

**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

_____ Кирик В.В.

“ ___ ” _____ 2020 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Електричні системи і мережі»
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

**на тему: «Web-розрахункова модель електричної мережі: вибір оптимальної
мережі»**

Виконав:

студент II курсу, групи ЕС-91мп

Льченко Дмитро Васильович _____

Науковий керівник:

проф. кафедри електричних мереж та систем, д. т. н.

Кирик Валерій Валентинович _____

Консультант з розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях»:

проф. кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки, д. т. н.

Третякова Лариса Дмитрівна _____

Консультант з розділу «Стартап-проєкт»:

ст. викл. кафедри економіки і підприємництва

Бахмачук Сергій Васильович _____

Рецензент:

ст. викладач кафедри автоматизації енергосистем, к. т. н.,

Нестерко Артем Борисович _____

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

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електричних мереж та систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електричні системи і мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Кирик В.В.

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Ільченку Дмитру Васильовичу

1. Тема дисертації: «Web-розрахункова модель електричної мережі: вибір оптимальної мережі», науковий керівник дисертації Кирик Валерій Валентинович, д. т. н., професор, затверджені наказом по університету від «11» листопада 2020 р. №3260-с.
2. Термін подання студентом дисертації: 14 грудня 2020 р.
3. Об'єкт дослідження: портативна web-модель для розрахунків усталених режимів електричних мереж.
4. Перелік завдань, які необхідно розробити:
 - 1) обрати оптимальний математичний метод розрахунку усталених режимів роботи складнозамкненої електричної мережі для web-додатку;
 - 2) розробити серверну частину web-додатку;
 - 3) розробити користувацький інтерфейс web-додатку;
 - 4) розробити розділ охорони праці за темою дисертації;
 - 5) розробити розділ стартап-проекту за темою дисертації.
5. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:
 - 1) Вихідні дані магістерської дисертації;
 - 2) Структура, функціонал проекту та порівняння аналогів;

- 3) Порівняння математичних моделей;
- 4) Схеми заміщення, використані в проєкті;
- 5) Порівняння методів розрахунку параметрів;
- 6) Аналіз отриманих даних розрахунку;
- 7) Розробка стартап-проєкту;
- 8) Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях;

6. Орієнтовний перелік публікацій:

1) Чижевський В. В., Ільченко Д. В., Волчков І. В., Лопуга В. В. «Визначення оптимального методу розрахунку параметрів усталених режимів роботи електричних мереж за критерієм межі збіжності ітераційного процесу» // збірник «Наука і studia» – 2020 р.

2) Чижевський В. В., Ільченко Д. В., Волчков І. В., Лопуга В. В. «Особливості розрахунку параметрів усталених режимів роботи електричних мереж з використанням оптимізаційного методу» // збірник «Наука і studia» – 2020 р.

7. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проєкт	Бахмачук С. В., ст. викл. кафедри економіки і підприємництва		
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	Третякова Л. Д., проф. кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки		

8. Дата видачі завдання: 10 вересня 2020 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вибір оптимального математичного методу розрахунку усталених режимів роботи складнозамкненої електричної мережі для web-додатку	10.09. – 30.09.	
2	Розробка серверної частини web-додатку	01.10. – 31.10.	
3	Розробка користувацького інтерфейсу web-додатку	01.11. – 25.11.	
4	Тестування роботи web-додатку	25.11. – 30.11.	
5	Оформлення пояснювальної записки	01.12. – 04.12.	
6	Підготовка графічного матеріалу	05.12. – 14.12.	

Студент _____

Дмитро ІЛЬЧЕНКО

Науковий керівник _____

Валерій КИРИК

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: «Web-розрахункова модель електричної мережі: вибір оптимальної мережі»

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка виконана на 97 сторінках формату А4, яка включає в себе 38 рисунків, 36 таблиць, 19 джерел використаної літератури. Графічна частина містить 8 аркушів технічних креслень форматом А1.

Мета роботи – створення web-додатку для розрахунку усталених режимів складнозамкненої електричної мережі різних класів напруги.

Об'єкт дослідження – усталені симетричні режими роботи електричних мереж різних класів напруги з трансформаторними зв'язками та різними конфігураціями (розімкнені та замкнені).

Предмет дослідження – ітераційні методи розрахунку усталених симетричних режимів роботи електричних мереж.

Методи дослідження – математичне моделювання із застосуванням мов програмування Java та JavaScript, також імітаційне моделювання електричних мереж із застосуванням програмного комплексу PowerFactory.

Завдання дослідження – вибір оптимального математичного методу розрахунку, побудова серверної бізнес-логіки та користувацького інтерфейсу додатку.

Науковою новизною отриманого додатку є висока гнучкість функціоналу в порівнянні з вже існуючими аналогами на ринку та конкурентоспроможність з desktop-програмами.

Практичним застосуванням одержаних результатів є впровадження розробленого додатку в проєктні організації чи освітні заклади, з метою покращення якості та швидкості розрахунків усталених режимів електричних мереж різних класів напруги.

Публікації за тематикою досліджень:

1. Чижевський В. В., Ільченко Д. В., Волчков І. В., Лопуга В. В. «Визначення оптимального методу розрахунку параметрів усталених режимів роботи електричних мереж за критерієм межі збіжності ітераційного процесу» // збірник «Наука і студія» – NR 12(214) – 2020 р.

2. Чижевський В. В., Ільченко Д. В., Волчков І. В., Лопуга В. В. «Особливості розрахунку параметрів усталених режимів роботи електричних мереж з використанням оптимізаційного методу» // збірник «Наука і студія» // збірник «Наука і студія» – NR 12(214) – 2020 р.

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ, РЕЖИМИ РОБОТИ, РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ,
КОРИСТУВАЦЬКИЙ ІНТЕРФЕЙС, WEB-ДОДАТОК

ABSTRACT

The master's dissertation consists of an explanatory note and a graphical part. The explanatory note is made on the 97 A4-size pages, which includes 38 drawings, 36 tables, 19 sources of used literature. The graphic part contains 8 sheets of technical drawings in A1 format.

The purpose of the work is to create a web-application for calculating the steady-state modes of a complex electrical network of different voltage classes.

The object of research is the established symmetrical modes of operation of electrical networks of different voltage classes with transformer connections and different configurations (open and closed).

The subject of research is iterative methods of calculation of established symmetrical modes of electric networks.

Research methods - mathematical modeling using Java and JavaScript programming languages, as well as simulation of electrical networks using PowerFactory software.

The task of the research is to choose the optimal mathematical method of calculation, construction of server business logic and user interface of the application.

The scientific novelty of the obtained results is the flexibility of the functionality in the context of the existing analogs on the market and the competitiveness of the desktop-programs.

Practical storage of the obtained results is the introduction of web-applications in the design of the organization or universities to improve the quality and speed of calculation of steady-state electrical grids of different voltage classes.

Publications:

1. Chizhevsky V. V., Ilchenko D. V., Volchkov I. V., Lopuha V. «The determination of the optimal method of calculating the parameters of steady operating modes of electrical networks by the verge of iteration process convergence» // «Nauka i studia» – NR 12(214) – 2020.

2. Chizhevsky V. V., Ilchenko D. V., Volchkov I. V., Lopuha V. «Features of parameters calculation of the established modes of work of electric grids with using an optimization method» // «Nauka i studia» – NR 12(214) – 2020.

ELECTRICAL NETWORKS, OPERATING MODES, COMPUTATIONAL MODEL, USER INTERFACE, WEB-PAGE APPLICATION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	11
ВСТУП.....	12
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ТА ОЦІНКА НАУКОВОЇ НОВИЗНИ ДОДАТКУ	15
1.1 Опис структури майбутнього додатку та оцінка наукової новизни	15
Висновки до розділу 1	16
2 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА КРИТЕРІЄМ МЕЖІ ЗБІЖНОСТІ ІТЕРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ	17
2.1 Опис методів розрахунку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь вузлової моделі.....	18
2.3 Результати дослідження	26
Висновки до розділу 2	30
2 СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ	31
3.1 Загальна структура програмного забезпечення	31
3.2 Структура серверної частини Web-дodatku	31
3.3 Структура бази даних	34
Висновки до розділу 3	36
4 ІНТЕРФЕЙС РОЗРОБЛЕНОГО WEB-ДОДАТКУ	37
4.1 Основні принципи побудови користувацького інтерфейсу	37
4.2 Особливості використання Web-дodatku	46
5 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ	48
5.1 Опис розрахункової схеми та вихідні данні.....	48
5.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення вихідної мережі.....	50
5.3 Ініціалізація необхідних параметрів для першого варіанту конфігурації мережі мережі.....	52
5.4 Організація ітераційного розрахунку для першого варіанту роботи мережі	53
5.5 Ініціалізація необхідних параметрів для другого варіанту конфігурації мережі.....	63
5.6 Організація ітераційного розрахунку для другого варіанту роботи мережі.	64
Висновки до розділу 5	74
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ПЛ 110 кВ.....	76

6.1 Вступ.....	76
6.2 Технічні характеристики устаткування спроектованої мережі.....	76
6.3 Аналіз умов праці під час експлуатації ПЛ 110 кВ.....	77
6.4 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників.....	80
6.5 Розробка і розрахунок технічних та організаційних заходів з охорони праці	Ошибка! Закладка не определена.
6.6 Вибір засобів індивідуального захисту для обмеження впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників	82
6.7 Вибір технічних та організаційних заходів для унеможливлення і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій	83
6.8 Розрахунок захисного заземлення опори на ПЛЕП 110 кВ.....	84
Висновки до розділу 6	86
7. СТАРТАП-ПРОЄКТ «WEB-РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ»	87
7.1. Опис ідеї проєкту	87
7.2. Технологічний аудит ідеї проєкту.....	88
7.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	89
Висновки до розділу 7	94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	96

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

- ЛЕП – лінія електропередавання
- ПЛ – повітряна лінія
- СУБД – система управління базами даних
- CSS – (англ. Cascading Style Sheets) – каскадна таблиця стилів
- DAO – (англ. Data Access Object) – абстрактний інтерфейс до типу бази даних або механізму зберігання
- DTO – (англ. Data Transfer Object) – шаблон проектування передачі даних
- HTML – (англ. HyperText Markup Language) – мова гіпертекстової розмітки
- ORM – (англ. Object-Relational Mapping) – об'єктно-реляційне відображення або перетворення
- IEEE – (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers) Інститут інженерів електротехніки та електроніки
- URL – (англ. Uniform Resource Locator) – система уніфікованих електронних адрес

ВСТУП

Метою виконання даної дисертації є розробка нового розрахункового web-додатку для розрахунку усталених режимів роботи складнозамкнених мереж. Формат використання браузера був обраний з метою збільшення портативності проведення таких розрахунків без залучення персональних комп'ютерів, використовуючи будь-який пристрій з підключенням до мережі Internet.

Наразі існує ряд desktop-програм для моделювання електричних мереж різних класів номінальної напруги та розрахунку усталених режимів їх роботи. До таких відносяться MathLAB, PowerFactory, NEPLAN та ГрафСКАНЭР. Ці програми мають широкий функціонал та велику кількість налаштувань під різноманітні завдання. Однак ці програми встановлюються на комп'ютер і швидкість їх роботи прямопропорційна обчислювальній потужності пристрою, на якому вони встановлені.

Інколи може постати завдання до проведення таких розрахунків без залучення потужних обчислювальних пристроїв, для отримання наближених та спрощених результатів, наприклад для попередньої оцінки стану мереж. Такі розрахунки зазвичай потрібно проводити оперативно і, за умови відсутності вищевказаних програм, портативно. Єдиним компромісом в такому разі є використання онлайн-додатків, що знаходяться у доступі в мережі Internet. Метою цього розділу є оцінка наявності таких додатків та їх функціональних характеристик.

Єдиним наразі існуючим онлайн-додатком для розрахунку усталених режимів електричних мереж є сервіс *online-electric.ru*. Функціонал сайту передбачає ввід параметрів елементів мережі у формі таблиць пунктів та ділянок. Слід зауважити, що трансформатори в такому разі моделюються ділянкою з певним коефіцієнтом трансформації. Також відсутня можливість моделювання трьохобмоткових трансформаторів. Зовнішній вигляд таблиць вводу параметрів показано на рис. 1.1 та рис. 1.2.

Расчет и анализ установившихся режимов электрических сетей

Статические характеристики															
Узлы															
№ уз	Наименование узла	U _н , кВ	N _{СХН}	P _{наг} , МВт	Q _{наг} , МВар	P _{ген} , МВт	Q _{ген} , МВар	Q _{мин} , МВар	Q _{макс} , МВар	G _ш , мкСм	B _ш , мкСм	U _{мод} , кВ	Угол, °	Тип узла	Опции
1	1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Обычный	
0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Базисно-баланс.	

Рисунок 1 – Таблица для ввода параметров узлов

Расчет и анализ установившихся режимов электрических сетей

Статические характеристики											
Узлы											
Ветви											
Результаты											
Граф											
Вкл./Откл.	N _{нач}	N _{кон}	N _{цеп}	R, Ом	X, Ом	G, мкСм	B, мкСм	k _T	I _{доп} , А	Опции	
	0	1	1								

Рисунок 2 – Таблица для ввода параметров ділянок

Після вводу всіх елементів додаток автоматично формує граф електричної мережі. Серед недоліків можна виділити те, що на графі не відображається додаткова інформація про елементи, а при наведені на пункти сайт показує у спливаючому вікні введену користувачем номінальну напругу пункту. Зовнішній вигляд графа показано на рис. 1.3.

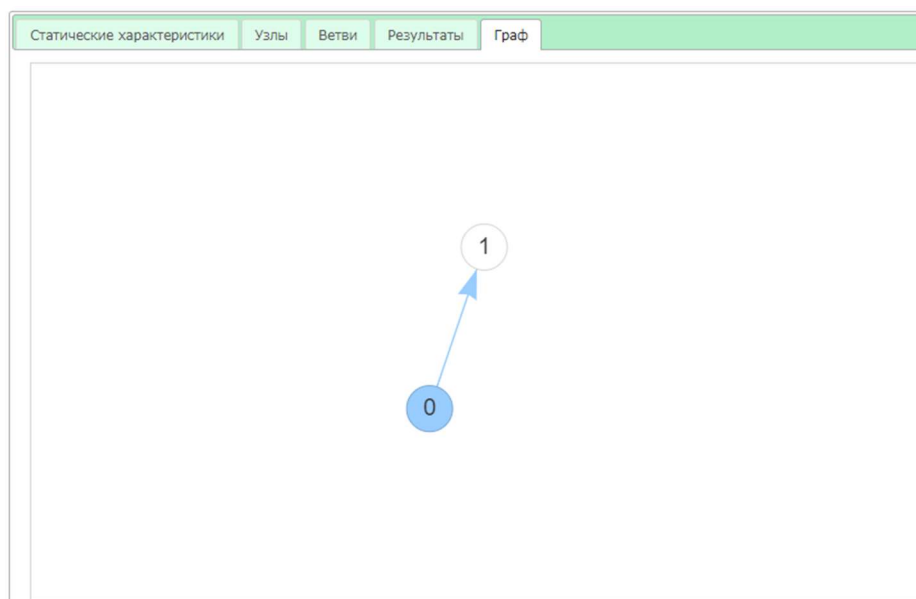


Рисунок 3 – Граф найпростішої мережі

Режим роботи сформованої мережі розраховується автоматично, а його результати користувач може завантажити у вигляді таблиць у форматах .xml та .doc. Формати таблиць результатів наведено на рис. 1.4.






Статические характеристики												Узлы		Ветви		Результаты		Граф	
 Таблица 1 - Потокораспределение																			
Nнач	Nкон	Наименование ветви	Параметры в начале ветви				Параметры в конце ветви				Нагрузочные потери								
			P _{нач} , МВт	Q _{нач} , МВар	S _{нач} , МВ·А	I _{нач} , А	P _{кон} , МВт	Q _{кон} , МВар	S _{кон} , МВ·А	I _{кон} , А	ΔP _{нб} , МВт	ΔQ _{нб} , МВар							
 Таблица 2 - Напряжения в узлах																			
N узла	Наименование узла	Номинальное напряжение, кВ		Фактическое напряжение, кВ		Отклонение от Uном, %													
 Таблица 3 - Перегруженные ветви																			
Nнач	Nкон	Наименование ветви		Ток ветви, А		Допустимый ток, А													
 Таблица 4 - Суммарные показатели																			
Параметр				P, МВт		Q, МВар													
Нагрузка																			
Генерация																			
Генерация Q _{вл}				-															
Генерация Q _{бск}				-															
Потери всего																			
Мощность балансирующего узла																			
 Таблица 5 - Потери активной мощности всего, МВт																			
Потери в ЛЭП		Потери в трансформаторах		Потери в ШР		Потери в БСК		Всего											
нагрузочные	холостого хода	нагрузочные	холостого хода																

Рисунок 4 – Таблиці результатів

Слід зауважити, що при помилці вводу інформації у таблиці (неправильний формат числа чи його значення), результати розрахунку в завантажених таблицях не будуть відобразитись взагалі. Крім того, користувач не отримає ніякого повідомлення про помилку і буде змушений шукати її самотужки.

Як результат, невеликий функціонал сайту і отримання результатів у форматі таблиць, стали поштовхом до розробки web-додатку з такою ж портативністю та швидкістю роботи, однак з функціоналом наближеним до наведених вище desktop-програм.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ТА ОЦІНКА НАУКОВОЇ НОВИЗНИ ДОДАТКУ

1.1 Опис структури майбутнього додатку та оцінка наукової новизни

Зважаючи на всі недоліки сервісу *online-electric.ru*, в розробці нового додатку було сформовано ряд функцій, які б наблизили його до desktop-програм.

Однією з них є відображення основних режимних параметрів прямо на графі. Це покращить зручність сприйняття інформації користувачем. Крім того було прийнято рішення про вивід результатів розрахунку режиму прямо в новому додатку, без завантаження сторонніх таблиць. Це дозволить користувачу виділяти ту інформацію по кожному з елементів мережі, яку він потребує. А відсутність великої кількості сторонніх файлів не створюватиме складнощів в пошуку актуальної інформації.

Також було прийнято рішення про розробку функціоналу з пошуку помилок введення даних та сповіщення користувача про їх наявність.

Також в додатку буде реалізовано розрахункову модель трьохобмоткового, фазоповоротного і вольтододаткового трансформаторів, оскільки вони є поширеними елементами електричних мереж України.

Ще однією корисною функцією, яку додаток перейме у своїх «desktop-родичів», буде наявність довідника з типовим обладнанням. Таким чином користувачу не треба буде вводити всі параметри елемента, а достатньо буде обрати потрібний з списку наявних. Це буде ще одним кроком до покращення портативності та швидкості роботи, оскільки не завжди користувач матиме під рукою довідникову літературу з параметрами проводів, кабелів чи трансформаторів.

Для збільшення портативності дизайн додатку буде адаптивним. Це дозволить використовувати його не лише на ПК але і планшетах і телефонах.

