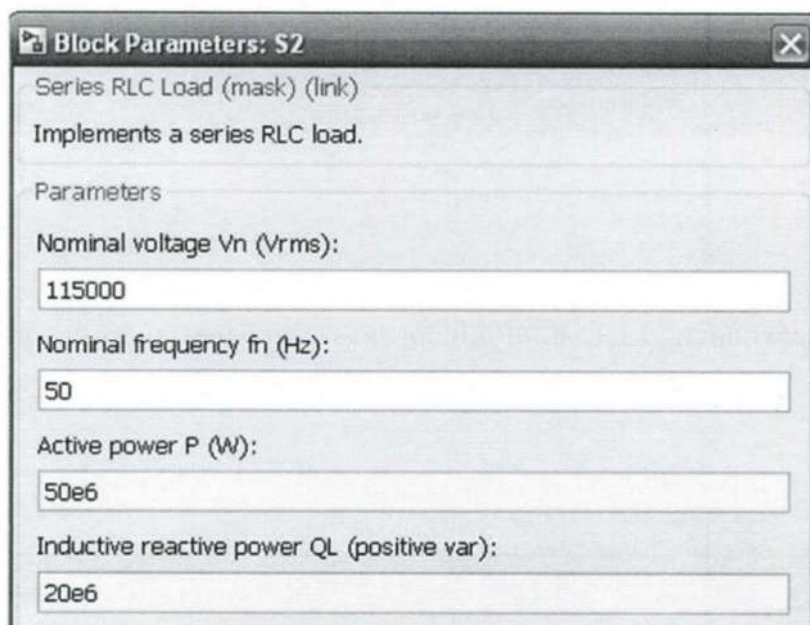


Рисунок 3.56 – Параметри навантаження  $\dot{S}_{H2}$

Вимірювання напруг в вузлах здійснюється за допомогою вимірювачів навантаження (Voltage measurement). Перетоки потужності вимірюються шляхом подачі вимірів струму на ділянках, які знімаються з вимірювачів струму (Current measurement) і напруги з початку ділянок на пристрій (Power), який множить струм і напругу і розраховує потужність, яка протікає по ділянці.

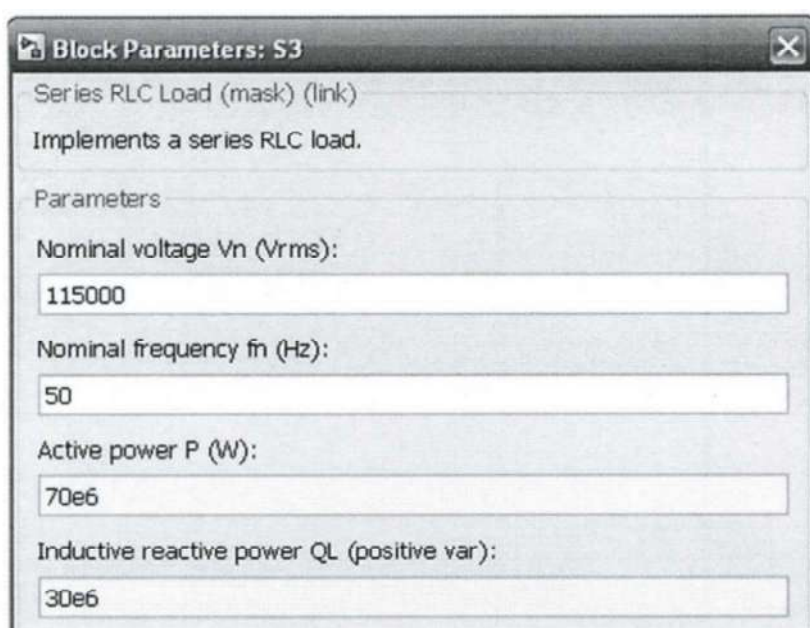


Рисунок 3.57 – Параметри навантаження  $\dot{S}_{H3}$

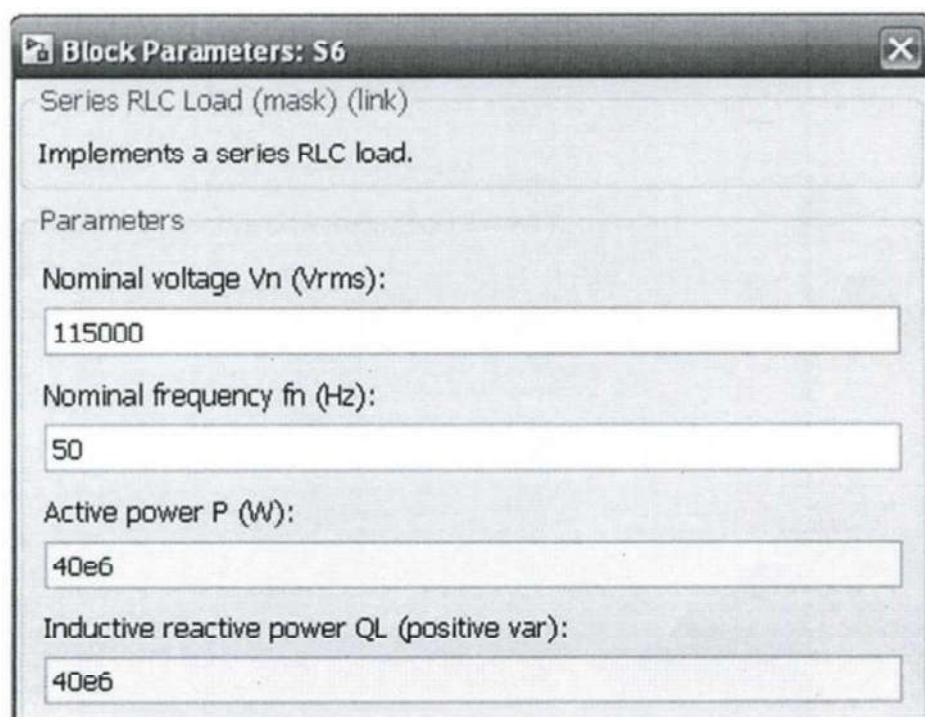


Рисунок 3.59 – Параметри навантаження  $\dot{S}_{H6}$

Схема моделі для розрахунку параметрів мережі в програмі MATLAB представлена на рис. 3.59.

Після складання схеми запускаємо процес моделювання режиму роботи електричної мережі на час 10 с після увімкнення.

Прорахувавши режим мережі за допомогою програмі MATLAB отримуємо наступні значення параметрів (табл. 3.5):

Таблиця 3.5 – Результати вимірювання параметрів в програмі MATLAB

$U_{БП}$	кВ	110
$P_{БП}$	МВт	10
$Q_{БП}$	МВАр	13
$U_{S2}$	кВ	115,052
$P_{S2}$	МВт	50,002
$Q_{S2}$	МВАр	20,005
1	2	3

Закінчення таблиці 3.5

1	2	3
$U_{S3}$	кВ	109,962
$P_{S3}$	МВт	70
$Q_{S3}$	МВАр	30,007
$U_{S6}$	кВ	115,061
$P_{S6}$	МВт	40
$Q_{S6}$	МВАр	40
$U_{Г4}$	кВ	115,998
$P_{Г4}$	МВт	106,8
$Q_{Г4}$	МВАр	25,29
$U_{Г5}$	кВ	119,995
$P_{Г5}$	МВт	98,37
$Q_{Г5}$	МВАр	75,57

Зіставивши режимні параметри мережі отримані за допомогою УРМЕС-2М та пакета прикладних програм для вирішення завдань технічних обчислень MatLab переконуємось, що вони майже однакові. Різницю можна пояснити похибками вимірювальних приладів.

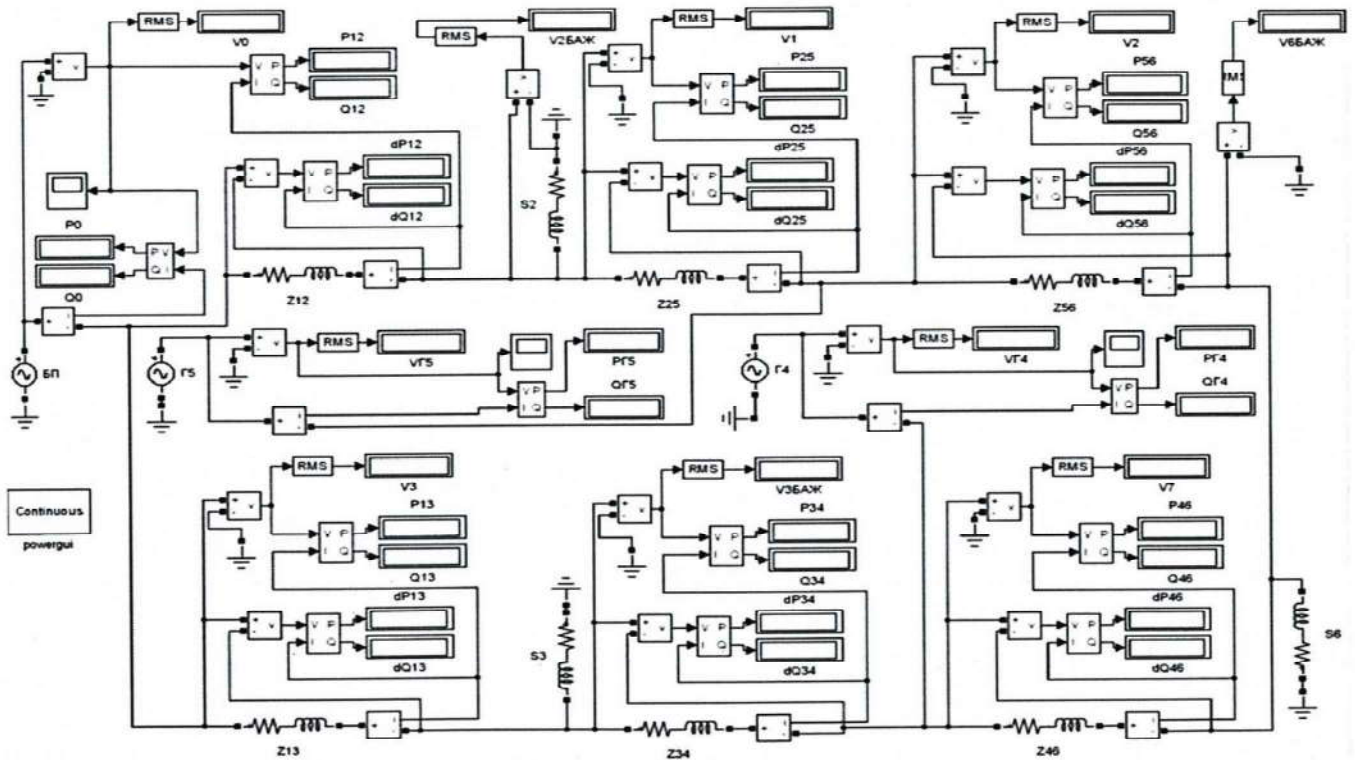


Рисунок 3.59 – Схема моделі для розрахунку параметрів мережі в програмі  
MATLAB

### Висновки до розділу

Перевіривши отримані дослідницькі результати за допомогою звичайного прорахунку та використовуючи середовище програмування та моделювання Matlab слід зауважити, що аналогова універсальна розрахункова модель УРМЕС-2М повною мірою дозволяє проводити дослідження параметрів, динамічної та статичної стійкості, регулювання електричних мереж, оскільки результати замірів виконаних на УРМЕС-2М повністю відповідають розрахунковим значенням. Звичайно має місце похибка, але вона істотно не впливає на дослідження.

Таким чином, маючи результати перевірки, аналогову універсальну розрахункову модель УРМЕС-2М можна повною мірою використовувати для проведення лабораторних практикумів на кафедрі електричних мереж та систем, оскільки вона задовольняє всі необхідні вимоги, що стосуються метрології та моделювання енергетичних систем.

#### **4 МОДЕРНІЗАЦІЯ УРМЕС-2М ШЛЯХОМ ЗАМІНИ БЛОКУ СЕЛЬСИНОВИХ ГЕНЕРАТОРНИХ СТАНЦІЙ НА НОВУ ЕЛЕКТРОННО-ЦИФРОВУ ГЕНЕРАТОРНУ СТАНЦІЮ**

Основними недоліками УРМЕС-2М являється низька ремонтпридатність у зв'язку з відсутністю запчастин, великі витрати часу на пошук несправності. Для вирішення цієї проблеми найкращим способом є установка сучасного устаткування на заміну застарілого.

Пристрої генерації напруги в УРМЕС-2М виконані на жорсткій логіці із застосуванням електромеханічних реле, транзисторів, мікросхем з непрограмованою логікою та електронних ламп. Основними недоліками таких систем є:

а) Погана ремонтпридатність у зв'язку з припиненням випуску більшості компонентів даних систем;

б) Великий час простою обладнання через тривалого часу ремонту, пов'язаного зі складністю визначення причин несправності;

в) Високе енергоспоживання;

г) Великі габарити;

Для обслуговування таких систем потрібно висококваліфікований персонал вміє розбиратися у подібних схемах і досить добре знає дане устаткування.

Сучасні системи управління побудовані на основі програмованих логічних контролерів дозволяє вирішити всі ці проблеми разом з тим розширюють функціональні можливості системи в цілому. Сучасна елементна база підвищує ремонтпридатність системи. Більшість систем управління будуються за модульним принципом, при цьому велика частина елементів підключається до системи за допомогою роз'ємів, це дозволяє провести заміну несправного елемента без розбору схеми і без спеціального інструменту або паяльника. Всі сучасні мікроконтролери володіють функціями самодіагностики, які дозволяють запобігати виникненню пошкодження і значно скорочують час пошуку несправності.