Зважаючи на усі вищезазвані особливості, розроблений додаток буде мати найбільший функціонал серед існуючих онлайн-додатків, що робить його новітнім, а завдання його розробки та впровадження актуальним.

Висновки до розділу 1

- 1) на основі проведеного аналізу встановлено, що наявні онлайн-додатки для розрахунку ustalених режимів роботи електричних мереж показують низький рівень функціональних можливостей та не значну інформативність виводу результатів, що підвищує актуальність розроблення нового портативного програмного комплексу для розрахунку параметрів ustalеного режиму мережі;
- 2) сформовано основні вимоги до розробки нового Web-додатку:
 - наявність інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу, що дозволить користувачу швидко та зручно набирати схему для подальшого розрахунку;
 - інформативність та наочність виводу отриманих результатів для зручного аналізу та систематизації отриманих даних;
 - оптимальний метод розрахунку для розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь для можливості розрахунку обтяжених режимів роботи електричної мережі та оптимізації реалізації розрахункового процесу;
 - гнучкість алгоритму, яка дозволить розробляти оновлення додатку для розширення його функціоналу.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА КРИТЕРІЄМ МЕЖІ ЗБІЖНОСТІ ІТЕРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ

Серед методів розрахунку параметрів усталених режимів роботи електричних мереж розрізняють методи вузлової моделі та методи контурної моделі. Реальні електричні мережі, що експлуатуються за замкненими схемами, мають кількість незалежних контурів меншу від кількості вузлів схеми, що забезпечує для методів контурної моделі меншу розмірність системи рівнянь усталеного режиму, ніж для методів вузлової моделі. Водночас, більшість електричних мереж експлуатують за нормально розімкненими схемами, що зумовлює неможливість застосування для визначення параметрів їх усталених режимів роботи методів контурної моделі. Крім того, для методів контурної моделі суттєву складність являє собою завдання автоматичного визначення топології (побудови контурної матриць інциденцій), яке для методів вузлової моделі вирішується доволі просто. Зазначені обставини призвели до того, що сучасні програмні комплекси з метою визначення параметрів усталених режимів електричних мереж застосовують, здебільшого, методи вузлової моделі - зокрема, метод Ньютона.

Розв'язання задачі визначення параметрів усталених режимів роботи електричних мереж суттєво ускладнюється під час розрахунку цих параметрів для обтяжених та післяаварійних режимів, для яких напруги вузлів електричної мережі наближаються до критичних (з огляду на збереження аперіодичної статичної стійкості). В таких ситуаціях отримання результату пов'язане з необхідністю виконання дуже великої кількості ітерацій, а для максимально обтяжених режимів отримання результату взагалі може виявитися неможливим, що негативним чином вплине на можливість розв'язання задачі з оцінювання стану електричної мережі і правильність вибору заходів, спрямованих на нормалізацію параметрів її режиму. З цієї причини визначення методів

розрахунку, здатних забезпечити розв'язання задачі визначення параметрів усталеного режиму роботи для граничних режимів роботи, є вельми актуальною проблемою.

2.1 Опис методів розрахунку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь вузлової моделі

Наведемо основні відомості про метод Зейделя.

Найпростішим методом розв'язання СНАР є метод простої ітерації, основною ідеєю такого метода є уточнення невідомих на кожній ітерації. Основною проблемою такого методу є дуже мала швидкість збіжності ітераційного процесу. Метод Зейделя являє собою модифікацію метода простої ітерації. Основною відмінністю є те, що в методі Зейделя уточнення наближення x_n на i -тій ітерації відбувається за допомогою вже попередньо розрахованих наближень x_1, x_2, \dots, x_{n-1} . Такий підхід дозволяє досягати необхідної точності в декілька разів швидше ніж при реалізації простої ітерації.

З точки зору простоти організації та автоматизації ітераційного процесу метод Зейделя є одним за найбільш простих. В той же час при застосуванні такого методу для систем великої розмірності або буде потребувати розрахунку великої кількості ітерацій, або призводити до розбіжності ітераційного розрахунку.

Наведемо алгоритм розрахунку за методом Зейделя.

Для розрахунку СНАР за методом Зейделя необхідно перетворити вузлові рівняння вигляду (2.1) до вигляду (2.2). Після чого розрахунок реалізується за наступним алгоритмом:

$$\dot{U}_i \underline{y}_{i,i} + \sum_{i \in j} \dot{U}_j \underline{y}_{i,j} = \frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_j}; \quad (2.1)$$

$$\dot{U}_i = \frac{1}{\underline{y}_{i,i}} \left(\frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_j} - \sum_{i \in j} \dot{U}_j \underline{y}_{i,j} \right); \quad (2.2)$$

- 1) задаються початкові наближення $U^{(0)}$, а також обирають необхідну інженерну точність ε ;
- 2) проводять розрахунок $k+1$ ітерації за формулами вигляду (2.3);

$$\begin{aligned} \dot{U}_1^{(k+1)} &= \frac{1}{\underline{y}_{1,1}} \left(\frac{\dot{S}_1}{\widehat{U}_1^{(k)}} - \dot{U}_0 \underline{y}_{0,1} - \dot{U}_2^{(k)} \underline{y}_{2,1} - \dots - \dot{U}_n^{(k)} \underline{y}_{n,1} \right); \\ \dot{U}_2^{(k+1)} &= \frac{1}{\underline{y}_{2,2}} \left(\frac{\dot{S}_2}{\widehat{U}_2^{(k)}} - \dot{U}_0 \underline{y}_{0,2} - \dot{U}_1^{(k+1)} \underline{y}_{1,2} - \dots - \dot{U}_n^{(k)} \underline{y}_{n,2} \right); \\ &\dots \\ \dot{U}_n^{(k+1)} &= \frac{1}{\underline{y}_{n,n}} \left(\frac{\dot{S}_n}{\widehat{U}_n^{(k)}} - \dot{U}_0 \underline{y}_{0,n} - \dot{U}_1^{(k+1)} \underline{y}_{1,n} - \dots - \dot{U}_{n-1}^{(k+1)} \underline{y}_{n-1,n} \right); \end{aligned} \quad (2.3)$$

- 3) розраховуємо нев'язку потужності за формулами (2.4-2.5);

$$\dot{S}_{p_i}^{(k)} = \dot{S}_{\text{наві}}^{(k)} + \underline{Y}_i^{(k)} \left(|\dot{U}_i^{(k)}| \right)^2; \quad (2.4)$$

$$dS_i^{(k+1)} = \dot{S}_{p_i}^{(k)} - \left(\sum_{i \in j} \dot{U}_j^{(k+1)} \underline{y}_{i,j} \right) \widehat{U}_i^{(k+1)}; \quad (2.5)$$

- 4) визначається максимальна нев'язка потужності та порівнюється з заданою інженерною точністю (2.6);

$$\max(dS) < \varepsilon; \quad (2.6)$$

- 5) якщо найбільша нев'язка потужності більше ніж задана інженерна точність, то необхідно продовжувати розрахунок та переходити до пункту 2 розрахунку, якщо менше – ітераційний розрахунок завершено.

Наведем основні відомості про метод Ньютона.

Класичний метод Ньютона являю собою спосіб вирішення системи вузлових рівнянь. Основною проблемою метода є те, що в загальному випадку

диференціювання комплексних чисел є неможливим, що в свою чергу унеможливило формування матриці Якобі, що являє собою матрицю перших похідних і має вигляд (2.26). Для того щоб вирішити цю проблему систему з n рівняннями розділяють окрема на дійсну уявну частину і отримують $2n$ рівнянь.

$$\dot{U}_i \underline{y}_{i,i} + \sum_{i \in j} \dot{U}_j \underline{y}_{i,j} = \frac{S_i}{\dot{U}_i}; \quad (2.7)$$

В загальному випадку рівняння вузлової моделі має вигляд (2.7). А система рівнянь, в матричному вигляді має вигляд (2.8-2.9). Розкладемо цей вираз в ряд Тейлора та виділимо перші два члени цього розвинення(2.10).

$$W(U) = 0; \quad (2.8)$$

$$W(U^{(n)} + \Delta U) = 0; \quad (2.9)$$

$$W(U^{(n)} + \Delta U) \approx W(U^{(n)}) + \left[\frac{\partial W}{\partial U} \right]_{U=U^{(n)}} \Delta U = 0; \quad (2.10)$$

Проаналізуємо отриманий вираз (2.10). Запишемо отриманий вираз та помітимо що ми маємо систему рівнянь (2.11), вирішимо цю систему в матричній формі відносно ΔU , отримуємо вид рівняння (2.12). Так, в лівій частині миємо поправку по напрузі, а в правій частині – добуток Якобіана $\left(\frac{\partial W}{\partial U} \right)$ на матрицю нев'язок ($W(U^{(n)})$).

$$\left[\frac{\partial W}{\partial U} \right]_{U=U^{(n)}} \Delta U = -W(U^{(n)}); \quad (2.11)$$

$$\Delta U = - \left[\frac{\partial W}{\partial U} \right]_{U=U^{(n)}}^{-1} W(U^{(n)}); \quad (2.12)$$

В цій системі рівнянь невідомою є напруга. Така система рівнянь є нелінійною, тому потребує ітераційного процесу розрахунку, таким чином що на кожній ітерації ми будемо уточнювати значення напруги відповідно до формули (2.13).

$$U^{(n)} = U^{(n-1)} + \Delta U; \quad (2.13)$$

Розглянемо основну ідею метода Ньютона, для наочності будемо розглядати систему у двомірному просторі (рис. 2.1). Маємо функцію $f(x)$, необхідно знайти точку перетину з віссю x . Необхідно задати початкове наближення поблизу шуканої точки, через те, що при віддаленні від шуканої точки можливі такі випадки, коли досягнення рішення системи не будуть знайдені. Отже, після визначення початкового наближення знаходимо значення функції, а також значення похідної, що являє собою тангенс нахилу дотичної графіка функції з доданім напрямком до осі абсцис, після чого можна знайти точку перетину дотичної і осі OX , отримане значення буде новим значенням наближення і після цього через кінцеву кількість ітерацій знаходимо розв'язок. В загальному випадку існує проблема, коли при такому способі або взагалі неможливо досягти точного результату, або він знаходиться через велику кількість ітерацій, тому для контролю точності задають так званий коефіцієнт, який показує: як близько нам необхідно наблизитись до шуканої точки розв'язку, це допустимо через те що в загальному випадку нас не цікавить точний результат, а достатньо деякого наближення.

Сформуємо загальний вигляд цільової функції має вигляд (2.14). В якому розрахунковий струм (I_{0i}) розраховується за формулою (2.15). Через те, що диференціювання комплексної функції в загальному вигляді неможливе розкладемо системо окремо на дійсну та уявну частини, відповідно записаних у вигляді (2.16-2.17). Відповідно необхідно перезаписати розрахунковий струм, через активну і реактивну складову відповідно (2.18-2.19).

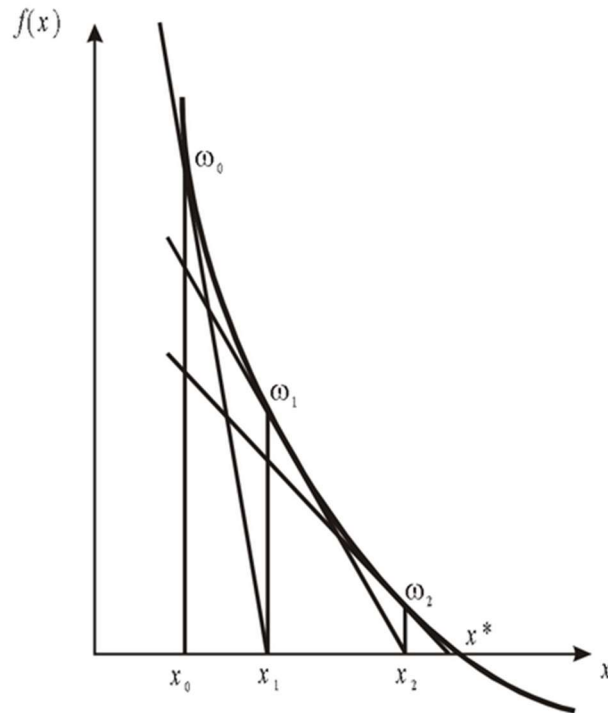


Рисунок 2.1 – Демонстрація процесу збіжності метода Ньютона

$$\omega_i = \dot{U}_i \underline{y}_{i,i} + \hat{U}_i \dot{I}_{0i} - \dot{S}_i = 0; \quad (2.14)$$

$$I_{0i} = \sum_{i \in j} \dot{U}_j \underline{y}_{i,j}; \quad (2.15)$$

$$\omega_{P_i} = g_{i,i} U_i^2 + U_i' I_{0i}' + U_i'' I_{0i}'' - P_i = 0; \quad (2.16)$$

$$\omega_{Q_i} = b_{i,i} U_i^2 + U_i' I_{0i}' - U_i'' I_{0i}'' - Q_i = 0; \quad (2.17)$$

$$I_{0i}' = \sum_{i=j} (g_{i,j} U_j' - b_{i,j} U_j''); \quad (2.18)$$

$$I_{0i}'' = \sum_{i=j} (g_{i,j} U_j'' + b_{i,j} U_j'); \quad (2.19)$$

Вище зазначений підхід використовує алгебраїчний запис комплексного числа, але зазвичай нас більше цікавить модуль та кут, а не дійсна та уявна частина напруги, тому більш доцільно використовувати тригонометричну форму запису комплексного числа, зазначений перехід виведений в формулах (2.20-2.25).

$$\dot{U} = U' + jU'' = Ue^{j\delta} = U(\cos \delta + j \sin \delta); \quad (2.20)$$

$$\omega_{P_i} = g_{i,i}U_i^2 + U_i \cos \delta_i I'_{0_i} + U_i \sin \delta_i I''_{0_i} - P_i = 0; \quad (2.21)$$

$$\omega_{Q_i} = b_{i,i}U_i^2 + U_i \cos \delta_i I''_{0_i} - U_i \sin \delta_i I'_{0_i} - Q_i = 0; \quad (2.22)$$

$$\omega_{P_i} = g_{i,i}U_i^2 + U_i \sum_{i=j} U_j (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}) - P_i = 0; \quad (2.23)$$

$$\omega_{Q_i} = b_{i,i}U_i^2 + U_i \sum_{i=j} U_j (g_{i,j} \sin \delta_{i,j} - b_{i,j} \cos \delta_{i,j}) - Q_i = 0; \quad (2.24)$$

$$\delta_{i,j} = \delta_i - \delta_j; \quad (2.25)$$

Структура матриці перших похідних має вигляд (2.26). Принципово матриця складається із сукупності похідних по кожній зі змінних, в лівій частині розташовано похідні по модулю напруги, а в правій – похідні по куту напруги. Відповідно в верхній частині розташовано похідні по дійсній частині цільових функцій, а в нижній – по уявній. Через те, що вид функції має узагальнений вигляд, то і похідні від неї має також цілком стандартний вигляд, всі вони наведені далі (2.27-2.34). Окремо похідні розділяють на діагональні (2.27-2.30) і недіагональні (2.31-2.34). Пара діагональної і недіагональної похідної формує окрему чверть Якобіану.

$$\partial W = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_P}{\partial U} & \frac{\partial \omega_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \omega_Q}{\partial U} & \frac{\partial \omega_Q}{\partial \delta} \end{bmatrix}; \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \omega_{P_i}}{\partial U_i} = 2g_{i,i}U_i + \sum_{i=j} U_j (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}); \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \omega_{Q_i}}{\partial U_i} = 2b_{i,i}U_i + \sum_{i=j} U_j (-g_{i,j} \sin \delta_{i,j} + b_{i,j} \cos \delta_{i,j}); \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \omega_{P_i}}{\partial \delta_i} = U_i \sum_{i=j} U_j (-g_{i,j} \sin \delta_{i,j} + b_{i,j} \cos \delta_{i,j}); \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \omega_{Q_i}}{\partial \delta_i} = -U_i \sum_{j=i} U_j (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}); \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial \omega_{P_i}}{\partial U_j} = U_i (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}); \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial \omega_{Q_i}}{\partial U_j} = -U_i (g_{i,j} \sin \delta_{i,j} + b_{i,j} \cos \delta_{i,j}); \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial \omega_{P_i}}{\partial \delta_j} = -U_i U_j (g_{i,j} \sin \delta_{i,j} + b_{i,j} \cos \delta_{i,j}); \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \omega_{Q_i}}{\partial \delta_j} = U_i U_j (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}); \quad (2.34)$$

Наведем алгоритм розрахунку за методом Зейделя:

1) умовно вважають, що напруги всіх вузлів схеми дорівнюють номінальній напрузі електричної системи;

$$\dot{U}_i = U_H; \quad (2.35)$$

2) визначають нев'язки потужностей за поточних наближень невідомих напруг за відповідними формулами (2.23-2.24), перевіряють умови збіжності ітераційного процесу, якщо максимальна за модулем нев'язка потужності не перевищує інженерної точності (2.36) то це свідчить про досягнення мети ітераційного розрахунку і виконання алгоритму зупиняють, в іншому разі переходять до пункту 3 алгоритму;

$$\max\{|\omega_i(U^{(n)})|\} \leq \varepsilon; \quad (2.36)$$

3) визначають елементи матриці Якобі за поточних наближень невідомих напруг відповідно до формул (2.27-2.34);

4) розв'язують систему лінійних алгебраїчних рівнянь, що має вигляд (2.12). Розраховують нові наближення невідомих напруг за формулою (2.13), далі переходимо до пункту 2 алгоритму для реалізації нового ітераційного процесу.

Наведемо основні особливості метода Ньютона.

Класичний метод Ньютона відноситься до групи методів вузлової моделі, що дає ряд переваг перед методами, що базуються на контурній моделі. Основною перевагою є те, що не потрібно прив'язуватися до топографії схеми, що дозволяє найбільш ефективно та просто організувати автоматизований ітераційний процес. І при відносно невеликій, порівняно з іншими методами, кількості ітерацій процес досягає точності розрахунку. Основною проблемою цього методу є необхідність обернення матриці Якобі на кожній ітерації, що складає 70% об'єму розрахунків і відповідно займає більшу частину потужності обчислювальної машини. Слід зазначити, що, при збільшенні кількості вузлів на 1 вузол, кількість рівнянь збільшується на 2. А також особливістю матриці Якобі є те, що така матриця прямо залежить від кількості зв'язків, через це ця матриця є мало заповненою, що робить процес розрахунку менш оптимізованим. Тобто, процес розрахунку оберненої матриці Якобі займає більше часу ніж потрібно фактично. Але ця проблема може бути вирішена завдяки застосуванню методів розрахунку для слабо заповнених матриць. Також слід зазначити, що метод Ньютона має достатню стійкість, тобто знаходить розв'язок в тих режимах, коли, наприклад, метод Зейделя, вже не має розв'язку і зациклюється. Також метод Ньютона відносно не чутливий до кількості вузлів. Тобто при збільшенні розмірності схеми кількість ітерацій значно не збільшується.

Наведемо основні відомості щодо модифікацій методу Ньютона, розглянутих в рамках роботи.

В рамках дослідницької роботи було розглянуто дві модифікації метода Ньютона: підхід без перерахунку матриці Якобі та метод січних.

При застосуванні метода Ньютона 70% обчислювальних потужностей втрачається на перерахунок та обернення матриці Якобі, в той же час, значення

матриці змінюється не значно, таким чином можливо розраховувати Якобіан або через певну кількість ітерацій, або взагалі один раз за весь розрахунок. Такий підхід погіршує збіжність і потребує розрахунку більшої кількості ітерацій, але в той же час зменшує об'єм необхідних розрахунків на кожній ітерації.

Метод січних застосовують у випадках коли процес знаходження часткових похідних або дуже складний або неможливий, такий метод за значно спрощує ітераційний розрахунок, тому що немає необхідності розрахунку матриці Якобі, достатньо порівнювати наближення на сусідніх ітераціях, але кількість ітерацій збільшується в значно збільшується, порівняно з класичним методом Ньютона.

2.3 Результати дослідження

Дослідження в рамках роботи було проведено на основі чотирьох варіацій 14-вузлової схеми IEEE (Рис. 2.2), у таких конфігураціях мережі:

- розімкнена схема з відключеними ділянками 2-5, 3-4, 4-5, 4-7, 4-9 та 5-6 без трансформаторних зв'язків (Схема 1);
- замкнена схема з відключеними ділянками 5-6, 4-7 та 4-9 без трансформаторних зв'язків (Схема 2);
- розімкнена схема з відключеними ділянками 2-5, 3-4, 4-5, 4-9, 10-11, 12-13 та 13-14 з трансформаторними зв'язками (Схема 3);
- замкнена мережа з трансформаторними зв'язками (Схема 4).

В ході проведення дослідження виконано розрахунки параметрів усталених режимів роботи зазначених електричних мереж з поступовим їх обтяженням шляхом введення відповідного коефіцієнту обтяження $k_{об}$ до значень навантажень пунктів та визначено граничні значення $k_{об}$, за яких досягається збіжність ітераційного процесу розрахунку. Результати досліджень наведено на графіках рис. 2.3 – 2.6.

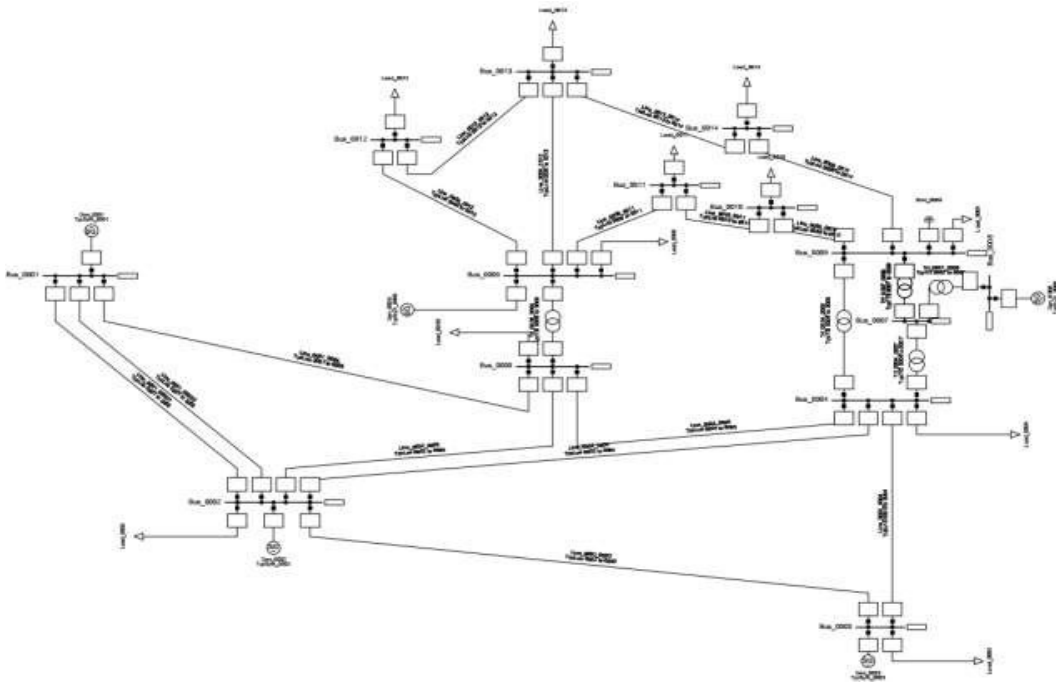


Рисунок 2.2 – Тестова схема електричної мережі IEEE-14

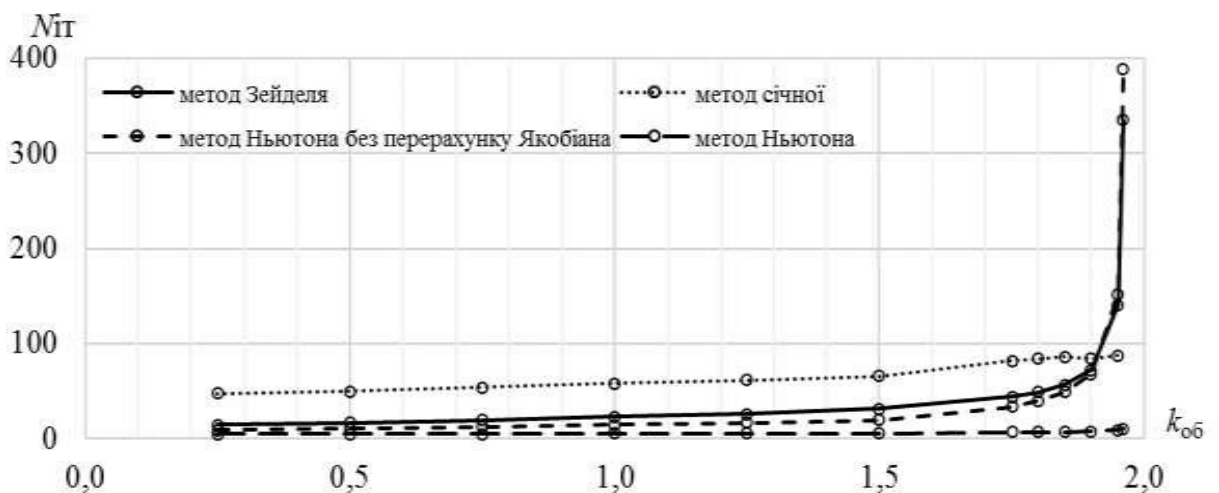


Рисунок 2.3 – Графіки залежності кількості ітерацій від значення коефіцієнту обтяження для Схеми 1 для різних методів розрахунку

Аналіз графіків рис. 2.3 – 2.6 показує, що для розглянутих конфігурацій схем електричних мереж для методів Зейделя, а також методу Ньютона та методу Ньютона без перерахунку якобіана відсутня відмінність у граничних значеннях коефіцієнту обтяження, натомість для методу січної у випадку розрахунку параметрів усталених режимів розімкнених мереж це

значення є суттєво меншим. Також граничний коефіцієнт обтяження за методом Зейделя та Ньютона відповідає межі статичної стійкості мережі за напругою.

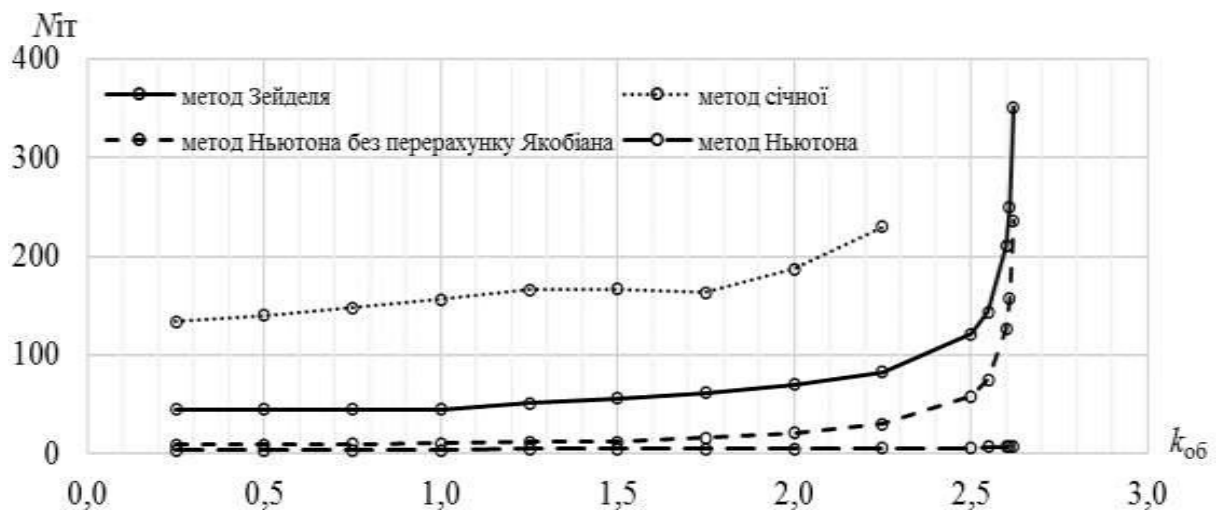


Рисунок 2.4 – Графіки залежності кількості ітерацій від значення коефіцієнту обтяження для Схеми 2 для різних методів розрахунку

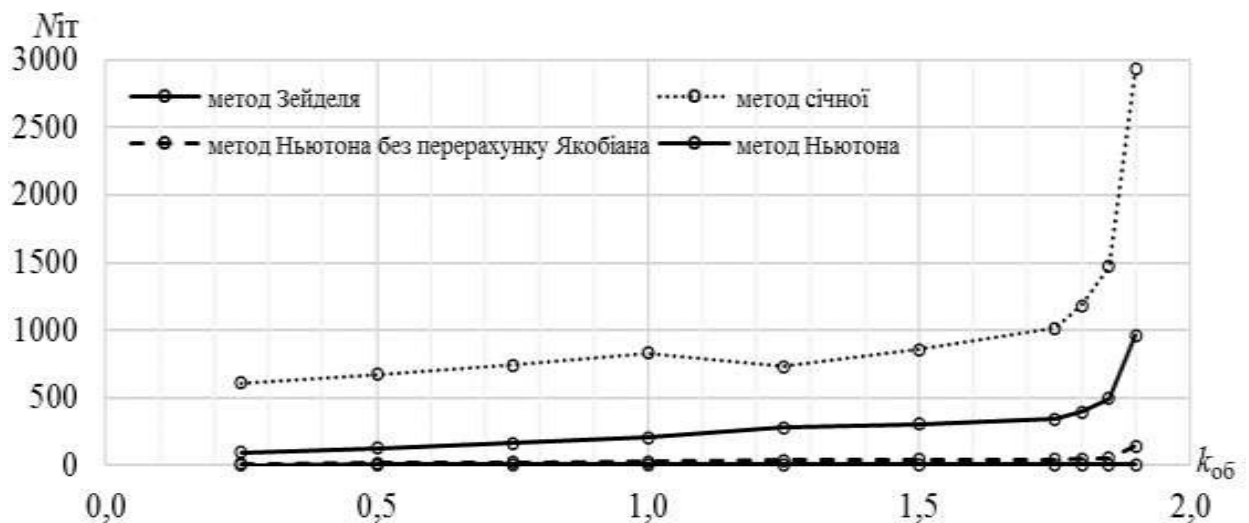


Рисунок 2.5 – Графіки залежності кількості ітерацій від значення коефіцієнту обтяження для Схеми 3 для різних методів розрахунку

Водночас, кількість ітерацій, необхідних для досягнення розв'язку системи вузлових рівнянь (2.1) для розглянутих методів розрахунку при максимальних обтяженнях режимів розглянутих електричних мереж для розглянутих методів може відрізнятись на порядки, що, у випадку розрахунку режимних параметрів

електричних мереж, які містять тисячі вузлів (наприклад, основної мережі енергооб'єднання ENTSO-E), призведе до значних часових затримок в отриманні результату.

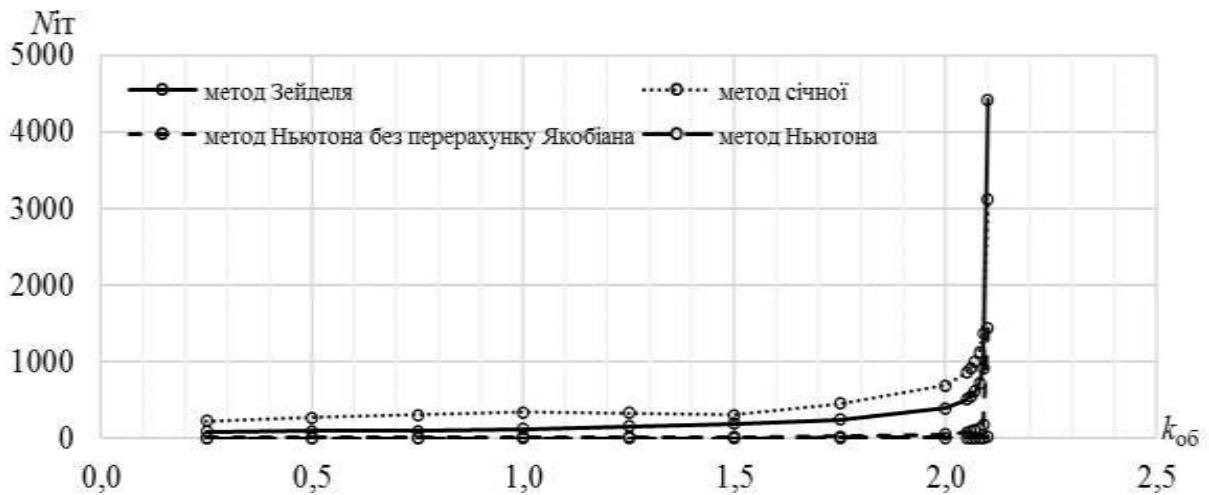


Рисунок 2.6 – Графіки залежності кількості ітерацій від значення коефіцієнту обтяження для Схеми 4 для різних методів розрахунку

Порівняння графіків рис. 2.3 – 2.6 для метода Ньютона та його модифікацій дає можливість стверджувати, що застосування методу січної під час розрахунку параметрів граничних за збіжністю ітераційного процесу усталених режимів роботи електричних мереж без трансформаторних зв'язків є недоцільним.

Наближення режимів роботи електричних мереж різної конфігурації до межі збіжності ітераційного процесу розрахунку призводить до різкого збільшення кількості ітерацій, необхідних для визначення режимних параметрів, для всіх розглянутих методів, окрім метода Ньютона. Окремо слід зазначити, що для розглянутих схем в режимах, граничних за збіжністю ітераційного процесу, максимальна кількість ітерацій розрахунку за методом Ньютона не перевищувала 21, натомість для інших методів розрахунку ця кількість сягала сотень та тисяч.

Висновки до розділу 2

- 1) визначено, що з огляду на забезпечення отримання результату розрахунку параметрів усталених режимів роботи електричних мереж різної конфігурації в режимах, граничних за збіжністю ітераційного процесу, можуть бути застосовані такі методи вузлової моделі: Зейделя, Ньютона та Ньютона без перерахунку Якобіана. Зазначені методи забезпечують однаковість результатів за критерієм граничного значення коефіцієнта обтяження режиму;
- 2) встановлено, що з наближенням до межі збіжності ітераційного процесу розрахунку кількість ітерацій, необхідних для визначення параметрів усталених режимів роботи електричних мереж, різко зростає для всіх розглянутих методів, окрім метода Ньютона, що може призвести значних часових затримок в отриманні результатів у випадку роботи з електричними мережами, що містять велику кількість вузлів;
- 3) встановлено, що методи Зейделя та Ньютона забезпечують можливість отримання результатів розрахунку параметрів усталеного режиму в діапазоні, обумовленому межею статичної стійкості електричної мережі.

2 СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ

3.1 Загальна структура програмного забезпечення

Програмне забезпечення дипломного проєкту реалізоване у вигляді Web-додатка з використанням архітектурного шаблону MVC. Програмну систему можна розділити на дві частини:

- 1) серверна частина, яка містить в собі всю бізнес-логіку, відповідальна за збереження та обробку даних;
- 2) клієнтська частина, що представляє зовнішній вигляд Web-додатка та дає користувачу можливість повноцінно користуватися розроблюваним програмним забезпеченням.

Клієнтська частина взаємодіє із серверною через інтерфейс RESTful API. Такий підхід разом з обраними технологіями дозволяє розробляти елементи програмної системи незалежно один від одного. Клієнтській частині не потрібно знати особливості реалізації серверної частини, а серверній – клієнтської. Для цього попередньо формується API – адреса (URL), метод та тіло запиту, яке приймає або повертає сервер у певному форматі. Знаючи даний API клієнтська частина може розроблятися незалежно, навіть за умови, що сервер ще не було реалізовано та розгорнуто в мережі.

Крім того, швидкість роботи цих частин не буде залежати від обчислювальних можливостей пристрою користувача, а лише від якості з'єднання та потужності сервера. Це дозволяє інтегрувати додаток у смартфони та планшети.

3.2 Структура серверної частини Web-додатка

Функції серверної частини Web-додатка:

- 1) реалізує процедуру створення робочого поля;
- 2) отримує, обробляє запити від клієнта та повертає відповідь;

3) взаємодіє з базою даних, виконуючи операції створення, зчитування, оновлення та видалення (CRUD) для сутностей системи;

4) реалізує функціонал для розрахунку схеми методом ньютонна.

Як було описано вище Web-додаток реалізовано у вигляді MVC шаблону. Серверна частина у цій зв'язці виконує роль Моделі (M) та Контроллера (C). Вона реалізує всю логіку роботи системи, створюючи її Модель, та надає інтерфейс для взаємодії з нею – Контроллер. Для виконання поставлених задач сервер має власну архітектуру, в даному разі було обрано багаторівневу, де зв'язки між компонентами залежать від рівня на якому вони розміщуються. Компоненти організовані в горизонтальні шари, кожен рівень виконує конкретну роль та несе певну відповідальність у застосуванні. Рівні архітектури Web сервера (рис. 3.1):

1) рівень подання (presentation layer). Розміщуються фільтри, контроллери. Відповідальний за обробку запитів від клієнта та перевірку вхідних даних. Описує API Web-сервера. Серверна частина реалізована за допомогою фреймворку Spring Boot. Він реалізує шаблон Front Controller, що об'єднує обробку всіх запитів шляхом їх направлення через один об'єкт – Dispatcher Servlet, який, використовуючи екземпляр класу HandlerMapping, делегує запити на відповідні контроллери. Такий підхід дозволяє позбутися дублювання коду, об'єднуючи загальну поведінку програми (авторизація, інтернаціоналізація) в один об'єкт, а також дозволяє змінювати цю поведінку динамічно під час виконання;

2) рівень фасадів (facade layer). Розміщуються класи фасадів та конвертори. Головне призначення – конвертація об'єктів DTO з запитів в об'єкти моделей та навпаки. Моделі використовуються на рівні бізнес-логіки та зберігаються в базі даних. DTO необхідні для передачі даних між клієнтською і серверною частиною. Структура цих об'єктів не обов'язково повинна бути однаковою;

3) рівень бізнес-логіки (service layer). Розміщуються сервіси, які містять всю логіку роботи Web-додатка. Сервіси відповідають за валідацію даних та

виконання необхідної бізнес-логіки. Слід відмітити, що на цьому рівні виконуються основні операції збереження, видалення, оновлення та отримання даних. Також на цьому рівні виконується розрахунок режиму за допомогою метода Ньютона;

4) рівень зберігання та доступу до даних (persistence layer). Розміщуються окремі модулі системи, які взаємодіють з різними зовнішніми сервісами для отримання, зберігання та обробки даних.