Використання в системі програмованих засобів промислової автоматизації дозволяє спростити електричну схему і підвищити її надійність за рахунок скорочення електромеханічних зв'язків.

Наявність у системі ПЛК дає можливість змінювати логіку управління, параметри і настройки без зміни або незначного зміни електричної схеми [12].

Таким чином, в ході виконання магістерської дисертації була виготовлена чотириполюсна генераторна станція, що дозволила значно покращити технічні можливості універсальної розрахункової моделі, знизити можливість пошкодження (за рахунок використання контролерів захисту), а також дала можливість для подальшого вдасконалення УРМЕС-2М, за рахунок використання генерації сигналів, які можливо пристосувати до ЕОМ з використанням пакету прикладних програм Matlab Simulink.

#### **4.1 Опис головного контролера. Моделювання плати пристрою генерації сигналу напруги генераторної станції з УРМЕС-2М**

Цифровий генератор синусоїдальної напруги, що планується до встановлення в розрахункову модель базується на основі мікроконтролера ATMEGA 48.

Мікроконтролер ATmega48PA-PU - популярний чіп з сімейства мікроконтролерів AVR ATmega від Atmel.

ATmega48PA-PU виконаний у вигляді DIP-мікросхеми зі стандартним відстанню між ніжками, що означає можливість його легкої установки на макетну плату.

Для прошивки мікроконтролера необхідний програматор, такий як AVR USBasp. Також в якості програматора можна використовувати плату Arduino, з встановленим на ній скетчем ArduinoISP, який являється стандартним і доступним разом з середовищем Arduino IDE. Але в даному випадку плата Arduino розглянута не буде, оскільки вона не може бути використана для цілей, поставлених у дані магістерській дисертації. Для компіляції програм на C ++ існує вільно розповсюджуваний інструментарій: avr-gcc (Linux, MacOS) і WinAVR (Windows).

Чіп має внутрішній осцилятор, який дозволяє працювати мікроконтролеру на тактовій частоті 8 МГц. Велика частота може бути встановлена підключенням до мікросхеми кварцового резонатора.

Як і всі мікроконтролери AVR фірми «Atmel», Мікроконтролер сімейства Mega с 8-розрядними мікроконтролером, призначений для вбудованих пристроїв. Вони виготовляються по економічній КМОП-технології, яка у поєднанні з удосконаленою RISC-архітектурою дозволяє досягти найкращого співвідношення швидкодія/енергоспоживання. Мікроконтролери даного сімейства є найбільш розвиненими представниками мікроконтролерів AVR.

Основні технічні характеристики мікроконтролеру ATMEGA 48 наведені нижче:

Високоякісний низькоспоживаючий 8-бітний AVR мікроконтролер.

Передова RISC архітектура:

- а) 130 команд, більшість яких виконується за один тактовий цикл;
- б) 32 8-бітних робочих регістра загального застосування;
- в) Повністю статична архітектура;
- г) продуктивність до 16 MIPS при тактовій частоті 16 МГц;
- д) вбудований двоцикловий помножувач.

Незалежна пам'ять програм і даних:

- а) 4/8/16 КБ внутрісистемного програмованої Flash пам'яті програми, здатної витримати 10 000 циклів запису / стирання;
- б) допоміжна секція завантажувального програми з незалежним бітом захисту;
- в) внутрішньосистемне програмування вбудованої програмою-завантажувачем;
- г) реальна функція зчитування при програмуванні;
- д) 256/512/1024 байта EEPROM, здатної витримати 100 000 циклів запису / стирання;
- е) 512 / 1К / 1К байта вбудованої SRAM пам'яті (статичне ОЗУ);
- ж) Програмована захист від зчитування.

### Характеристики периферії:

а) два 8- розрядних таймера / лічильника з окремим предделителя і режимом порівняння;

б) один 16- таймер / лічильник з окремим предделителя і режимом порівняння і режимом захоплення;

в) лічильник реального часу з окремим генератором;

г) п'ять ШІМ каналів;

### Передавальні характеристики контролеру:

а) 8 канальний АЦП у приладів в TQFP і MFL корпусах;

б) 6 10- бітних каналів;

в) 2 8- бітних каналу;

г) 6 канальний АЦП у приладів в PDIP корпусі;

д) 4 10- бітних каналів;

е) 2 8- бітних каналу;

ж) програмований послідовний USART;

з) ведучий / ведений SPI інтерфейс;

и) байт-орієнтований послідовний 2-провідний інтерфейс;

к) програмований сторожовий таймер з вбудованим генератором;

л) вбудований аналоговий компаратор;

м) переривання і пробудження при зміні стану висновків.

### Спеціальні характеристики мікроконтролера:

а) скидання при включенні харчування і детектор короткочасних зникнень харчування;

б) вбудований відкалібрований генератор ;

в) зовнішні та внутрішні джерела переривання;

г) п'ять режимів зниженого споживання: Idle, ADC Noise Reduction, Power-Save, Power-down і Standby.

### Порти введення - виведення і корпусне виконання:

а) 23 програмованих лінії портів введення-виведення;

б) 32 вивідні TQFP і MFL корпусу.

Діапазон напруги живлення:

- а) від 1.8 до 5.5 В у ATmega48 ;
- б) від 2.7 до 5.5 В у ATmega48 ;
- в) від 4.5 до 5.5 В у ATmega48 .

Різний діапазон робочих тактових частот:

- а) від 0 до 1 МГц у ATmega48 ;
- б) від 0 до 8 МГц у ATmega48;
- в) від 0 до 16 МГц у ATmega48.

Понад низьке споживання:

- а) Активний режим:
- б) 300 мкА при частоті 1 МГц і напрузі живлення 1.8 В;
- в) 20 мкА при частоті 32 кГц і напрузі живлення 1.8 В;
- г) Режим зниженого споживання:
- д) 0.5 мкА при напрузі живлення 1.8 В.

У мікроконтролерах AVR реалізована Гарвардська архітектура, яка характеризується роздільною пам'яттю програм і даних, кожна з яких має власні шини доступу до них. Така організація дозволяє одночасно працювати як з пам'яттю програм, так і з пам'яттю даних. Поділ шин доступу дозволяє використовувати для кожного типу пам'яті шини різної розрядності, причому способи адресації і доступу до кожного типу пам'яті також різні.

Ще одним рішенням, спрямованим на підвищення швидкодії, є використання технології конвейеризації. Конвейеризація полягає у тому, що під час виконання поточної команди проводиться вибірка з пам'яті і дешифрація коду наступної команди [11].

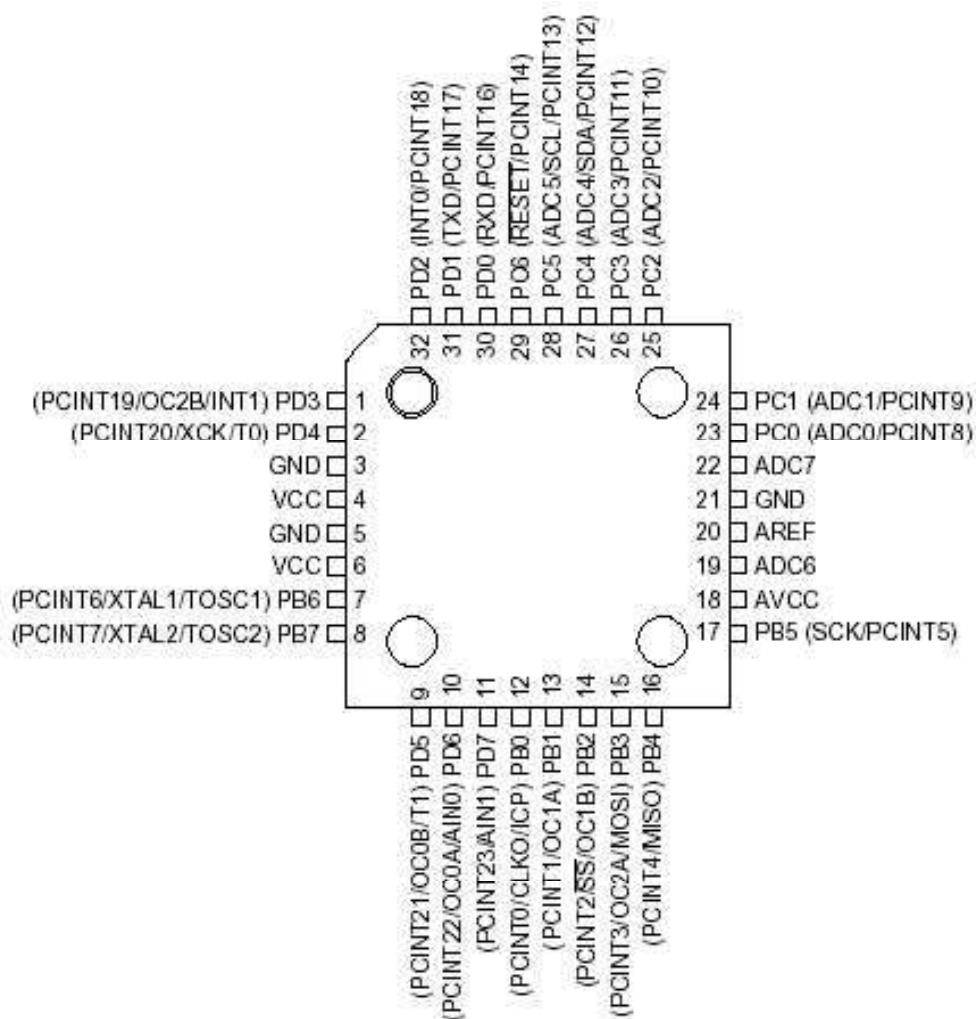


Рисунок 4.1 – Маркування та опис виводів головного мікроконтролера

Під час виконання магістерської дисертації була змодельована монтажна плата пристрою генерації сигналу напруги. Оскільки схема дуже складна, то друкована плата була змодельована за допомогою програми P-Cad і в подальшому, на основі результатів програми, була дана плата може бути виготовлена. На рис. 4.2, та 4.3 представлено схему розміщення елементів на монтажній платі.

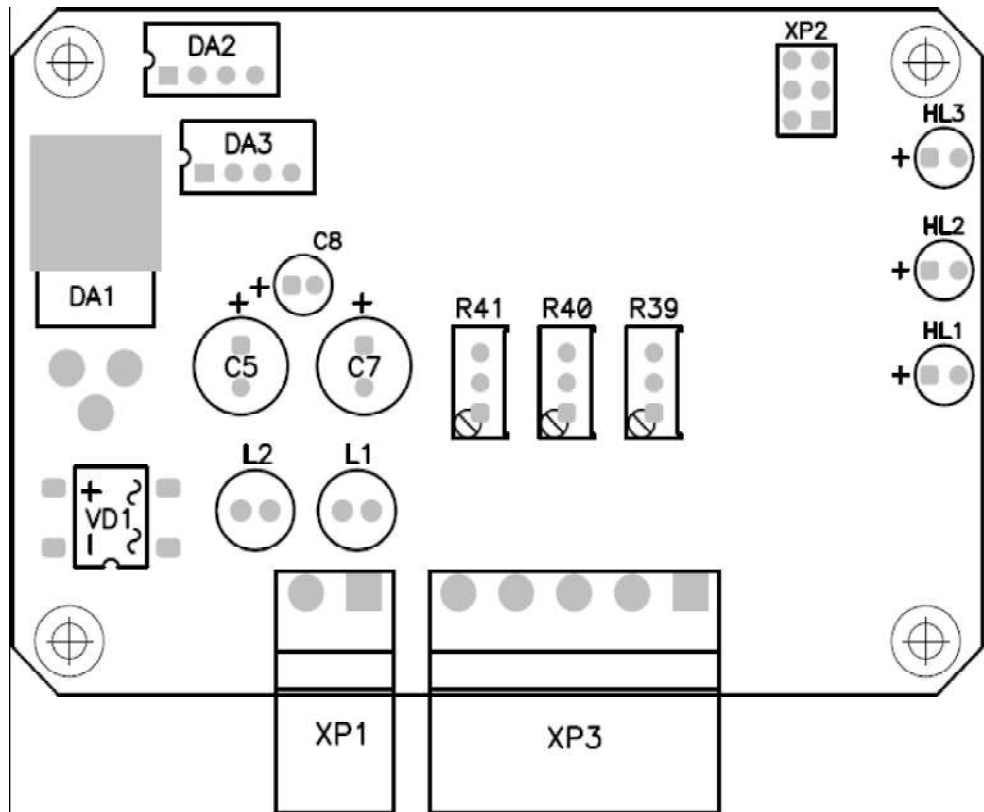


Рисунок 4.2 – Схема розміщення елементів плати (вид зверху)

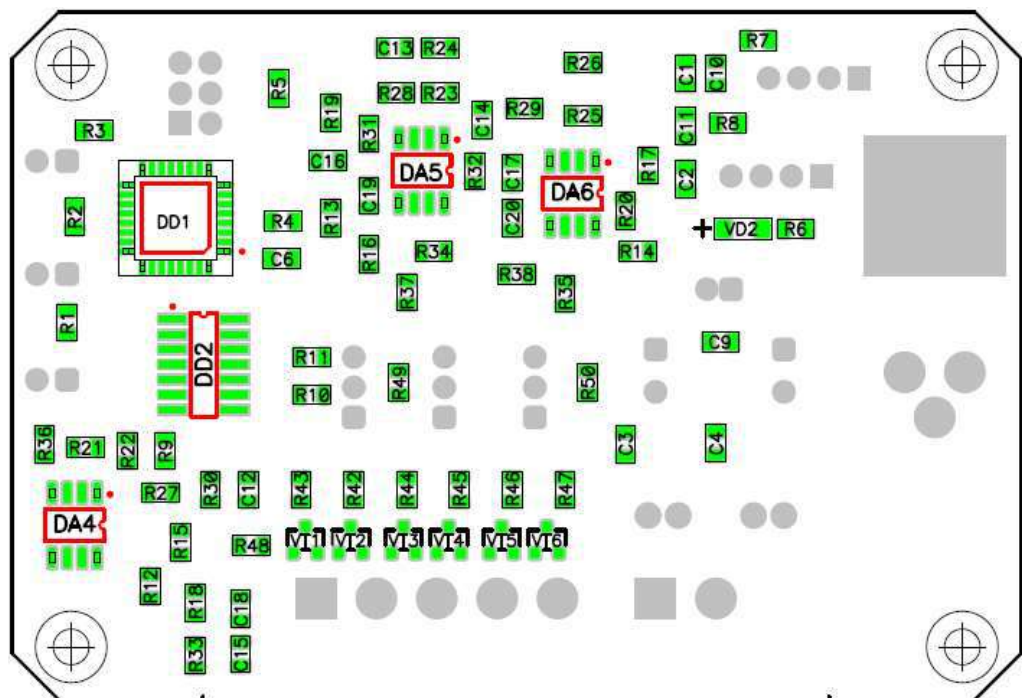


Рисунок 4.3 – Схема розміщення елементів плати (вид знизу)

Оскільки на генераторну станцію надходить живлення в 6,3 В, має бути описаний процес перетворення вхідного сигналу на 5 В синусоїдальної напруги.

Процес перетворення полягає у наступному:

а) вхідний генеруючий сигнал надходить до аналогового демультіплікатора;

б) сигнал від демультіплікатора проходить через фільтр нижчих частот;

в) сигнал поступає на апаратний підсилювач;

г) отримуємо  $U_{вих} = 5 \text{ В}$ .

На рис.4.4 - 4.7 зображені стадії перетворення сигналу з вхідного у вихідний за допомогою вище згаданих елементів.

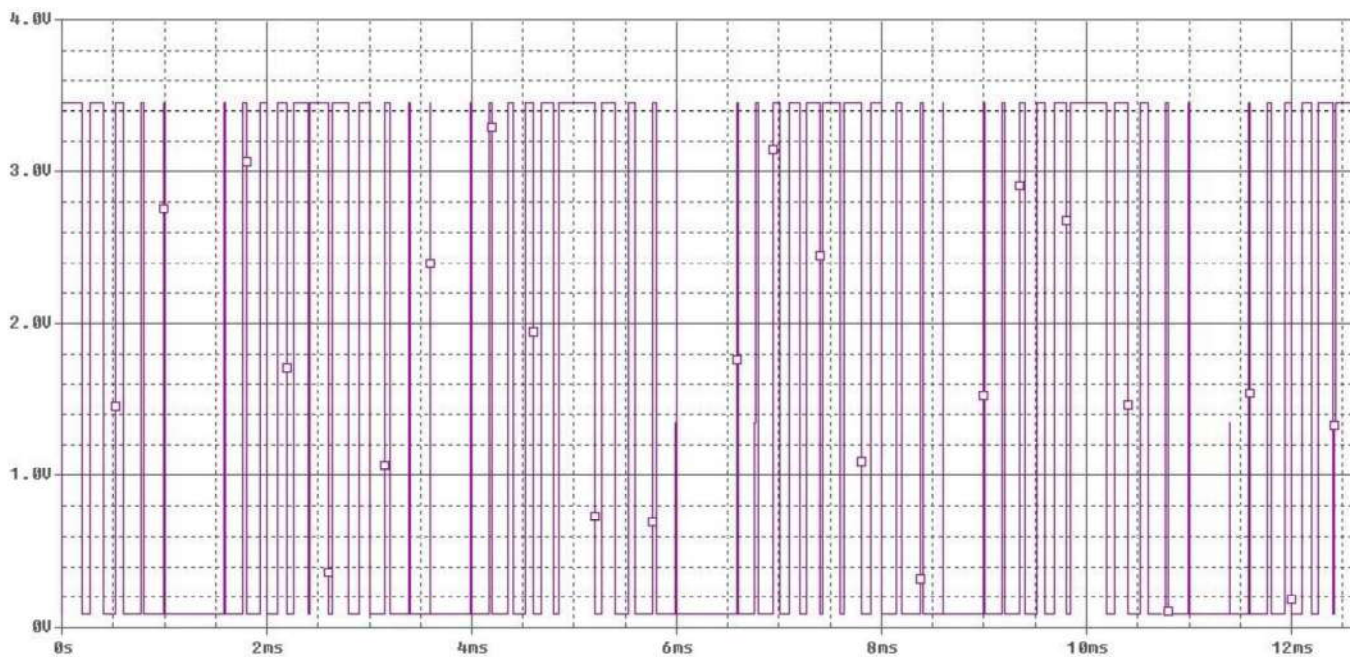


Рисунок 4.4 – Вигляд вхідного сигналу (широтно-імпульсна модуляція).

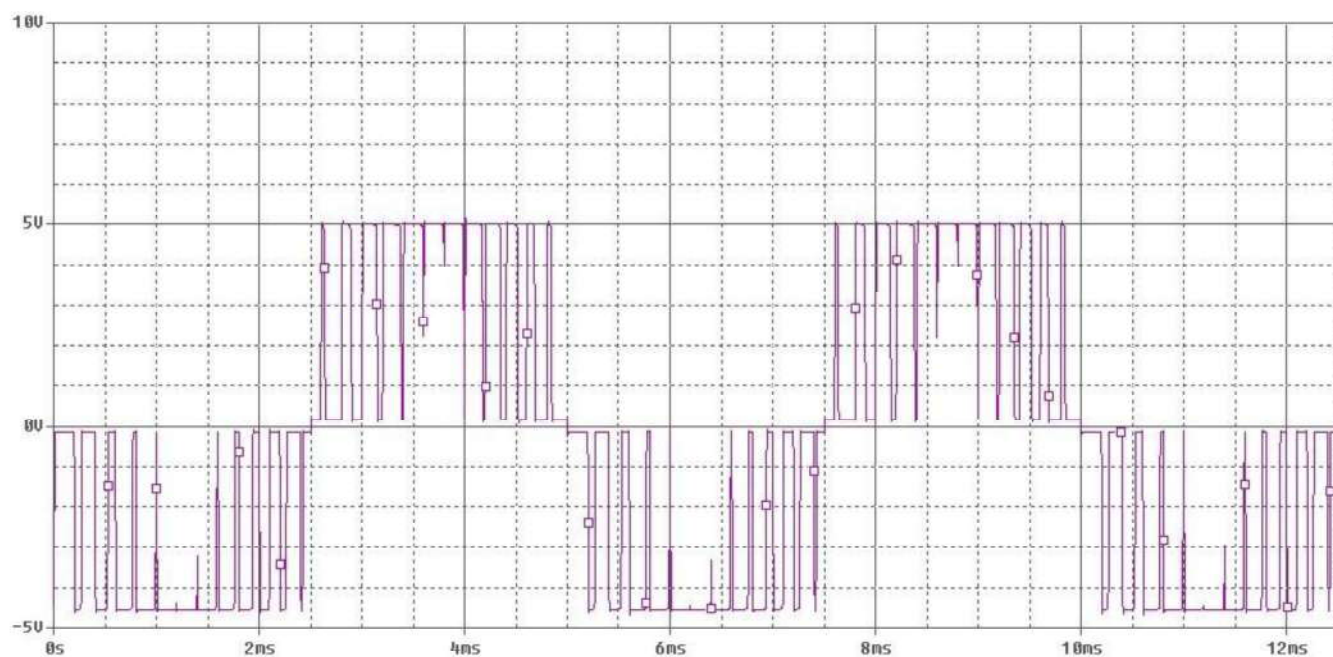


Рисунок 4.5 – Вигляд перетвореного шиму  $\pm 5$  В.

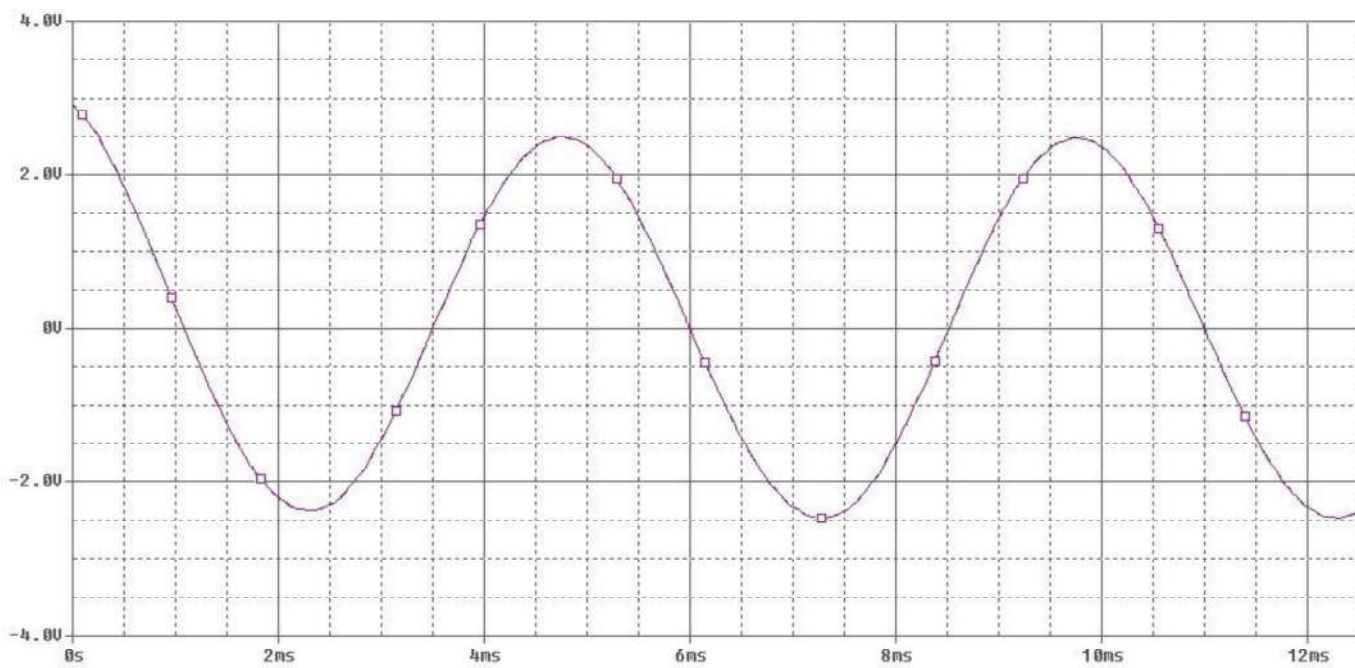


Рисунок 4.6 – Вигляд перетвореного сигналу перед надходженням до апаратного підсилувача.

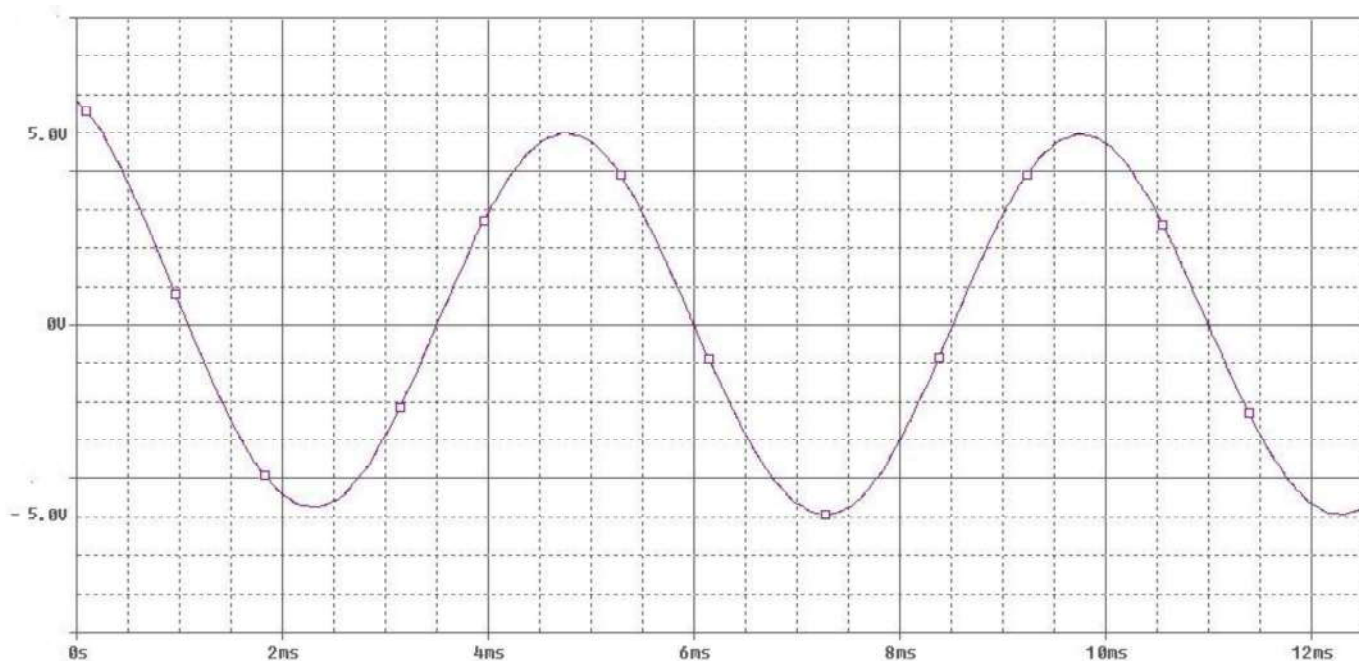


Рисунок 4.7 – Вигляд вихідного сигналу.