DAO – інтерфейс для доступу до бази даних. Приховує від користувача деталі реалізації, особливості бази даних чи технологій для взаємодії з нею.

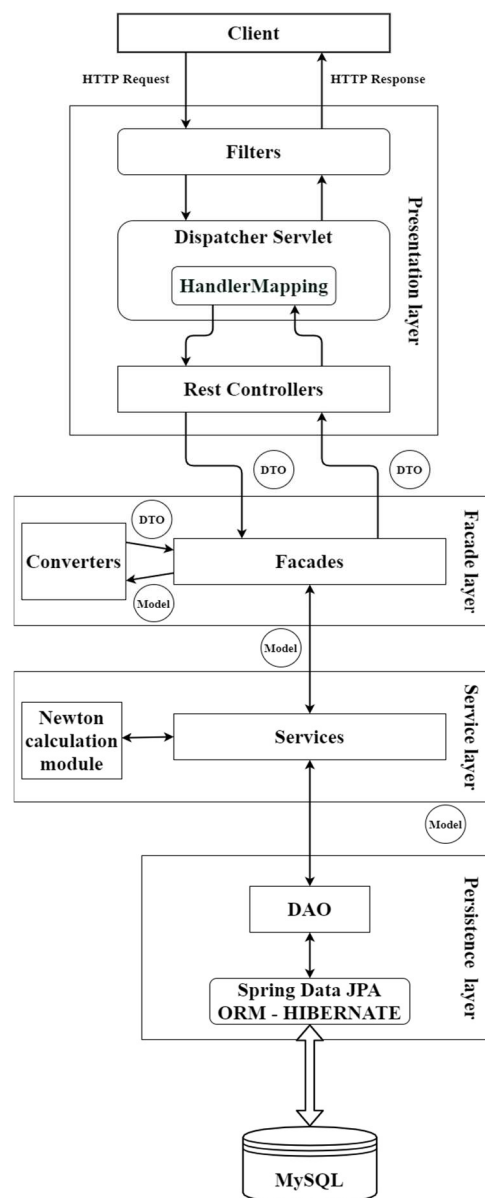


Рисунок 3.1 – Структура серверної частини Web-додатка

3.3 Структура бази даних

Для розробки Web-додатка з урахуванням поставлених вимог до розрахунку режимів електропередач було спроектовано схему реляційної бази даних. Таблиці бази даних, зв'язки між ними, зовнішні і первинні ключі та типи полів зображено у вигляді ER-діаграми (рис. 1.2). Усі таблиці нормалізовані у першу, другу та третю нормальні форми.

Пропонується окремо детальніше розглянути сутності спроектованої ER-діаграми з описом їх призначення та атрибутів.

Координата (табл. coords) – точка на площині, на якій може бути розміщений один елемент:

- 1) унікальний ідентифікатор координати (coord_id) – первинний ключ;
- 2) початок по осі абсцисс (begin);
- 3) кінець по осі ординат (end);
- 4) ідентифікатор розрахунку (calculation_id);
- 5) номер вузла (node_number);
- 6) назва трансформатора (transformer_name);
- 7) ідентифікатор елемента у клітинці (element_id);
- 8) назва елемента (element).

Вузол (табл. nodes) – таблиця для збереження параметрів вузла:

- 1) унікальний ідентифікатор вузла (role_id) – первинний ключ;
- 2) ідентифікатор розрахунку (calculation_id);
- 3) номер вузла (number);
- 4) активна потужність (active_power);
- 5) реактивна потужність (reactive_power);
- 6) напруга вузла (voltage);
- 7) балансує вузол (is_balanced);
- 8) $\cos\phi$ (cos_fi).

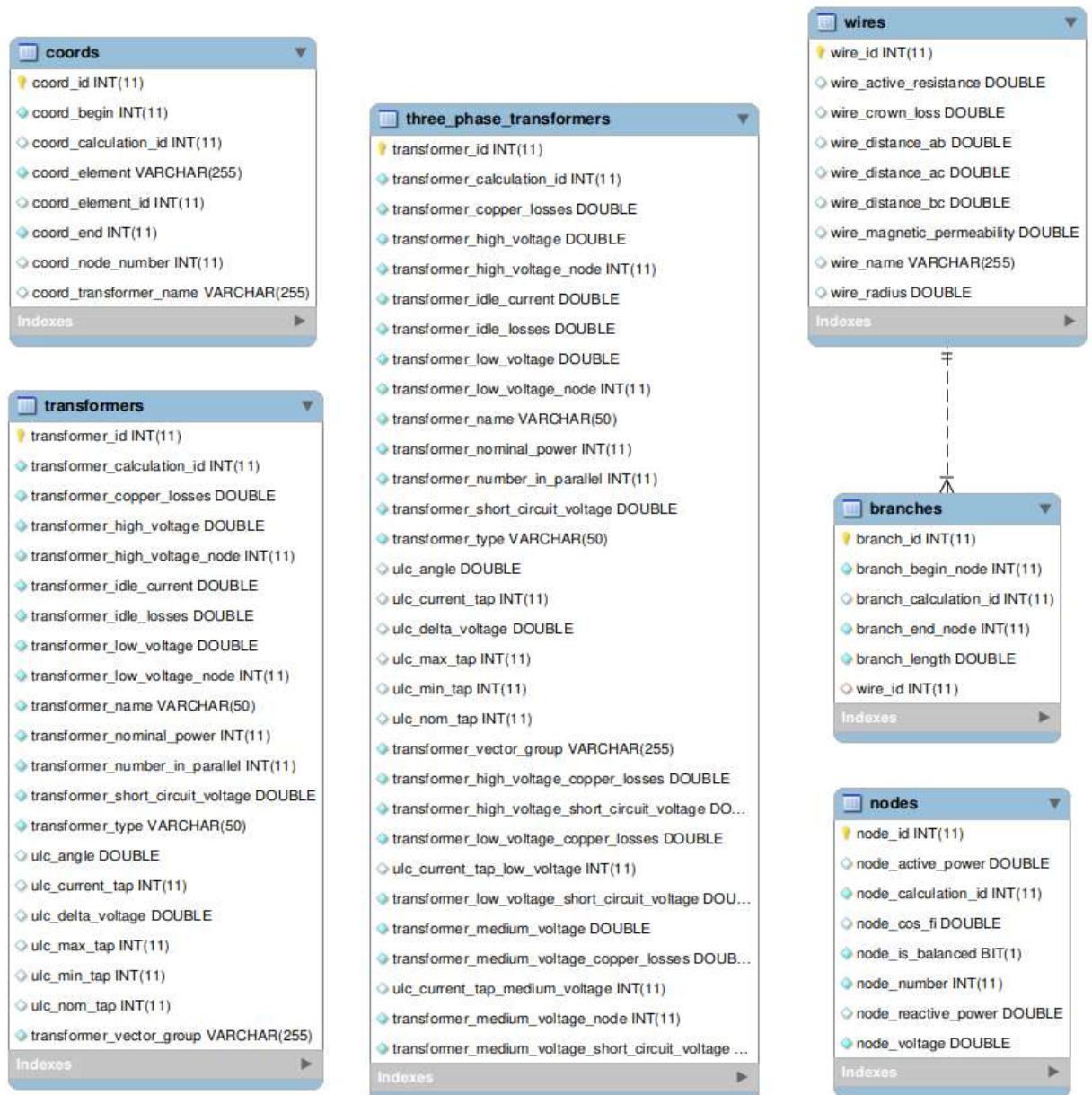


Рисунок 3.2 – Структура бази даних

Гілка (табл. branches) – таблиця для збереження параметрів гілки:

- 1) унікальний ідентифікатор гілки (role_id) – первинний ключ;
- 2) унікальний ідентифікатор проводу (wire_id) – зовнішній ключ;
- 3) ідентифікатор розрахунку (calculation_id);
- 4) початковий вузол приєднання (begin_node);
- 5) кінцевий вузол приєднання (end_node);
- 6) довжина ділянки (length).

Провід (табл. wires) – таблиця для збереження параметрів проводів:

- 1) унікальний ідентифікатор проводу (wire_id) – первинний ключ;
- 2) ім'я (name);
- 3) активний опір (active_resistance);
- 4) втрати на корону (crown_losses);
- 5) радіус (radius);
- 6) магнітна проникність (magnetic_permeability);
- 7) відстань між фазами ab (distance_ab);
- 8) відстань між фазами bc (distance_bc);
- 9) відстань між фазами ac (distance_ac).

Також, ми маємо ще дві таблиці transformers та three_phase_transformers, які відповідають за збереження параметрів різних типів трансформаторів. Основні параметри, можна побачити на рис. 3.2.

Висновки до розділу 3

За результатами аналізу різних типів технологій для реалізації Web-додатку для розрахунку електричних мереж можна відзначити основні позиції стосовно серверної частини:

1) виконано реалізацію Web-додатку у шляхом формування MVC шаблону. Сервісна частина додатку виконує роль Моделі (M) та Контролера (C). Логіка моделі реалізується шляхом її моделі та надання та надання інтерфейсу для можливості взаємодії з нею;

2) збереження даних було реалізовано за допомогою Web-додатку MySQL. Для зв'язку бази даних та алгоритму обрано фреймворк Spring Data, що дозволяють працювати з таблицями у вигляді об'єктів, що суттєво спрощує процес опрацювання даних;

3) у Web-додатку для розрахунку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь реалізовано класичний метод Ньютона за допомогою мови програмування Java;

4) у Web-додатку реалізовано попередню валідацію, що дозволяє зменшити кількість помилок, ще до початку розрахунку.

4 ІНТЕРФЕЙС РОЗРОБЛЕНОГО WEB-ДОДАТКУ

4.1 Основні принципи побудови користувацького інтерфейсу

Стек технологій для розробки користувацької частини є практично ідентичним для будь-якого Web-додатку. Основу складає HTML і CSS. HTML (HyperText Markup Language) – мова розмітки сторінки Web-додатку, за допомогою якої створюються всі відображені на екрані елементи. CSS (Cascading Style Sheets) – каскадні таблиці стилів, які використовуються для задання усім елементам відповідного зовнішнього вигляду (розташування, форма, колір і тд.). JavaScript – мова програмування, що підтримує об'єктно-орієнтований, імперативний та функціональний стилі, і використовується для написання анімації – динамічної реакції елементів на дії користувача та зміни їх параметрів при таких діях.

В розробленому додатку прийнята для використання одна з найпопулярніших бібліотек (набір функцій) JavaScript – jQuery, що фокусується саме на взаємодії елементів HTML та JavaScript. Крім того jQuery має зручний API (Application Programming Interface) для роботи з AJAX (Asynchronous Javascript and XML). AJAX це підхід до побудови користувацьких Web-інтерфейсів, що використовує «фоновий» обмін даними з сервером, тобто без постійного перезавантаження сторінки. Таким чином використання такого стеку для побудови користувацького інтерфейсу забезпечить найбільшу швидкодію та зручність додатку.

Так само як CSS відокремлює візуалізацію від структури HTML, JQuery відокремлює поведінку від структури HTML. Наприклад, замість прямої вказівки на обробник події натискання кнопки, управління передається JQuery, яка ідентифікує кнопки і потім перетворює його в обробник події кліка. Такий поділ поведінки і структури також називається принципом ненав'язливого JavaScript. Бібліотека jQuery містить функціонал, корисний для максимально широкого кола завдань. Проте, розробниками бібліотеки не ставилося завдання суміщення в jQuery функцій, які підійшли б усюди, оскільки це призвело б до

великого розміру вихідного коду, велика частина якого була б не затребувана. Тому була реалізована архітектура компактного універсального ядра бібліотеки і плагінів. Це дозволяє зібрати для ресурсу саме ту JavaScript-функціональність, яка на ньому була б затребувана.

Таким чином, при розробці інтерфейсу додатку використовувалися наступні плагіни:

- Fancybox;
- Validate;
- Normalize.

Плагін Normalize використовується для кросбраузерності, тобто однакового відображення сторінки в різних браузерах, Validate – для валідації (перевірки правильності заповнення) форм – елементів через які користувач вносить дані на сервер, Fancybox – для розгортання необхідних вікон над сторінкою без її перезавантаження.

Додаток складається з трьох взаємопов'язаних сторінок. Такий поділ дозволяє розподілити процес роботи з додатком на етапи і зменшити навантаження на розрахунковий пристрій на кожному з цих етапів.

При розробці дизайну було прийнято рішення про використання двох палітр кольорів: відтінків сірого та жовтого. Таке поєднання зменшить навантаження на очі користувача, а контраст створений різницею кольорів, дозволить акцентувати увагу юзера на окремих важливих елементах.

Перша сторінка була створена для ініціалізації конкретного розрахунку, а також як елемент «знайомства» користувача з додатком. Зовнішній вигляд розробленої сторінки показаний на рис. 4.1.

Для правильного збереження даних в базу, і правильного використання програмою збережених даних, кожному введеному користувачем елементу присвоюється номер даного розрахунку, який автоматично задається при ініціалізації розрахункового поля.

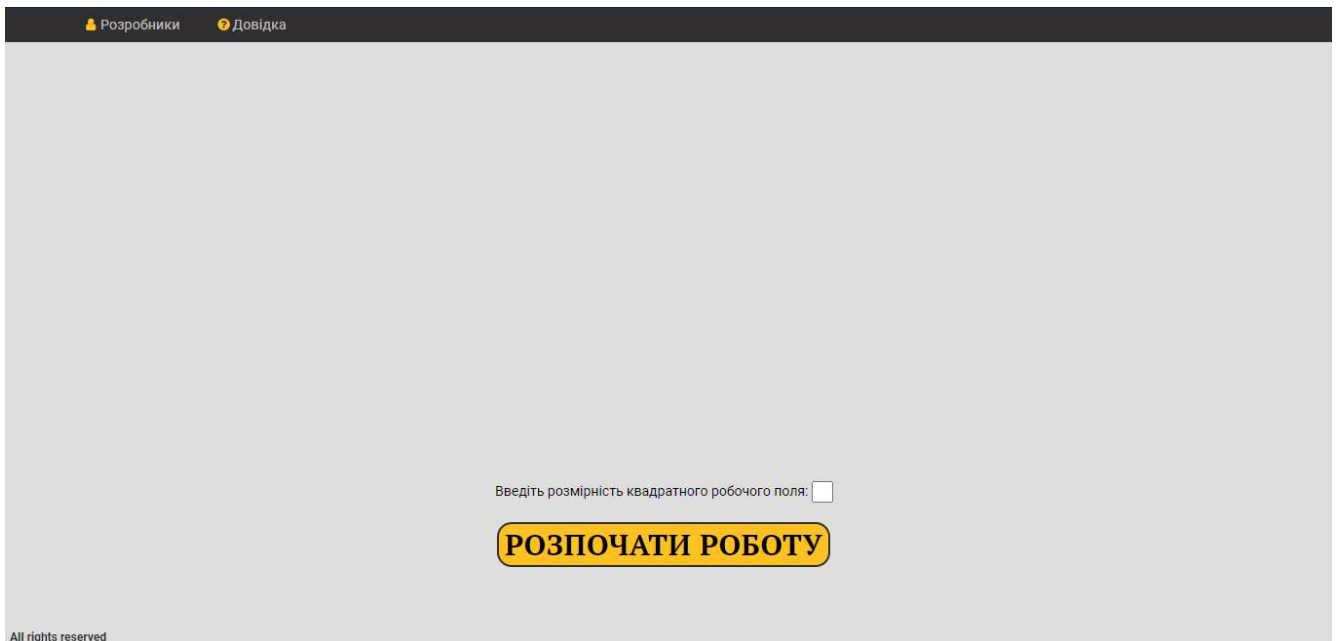


Рисунок 4.1 – Стартова сторінка додатку

На рис. 4.1 окрім кнопки початку роботи можна побачити маленьке вікно для введення розмірності робочого поля. Ця функція дозволяє створити поле будь-якої розмірності для побудови різних за масштабом електричних схем. Існують правила введення інформації в поля форми, тому при некоректному її заповненні чи ігноруванні будуть з'являтися повідомлення про помилки. Варіації розроблених повідомлень для форми розмірності поля наведені на рис. 4.2. Усі правила користування додатком, в тому числі і введення інформації у форми, описані в пункті 5 цього розділу.

У верхній частині стартової сторінки можна також побачити дві кнопки. Це кнопка «Розробники», натискання на яку відкриває вікно з контактами розробників (в майбутньому технічна підтримка), та кнопка «Довідка», натискання на яку відкриває вікно з коротким мануалом (правила роботи з додатком). Ці функції були закладені в додаток з метою полегшення використання програми, та можливості виправити помилки в роботі найшвидшим способом.

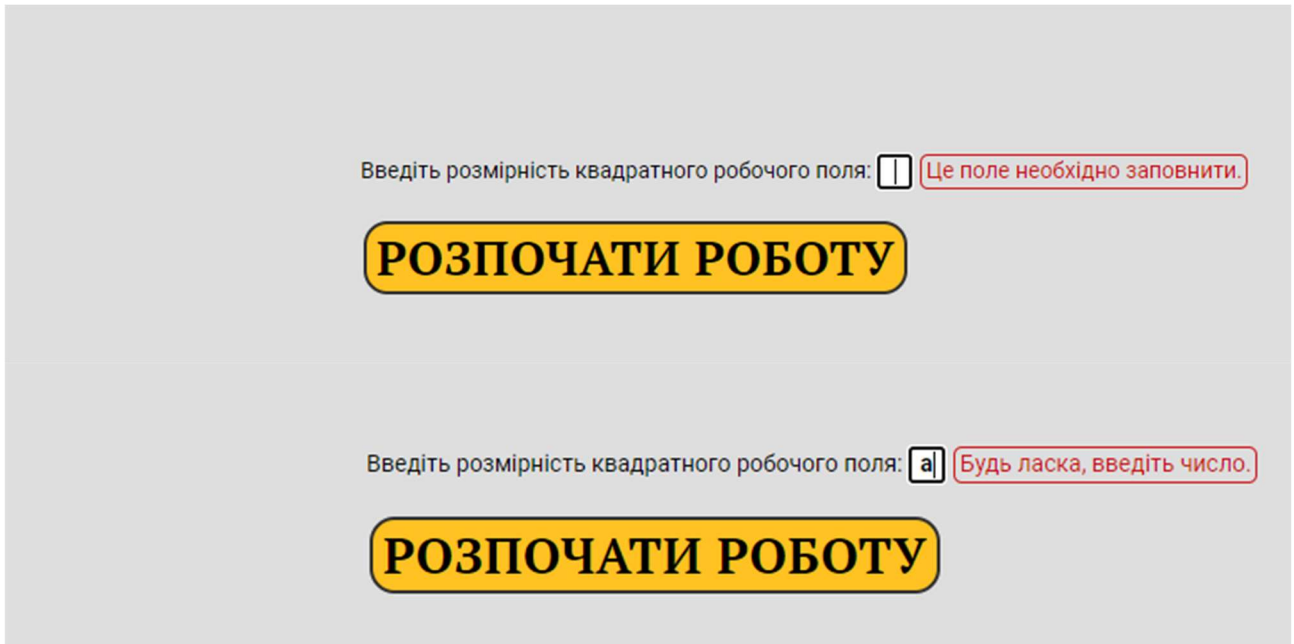


Рисунок 4.2 – Повідомлення про помилку заповнення форми

Після введення розмірності робочого поля та натискання на кнопку початку роботи програма переправить користувача на сторінку робочого поля. Фактично додаток надішле запит на контролер *initField()*, який і повертає нову сторінку з тою розмірністю поля, яку задав користувач. Її зовнішні вигляд показано на рис. 4.5. Текст коду контролера *initField()* показано на лістингу 1. Сторінка складається власне з робочого поля, яке можна вільно гортати в різних напрямках, форми з параметрами ітераційного розрахунку та вільним місцем під можливий майбутній функціонал.

Робоче поле є квадратним, крім того кількість елементів по горизонталі та вертикалі є рівним числу, що ввів користувач у формі на попередній сторінці. Кожна «клітинка» є незалежним типовим елементом, функцією якого є графічне відображення топографії схеми. Оскільки в браузерах немає функціоналу для необмеженого креслення, така структура дозволить показати топографію графічно, хоча б у спрощеному вигляді. Креслення схеми відбувається шляхом заповнення «клітинок» необхідними елементами електричних мереж.

```

static ModelAndView initField(CoordsFieldDTO field) {
    ModelAndView modelAndView = new ModelAndView();
    NodeDTO nodeDTO = new NodeDTO();
    BranchDTO branchDTO = new BranchDTO();
    TransformerDTO transformerDTO = new TransformerDTO();
    ThreePhaseTransformerDTO threePhaseTransformerDTO = new ThreePhaseTransformerDTO();
    UnderLoadChangingGearDTO highVoltageGear = new UnderLoadChangingGearDTO();
    UnderLoadChangingGearDTO mediumVoltageGear = new UnderLoadChangingGearDTO();
    UnderLoadChangingGearDTO lowVoltageGear = new UnderLoadChangingGearDTO();
    List<UnderLoadChangingGearDTO> underLoadChangingGearList = Arrays.asList(highVoltageGear,
    mediumVoltageGear, lowVoltageGear);

    highVoltageGear.setVoltage("High");
    mediumVoltageGear.setVoltage("Medium");
    lowVoltageGear.setVoltage("Low");
    branchDTO.setWire(new WireDTO());
    transformerDTO.setUnderLoadChangingGear(underLoadChangingGearList);
    threePhaseTransformerDTO.setUnderLoadChangingGear(underLoadChangingGearList);

    modelAndView.addObject("field", field);
    modelAndView.addObject("node", nodeDTO);
    modelAndView.addObject("branch", branchDTO);
    modelAndView.addObject("transformer", transformerDTO);
    modelAndView.addObject("threePhaseTransformer", threePhaseTransformerDTO);
    modelAndView.setViewName(WORK_PAGE);

    return modelAndView;
}

```

Лістинг 1 – Контролер ініціалізації робочого поля

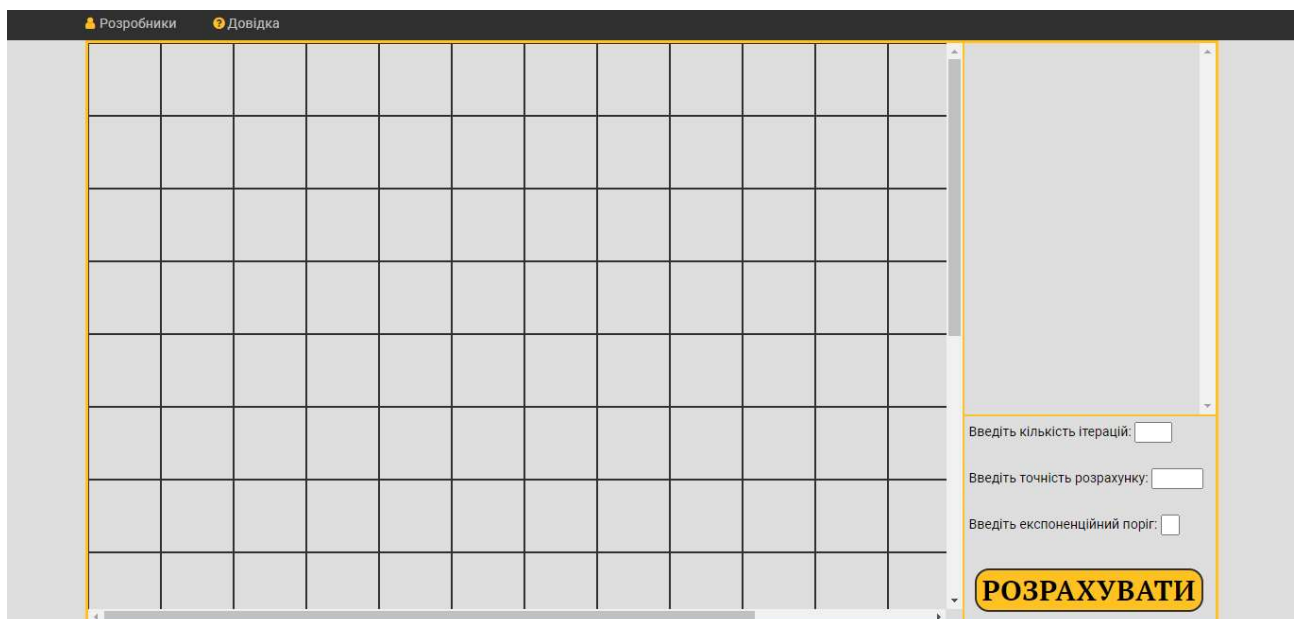


Рисунок 4.5 – Сторінка з робочим полем

При натисканні на будь яку клітинку, користувачу буде відкриватись спеціальне меню з основними класами елементів мереж. Зовнішній вигляд цього меню показано на рис. 4.6. В програмі існує 4 основні класи: пункти, ділянки, трансформатори та перемички. Останні не несуть в собі ніяких параметрів і використовуються лише для полегшення графічної побудови великих схем з складними зв'язками.

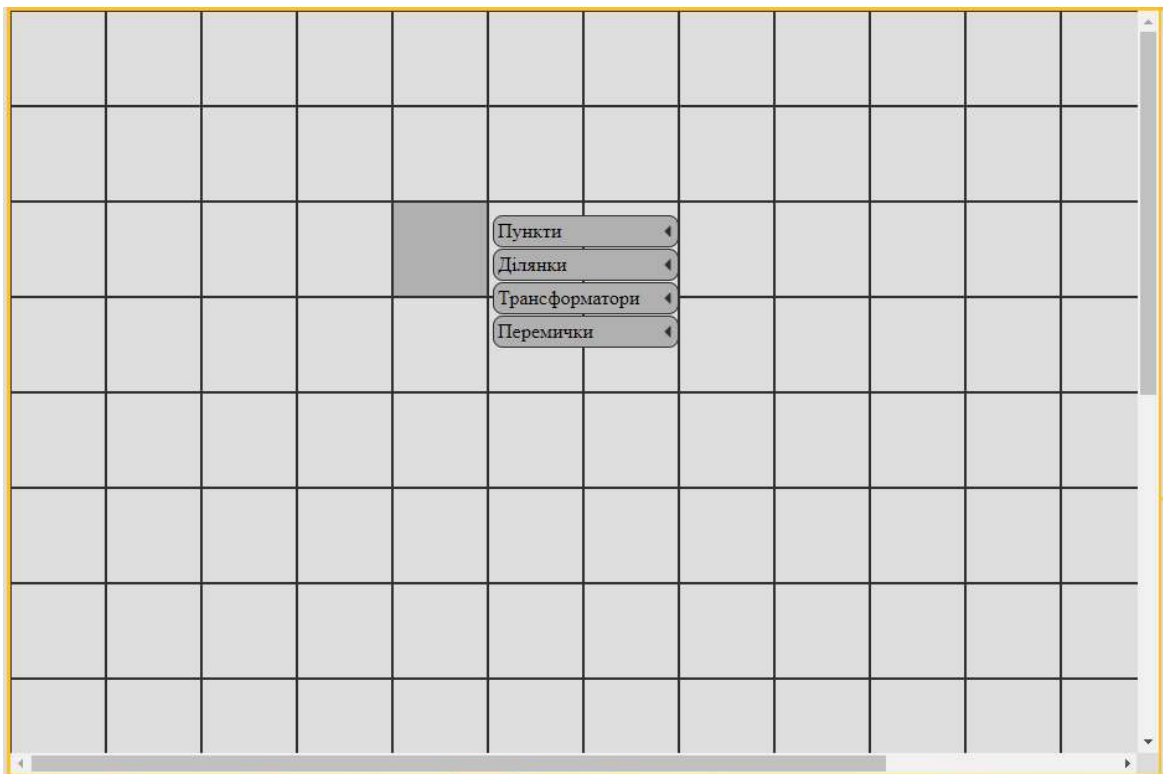


Рисунок 4.6 – Первинне меню елементів

При наведенні на будь-який клас елементів програма буде автоматично розгортати вторинне меню. В ньому будуть знаходитись конкретні елементи, які користувач може помістити в «клітинку». Оскільки схема з'єднань може бути складною, для кожного класу було створено декілька графічних відображень, щоб графічна топографія була найбільш інформативною. На рис. 4.7, рис. 4.8 та рис. 4.9 показані вторинні меню для кожного з класів елементів. При наведенні на конкретний елемент вторинного меню, користувачу буде показуватись призначення цього елемента.

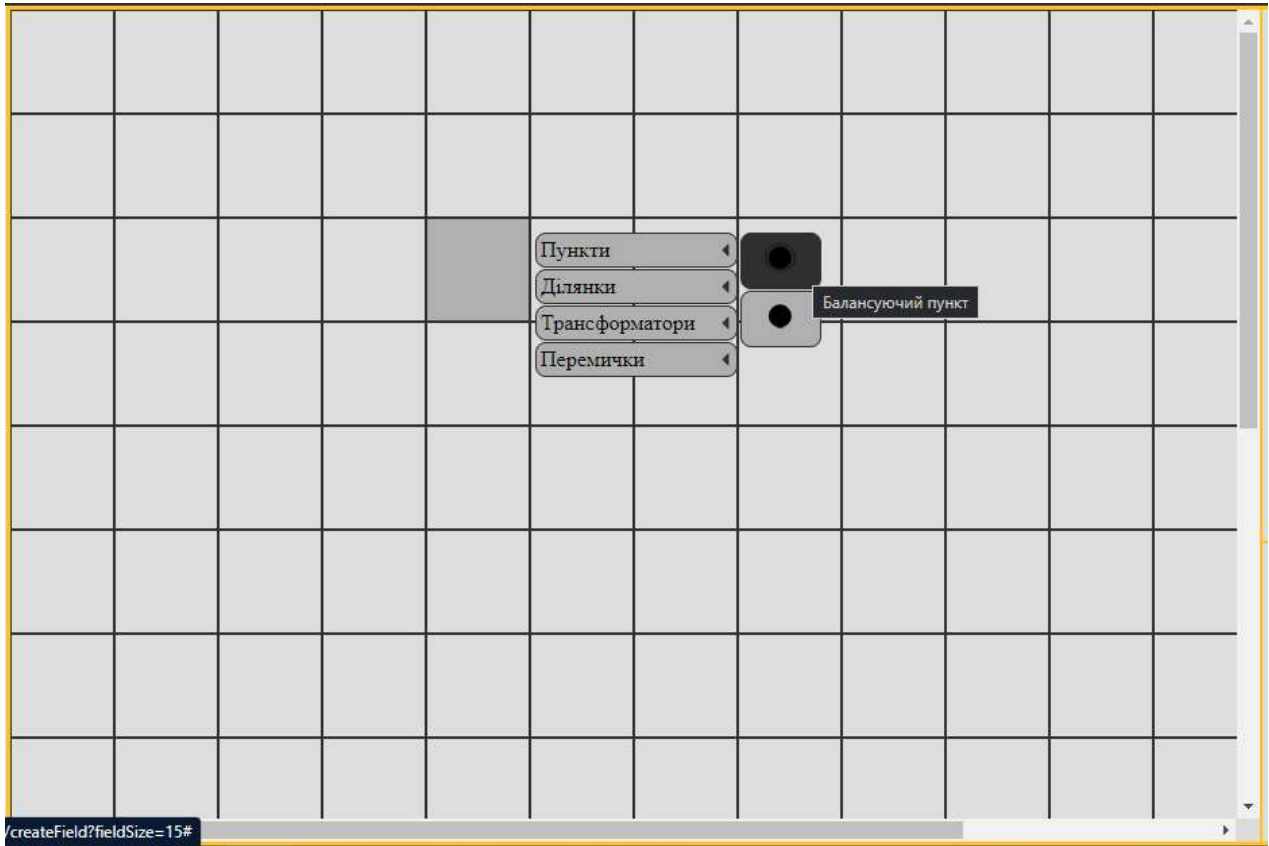


Рисунок 4.7 – Вторинне меню пунктів

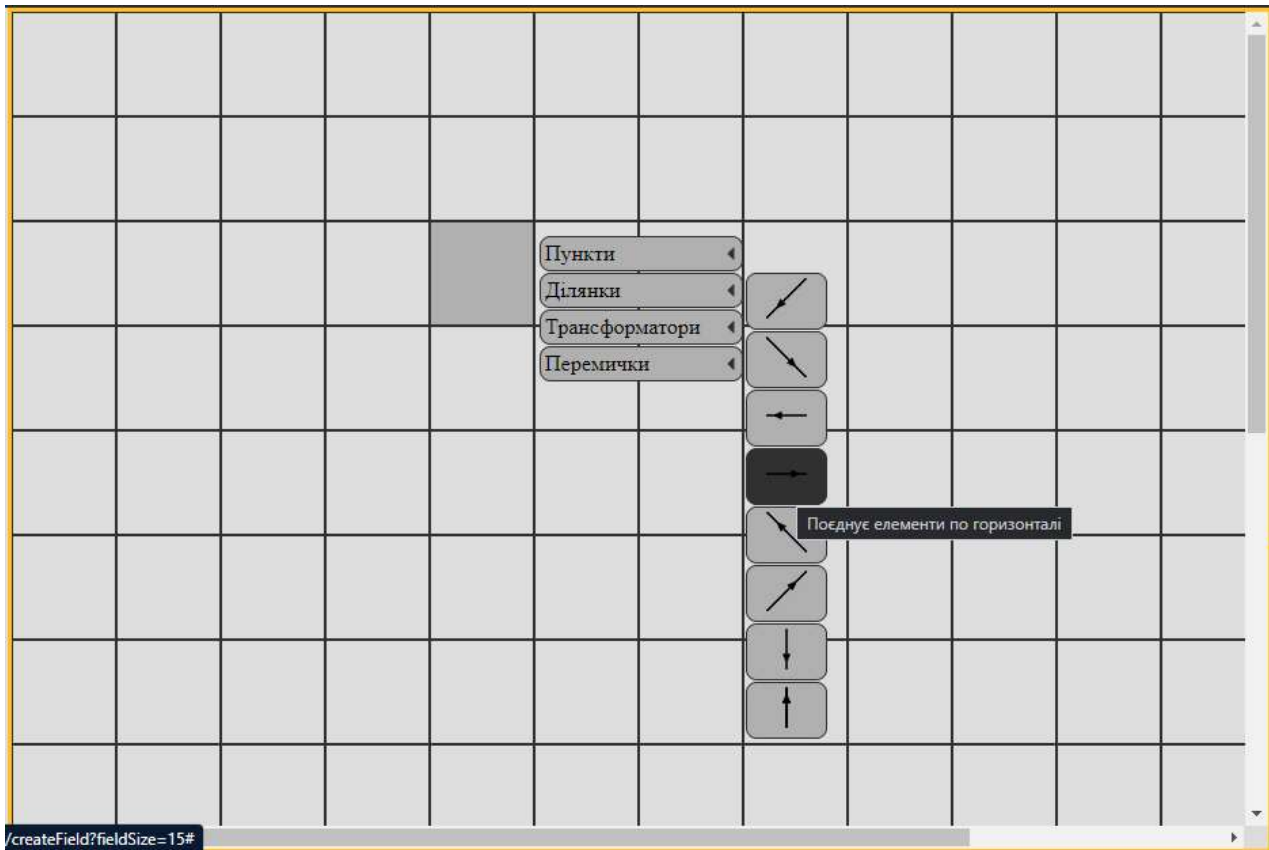


Рисунок 4.8 – Вторинне меню ділянок

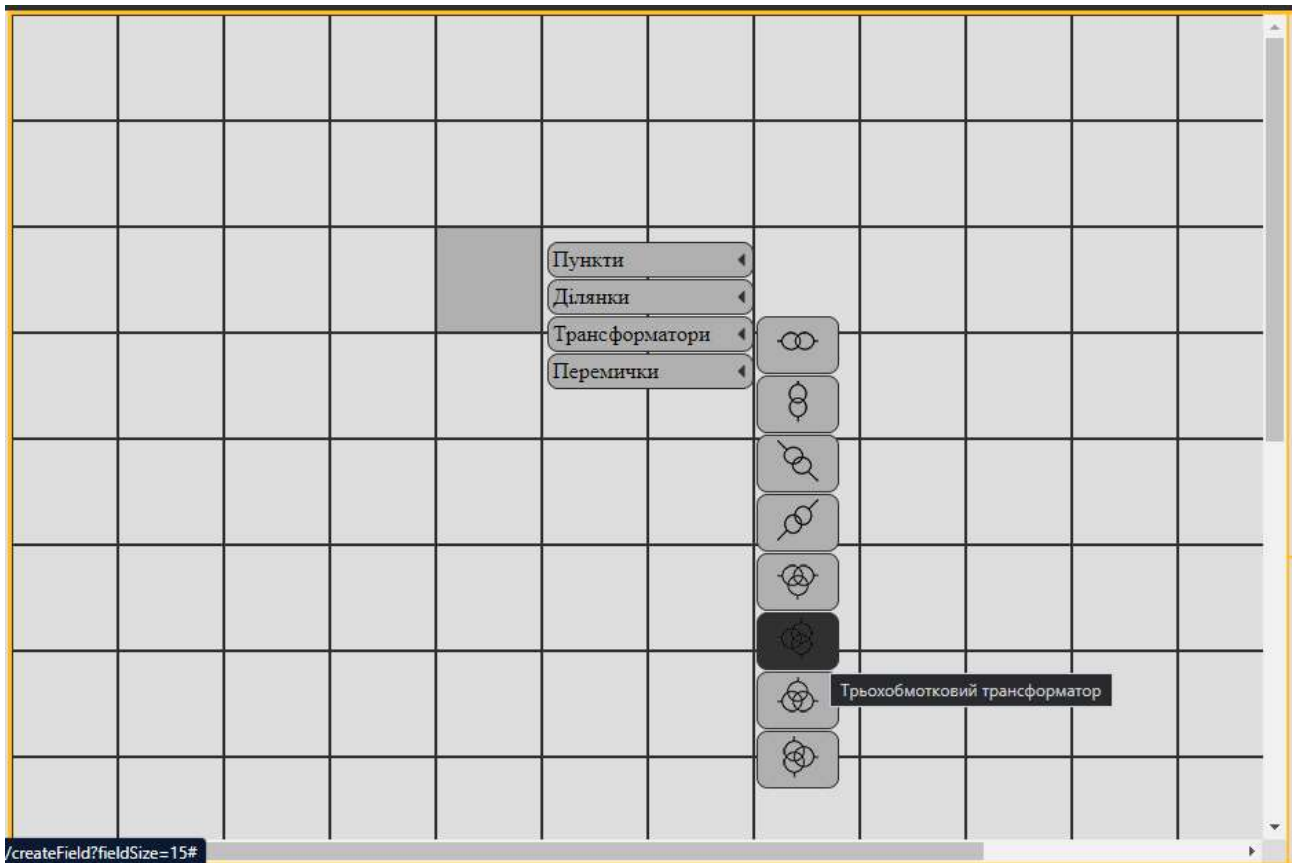


Рисунок 4.9 – Вторинне меню трансформаторів

На рис. 4.10 показано найпростішу мережу яку створили в додатку. Всі особливості вводу параметрів у форми для кожного з класів описані в пункті 2 цього розділу.