Спряження нової генераторної станції до аналогової розрахункової моделі УРМЕС-2М було виконане шляхом відключення лампової генераторної станції та приєднання до її вихідних затискачів нової станції. В якості блоку регулювальних параметрів використовується стандартна панель генераторної станції УРМЕС-2М, в якій використовуються змінні резистори R2 та R6.

Принципову схему реалізації даного процесу наведено на рис. 4.8.

### **Висновки до розділу**

В даному розділі була спроектована монтажна плата пристрою генерації сигналу напруги на основі мікроконтролера ATMEGA 48, що в результаті дало змогу замінити застарілу та ненадійну сельсинову генераторну станцію універсальної розрахункової моделі УРМЕС-2М на нову чотириполюсну. Це значно покращило технічні характеристики моделі. В цьому заключається новизна магістерської дисертації. Застосування нової генераторної станції дає можливість для подальшого вдосконалення моделі та її спряження з ЕОМ з використання пакету прикладних програм Matlab Simulink.

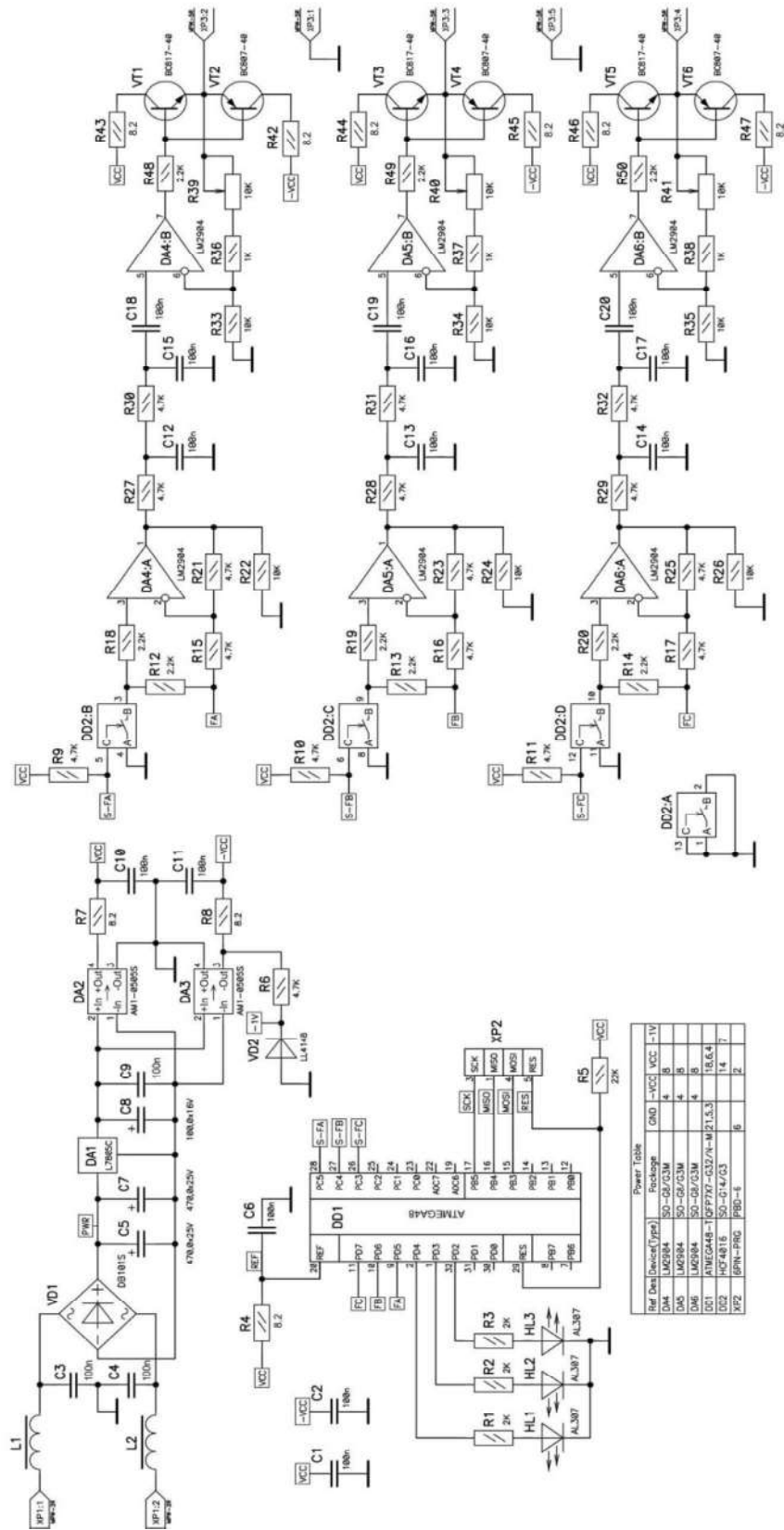


Рисунок 4.8 – принципова схема генератора синусоїдальної напруги.

## 5 РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ

### 5.1 Вступ. Загальні положення

Шунтувальний реактор – один із пристроїв компенсації реактивної потужності в електричній мережі. Він являє собою реактор паралельного вмикання, що призначений для компенсування ємнісного струму;

Шунтувальні реактори призначені для споживання надлишку реактивної потужності в енергосистемах. Найбільш розповсюдженими місцями розташування шунтувальних реакторів є розподільчі пристрої напругою 500 кВ і вище, для яких являється характерною наявність значних обсягів ємнісної потужності, яка стікає з повітряних ліній електропередавання (ПЛ). Недоліком шунтувальних реакторів являється залежність спожитої потужності, яка визначається режимом його роботи. З метою забезпечення можливості керування споживаною потужністю реактора застосовують керовані шунтувальні реактори, здатні змінювати в певних межах свою індуктивність [13]. Для шунтувальних реакторів (330-750 кВ) слід передбачати пристрої релейного захисту від наступних видів пошкоджень і ненормальних режимів роботи:

- а) однофазних і двофазних замикань на землю в обмотках і на висновках;
- б) виткових замикань в обмотках;
- в) зниження рівня масла;
- г) часткового пробоя ізоляції вводів, якщо вводи маслонаполненні.

В даному випадку буде розглянута захист шунтуючих реакторів на базі пристроїв RET 521 виробництва ТОВ «АВВ Силові і Автоматизовані Системи».

### 5.2 Пристрій захисту RET 521

Пристрій захисту RET 521 є універсальним багатофункціональним пристроєм з відкритою структурою і може застосовуватися для захисту шунтуючих реакторів (330 ÷ 750) кВ.

## 5 РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ

### 5.1 Вступ. Загальні положення

Шунтувальний реактор – один із пристроїв компенсації реактивної потужності в електричній мережі. Він являє собою реактор паралельного вмикання, що призначений для компенсування ємнісного струму;

Шунтувальні реактори призначені для споживання надлишку реактивної потужності в енергосистемах. Найбільш розповсюдженими місцями розташування шунтувальних реакторів є розподільчі пристрої напругою 500 кВ і вище, для яких являється характерною наявність значних обсягів ємнісної потужності, яка стікає з повітряних ліній електропередавання (ПЛ). Недоліком шунтувальних реакторів являється залежність спожитої потужності, яка визначається режимом його роботи. З метою забезпечення можливості керування споживаною потужністю реактора застосовують керовані шунтувальні реактори, здатні змінювати в певних межах свою індуктивність [13]. Для шунтувальних реакторів (330-750 кВ) слід передбачати пристрої релейного захисту від наступних видів пошкоджень і ненормальних режимів роботи:

- а) однофазних і двофазних замикань на землю в обмотках і на висновках;
- б) виткових замикань в обмотках;
- в) зниження рівня масла;
- г) часткового пробоя ізоляції вводів, якщо вводи маслонаповнені.

В даному випадку буде розглянута захист шунтуючих реакторів на базі пристроїв RET 521 виробництва ТОВ «АВВ Силові і Автоматизовані Системи».

### 5.2 Пристрій захисту RET 521

Пристрій захисту RET 521 є універсальним багатофункціональним пристроєм з відкритою структурою і може застосовуватися для захисту шунтуючих реакторів (330 ÷ 750) кВ.

Пристрій має високу надійність апаратного забезпечення і широкими можливостями конфігурації. Крім захисних, пристрій виконує ряд сервісних функцій:

- а) реєстратор аварійних режимів (цифровий осцилограф);
- б) реєстратор подій;
- в) самодіагностика пристрої (підвищення надійності функціонування);
- г) індикація параметрів режиму енергооб'єкта;
- д) зв'язок з системою моніторингу і збору даних / управління на підстанції.

Захист повинна підключатися до ТТ, з'єднаними в «зірку з нульовим проводом» (Yo) на всіх сторонах шунтуючого реактора.

Особливості RET 521 дозволяють виконати адаптацію параметрів спрацьовування до номінальних параметрів, як самого об'єкта, що захищається шунтуючого реактора, так і високовольтних трансформаторів струму і трансформатора напруги, тому для правильної роботи пристрою необхідно задавати параметри ТС і ТН, а також параметри об'єкта, що захищається.

Методика розрахунку параметрів спрацьовування захисних функцій пристрою RET 521, наведена в цьому розділі, відповідає Технічному довідковому посібнику і рекомендацій щодо розрахунку параметрів спрацьовування виробника.

Розрахунки рекомендується виконувати в наступному порядку:

- а) перевірка забезпечення цифрового вирівнювання струмів плечей захисту відповідно до п.В.1 Додатки В;
- б) перевірка забезпечення виконання вимог до ТС в схемах диференційної струмового захисту;
- в) параметрування даних про аналогових входах пристрою і про об'єкті, що підлягає відповідно;
- г) безпосередній розрахунок параметрів спрацювання функцій пристрою відповідно до методики, викладеної в даному розділі нижче.

У цьому прикладі показано розрахунок параметрів спрацювання пристрою RET 521 при його використанні для захисту шунтувального реактора типу 3хРОМБСМ-60000/500 з параметрами, представленими в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри, шунтувального реактора, що захищається

Найменування параметру	Умовне позначення	Одиниці виміру	Значення
Число фаз	–	–	1
Номинальна потужність	$S_{ном}$	МВА	60
Номинальна напруга	$U_{ном}$	кВ	$525/\sqrt{3}$

Коефіцієнти трансформації ТС, встановлених з боку лінійного введення ТС, ЛВ і нейтральних введів ТС, НВ1 і ТС, НВ2, рівні відповідно  $K_{ТС,ЛВ} = 1000/1$  и  $K_{ТС,НВ} = K_{ТС,НВ1} = K_{ТС,НВ2} = 600/1$ .

Параметри трансформаторів струму сторін ЛВ та НВ представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Параметри ТС сторін ЛВ та НВ.

Найменування параметру	Позначення параметру	Одиниці виміру	Значення
Параметри ТС зі сторони ЛВ			
Номинальна межа кратності	$K_{пр,ном}$	–	30
Опір вторинної обмотки ТС постійному струму в Т-подібній схемі заміщення	$Z_{обм2} \approx R_{обм2}$	Ом	4,52
Номинальний опір навантаження	$Z_{нг,ном}$	Ом	40,0
Опір навантаження	$Z_{нг} \approx R_{нг}$	Ом	4,41
Параметри ТС зі сторони НВ			
Номинальна межа кратності	$K_{пр,ном}$	–	18
Опір вторинної обмотки ТС постійному струму в Т-подібній схемі заміщення	$Z_{обм2} \approx R_{обм2}$	Ом	0,39
Номинальний опір навантаження	$Z_{нг,ном}$	Ом	2,0
Опір навантаження	$Z_{нг} \approx R_{нг}$	Ом	1,53

Перед знаходження параметрів диференційного струмового захисту необхідно перевірити ряд параметрів, наведених нижче:

а) перевірка забезпечення цифрового вирівнювання струмів плечей захищається ШР;

б) перевірка забезпечення вимог до ТС в схемах диференційної струмового захисту;

- параметрування даних про аналогових входах і про захищається ШР;

Вважатимемо, що наведені вище обмеження виконуються і будемо проводити розрахунок повздожньої та поперечної диференційних захистів шунтувальних реакторів. Початкова схема шунтувального реактора ШР і прилеглої мережі приведена на малюнку 5.1.

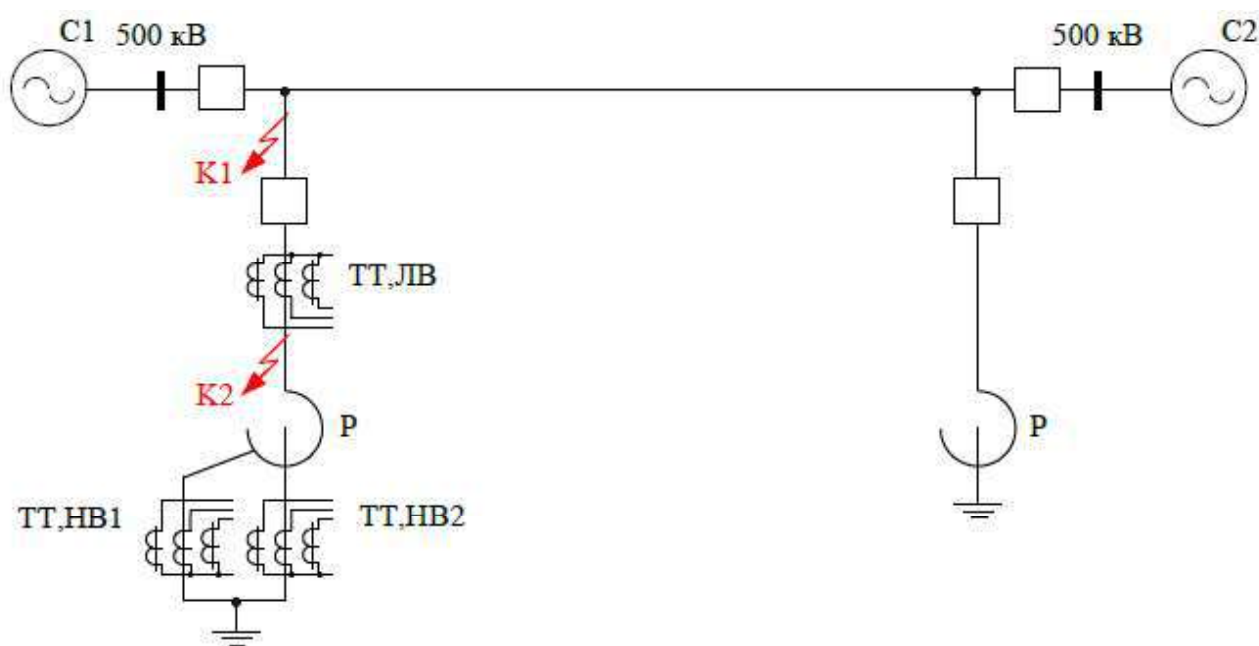


Рисунок 5.1 – Схема захисного ШР та прилеглої мережі.

Повздожній диференційний захист використовується для запобігання міжфазного пошкодження, а поперечний захист – для уникнення міжвиткового замикання в реакторі на одній фазі.

### 5.3 Розрахунок та вибір параметрів спрацювання повздовжнього диференційного струмового захисту шунтувального реактору

Повздовжній диференційний струмовий захист виконується пофазної і з боку лінійного введення підключається до ТС, вбудованим в високовольтний ввід, а з боку нейтралі - або до ТС, вбудованим в паралельні гілки обмотки шунтируючого реактора з боку введів до нейтралі ШР, або до виносних ТС з боку введів до нейтралі шунтируючого реактора

Функція диференційної струмового захисту в пристрої RET 521 позначається DIFP і включає диференціальну захист з гальмуванням і диференціальну відсічення.

Захист виконується пофазнонезалежно і використовує струми з усіх боків, що захищається. Токи сторін наводяться до основної сторони і порівнюються один з одним в цифровому реле.

Вибір опорної (базисної) сторони здійснюється захистом автоматично: приймається сторона лінійного введення. Для гарантованого приведення виміряних струмів до сторони лінійного введення необхідно ставити потужність цієї обмотки більше номінальних потужностей інших обмоток на мінімальне значення 0,1 МВА. Далі номінальний струм опорної боку позначається  $I_{ном}$ , опор. розрахунок диференційних струмів в захисті проводиться з урахуванням вирівнювання модулів і зсуву фаз струмів

Параметр Активізація приймається рівним "On" для активізації функції диференційного захисту.

Відносний початковий диференційний струм спрацювання  $I_{dmin}$  розраховується по умові налагодження від струмів небалансу в режимі включення шунтуючого реактора за виразом

$$I_{dmin} = K_{ОТС} K_{вб розр} I_{гальм розр} \cdot 100\% = 1,2 \cdot 0,31 \cdot 1 \cdot 100\% = 37,2\%$$

де  $K_{ОТС} = 1,2$  - коефіцієнт відбудови;

$K_{вб розр}$  - розрахунковий коефіцієнт небалансу, розрахований за виразом

$$K'_{\text{вб розр}} = \sqrt{(K'_{\text{пер}} \varepsilon_{\text{ТС}} + \varepsilon_{\text{ПТС}})^2 + 2\Delta f_{\text{вир}} + \Delta f_{\text{вир}}^2} =$$

$$= \sqrt{(3 \cdot 0,1 + 0)^2 + 2 \cdot 0,03 + 0,03^2} = 0,31;$$

$K'_{\text{пер}}$  - коефіцієнт, що враховує перехідний процес. Приймається рівним  $K'_{\text{пер}} = 3,0$ , тому що з боку НВ значення наведеної граничної кратності  $K'_{\text{пр}} < 90$  (см.п.2.7.3);

$\varepsilon_{\text{ТС}} = 0,10$  - повна відносна похибка трансформаторів струму в усталеному режимі;

$\varepsilon_{\text{ПТС}}$  - повна відносна похибка проміжних трансформаторів струму. Приймається рівною  $\varepsilon_{\text{ПТС}} = 0$ , тому що ПТС не використовуються;

$\Delta f_{\text{вир}} = 0,03$  - відносна похибка вирівнювання струмів плечей

$I_{\text{гальм розр}} = 1,0$  - відносний розрахунковий гальмівний струм.

Отримане значення параметра спрацьовування 37,2% більше мінімального рекомендованого значення 20%. Параметр спрацьовування  $I_{d \text{ min}}$  приймається рівним 38%.

Номер гальмівної характеристики CharactNo без розрахунку приймаємо рівним 4.

Мінімальний струм при КЗ на стороні НВ дорівнює номінальному, тобто 198 А.

При цьому диференційний і гальмівний струми рівні:

$$I_{\text{диф розр}} = |I_1 + I_2| = |198 + 0| = 198 \text{ А},$$

$$I_{\text{гальм розр}} = \max(I_1, I_2) = \max(198, 0) = 198 \text{ А}.$$

Тоді розрахункові значення відносних диференційного і гальмівного струмів рівні відповідно:

$$I'_{\text{диф розр}} = \frac{I_{\text{диф розр}}}{I_{\text{ном опор}}} = \frac{198}{198} = 1,0,$$

$$I'_{\text{гальм розр}} = \frac{I_{\text{гальм розр}}}{I_{\text{ном опор}}} = \frac{198}{198} = 1,0.$$

Отриманий відносний розрахунковий гальмівний струм менше початкового струму гальмування  $I'_{\text{гальм розр}} = 1,0 < 1,25$ . Тоді коефіцієнт чутливості при мінімальному струмі КЗ на виводах НВ шунтируючого реактора дорівнює:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I'_{\text{диф розр}}}{I_{\text{d min}} / 100\%} = \frac{1,0}{38\% / 100\%} = 2,6 > 2,0.$$

Отриманий коефіцієнт чутливості  $K_{\text{ч}} = 2,6$  більше мінімального допустимого значення 2,0, тобто необхідна чутливість при вибраних параметрах гальмівної характеристики забезпечується.

При КЗ на виводах ЛВ відносні диференційні і гальмівні струми перевищують значення 1,25, що відповідає роботі захисту на похилих ділянках. Перевірка чутливості в цьому випадку не потрібно.

Диференційна відсічення являється грубим органом без гальмування, що реагує на першу гармоніку диференційного струму. Для шунтируючого реактора параметр спрацьовування диференційного відсічення  $I_{\text{dune}}$  без розрахунку приймається рівним 200%.

Параметр `StabByOption`, що визначає алгоритм блокування захисту по другій гармоніці, приймається рівним «Завжди».

Блокування диференційного захисту по другій гармоніці реагує на співвідношення амплітуд другій і першій гармонійних складових диференційного струму. Параметр спрацьовування блокування  $I2 / I1\text{ratio}$  приймається рівним 40%.

Блокування диференційного захисту по п'ятій гармоніці реагує на співвідношення амплітуд п'ятої та першої гармонік диференційного струму. Параметр спрацьовування блокування  $I5 / I1\text{ratio}$  приймається рівним 40%.

## 5.4 Розрахунок і вибір параметрів спрацьовування поперечного диференційного струмового захисту

Відносний струм спрацьовування поперечної диференційної струмового захисту розраховується по умові налагодження від струму небалансу в режимі включення ШР за виразом:

$$I_{\text{диф уст}} = K_{\text{ОТС}} K_{\text{вб розр}} I_{\text{розр}} + \Delta I = 1,1 \cdot 0,07 \cdot 0,5 + 0,024 = 0,063,$$

де  $K_{\text{ОТС}} = 1,1$  - коефіцієнт відбудови;

$K_{\text{вб розр}}$  - розрахунковий коефіцієнт небалансу. Розраховується за висловом

$$K_{\text{вб розр}} = \sqrt{(K'_{\text{пер}} K_{\text{одн}} \varepsilon_{\text{ТС}} + \varepsilon_{\text{ПТС}})^2 + 2\Delta f_{\text{вир}} + \Delta f_{\text{вир}}^2} = \\ = \sqrt{(2,5 \cdot 0,5 \cdot 0,05 + 0)^2 + 2 \cdot 0,03 + 0,03^2} = 0,07;$$

$K'_{\text{пер}}$  - коефіцієнт, що враховує перехідний процес. Приймається рівним  $K'_{\text{пер}} = 2,5$ , тому що значення наведеної граничної кратності для ТС однієї зі сторін становить  $K'_{\text{пр}} < 90$  (см.п.2.7.3);

$K_{\text{одн}} = 0,5$  - коефіцієнт однотипності;

$\varepsilon_{\text{ТС}} = 0,05$  - повна відносна похибка трансформаторів струму, до яких підключається захист;

$\varepsilon_{\text{ПТС}}$  - повна відносна похибка проміжних трансформаторів струму. Приймається рівною  $\varepsilon_{\text{ПТС}} = 0$ , тому що ПТС не використовуються;

$\Delta f_{\text{вир}} = 0,03$  - відносна похибка вирівнювання струмів плечей  $I_{\text{розр}} = 0,5$  - максимальний відносний струм включення;

$\Delta I$  - різниця струмів в паралельних гілках нейтралі. Попередньо приймаємо рівним максимальному значенню 0,024, яке в подальшому має бути уточнено в процесі експлуатації.

Для роботи поперечної диференційної струмового захисту на базі функції ТОС використовується висока ступінь (High). Уставка по струму спрацьовування задається за допомогою параметра IsetHigh в процентах. З урахуванням округлення до цілих і з урахуванням мінімального можливого значення (10%) приймається рівним 10%.

Параметри функції ТОС, які мають дорівнювати значенням за замовчуванням, в таблиці не наведено [14].

На рис.5.2 наведено загальний вигляд гальмівної характеристики функції диференційного захисту.

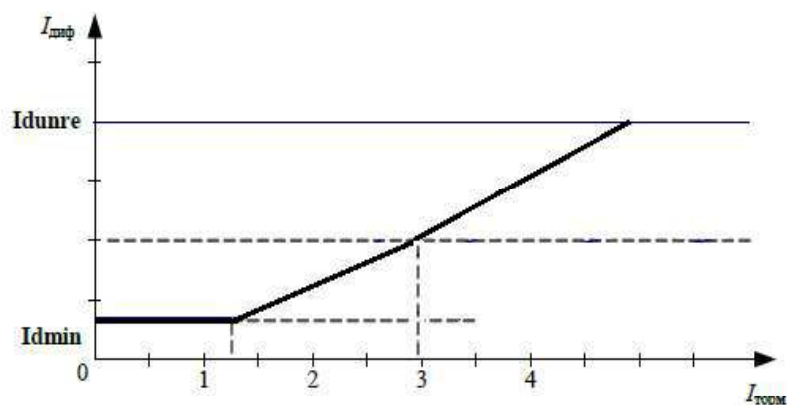


Рисунок 5.2 – Гальмівна характеристика функції диференційного захисту приладу RET 521

Вибрані параметри функції диференційного захисту приладу наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Перелік параметрів спрацювання пристрою RET 521

Параметри спрацювання	Одиниці виміру	Діапазон	Крок	За замовчування	Розрахункове значення
Функція продольного диференційного захисту DIFP					
Активізація	–	Вимк Вкл	–	Вимк	Вкл
Idmin	% від $I_{ном,опор}$	10 – 50	1	40	39
CharactNo	–	1, 2, 3, 4, 5	–	5	4
Idunre	% від $I_{ном,опор}$	200 – 2500	1	600	200
1	2	3	4	5	6

Продовження таблиці 5.3

1	2	3	4	5	6
StabByOption	–	За умови завжди	–	За умови	завжди
I2/I1	%	10 – 25	1	15	40
I5/I1	%	10 – 50	1	25	40
ZSCSub	–	Вимк Вкл	–	Вкл	Вимк
CrossBlock	–	Вимк Вкл	–	Вкл	Вимк
Функція поперечного диференційного захисту ТОС					
Активізація	–	Вимк Вкл	–	–	Вкл
IrUserDef	A	1 – 99999	1	–	198
BlockLow	–	Вимк Вкл	–	–	Вкл
BlockHigh	–	Вимк Вкл	–	–	Вимк
IsetHigh	% от IrUserDef	10 – 2000	1	–	10
tDefHigh	с	0,03 – 240,00	0,01	–	0,03
DirectionHigh	–	Ненапр.; В прямому напрямку; В	–	–	Ненапр
Функція контролю ізоляції вводу TEF1					
Активізація	–	Вимк Вкл	–	–	Вкл
IrUserDef	A	0,1 – 99999,0	0,1	–	0,5
BlockLow	–	Вимк Вкл	–	–	Вимк
IsetLow	%	5 – 2000	1	–	15
tDefHigh	с	0,03 – 240,00	0,01	–	1,5
BlockHigh	–	Вимк Вкл	–	–	Вкл
IsetHigh	% від IrUserDef	5 – 2000	1	–	5
tDefHigh	с	0,03 – 240,00	0,01	–	9
1	2	3	4	5	6

Закінчення таблиці 5.3

1	2	3	4	5	6
Функція першого ступеня ненаправленої ТЗНП ТЕF2					
Активізація	–	Вимк Вкл	–	–	Вкл
IrUserDef	A	0,1 – 99999,0	0,1	–	198
BlockLow	–	Вимк Вкл	–	–	Вкл
BlockHigh	–	Вимк Вкл	–	–	Вимк
IsetHigh	% від IrUserDef	5 – 2000	1	–	126
tDefHigh	c	0,03 – 240,00	0,01	–	1,8
Функція другого ступеня ненаправленої ТЗНП ТЕF2					
Активізація	–	Вимк Вкл	–	–	Вкл
IrUserDef	A	0,1 – 99999,0	0,1	–	198
BlockLow	–	Вимк Вкл	–	–	Вкл

### Висновки до розділу

В даному розділі розглянуто основні пошкодження та ненормальні режими роботи шунтувальних реакторів. Проведений розрахунок та вибір уставок спрацювання диференційного захисту шунтувального реактора типу 3xPOMБСМ-60000/500 на базі блоку мікропроцесорного релейного захисту RET 521. Приведено розрахунок повздовжнього та поперечного диференційного захисту для шунтувальних реакторів. Основні показники зведено до таблиці.