В додатку також було реалізовано можливість видаляти елементи або редагувати вхідні дані. Це реалізовано шляхом додавання кнопок «Редагувати» та «Видалити» після циклу створення нового елемента. Якщо користувач натисне на «клітинку» в яку вже завантажено елемент, програма покаже йому нове меню. При видаленні елемент буде повністю стертий як і з робочого поля, так і з бази даних. При редагуванні програма поверне користувачу форму для елемента, в якій вже будуть записані попередні значення. Користувачу потрібно буде змінити необхідні величини та заново відправити форму на сервер. Програма перезапише відредаговані дані в базу даних.

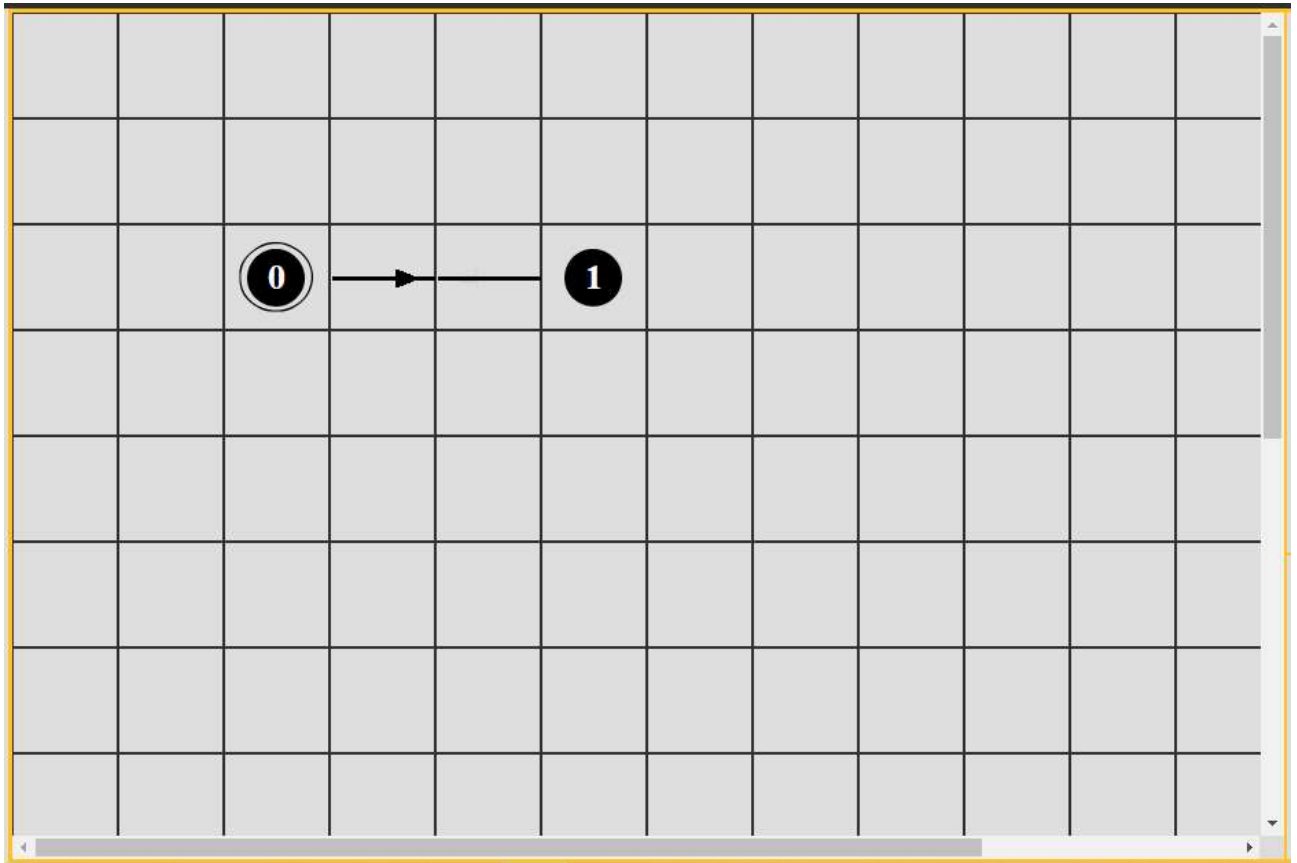


Рисунок 4.10 – Топографія найпростішої схеми



Рисунок 4.11 – Меню редагування та видалення

Після створення схеми, режим якої слід розрахувати, користувачу слід заповнити форму параметрів ітераційного розрахунку. Її зовнішній вигляд показаний на рис. 4.12. Для даної форми було розроблено валідацію в режимі

реального часу, і тому при невірному заповненні полів з'являтимуться повідомлення про помилку. Їх варіації показано на рис. 4.13.

Після натискання кнопки «Розрахувати» програма запустить алгоритм розрахунку і перенаправить користувача на сторінку виводу результатів.

Введіть кількість ітерацій:

Введіть точність розрахунку:

Введіть експоненційний поріг:

РОЗРАХУВАТИ

Рисунок 4.12 – Форма параметрів ітераційного розрахунку

Введіть кількість ітерацій:

Введіть число, більше або рівно 1.

Введіть точність розрахунку:

Будь ласка, введіть число.

Введіть експоненційний поріг:

Це поле необхідно заповнити.

РОЗРАХУВАТИ

Рисунок 4.13 – Повідомлення про помилку вводу даних у форму

4.2 Особливості використання Web-додатку

В цьому пункті зібрано перелік рекомендацій до роботи з додатком для забезпечення його надійної та безпомилкової роботи.

Нумерацію ділянок слід проводити починаючи з пункту з меншим порядковим номером не залежно від реального напрямку потоку потужності.

Писати найменування трансформаторів у формі у форматі «Т2» або «Т-2» задля збереження правильного графічного виводу результатів.

Висновки до розділу 4

- 1) розроблено дизайн користувацького інтерфейсу, який не інтуїтивно зрозумілий та не потребує великого часу для освоєння користувачем, а також дозволяє швидко набирати розрахункові моделі;
- 2) розроблено концепт робочого поля, який найбільш органічно вписується в концепцію Web-додатку та дозволяє спростити процес компоновки розрахункової схеми;
- 3) реалізовано ряд заходів дизайнерського характеру, такі як: анімація впливаючих вікон та меню елементів, такі розробки дозволяють користуватися Web-додатком більш приємно;
- 4) розроблено та реалізовано процес валідації вхідних даних з метою не допущення внесення в базу даних об'єктів, які відрізняються від тих, що передбачені розробником;
- 5) створено та розроблено графічний ввід та вивід даних з нанесенням основних режимних параметрів на топографічну схему мережі для більшої наочності та більш простого аналізу отриманих результатів;
- 6) створено ряд графічних позначень, за допомогою яких на робочому полі формується граф схеми електричної мережі, що дозволяє швидко та інтуїтивно зрозуміло формувати розрахункову схему мережі.

5 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

5.1 Опис розрахункової схеми та вихідні данні

Для визначення оптимальної конфігурації електромережі було обрано стандартну схему розрахункового комплексу PowerFactory, конфігурацію схеми наведено на рис.5.1, вихідні данні схеми наведені в табл.5.1-5.2.

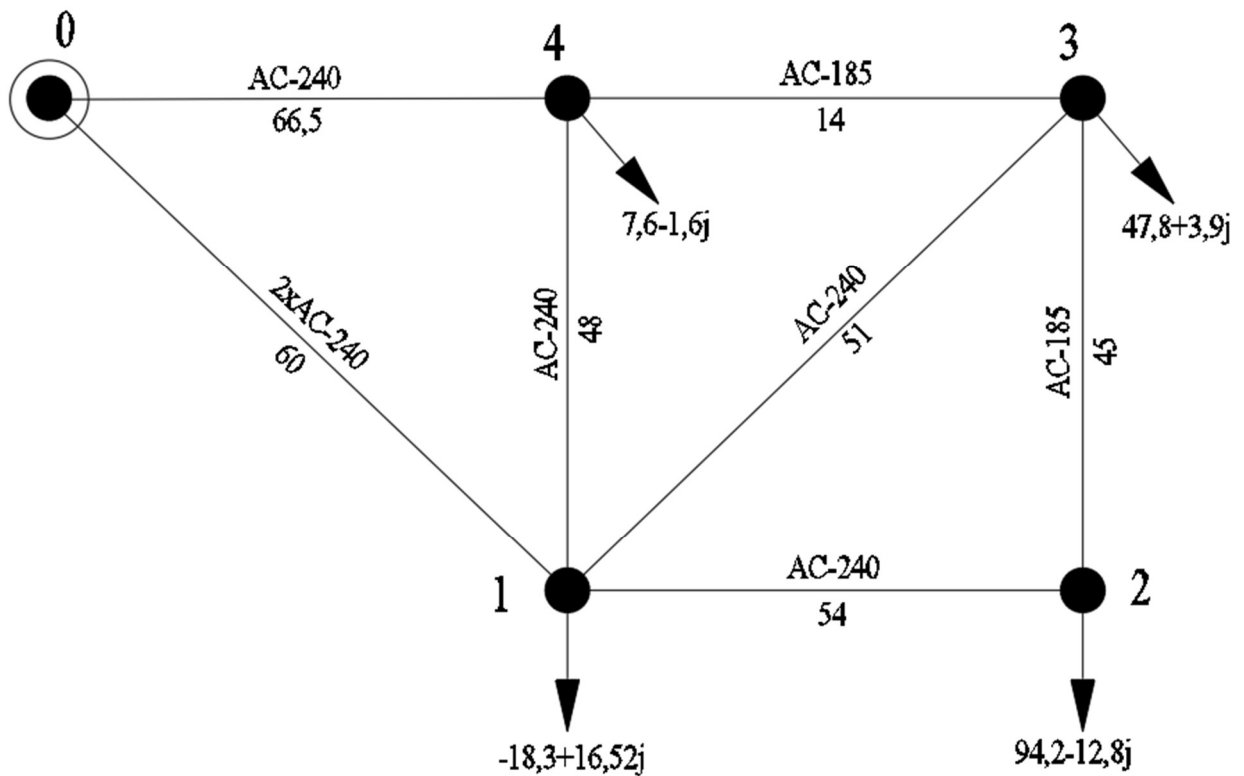


Рисунок 5.1 – Вихідна розрахункова схема

Таблиця 5.1 – Вихідні данні для розрахунку електричної мережі

Ділянка	0-1	0-4	1-2	1-3	1-4	2-3	3-4
Довжина	60 км	66,5 км	54 км	51 км	48 км	45 км	14 км
Провід	$2 \times \text{AC-240}$	AC-240	AC-240	AC-240	AC-240	AC-185	AC-185
Опора	П110-5	П110-5	П110-5	П110-5	П110-5	П110-5	П110-5

Таблиця 5.1.2 – Паспортні данні проводів

Провід	Опір, Ом/км	Радіус, мм
AC-240	0,112	10,8
AC-185	0,157	9,4

Таблиця 5.1.2 – Паспортні дані опор

Тип опори	Відстань між фазами, м		
	A-B	A-C	B-C
П110-5	7,3	6,3	6,3

Таблиця 5.1.3 – Величини навантажень у вузлах

Номер вузла	1	2	3	4
Потужність, МВА	$21,7-j12,7-S_{g1}$	$94,2-j19-S_{g2}$	$47,8+j3,9$	$7,6-j1,6$

На основі рис. 5.1 було обрано 2 варіанти (рис.5.2 та рис.5.3) з метою визначення оптимальної конфігурації за критерієм мінімізації сумарних втрат.

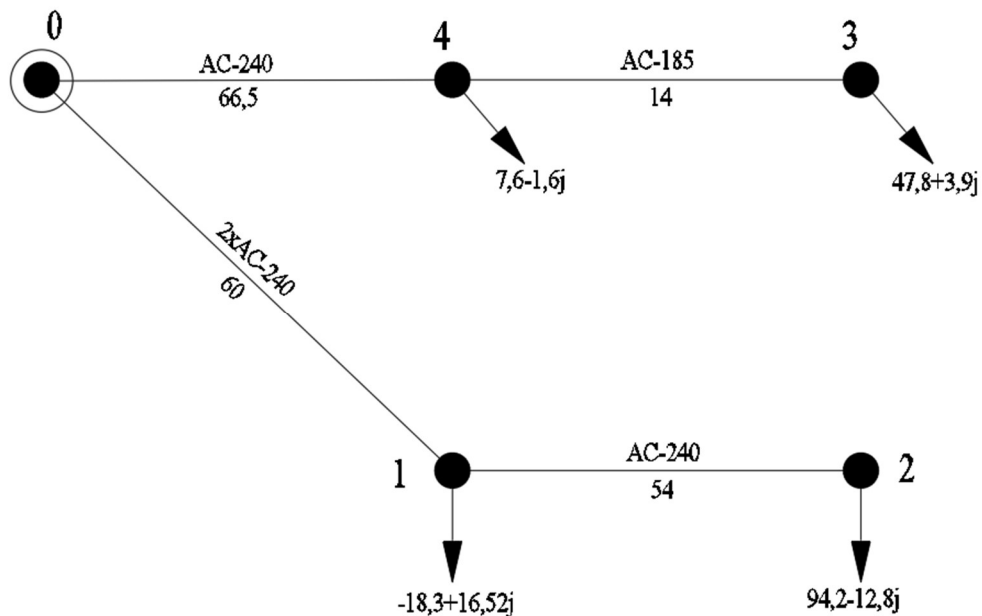


Рисунок 5.2 – Перший варіант конфігурації розімкненої схеми

Схема складається з 4 вузлів навантаження і одного балансуючого вузла, в першому та другому вузлах встановлено генератори, які працюють як синхронні компенсатори та компенсують реактивну потужність з метою підвищення напруги мережі, тому величина генерації реактивної потужності залежить від конфігурації схеми і відрізняється у всіх варіантах, величина потужності генерації наведено в табл 5.4.

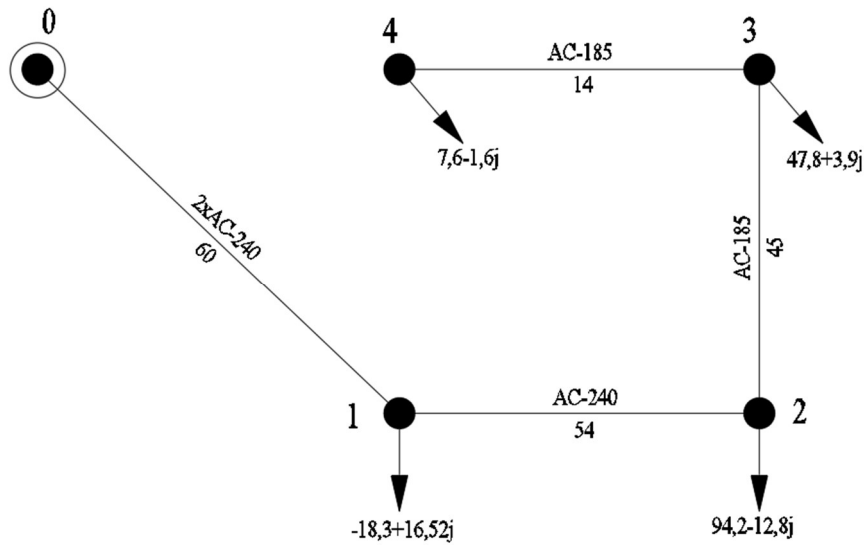


Рисунок 5.3 – Другий варіант конфігурації розімкненої схеми

Таблиця 5.4 – Величина потужності генераторів у вузлах

Генератори	Варіант 1	Варіант 2
S_{g1} , МВА	$40-j24,2$	$40-j43,6$
S_{g2} , МВА	$-j23,7$	$-j47,7$

5.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення вихідної мережі

Розрахуємо параметри схеми заміщення на основі паспортних даних, наведених в табл.5.1-5.4.