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ УРМЕС-2М**

Проведення лабораторних робіт, де студенті мають справу з електричним струмом, з використанням будь-якої техніки потребує обов'язкового дотримання правил безпеки при експлуатації лабораторних установок.

Мета дослідження – розробка заходів щодо запобігання або зменшення впливу на студентів шкідливих і небезпечних виробничих чинників, при експлуатації лабораторного стенду УРМЕС-2М.

Об'єкт досліджень – проведення лабораторних робіт з використанням установки УРМЕС-2М.

### **6.1 Технічні характеристики універсальної розрахункової моделі УРМЕС-2М**

Універсальна розрахункова модель УРМЕС-2М - це спеціалізований навчальний об'єкт призначений для проведення практичних занять в рамках курсів "Електричні системи та мережі". Головним небезпечним фактором при роботі з даним лабораторним стендом являється електричний струм. Універсальна розрахункова модель енергосистем УРМЕС-2 змінного струму призначена для аналогового моделювання енергетичних систем і дослідження режимів їх роботи при проектування ті експлуатації.

Технічні характеристики розрахункової моделі УРМЕС 2М:

- а) клас точності – 2,5;
- б) робоча частота – 200 Гц;
- в) живлення від мережі трьох фаз - 220/380 В, 50 Гц;
- г) споживана потужність – 1,5 кВт.

До складу моделі входять:

- а) 12 сельсинових генераторних станцій (СГС);

- б) 12 ручних навантажувальних елементів (НЕ);
- в) 12 апаратів постійних вольт-ампер (АНПВ);
- г) 36 трансформаторних елементів (ТЕ);
- д) 84 лінійних елементів (ЛЕ);
- е) ємнісних елементів (ЄЕ);
- ж) 2 розділових трансформатора (РТ);
- з) 3 комутаційні панелі (КП);
- и) 3 панелі лінійних опорів (ПЛО);
- к) 3 комплекти вимірювальних приладів (ПРМ-2).

Корпус установки металічний і має наступні габарити:

довжина – 2760 мм;

ширина – 1510 мм;

висота – 2312 мм;

Маса лабораторного стенду – 1800 кг.

## **6.2 Дослідження та аналіз умов праці на робочих місцях електротехнічних працівників**

Небезпека експлуатації установки в лабораторії зумовлюється можливістю враження електричним струмом під час:

- а) дотику до струмовідних частин під напругою;
- б) дотику до металевих частин корпусу стенду, що не заземлені[15];

Роботи з моделювання режимів електричних мереж на електроустановці УРМЕС-2 проводяться в лабораторії площею 30 м<sup>2</sup>. В лабораторії одночасно мають змогу працювати 6 чоловік (1 група), що забезпечує виконання умови робочої площі в 4,5 м<sup>2</sup> на одного студента. Меблі та лабораторне устаткування займають 15% об'єму приміщення. Температура в лабораторії підтримується на рівнів межах 22-24 °С. Лабораторія має 2 вікна (звичайні з дерев'яними рамами), одні двері з шириною проходу 1,5 м, зовнішню стіну. Робота у лабораторії триває 1 год. 30 хв. для 1 групи студентів [16].

Живлення для лабораторії здійснюється через трифазну мережу з лінійною напругою  $U_n = 220\text{В}$  (відповідно  $U_\phi = 127\text{В}$ ) з глухозаземленою нейтраллю.

### **6.3 Вибір і розрахунок технічних засобів і заходів безпеки до електроустановки УРМЕС -2М**

До засобів захисту розрахункової моделі відносяться засоби аварійного відключення (УЗО), запобіжники перенапруг, автомати для негайного відімкнення установки в разі виникнення аварійного режиму.

Дана розрахункова модель знаходиться в експлуатації вже декілька десятків років. Тому для уникнення пошкоджень у вигляді коротких замикань та ураження студентів електричним струмом, доцільно розрахувати параметри та обрати новий сучасний кабель для живлення даної установки.

#### **6.3.1 Розрахунок кабелю для живлення розрахункової моделі УРМЕС-2М**

Виходячи з технічних характеристик моделі розрахуємо струмове навантаження. Струм в нормальному режимі становить:

$$I_{\text{ном}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{1,5}{\sqrt{3} \cdot 0,22} = 3,93 \text{ А}$$

Для заданої установки обираємо провід марки ПВС 5 х 0,75 Одеського кабельного заводу. Застосування 5-жильного дозволяти проводити дослідницькі роботи на установці безпечніше, оскільки являється можливість заземлення розрахункової моделі. В таблиці 6.1 наведені параметри даного кабелю.

Таблиця 6.1 – Параметри кабелю ПВС 5 х 0,75

Параметр	Значення
Кількість жил	5 шт.
Переріз жили	0,75 мм <sup>2</sup>
Струмове навантаження	6 А
Потужність в 3-ч фазній мережі	3,9 кВт
Опір жили	26 Ом/км
Матеріал жили	Мідна, кругла, багатопроволочна
Ізоляція	Полівінілхлоридна
Оболочка	Шланговий ПВХ, пластикат

По отриманому струму вибираємо кабель перерізом:  $F=0,75 \text{ мм}^2$ .

Тривалий допустимий струм для цього перерізу на одну фазу становить:

$$I_{\text{доп}} = 6 \text{ А.}$$

Для мідних даного провідника перевірка по нагріву не являється обов'язковою, оскільки для мідних провідників до 6 мм<sup>2</sup> струм за умов нагріву приймається рівним струму довготривалого режиму.

Виконаємо перевірку вибраного перерізу кабелю в після аварійного режиму:

$$I_{\text{ав}} = 3,93 \text{ А} < I_{\text{доп}} \cdot 1,3 = 6 \cdot 1,3 = 7,8 \text{ А.}$$

Так як умова виконується вибираємо кабель перерізом 0,75 мм<sup>2</sup> з допустимим тривалим струмом 6 А.

Визначимо втрати напруги в нормальному та після аварійному режимі.

Для кабелю даного перерізу погонний активний опір:  $r_0=0,26 \text{ Ом/км}$ .

Довжина кабельної лінії:  $L=20 \text{ м}$ .

Визначимо втрату напруги в нормальному режимі:

$$\Delta U = \frac{P \cdot r_0 \cdot L}{10 \cdot U_{\text{ном}}^2} = \frac{1,5 \cdot 0,26 \cdot 0,2}{10 \cdot 0,22^2} = 0,16.$$

Перевірка допустимої втрати напруги виконується  $0,16 \% < 5 \%$ .

В аварійному режимі допустима втрата напруги в 10 %, а оскільки  $0,16 \% < 10 \%$ , робимо висновок, що вибраний переріз кабельної лінії задовольняють усім вимогам.

Заземлення установки виконується через заземлення в лабораторії. Оскільки в лабораторії знаходяться 3 установки типу УРМЕС-2, то необхідне використання використати трифазний диференційний автомат з номінальним струмом  $I_{\text{ном}} = 16\text{А}$ .

### 5.3.2 Розрахунок УЗО для універсальної розрахункової моделі УРМЕС-2М

Відповідно до ДБН [17] сумарний струм витоку мережі з урахуванням приєднаних стаціонарних і переносних електроприймачів в нормальному режимі роботи не повинен перевершувати  $1/3$  номінального струму УЗО. За відсутності даних струм витоку електроприймачів слід приймати з розрахунку  $0,4 \text{ мА}$  на  $1 \text{ А}$  струму навантаження, а струм витоку мережі - з розрахунку  $10 \text{ мкА}$  на  $1 \text{ м}$  довжини фазного провідника.

Розраховуємо УЗО для універсальної розрахункової моделі УРМЕС-2М. Розрахунок будемо проводити для 3 установок, розміщених в лабораторії та об'єднані спільною мережею. Розрахунковий струм становитиме:

$$I_{\text{розр}} = 12 \text{ А.}$$

Сумарна довжина провідників, що знаходиться під напругою мережі УРМЕС-2М:

$$L = 14,5 \text{ м.}$$

Струм витоку становить:

$$I_{\text{вит}} = 0,4 \cdot L = 0,4 \cdot 14,5 = 5,8 \text{ мА}$$

Струм витоку мережі  $I_{\text{вит.мер}}$  визначимо по формулі:

$$I_{\text{вит.мер}} = 0,01 \cdot L = 0,01 \cdot 14,5 = 0,145 \text{ мА}$$

Сумарний струм витоку визначаємо за формулою:

$$I_{\text{вит.сум}} = I_{\text{вит}} + I_{\text{вит.мер}} = 5,8 + 0,145 = 5,945 \text{ мА}$$

Тоді мінімальне значення диференціального струму УЗО складатиме:

$$I_{\text{УЗО}} = 5,945 = 17,835 \text{ мА}$$

Із стандартної шкали диференційних струмів УЗО обираємо найближче вище значення в 30 мА.

Таким чином, для захисту студентів від враження електричним струмом та виникнення пожежі, в якості захисного пристрою лабораторної установки УРМЕС-2М обирається трифазний диференційний автомат з номінальним струмом  $I_{\text{ном}} = 16 \text{ А}$  та диференційним струмом  $I_{\text{УЗО}} = 30 \text{ мА}$ .

#### **6.4 Вибір заходів і засобів безпеки у надзвичайних ситуацій**

Експлуатація розрахункової моделі УРМЕС-2М може призвести до виникнення аварійних режимів, зумовлених:

- а) пожежами,
- б) короткими замиканнями[18].

Виходячи із вище згаданих небезпек використання розрахункової моделі, передбачено наступні заходи для забезпечення безпечного використання даного стенду, а також заходи для швидкого усунення надзвичайних ситуацій, що може забезпечити збереження здоров'я експлуатаційної бригади:

- а) системи пожежогасіння;
- б) аварійне відключення електричного струму;
- в) евакуація персоналу.

Всі працюючі в лабораторії мають бути ознайомлені з правилами безпеки при роботі з розрахунковою моделлю, а також засвідчити підписом в журналі безпеки те, що вони обізнані і згодні з цими правилами.

Причинами виникнення пожежі можуть бути наступні фактори:

а) несправність електропроводки, комутуючих реле, які можуть призвести до короткого замикання, нагрівання силових кабелів або пробую ізоляції;

б) неправильне складання електричної схеми лабораторної роботи;

в. використання пошкоджених (несправних) електроприладів;

У разі виникнення пожежі:

а) негайно відключити головний рубильник;

б) викликати пожежну допомогу;

в) вжити заходів до ліквідації пожежі, первинними і підручними засобами.

Лабораторія має обов'язково бути обладнана пожежною сигналізацією, яка у разі виникнення пожежі, негайно посилає сигнал на увімкнення протипожежної системи.

Найважливішу роль при ліквідації пожежі в лабораторії відіграють вогнегасники різних типів: водяні, водо-пінні, порошкові, вуглекислотні, газові.

Найбільш перспективними є порошкові вогнегасники, які застосовують для гасіння лужних металів, ЛЗР і ТР, електрообладнання, що горить під напругою до 1000В, твердих та газоподібних речовин.

Вуглекислотні вогнегасники застосовуються для гасіння загорянь на машинах, автомобілях і для невеликих об'ємів нафтопродуктів, а також електроустановок під напругою до 1000В.

У корпусі вогнегасника міститься вуглекислий газ у рідкому стані під високим тиском 6МПа (ручні).

Вибір типу вогнегасника визначається розмірами загоряння і можливих осередків пожеж. У лабораторії доцільно розміщувати 1 вуглекислотний вогнегасник типу ОП-5, оскільки в ній знаходяться декілька установок типу УРМЕС-2, та лабораторія має площу 30 м<sup>2</sup>.

Для безпечної роботи та забезпечення збереження здоров'я працівників, в лабораторії розроблено спеціальний план евакуації при виникненні надзвичайної ситуації. Лабораторія обладнана 1 аварійним виходом з шириною проходу 1,5 м. Якщо студент вперше виконує роботу в лабораторії, він має спочатку ознайомитися з

правилами безпечної роботи, а також з планом евакуації у разі надзвичайної ситуації. При невиконанні цих вимог, студент не має права бути допущеним до роботи на розрахунковій моделі. Те, що студент ознайомлений з правилами безпечної роботи з установкою, він має засвідчити підписом в журналі безпеки лабораторії.

### **Висновки до розділу**

Основними профілактичним заходами під час експлуатації та ремонту стенду є: контроль і профілактика пошкоджень ізоляції, контроль заземлення, перевірка засобів захисного відключення, користуватися діелектричними рукавицями та слюсарно-монтажним інструментом з ізольованими рукоятками. Для захисту студентів від ураження електричним струмом та виникнення пожежі запропоновано встановити захисний пристрій лабораторної установки УРМЕС-2М - трифазний диференційний автомат з номінальним струмом  $I_{\text{ном}} = 16\text{А}$  та диференційним струмом  $I_{\text{узо}} = 30\text{ мА}$ . Для живлення установки замінено старий кабель. Вибрано 5-жильний кабель марки ПВС 5 x 0,75 який прокладено під підлогою.

## 7 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ УРМЕС-2М

### 7.1 Вступ

Енергетика є найважливішою структурною складовою економіки України, що забезпечує життєдіяльність продуктивних сил і зумовлює добробут населення.

Підготовка та вдосконалення висококваліфікованих кадрів, озброєних сучасними знаннями, практичними навичками являється однією з найважливіших завдань навчальних закладів. Одним з напрямків яким має йти це вдосконалення, являється розвиток і зміцнення матеріало-технічної бази навчальних закладів.

Використання апаратних засобів і методів інформаційних технологій створює нові перспективи у втіленні ідей розвивального навчання, особливо при проведенні лабораторних практикумів з предметів спеціалізованого спрямування. Необхідність використання в практиці педагогічної діяльності лабораторних робіт і практикумів обумовлено і тим, що експериментальний метод є засобом отримання інформації, головні властивості його - навчання в діяльності, доказовість науки, наочність джерела знань про довкілля. Таким чином, практикуми є важливою умовою активізації процесів розумової діяльності студентів, виховання стійкого інтересу до предметів, що вивчаються, а також формування уявлень про практичне застосування отриманих теоретичних знань.

Аналогові обчислювальні моделі використовують неперервну форму представлення інформації та аналітичних принципів її переробки, при реалізації якого кожній аналітичній залежності між математичними змінними відповідає подібний аналітичний опис зв'язку між машинними змінними.

Неперервна форма представлення інформації і аналітичний принцип її обробки забезпечують безперервне розв'язку математичної задачі на АОМ і високу швидкодію. Проте точність роботи АОМ обмежена точністю виготовлення її окремих елементарних блоків і стабільністю їх характеристик у процесі розв'язку

задачі. Вказані якості АОМ разом з відносно малим часом і простотою підготовки задачі для машинного розв'язку, простотою обслуговування і нескладною конструкцією вигідно вирізняють АОМ від інших обчислювальних машин тих випадках, коли не вимагається високої точності й універсальності.

Універсальна розрахункова модель енергосистем УРМЕС-2М змінного струму призначена для аналогового моделювання енергетичних систем і дослідження режимів їх роботи при проектуванні та експлуатації. На розрахунковій моделі безпосередньо моделюється лише енергетична схема енергетичної системи та опору її елементів.

Дана розрахункова модель є гарним інструментом для майбутніх спеціалістів для проведення лабораторних робіт та здобуття досвіду у моделюванні режимів. Але дані установки на сьогодні потребують значної модернізації, оскільки знаходяться у використанні вже досить довгий час.

## 7.2 Опис ідеї проекту

Запропонована ідея удосконалення даної розрахункової моделі є модернізація генератора шляхом заміни вже застарілого лампового генератора на генератор синусоїдальної напруги на мікроконтролері, який буде спеціально запрограмований для правильної синхронізації з установкою.

Таблиця 7.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Заміна лампового генератора на сучасний генератор синусоїдальної напруги на мікроконтролері	Удосконалення розрахункової моделі УРМЕС-2М	1.Зменшення габаритів установки та похибки вимірювань
		2. Можливість програмування мікроконтролера згідно із завданням викладача
		3.Можливість комп'ютерної синхронізації установки

З існуючим на сьогодні розмаїттям мікроконтролерів та програмного забезпечення до них, реалізація даної модернізації не являється складною у виконанні. В даному випадку було обрано мікроконтролер ATMEGA 48, оскільки він являється оптимальним для виконання поставленої задачі, має а також доступним для широкого загалу користувачів.

Встановлений на даний час ламповий генератор у розрахунковій моделі являється застарілою технологією і потребує значної модернізації. Основні недоліки лампового генератора:

а) великі габарити установки;

б) велика похибка вимірювання, оскільки наповнення самого генератора на сьогодні застаріле.

Таблиця 7.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		ATMEGA 48	AtTiny13 A	MSP430F2101PW	LPC1111FHN33			
1.	Продуктивність (MIPS)	20	20	16	0.9*50	Низька продуктивність, порівняно з більш дорогими конкурентами	Опосередковане значення продуктивності	Легка установка та підключення до розрахункової моделі
2.	Зручність у користуванні (за оцінками експертів) в балах	9	7	10	8	-	-	Доступність програмних комплексів
3.	Ціна грн.	48	26	53	52	Невисокий функціонал,	Доступність	Низька вартість, порівняно з конкурентами
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Закінчення таблиці 7.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4.	ОЗУ (кб)	4	1	1	2	-	-	Найбільше значення оперативної пам'яті

### 7.3 Технологічний аудит ідеї проекту

На рис.7.1, рис.7.2, рис.7.3 приведено зображення вже встановленого генератора у розрахунковій моделі.

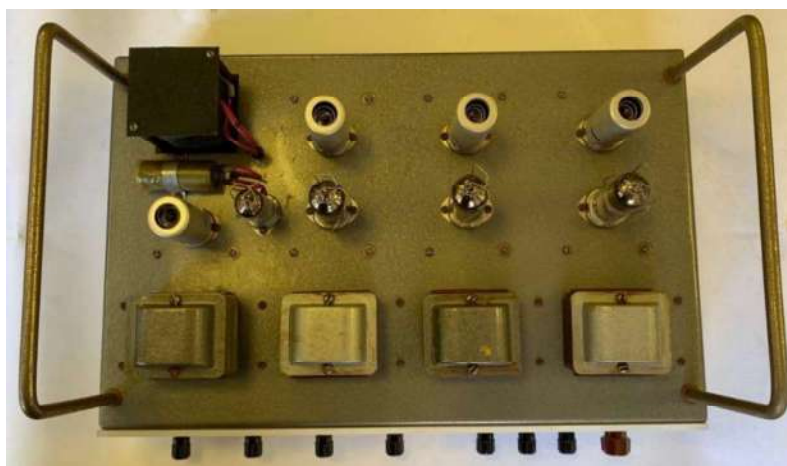


Рисунок 7.1 – Ламповий генератор (вид зверху).



Рисунок 7.2 – Ламповий генератор (вид спереду).

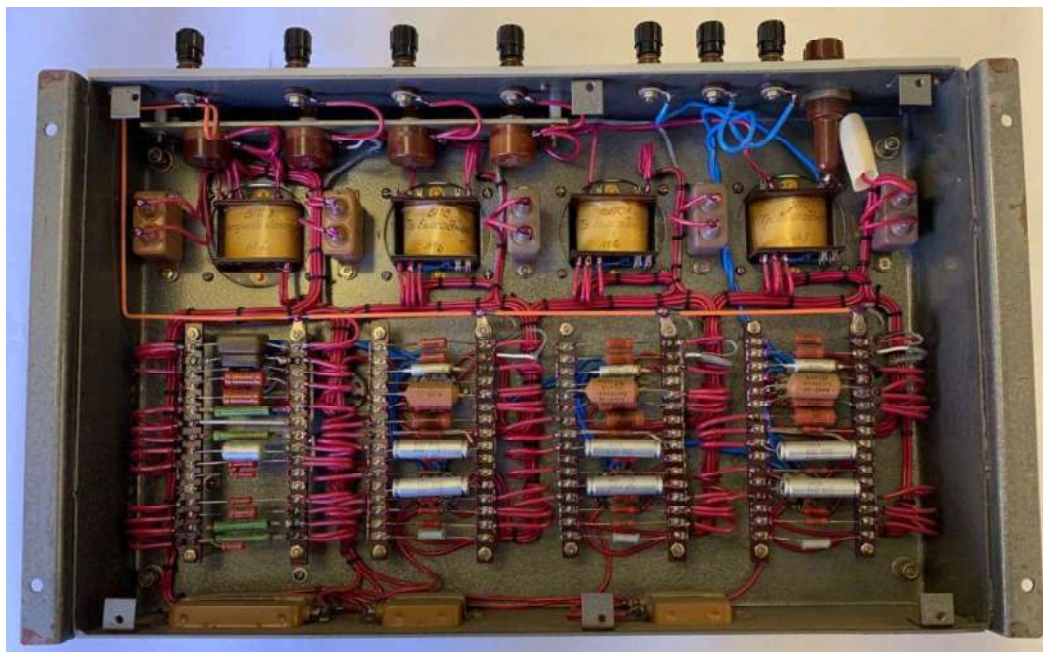


Рисунок 7.3 – Ламповий генератор (вид знизу).

Габаритні розміри пристрою: 42,5/24/10,4 см.

Вага: 4 кг.

Оскільки в конструкції генератора приведені застарілі комплектуючі, то неможливо зробити фінансову оцінку щодо його вартості. Зважаючи на те, що генератор складається з багатьох комплектуючих і має у своїй конструкції велику кількість металу, можна припустити, що вартість такого устаткування набагато перевищує ті затрати, що можуть бути задіяні при використанні мікроконтролерів.

Запропоноване удосконалення у вигляді заміни старого устаткування на генератор на мікроконтролері несе за собою низку переваг:

а) значно зменшуються розміри самого генератора. Старий ламповий генератор має суттєві геометричні розміри та велику вагу, порівняно з платою. Це дає змогу набагато легше розмістити новий пристрій у розрахунковій моделі.

б) генератор синусоїдальної напруги на мікроконтролері являється більш доцільним з економічної точки зору. Дане удосконалення не потребує великих фінансових вкладів. Також на сьогодні кількість мікроконтролерів, що представлені на світовому ринку – безмежна, тому, при впровадженні таких

удосконалень, не повинно виникати ніяких труднощів у пошуку комплектуючих частин.

в) даний пристрій має змогу бути запрограмованим різним чином, що розширює можливості його використання. Аналогові установки не мають можливості виконувати декілька різних функцій, на відміну від цифрових. Раніше, для різних завдань мав би застосовуватися конкретний агрегат. На сьогодні один цифровий прилад має змогу виконувати функції декількох приладів, не потребуючи при цьому конструктивних змін.

Даний пристрій являє собою один зі способів модернізації вже існуючого обладнання, що може реалізованим для моделювання режимів електричних мереж. Він являється доступним, що дозволяє з мінімальними затратами створювати аналогічні пристрої для модернізації решти розрахункових моделей.

Використання мікроконтролера може дати змогу викладачу безпосередньо перед виконанням лабораторної роботи задавати відповідну програму студентам не відходячи від комп'ютеру, а також здійснювати перевірку обладнання на працездатність.

Високоякісний низькоспоживаючий 8- бітний AVR мікроконтролер

Загальні характеристики досліджуваного мікроконтролера:

- а) 130 команд, більшість яких виконується за один тактовий цикл;
- б) 32 8 бітних робочих регістра загального застосування;
- в) повністю статична архітектура;
- г) продуктивність до 16 MIPS при тактовій частоті 16 МГц;
- д) вбудований двоцикловий помножувач;

Характеристика пам'яті контролера:

а) 4/8/16 КБ внутрісистемного програмованої Flash пам'яті програми, здатної витримати 10 000 циклів запису / стирання;

б) допоміжна секція завантажувального програми з незалежним бітом захисту внутрішньосистемне програмування вбудованої програмою-завантажувачем реальна функція зчитування при програмуванні;

в) 256/521/512 байта EEPROM, здатної витримати 100 000 циклів запису / стирання;

г) 512 / 1К / 1К байта вбудованої SRAM пам'яті (статичне ОЗУ);

д) програмована захист від зчитування;

е) характеристики периферії;

ж) два 8- розрядних таймера / лічильника з окремим предделителя і режимом порівняння;

з) один 16- таймер / лічильник з окремим предделителя і режимом порівняння і режимом захоплення.

Передавальні характеристики приладу:

а) лічильник реального часу з окремим генератором;

б) п'ять ШІМ каналів;

в) 8 каналний АЦП у приладів в TQFP і MFL корпусах;

г) 6 10- бітних каналів;

д) 2 8- бітних каналу;

е) 6 каналний АЦП у приладів в PDIP корпусі;

ж) 4 10- бітних каналів;

з) 2 8- бітних каналу;

и) програмований послідовний USART;

к) ведучий / ведений SPI інтерфейс;

л) байт-орієнтований послідовний 2 провідний інтерфейс;

м) програмований сторожовий таймер з вбудованим генератором;

н) вбудований аналоговий компаратор;

о) переривання і пробудження при зміні стану висновків.

Спеціальні характеристики мікроконтролера:

а) скидання при включенні харчування і детектор короткочасних зникнень харчування;

б) п'ять режимів зниженого споживання: Idle, ADC Noise Reduction, Power-Save, Power-down і Standby.