Активний опір:

$$r_{0,1} = \frac{r_{0,1} L_{0,1}}{k_{0,1} n_{0,1}} = \frac{0,112 \cdot 60}{2 \cdot 1} = 3,36 \text{ Ом.}$$

$$r_{0,4} = \frac{r_{0,4} L_{0,4}}{k_{0,4} n_{0,4}} = \frac{0,112 \cdot 66,5}{1 \cdot 1} = 7,448 \text{ Ом.}$$

Середньо геометрична відстань:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{A-B} D_{A-C} D_{B-C}} = \sqrt[3]{7,324 \cdot 6,357 \cdot 6,3} = 6,644 \text{ м.}$$

Реактивний опір:

$$x_{0,1} = \frac{\left(0,144 \cdot \lg \left(\frac{D_{cp0,1}}{R_{e0,1}}\right) + 0,016 \cdot \mu\right) \cdot L_{0,1}}{k_{0,1} n_{0,1}} =$$

$$= \frac{0,144 \cdot \lg\left(\frac{6,6}{0,01}\right) + 0,016 \cdot 1}{2 \cdot 1} \cdot 60 = 16,759 \text{ Ом.}$$

$$x_{0,4} = \frac{(0,144 \cdot \lg\left(\frac{D_{\text{cp}0,4}}{R_{e0,4}}\right) + 0,016 \cdot \mu) \cdot L_{0,4}}{k_{0,4} n_{0,4}} =$$

$$= \frac{0,144 \cdot \lg\left(\frac{6,6}{0,01}\right) + 0,016 \cdot 1}{1 \cdot 1} \cdot 66,5 = 37,148 \text{ Ом.}$$

Реактивна провідність:

$$b_{0,1} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{D_{\text{cp}0,1}}{R_{e0,1}}\right)} \cdot L_{0,1} k_{0,1} n_{0,1} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{6,6}{0,01}\right)} \cdot 60 \cdot 2 \cdot 1 = 81,534 \text{ См.}$$

$$b_{0,4} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{D_{\text{cp}0,4}}{R_{e0,4}}\right)} \cdot L_{0,4} k_{0,4} n_{0,4} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{6,6}{0,01}\right)} \cdot 66,5 \cdot 1 \cdot 1 = 180,734 \text{ См.}$$

Комплексні опір та провідність:

$$Z_{0,1} = r_{0,1} + j \cdot x_{0,1} = 3,36 + j16,759 \text{ Ом.}$$

$$Y_{0,1} = j \cdot b_{0,1} = j81,534 \text{ См.}$$

Результати розрахунку параметрів схем заміщення для решти ділянок наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5– Параметри схем заміщення ділянок

№	S, мм ²	L, км	Опір, Ом			Провідність, См		
			r _л	x _л	Z _л	g _л	b _л	Y _л
0-1	2×240	60	3,36	16,759	3,36+j16,759	0	81,534	i81,534
0-4	1×240	66.5	7,448	37,148	7,448+j37,148	0	180,734	j180,734
1-2	1×240	54	6,048	30,165	6,048+j30,165	0	146,761	j146,761
1-3	1×240	51	5,712	28,49	5,712+j28,49	0	138,608	j138,608
1-4	1×240	48	5,376	26,814	5,376+j26,814	0	130,454	j130,454
2-3	1×185	45	7,065	25,529	7,065+j25,529	0	119,713	j119,713
3-4	1×185	14	2,198	7,942	2,198+j7,942	0	37,244	j37,244

5.3 Ініціалізація необхідних параметрів для першого варіанту конфігурації мережі

В першому варіанті розмикаємо лінії 1-3, 1-4, 2-3 рис. 5.1.2, напруга балансуєного вузла становить $U_0=139,92$ кВ. Ініціалізуємо початкові наближення модуля напруги $U_j=132$ кВ та кути $\delta_j=0$.

Для розрахунку режиму електричної мережі за допомогою вузлової моделі необхідно виконати ряд певних розрахунків:

Алгебраїчні взаємні провідності:

$$y_{0,1} = \frac{1}{Z_{0,1}} = \frac{1}{3,36 + j16,759} = 0,003 - j0,03 \text{ См.}$$

$$y_{0,4} = \frac{1}{Z_{0,4}} = \frac{1}{7,448 + j37,148} = 0,006 - j0,032 \text{ См.}$$

Алгебраїчні власні провідності:

$$\begin{aligned} y_{1,1} &= -(y_{0,1} + y_{1,2}) = -(0,003 - j0,03 + 0,006 - j0,032) = \\ &= -0,009 + j0,061 \text{ См.} \end{aligned}$$

$$y_{2,2} = -(y_{1,2}) = -(0,006 - j0,032) = -0,006 + j0,032 \text{ См.}$$

Результати розрахунку матриці алгебраїчних провідностей для решти ділянок:

$$y = \begin{bmatrix} -0,009 + j0,06 & 0,006 - j0,03 & 0,000 - j0,000 & 0,005 - 0,026 \\ 0,006 - j0,03 & -0,006 + j0,03 & 0,000 - j0,00 & 0,000 - j0,00 \\ 0,000 - j0,00 & 0,000 - j0,00 & -0,032 + j0,12 & 0,032 - j0,12 \\ 0,005 - j0,02 & 0,000 - j0,00 & 0,032 - j0,12 & -0,04 + j0,14 \end{bmatrix} \text{ См.}$$

Фізичні вузлові провідності:

$$Y_{p_1} = 0,5(Y_{0,1} + Y_{1,2}) = 0,5(j163,068 + j180,734) = j154,914 \text{ мкСм.}$$

$$Y_{p_2} = 0,5(Y_{1,2}) = 0,5(j180,734) = j73,38 \text{ мкСм.}$$

Результати розрахунку матриці фізичних вузлових провідностей для решти вузлів:

$$Y_p = \begin{bmatrix} j154,914 \\ j73,38 \\ j18,622 \\ j108,989 \end{bmatrix} \text{ мкСм.}$$

5.4 Організація ітераційного розрахунку для першого варіанту роботи мережі

Наведемо розрахунок першої ітерації розрахунку параметрів усталеного режиму електричної мережі за допомогою web-додатку.

Уточнюємо розрахункове навантаження з урахуванням втрат потужності від провідності ділянок:

$$\begin{aligned} S_{p_1} &= S_{n_1} + Y_{p_1} \cdot (U_1)^2 = -18,3 + j11,5 + (j154,914)(132)^2 = \\ &= -18,3 + j14,199 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{p_2} &= S_{n_2} + Y_{p_2} \cdot (U_2)^2 = 94,2 + j4,7 + (j73,38)(132)^2 = \\ &= 94,2 + j5,979 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку матриці фізичних вузлових провідностей для решти вузлів:

$$S_p = \begin{bmatrix} -18,3 + j14,199 \\ 94,2 + j5,979 \\ 47,8 + j4,224 \\ 7,6 + j0,299 \end{bmatrix} \text{ МВА.}$$

Обчислюємо розрахунковий струм:

$$\begin{aligned} I'_{p_1} &= U_0(g_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) + b_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(0,003 \cdot \cos(0 - 0) - 0,03 \cdot \sin(0 - 0)) + \\ &+ 132(0,006 \cdot \cos(0 - 0) - 0,032 \cdot \sin(0 - 0)) = 1,258 \text{ кА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I''_{p_1} &= U_0(b_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) - g_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(-0,03 \cdot \cos(0 - 0) - 0,003 \cdot \sin(0 - 0)) + \\ &+ 132(-0,032 \cdot \cos(0 - 0) - 0,006 \cdot \sin(0 - 0)) = -8,34 \text{ кА.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку матриць розрахункових струмів активної та реактивної складової для решти вузлів:

$$I'_{p1} = \begin{bmatrix} 1,258 \\ 0,843 \\ 4,273 \\ 4,999 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$I''_{p1} = \begin{bmatrix} -8,34 \\ -4,207 \\ -15,438 \\ -19,059 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

Обчислюємо нев'язки потужностей у вузлах:

$$\begin{aligned} w_{p1} &= g_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I'_{p1} - P_{p1} = \\ &= -0,009 \cdot (132)^2 + 132 \cdot 1,258 - (-18,3) = 21,396 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{q1} &= b_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I''_{p1} - Q_{p1} = \\ &= 0,061 \cdot (132)^2 + 132 \cdot (-4,207) - 14,12 = -45,08 \text{ МВАр.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку матриці нев'язок потужності для решти вузлів:

$$W = \begin{bmatrix} 21,396 \\ -94,2 \\ -47,8 \\ -2,176 \\ -45,08 \\ -5,979 \\ -4,224 \\ -27,354 \end{bmatrix} \text{ МВА.}$$

Визначаємо максимальну нев'язку у вузла та порівнюємо її з заданою інженерною точністю:

$$W_{max} = \max(|\overline{W}|) = 94,2.$$

$$W_{max} > \varepsilon = 94,2 > 0,01.$$

Найбільша нев'язка вузла більша за інженерну точність, тому розв'язок системи рівнянь не отримано, продовжуємо ітераційний розрахунок.

Обчислюємо елементи матриці Якобі:

Недіагональні елементи:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,2} &= U_1(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 132(0,006 \cdot \cos(0 - 0) - 0,032 \cdot \sin(0 - 0)) = 843,456 \text{ А.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,2} &= U_1(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 132(0,006 \cdot \cos(0 - 0) - 0,032 \cdot \sin(0 - 0)) = -4206,822 \text{ A.} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,2} = -U_2 \left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,2} = -132 \cdot (-4206,822) = 555,3 \text{ МВт.}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,2} = U_2 \left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,2} = 132 \cdot (843,456) = 111,336 \text{ МВАр}$$

Діагональні елементи:

$$\left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot g_{1,1} \cdot U_1 + I''_{p_1} = 2 \cdot (-0,009) \cdot 132 - 8,34 = -1,211 \text{ кА.}$$

$$\left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot b_{1,1} \cdot U_1 + I'_{p_1} = 2 \cdot (0,061) \cdot 132 + 1,258 = 7,872 \text{ кА.}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,1} = U_1 \cdot I''_{p_1} = 132 \cdot -8,34 = -1100,865 \text{ МВт.}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,1} = -U_1 \cdot I'_{p_1} = -132 \cdot 1,258 = -166,028 \text{ МВАр.}$$

Результати розрахунку складових матриці Якобі для решти елементів по кожній з складових:

$$\frac{dP}{dU} = \begin{bmatrix} -1,211 & 0,843 & 0 & 0 \\ 0,843 & -0,843 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4,273 & 4,273 \\ 0 & 0 & 4,273 & -4,916 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$\frac{dQ}{dU} = \begin{bmatrix} 7,872 & -4,207 & 0 & 0 \\ -4,207 & 4,207 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15,438 & -15,438 \\ 0 & 0 & -15,438 & 18,649 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \begin{bmatrix} -1100,865 & 555,3 & 0 & 0 \\ 555,3 & -555,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2037,821 & 2037,821 \\ 0 & 0 & 2037,821 & -2515,792 \end{bmatrix} \text{ МВт.}$$

$$\frac{dQ}{d\delta} = \begin{bmatrix} -166,028 & 111,336 & 0 & 0 \\ 111,336 & -111,336 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -563,98 & 563,98 \\ 0 & 0 & 563,98 & -659,811 \end{bmatrix} \text{ МВАр.}$$

Формуємо матрицю Якобі:

$$dW = \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}.$$

Розв'язуємо систему рівнянь та знаходимо корені:

$$\begin{bmatrix} U_p \\ \delta_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} w_p \\ w_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11,821 \\ 8,871 \\ 5,913 \\ 6,454 \\ -0,141 \\ -0,307 \\ -0,136 \\ -0,113 \end{bmatrix}.$$

Перераховуємо значення напруг та кутів:

$$U_1 = U_1 + U_p = 132 + 11,821 = 143,821 \text{ кВ.}$$

$$\delta_1 = \delta_1 + \delta_p = 0 - 0,141 = -0,141 \text{ кВ.}$$

Результати розрахунку нових значень модулів напруг та кутів для решти вузлів (без врахування балансуєчого вузла):

$$U = \begin{bmatrix} 143,821 \\ 140,871 \\ 137,913 \\ 138,454 \end{bmatrix} \text{ кВ.}$$

$$\delta = \begin{bmatrix} -0,141 \\ -0,307 \\ -0,136 \\ -0,113 \end{bmatrix}.$$

Ітерація завершена.

Наведемо розрахунок другої ітерації розрахунку параметрів усталеного режиму електричної мережі за допомогою web-додатку.

Уточнюємо розрахункове навантаження з урахуванням втрат потужності від провідності ділянок:

$$\begin{aligned} S_{p_1} &= S_{n_1} + Y_{p_1} \cdot (U_1)^2 = -18,3 + j11,5 + (j154,914)(143,821)^2 = \\ &= -18,3 + j14,704 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

$$S_{p_2} = S_{n_2} + Y_{p_2} \cdot (U_2)^2 = 94,2 + j4,7 + (j73,38)(140,871)^2 =$$

$$= 94,2 + j6,156 \text{ МВА.}$$

Результати розрахунку матриці фізичних вузлових провідностей для решти вузлів:

$$S_p = \begin{bmatrix} -18,3 + j14,704 \\ 94,2 + j6,156 \\ 47,8 + j4,254 \\ 7,6 + j0,489 \end{bmatrix} \text{ МВА.}$$

Обчислюємо розрахунковий струм:

$$\begin{aligned} I'_{p_1} &= U_0(g_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) + b_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(0,003 \cdot \cos(0 - (-0,141)) - 0,03 \cdot \sin(0 - (-0,141))) + \\ &+ 1409(0006 \cdot \cos((-0,31) - (-0,14)) - 0,032 \times \\ &\times \sin((-0,31) - (-0,14))) = 1,142 \text{ кА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I''_{p_1} &= U_0(b_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) - g_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(-0,03 \cdot \cos(0 - (-0,141)) - 0,003 \cdot \sin(0 - (-0,141))) + \\ &+ 140,9(-0,03 \cdot \cos((-0,31) - (-0,14)) - 0,006 \times \\ &\times \sin((-0,31) - (-0,14))) = -8,61 \text{ кА.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку матриць розрахункових струмів активної та реактивної складової для решти вузлів:

$$I'_p = \begin{bmatrix} 1,142 \\ 1,66 \\ 4,842 \\ 5,233 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$I''_p = \begin{bmatrix} -8,61 \\ -4,37 \\ -16,089 \\ -19,741 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

Обчислюємо нев'язки потужностей у вузлах:

$$\begin{aligned} w_{p_1} &= g_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I'_{p_1} - P_{p_1} = -0,009 \cdot (143,8)^2 + 143,8 \cdot 1,14 - \\ &- (-18,3) = -10,808 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

$$w_{q_1} = b_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I''_{p_1} - Q_{p_1} = 0,061 \cdot (143,8)^2 + 143,8 \cdot (-8,61) - 14,7 = 17,222 \text{ МВАр.}$$

Результати розрахунку матриці нев'язок потужності для решти вузлів:

$$W = \begin{bmatrix} -10,808 \\ 12,85 \\ 4,307 \\ -2,959 \\ 17,222 \\ 10,671 \\ 1,358 \\ 4,365 \end{bmatrix} \text{ МВА.}$$

Визначаємо максимальну нев'язку у вузла та порівнюємо її з заданою інженерною точністю:

$$W_{max} = \max(|\vec{W}|) = 17,222.$$

$$W_{max} > \varepsilon = 17,222 > 0,01.$$

Найбільша нев'язка вузла більша за інженерну точність, тому розв'язок системи рівнянь не отримано, продовжуємо ітераційний розрахунок.

Обчислюємо елементи матриці Якобі:

Недіагональні елементи:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,2} &= U_1(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 143,8(0,006 \cdot \cos((-0,307) - (-0,141)) - \\ &- 0,032 \cdot \sin((-0,307) - (-0,141))) = 0,153 \text{ кА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,2} &= U_1(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 143,8(0,006 \cdot \cos((-0,307) - (-0,141)) - \\ &- 0,032 \cdot \sin((-0,307) - (-0,141))) = -4,672 \text{ кА.} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,2} = -U_2 \left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,2} = -140,871 \cdot (-4,672) = 658,186 \text{ МВт.}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,2} = -U_2 \left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,2} = 140,871 \cdot (0,153) = 21,541 \text{ МВАр.}$$

Діагональні елементи:

$$\left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot g_{1,1} \cdot U_1 + I''_{p_1} = 2 \cdot (-0,009) \cdot 143,82 - 8,61 = -1,547 \text{ кА.}$$

$$\left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot b_{1,1} \cdot U_1 + I'_{p_1} = 2 \cdot (0,061) \cdot 143,821 + 1,142 = 9,054 \text{ кА.}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,1} = U_1 \cdot I''_{p_1} = 143,821 \cdot (-8,61) = -1238,275 \text{ МВт.}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,1} = -U_1 \cdot I'_{p_1} = -143,821 \cdot 1,142 = -164,312 \text{ МВАр.}$$

Результати розрахунку складових матриці Якобі для решти елементів по кожній з складових:

$$\frac{dP}{dU} = \begin{bmatrix} -1,547 & 0,153 & 0 & 0 \\ 1,626 & -0,14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4,086 & 4,823 \\ 0 & 0 & 4,119 & -5,166 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$\frac{dQ}{dU} = \begin{bmatrix} 9,054 & -4,672 & 0 & 0 \\ -4,28 & 4,609 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16,17 & -16,026 \\ 0 & 0 & -16,289 & 19,811 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \begin{bmatrix} -1238,275 & 658,186 & 0 & 0 \\ 615,618 & -615,618 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2218,856 & 2218,856 \\ 0 & 0 & 2246,444 & -2733,216 \end{bmatrix} \text{ МВт.}$$

$$\frac{dQ}{d\delta} = \begin{bmatrix} -164,312 & 21,541 & 0 & 0 \\ 233,853 & -233,853 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -667,742 & 667,742 \\ 0 & 0 & 568,058 & -724,588 \end{bmatrix} \text{ МВАр.}$$

Формуємо матрицю Якобі:

$$dW = \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}.$$

Розв'язуємо систему рівнянь та знаходимо корені:

$$\begin{bmatrix} U_p \\ \delta_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} W_p \\ W_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5,485 \\ -7,005 \\ -1,371 \\ -1,361 \\ 0,003 \\ 0,011 \\ 0,005 \\ 0,004 \end{bmatrix}$$

Перераховуємо значення напруг та кутів:

$$U_1 = U_1 + U_p = 143,821 - 5,485 = 138,335 \text{ кВ.}$$

$$\delta_1 = \delta_1 + \delta_p = -0,141 + 0,003 = -0,138 \text{ кВ.}$$

Результати розрахунку нових значень модулів напруг та кутів для решти вузлів (без врахування балансуєчого вузла):

$$U = \begin{bmatrix} 138,335 \\ 133,866 \\ 136,542 \\ 137,093 \end{bmatrix} \text{ кВ.}$$

$$\delta = \begin{bmatrix} -0,138 \\ -0,295 \\ -0,13 \\ -0,11 \end{bmatrix}$$

Ітерація завершена.

Подальший хід ітераційного розрахунку наведено в табл 5.6.