Порти введення - виведення і корпусне виконання:

а) 23 програмованих лінії портів введення-виведення;

б) 32 вивідні TQFP і MFL корпусу.

Діапазон напруги живлення:

а) від 1.8 до 5.5 В у ATmega48 / ATmega88 / ATmega168V;

б) від 2.7 до 5.5 В у ATmega48 / ATmega88 / ATmega168L;

в) від 4.5 до 5.5 В у ATmega48 / ATmega88 / ATmega168.

Різний діапазон робочих тактових частот:

а) від 0 до 1 МГц у ATmega48 / ATmega88 / ATmega168V;

б) від 0 до 8 МГц у ATmega48 / ATmega88 / ATmega168L.

в) від 0 до 16 МГц у ATmega48 / ATmega88 / ATmega168.

Понад низьке споживання:

а) активний режим:

1. 300 мкА при частоті 1 МГц і напрузі живлення 1.8 В;

2. 20 мкА при частоті 32 кГц і напрузі живлення 1.8 В.

б) режим зниженого споживання:

0.5 мкА при напрузі живлення 1.8 В [19].

#### **7.4 Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту**

Оскільки ламповий генератор, що використовується у моделі являється застарілим, цей факт унеможлиблює проведення фінансово-економічного аналізу даного продукту. Оскільки мікроконтролер являється основним елементом даного стартап-проекту, тому порівняння фінансових вкладань в реалізацію проекту буде проводитись виходячи з порівняння мікроконтролерів інших виробників.

Для фінансово-економічного аналізу порівняно мікроконтролери з подібними характеристиками вартістю до 100 грн.

Порівнюючи вартість аналогічних контролерів можна побачити, що запропонований ATMEGA 48 не являється найбільш дешевим серед конкурентів, але якщо оцінювати технічні характеристики конкурентів, можна чітко побачити, що ATMEGA 48 має найкраще співвідношення ціна/якість і являється найкращим

варіантів для впровадження в якості модернізації досліджуваної розрахункової моделі. Звичайно ж дані мікроконтролери не відрізняються найкращими технічними характеристиками, але для тих цілей, для яких він планується використовуватися, дане рішення являється найбільш доцільним и практичним.

Безумовно, Atmel відстають від своїх найближчих конкурентів. На даний момент в області високої продуктивності / функціоналу програють Cortex M3 від STM32 (і за ціною і за функціоналом), а для дрібних додатків - дрібним PIC-ам, які вдвічі дешевше. Втім, являється ще невелика ніша для додатків де потрібна робота від 5V . Якраз такий випадок ми спостерігаємо при впровадженні даного контролера в досліджувану модель [20].

В якості програматора можна використовувати програматор AVR USBasp + Zif board 28 pin, що повністю задовільняє потреби при програмуванні для розрахункової моделі УРМЕС-2М, являється доступним по ціні та простим експлуатації. Зображення даного програматора приведено на рис.6.

Щодо програмного забезпечення, то воно являється доступним для користувачів безкоштовно в мережі Internet, що здешевлює даний стартап для являється більш зручним для користувачів.

Узагальнюючі результати фінансових вкладань в розробку генератора синусоїдальної напруги приведені в таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 - Економічний результат вибору обладнання

№	Назва позиції	Ціна (грн)
1	Мікроконтролер ATMEGA 48	40
2	Програматор AVR USBasp	200
3	Плата для встановлення мікроконтролера	200
4	Програмне забезпечення	-
	Сума	440

## Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуто питання з модернізації розрахункової моделі УРМЕС-2М шляхом заміни лампового генератора на новий пристрій, що базується на мікроконтролері та виконує ті самі функції, що і застарілий аналог.

Основною задачею був вибір мікроконтролера та обладнання для його програмування. Проаналізувавши ринок, та провівши фінансово-економічний аналіз, було обрано контролер ATMEGA 48. Даний контролер являється гарний рішенням, виходячи зі співвідношення ціна/якість, що повністю задовольняє всі вимоги, чітко виконує поставлену задачу, являється доступним та легким у користуванні. А також було обране відповідне устаткування для підготовки та установки його в розрахункову модель. Більш дорогі його аналоги являються недоречними, оскільки по-перше – мають більшу вартість, а по-друге – наша розрахункова модель не передбачає підтримки такого великого функціоналу, який можуть запропонувати дорожчі моделі.

Отже, перспектива впровадження технології з огляду на капіталовкладання, можливість реалізації, подвльша вмплементация проекту являється доцільною.

## ВИСНОВКИ

Існуюча лабораторна установка на базі аналогово-обчислювальної розрахункової моделі являється хорошим інструментом в руках викладачів, для навчання студентів та в допомозі розвитку їх практичних навичок в області керування режимами роботи енергосистемами та уявлення про фізичні процеси, які протікають під час роботи енергоустановок.

Виконання лабораторних робіт на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС-2М сприяє закріпленню у студентів фізичного уявлення про режими роботи електричних мереж і систем і набуття ними досліджувальних навичок.

Маючи результати перевірки, аналогову універсальну розрахункову модель УРМЕС-2М можна повною мірою використовувати для проведення лабораторних практикумів на кафедрі електричних мереж та систем, оскільки вона задовольняє всі необхідні вимоги.

Розроблений лабораторний практикум включає 3 лабораторних робіт на основі яких може бути в процес навчання введений цикл лабораторних робіт по дослідженню параметрів, режимів роботи, статичної та динамічної стійкості електричних мереж у всіх можливих їхніх схемних варіантах.

Виготовлена цифрово-електронна генераторна станція, що дозволила значно покращити технічні можливості універсальної розрахункової моделі, а також дала можливість для подальшого вдосконалення УРМЕС-2М, за рахунок використання генерації сигналів, які можливо пристосувати до ЕОМ з використанням пакету прикладних програм Matlab Simulink.

Отже, в ході виконання магістерської дисертації були вирішені наступні завдання:

- а) Вирішена задача налагодження та введення в роботу УРМЕС-2М;

б) Розроблена електрична схема генераторної станції, був змодельований процес перетворення сигналу, що надходить до генераторної установки, та віддається на розрахунковий стенд.

в) Розроблена низка лабораторних робіт з інженерного моделювання енергосистем на УРМЕС-2М, а саме з дослідження режимів роботи лінії електропередавання, усталених режимів замкнутої електричної мережі, визначення параметрів режиму електричної мережі, вибору оптимальної експлуатаційної схеми неоднорідної електричної мережі, оптимального розподілу потужності в електричній мережі .

г) Розроблені правила безпечного виконання лабораторних робіт на універсальній розрахунковій моделі УРМЕС-2М;

д) Виконані практичні розрахунки для перевірки дослідницьких результатів при моделюванні енергосистем на УРМЕС-2М;

е) Приведені приклади виконання лабораторних робіт по одному із варіантів завдання;

ж) Розраховано потужність УЗО, а також параметри нового живлячого кабелю, які необхідно встановити в розрахункову модель для зниження ризику враження електричним струмом.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Анисимов Б.В. Аналоговые и гибридные ЭВМ. – М.: Высш. шк., 1986.-288 с.
2. Андрущенко В.А. Теория систем автоматического управления: Учебное пособие. – Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1990. - 256 с.
3. Самоткин В.В. Курс лекцій з теорії автоматичного керування. – Ж., 1997.- 301 с.
4. Електричні мережі та системи: підручн. / В.М. Сулейманов, Т.Л. Кацадзе. - К.: НТУУ "КПІ", 2008.-456с. – Бібліогр. : с.441– 443. -500 пр.
5. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы к электрических системах. – М.: Высшая школа, 1970. – 427 с.
6. Модель электрических систем. - Методика расчетов на модели. М.: ВГПИ и КПИ "Энергосетьпроект", 1969. – 117 с.
7. Электрические системы и сети/Н. В. Буслова, В. Н. Винославский, Т. И. Денисенко, В. С, Перхач; Под ред. Г. И. Денисенко. Киев: Высшая школа, 1986.
8. Арзамасцев Д.А., Липес А.В. Оптимизационные модели развития электрических сетей энергосистем. Учеб. пособие. - Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1987. – 72 с.
9. Будзко И.А., Левин М.С. Особенности оптимизационных задач энергетики и методов их решения //Электричество. – 1981. – №3. – с. 1– 7.
10. Веников В. А., Идельчик В. И., Лисеев М. С. Регулирование напряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. <http://www.micro.niza.ru/dsh/atmega48.pdf>
12. <https://prototype.org.ua/handbook/microchips/microcontrollers/avr/megaavr/atmega48>
13. <http://foraenergy.ru/zashhita-shuntiruyushhego-i-kompensacionnogo-reaktora-vl-750-kv/>

14. СТО 56947007-29.120.70.98-2011 Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства ООО АББ Силовые и Автоматизированные Системы
15. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Визначає вимоги з безпечної експлуатації електроустановок споживачів напругою до 220 кВ
16. Методичні вказівки до лабораторно-практичної роботи ОПЕ-6 «Організація безпечної експлуатації діючих електроустановок» (для студентів електротехнічних спеціальностей) Укладачі Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 27 с.;
17. ДБН В.2.5-23:2010 Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – К., 2010
18. Методичні рекомендації до виконання розділу «Охорона праці і безпека у надзвичайних ситуаціях» у магістерській дисертації для студентів енергетичних спеціальностей за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр професійний» / Укл.: Л. Д. Третьякова. – К.: КПІ ім. І. Сікорського, ІЕЕ, 2018. – 41 с.
19. <http://www.ngpedia.ru/id639509p1.html>
20. Розроблення стартап-проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

Додаток А  
Результати перевірки на плагіат

## Doc vs My Database

80.57% Originality	19.43% Similarity	120 Sources
--------------------	-------------------	-------------

### Database sources: 120 sources found

1. Year: 2013 Name: Валентин Surname: Дуплик Speciality Code: ЕС	13.25%
File path: /Кафедра автоматизації енергосистем/ЕС/2013/Магістр_Дуплик_Валентин_Сергійович/	
2. Year: 2013 Name: Валентин Surname: Дуплик Speciality Code: ЕС	13.25%
File path: /ЕС/2013/Магістр_Дуплик_Валентин_Сергійович/Магістр_Дуплик_Валентин_Сергійович.	
3. Year: 2013 Name: Ярослав Surname: Притискач Speciality Code: ЕС	6.04%
File path: /Кафедра автоматизації енергосистем/ЕС/2013/Магістр_Притискач_Ярослав_Васильови	
4. Year: 2013 Name: Ярослав Surname: Притискач Speciality Code: ЕС	6.04%
File path: /ЕС/2013/Магістр_Притискач_Ярослав_Васильович/Магістр_Притискач_Ярослав_Васи	
5. Year: 2013 Name: XXX Surname: Гут Speciality Code: АЕ	1.14%
File path: /Кафедра автоматизації енергосистем/АЕ/2013/Спеціаліст_Гут_XXX_XXX/РАСЧЕТ ДФЗ	
6. Year: 2013 Name: XXX Surname: Гут Speciality Code: АЕ	1.14%
File path: /АЕ/2013/Спеціаліст_Гут_XXX_XXX/РАСЧЕТ ДФЗ АТ.pdf	
7. Year: 2015 Name: Артем Surname: Дученко Speciality Code: ЕПА	0.62%
File path: /ЕПА/2015/Магістерська_Дученко_Артем_Юрійович/Дученко.docx	
8. Year: 2018 Speciality Code: ЕС	0.58%
File path: /ЕС/2018/Магістр_Меркотан_Роман_Андрійович/пояснювальна записка/Меркотан Р.А. Э	
9. Year: 2018 Speciality Code: ЕС	0.51%
File path: /ЕС/2018/Магістр_Крикливий_Дмитро_Сергійович/Магістерська дисертація/Магістерськ	
10. Year: 2015 Name: Дмитро Surname: Коротченко Speciality Code: ВДЕ	0.38%
File path: /Кафедра автоматизації енергосистем/ВДЕ/2015/Магістерська_Коротченко_Дмитро_Єв	
11. Year: 2015 Name: Дмитро Surname: Коротченко Speciality Code: ВДЕ	0.38%
File path: /ВДЕ/2015/Магістерська_Коротченко_Дмитро_Євгенович/Коротченко ЕД-41м диплом.do	
12. Year: 2018 Speciality Code: ЕС	0.36%
File path: /ЕС/2018/Спеціаліст_Ратошнюк_Віталій_Миколайович/ДП - Ратошнюк.pdf	
13. Year: 2013 Speciality Code: АЕ	0.36%
File path: /АЕ/2013/Спеціаліст_Сліпченко_XXX_XXX/Диплом_Сліпченко/Розділ_Р3.doc	
14. Year: 2015 Name: Олексій Surname: Черній Speciality Code: ЕТ	0.36%
File path: /ЕТ/2015/Магістерська_Черній_Олексій_Володимирович/2_chastina.pdf	
15. Year: 2016 Name: Іван Surname: Шпак Speciality Code: ЕС	0.36%
File path: /ЕС/2016/Спеціаліст_Шпак_Іван_Олександрович/Шпак Розділ 1, 3 Електрична частина Е	
16. Year: 2016 Name: Іван Surname: Шпак Speciality Code: ЕС	0.36%
File path: /ЕС/2016/Спеціаліст_Шпак_Іван_Олександрович/Шпак Розділ 6 Охорона праці Ваня.pdf	
17. Year: 2013 Name: XXX Surname: Сліпченко Speciality Code: АЕ	0.36%
File path: /АЕ/2013/Спеціаліст_Сліпченко_XXX_XXX/Розрахунок RET 670.docx	

 Similarity

 Citation

 Similarity from a chosen source

 References

 Possible character replacement