Таблиця 5.6 – Результати розрахунку по кожній з ітерацій

№ ітер.	W _{max}	Напруга вузла							
		U ₁	δ ₁	U ₂	δ ₂	U ₃	δ ₃	U ₄	δ ₄
		кВ	рад	кВ	рад	кВ	рад	кВ	рад
0	–	132	0	132	0	132	0	132	0
1	94,2	143,82	-0,14	140,87	-0,31	140,87	-0,14	138,45	-0,11
2	17,222	138,34	-0,14	133,87	-0,3	136,54	-0,13	137,09	-0,11
3	0,864	137,96	-0,14	133,35	-0,3	136,51	-0,13	137,06	-0,11
4	0,018	137,96	-0,14	133,34	-0,3	136,51	-0,13	137,06	-0,11
5	0,00035	137,96	-0,14	133,34	-0,3	136,51	-0,13	137,06	-0,11

Комплексне значення напруги:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\delta} = \begin{bmatrix} 139,920 \\ 136,636 - j19,036 \\ 127,563 - j38,834 \\ 135,354 - j17,735 \\ 136,242 - j14,978 \end{bmatrix} \text{кВ.}$$

Після досягнення точності розрахунку ШАР вважається розв'язаною і модулі та кути вектору напруги вважаються відомими.

Визначаємо поточкорозподіл в мережі:

$$\begin{aligned} S_{п_{0,1}} &= (U_0 - U_1) \cdot y_{0,1} \cdot \bar{U}_0 + 0.5 \cdot Y_{0,1} \cdot (|U_0|)^2 = \\ &= (139,92 - 136,636 - j19,036) \cdot (0,003 - j0,03) \cdot 139,92 + \\ &+ 0,5 \cdot j163,068 \cdot (139,92)^2 = 80,04 - j4,09 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{к_{0,1}} &= (U_0 - U_1) \cdot y_{0,1} \cdot \bar{U}_1 - 0.5 \cdot Y_{0,1} \cdot (|U_1|)^2 = \\ &= (139,92 - 136,636 - j19,036) \cdot (0,003 - j0,03) \cdot (136,636 + \\ &+ j19,036) + 0,5 \cdot j163,068 \cdot (137,956)^2 = 78,93 + j3,79 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку потоків початку та кінця для решти ділянок розрахованих за допомогою Web-додатку зображено на рис. 5.6 за допомогою PowerFactory- на рис. 5.4 та в табл. 5.7.

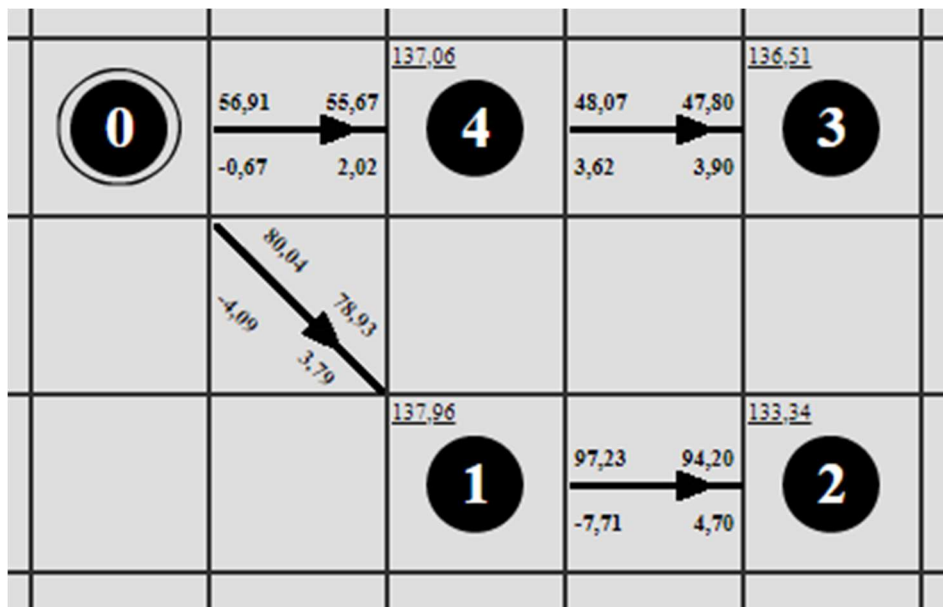


Рисунок 5.4— Результати розрахунку схеми електричної мережі за допомогою Web-додатку

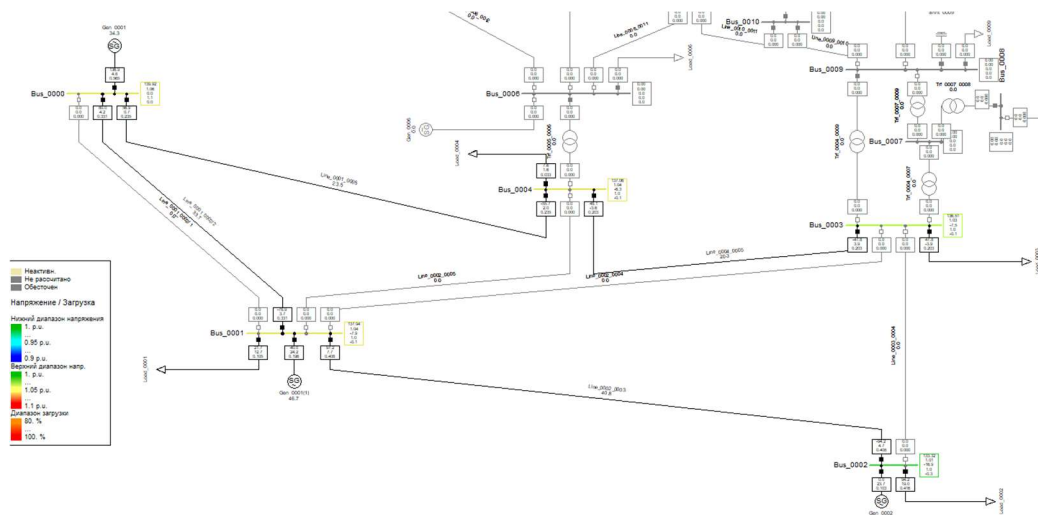


Рисунок 5.5 – Результати розрахунку схеми електричної мережі за допомогою PowerFactory

Таблиця 5.8– Результати розрахунку напруг електричної мережі за допомогою PowerFactory

Вузол	1	2	3	4
U, кВ	$137,9 \cdot e^{j(-0,14)}$	$133,3 \cdot e^{j(-0,3)}$	$137,06 \cdot e^{j(-0,13)}$	$136,51 \cdot e^{j(-0,11)}$

Таблиця 5.9 – Результати розрахунку потоку потужності початку та кінця електричної мережі за допомогою PowerFactory

Ділянка	$S_{\text{поч}}, \text{MVA}$	$S_{\text{кін}}, \text{MVA}$
0-1	$80-j4,2$	$78,9+j3,7$
0-4	$97,2-j7,7$	$94,2+j4,7$
1-2	$48,1+j3,6$	$47,8+j3,9$
3-4	$56,9-j0,7$	$55,7+j2$

Розрахуємо втрати потужності в мережі:

$$\Delta S_{\text{сум}} = S_{\text{п0,1}} + S_{\text{п0,4}} - \sum S_{\text{н}} = 80,036 - j4,088 + 56,906 - j0,674 - (131,3 + j18,5) = 5,64 - j23,26 \text{ MVA.}$$

Web-додаток дозволяє розраховувати також втрати потужності в ділянках в повздовжньому опорі, а також в поперечній провідності для ділянок та модуль і кут напруги для вузлів.

Додаткові результати розрахунку для вузлів та ділянок визначених за допомогою Web-додатку наведено на рис. 5.6.

^ Загальні $\Delta S_{\text{сум}} = 5,64 - 23,26j$ МВА.	^ Ділянка 0-1 $P_{\text{поч}} = 80,04$ МВт; $P_{\text{кін}} = 78,93$ МВт; $Q_{\text{поч}} = -4,09$ МВАр; $Q_{\text{кін}} = 3,79$ МВАр. ^Додатково $Z = 1,10 - 7,87j$ Ом; $\Delta S_Z = 2,65 + 10,76j$ МВА; $\Delta S_Y = 0,00 + 3,15j$ МВА.	^ Ділянка 1-2 $P_{\text{поч}} = 97,23$ МВт; $P_{\text{кін}} = 94,20$ МВт; $Q_{\text{поч}} = -7,71$ МВАр; $Q_{\text{кін}} = 4,70$ МВАр. ^Додатково $Z = 3,03 - 12,41j$ Ом; $\Delta S_Z = 9,47 + 12,16j$ МВА; $\Delta S_Y = 0,00 + 2,70j$ МВА.
^ Вузол №1 $ U = 137,96$ кВ; $\delta U = -7,93^\circ$. vДодатково	^ Ділянка 0-4 $P_{\text{поч}} = 56,91$ МВт; $P_{\text{кін}} = 55,67$ МВт; $Q_{\text{поч}} = -0,67$ МВАр; $Q_{\text{кін}} = 2,02$ МВАр. ^Додатково $Z = 1,23 - 2,69j$ Ом; $\Delta S_Z = 1,76 + 6,03j$ МВА; $\Delta S_Y = 0,00 + 3,47j$ МВА.	^ Ділянка 3-4 $P_{\text{поч}} = -47,80$ МВт; $P_{\text{кін}} = -48,07$ МВт; $Q_{\text{поч}} = -3,90$ МВАр; $Q_{\text{кін}} = -3,62$ МВАр. ^Додатково $Z = 0,27 - 0,28j$ Ом; $\Delta S_Z = 0,35 + 0,96j$ МВА; $\Delta S_Y = 0,00 + 0,70j$ МВА.
^ Вузол №2 $ U = 133,34$ кВ; $\delta U = -16,93^\circ$. vДодатково		
^ Вузол №3 $ U = 136,51$ кВ; $\delta U = -7,47^\circ$. vДодатково		
^ Вузол №4 $ U = 137,06$ кВ; $\delta U = -6,27^\circ$. vДодатково		

Рисунок 5.6 – Додаткові результати розрахунку

5.5 Ініціалізація необхідних параметрів для другого варіанту конфігурації мережі

В другому варіанті розмикаємо лінії 1-3, 1-4, 0-4 рис. 5.3, напруга балансуєчого вузла становить $U_0=139,92$ кВ. Ініціалізуємо початкові наближення модуля напруги $U_j=132$ кВ та кути $\delta_j=0$.

Для розрахунку режиму електричної мережі за допомогою вузлової моделі необхідно виконати ряд певних розрахунків:

Алгебраїчні взаємні провідності:

$$y_{0,1} = \frac{1}{Z_{0,1}} = \frac{1}{3,36 + j16,759} = 0,003 - j0,03 \text{ См.}$$

$$y_{1,2} = \frac{1}{Z_{1,2}} = \frac{1}{6,048 + j30,165} = 0,006 - j0,032 \text{ См.}$$

Алгебраїчні власні провідності:

$$y_{1,1} = -(y_{0,1} + y_{1,2}) = -(0,003 - j0,03 + 0,006 - j0,032) = \\ = -0,009 + j0,061 \text{ См.}$$

$$y_{2,2} = -(y_{1,2}) = -(0,006 - j0,032) = -0,006 + j0,032 \text{ См.}$$

Результати розрахунку матриці алгебраїчних провідностей для решти ділянок:

$$y = \begin{bmatrix} -0,009 + j0,06 & 0,006 - j0,03j & 0 & 0 \\ 0,006 - j0,032 & -0,02 + j0,07 & 0,01 - j0,04 & 0 \\ 0 & 0,01 - j0,036 & -0,042 + j0,153 & 0,032 - j0,12 \\ 0 & 0 & 0,032 - j0,12 & -0,03 + j0,12 \end{bmatrix} \text{ См.}$$

Фізичні вузлові провідності:

$$Y_{p_1} = 0,5(Y_{0,1} + Y_{1,2}) = 0,5(j163,068 + j180,734) = j154,914 \text{ мкСм.}$$

$$Y_{p_2} = 0,5(Y_{1,2} + Y_{2,3}) = 0,5(j146,761 + j119,713) = j133,237 \text{ мкСм.}$$

Результати розрахунку матриці фізичних вузлових провідностей для решти вузлів:

$$Y_p = \begin{bmatrix} j154,914 \\ j133,237 \\ j78,478 \\ j18,622 \end{bmatrix} \text{ мкСм.}$$

5.6 Організація ітераційного розрахунку для другого варіанту роботи мережі

Наведемо розрахунок першої ітерації розрахунку параметрів усталеного режиму електричної мережі за допомогою web-додатку.

Уточнюємо розрахункове навантаження з урахуванням втрат потужності від провідності ділянок:

$$S_{p_1} = S_{H_1} + Y_{p_1} \cdot (U_1)^2 = -18,3 + j30,9 + (j154,914)(132)^2 = \\ = -18,3 + j33,599 \text{ МВА.}$$

$$S_{p_2} = S_{H_2} + Y_{p_2} \cdot (U_2)^2 = 94,2 + j28,7 + (j133,237)(132)^2 = \\ = 94,2 + j31,022 \text{ МВА.}$$

Результати розрахунку матриці фізичних вузлових провідностей для решти вузлів:

$$S_p = \begin{bmatrix} -18,3 + j33,599 \\ 94,2 + j31,022 \\ 47,8 + j5,267 \\ 7,6 - j1,276 \end{bmatrix} \text{ МВА.}$$

Обчислюємо розрахунковий струм:

$$\begin{aligned} I'_{p_1} &= U_0(g_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) + b_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(0,003 \cdot \cos(0 - 0) - 0,03 \cdot \sin(0 - 0)) + \\ &+ 132(0,006 \cdot \cos(0 - 0) - 0,032 \cdot \sin(0 - 0)) = 1,258 \text{ кА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I''_{p_1} &= U_0(b_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) - g_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(-0,03 \cdot \cos(0 - 0) - 0,003 \cdot \sin(0 - 0)) + \\ &+ 132(-0,032 \cdot \cos(0 - 0) - 0,006 \cdot \sin(0 - 0)) = -8,34 \text{ кА.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку матриць розрахункових струмів активної та реактивної складової для решти вузлів:

$$I'_p = \begin{bmatrix} 1,258 \\ 2,173 \\ 5,602 \\ 4,273 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$I''_p = \begin{bmatrix} -8,34 \\ -9,01 \\ -20,241 \\ -15,438 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

Обчислюємо нев'язки потужностей у вузлах:

$$\begin{aligned} w_{p_1} &= g_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I'_{p_1} - P_{p_1} = \\ &= -0,009 \cdot (132)^2 + 132 \cdot 1,258 - (-18,3) = 21.396 \text{ МВт.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{q_1} &= b_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I''_{p_1} - Q_{p_1} = \\ &= 0,061 \cdot (132)^2 + 132 \cdot (-4,207) - 33,6 = -64,48 \text{ МВАр.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку матриці нев'язок потужності для решти вузлів:

$$W = \begin{bmatrix} 21,396 \\ -94,2 \\ -47,8 \\ -7,6 \\ -64,48 \\ -31,022 \\ -5,267 \\ 1,276 \end{bmatrix} \text{ МВА.}$$

Визначаємо максимальну нев'язку у вузла та порівнюємо її з заданою інженерною точністю:

$$W_{max} = \max(|\vec{W}|) = 94,2.$$

$$W_{max} > \varepsilon = 94,2 > 0,01.$$

Найбільша нев'язка вузла більша за інженерну точність, тому розв'язок системи рівнянь не отримано, продовжуємо ітераційний розрахунок.

Обчислюємо елементи матриці Якобі:

Недіагональні елементи:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,2} &= U_1(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 132(0,006 \cdot \cos(0 - 0) - 0,032 \cdot \sin(0 - 0)) = 843,456 \text{ А.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,2} &= U_1(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 132(0,006 \cdot \cos(0 - 0) - 0,032 \cdot \sin(0 - 0)) = -4,207 \text{ кА.} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,2} = -U_2 \left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,2} = -132 \cdot (-4,207) = 555,3 \text{ МВт.}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,2} = -U_2 \left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,2} = 132 \cdot (843,456) = 111,336 \text{ МВАр.}$$

Діагональні елементи:

$$\left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot g_{1,1} \cdot U_1 + I''_{p_1} = 2 \cdot (-0,009) \cdot 132 - 8,34 = -1,234 \text{ кА.}$$

$$\left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot b_{1,1} \cdot U_1 + I'_{p_1} = 2 \cdot (0,061) \cdot 132 + 1,258 = 7,872 \text{ кА.}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,1} = U_1 \cdot I''_{p_1} = 132 \cdot -8,34 = -1100,865 \text{ МВт.}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,1} = -U_1 \cdot I'_{p_1} = -132 \cdot 1,258 = -166,028 \text{ МВАр.}$$

Результати розрахунку складових матриці Якобі для решти елементів по кожній з складових:

$$\frac{dP}{dU} = \begin{bmatrix} -1,211 & 0,843 & 0 & 0 \\ 0,843 & -2,173 & 1,329 & 0 \\ 0 & 1,329 & -5,602 & 4,273 \\ 0 & 0 & 4,273 & -4,273 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$\frac{dQ}{dU} = \begin{bmatrix} 7,872 & -4,207 & 0 & 0 \\ -4,207 & 9,01 & -4,803 & 0 \\ 0 & -4,803 & 20,241 & -15,438 \\ 0 & 0 & -15,438 & 15,438 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \begin{bmatrix} -1100,865 & 555,3 & 0 & 0 \\ 555,3 & -1189,265 & 633,964 & 0 \\ 0 & 633,964 & -2671,785 & 2037,821 \\ 0 & 0 & 2037,821 & -2037,821 \end{bmatrix} \text{ МВт.}$$

$$\frac{dQ}{d\delta} = \begin{bmatrix} -166,028 & 111,336 & 0 & 0 \\ 111,336 & -286,782 & 175,446 & 0 \\ 0 & 175,446 & -739,426 & 563,98 \\ 0 & 0 & 563,98 & -563,98 \end{bmatrix} \text{ МВАр.}$$

Формуємо матрицю Якобі:

$$dW = \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}.$$

Розв'язуємо систему рівнянь та знаходимо корені:

$$\begin{bmatrix} U_p \\ \delta_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} W_p \\ W_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23,404 \\ 24,551 \\ 22,358 \\ 22,154 \\ -0,251 \\ -0,522 \\ -0,605 \\ -0,608 \end{bmatrix}.$$

Перераховуємо значення напруг та кутів:

$$U_1 = U_1 + U_p = 132 + 24,551 = 155,404 \text{ кВ.}$$

$$\delta_1 = \delta_1 + \delta_p = 0 - 0,251 = -0,251 \text{ кВ.}$$

Результати розрахунку нових значень модулів напруг та кутів для решти вузлів (без врахування балансуєчого вузла):

$$U = \begin{bmatrix} 155,404 \\ 156,551 \\ 154,358 \\ 154,154 \end{bmatrix} \text{ кВ.}$$

$$\delta = \begin{bmatrix} -0,251 \\ -0,522 \\ -0,605 \\ -0,608 \end{bmatrix}.$$

Ітерація завершена.

Наведемо розрахунок другої ітерації розрахунку параметрів усталеного режиму електричної мережі за допомогою web-додатку.

Уточнюємо розрахункове навантаження з урахуванням втрат потужності від провідності ділянок:

$$\begin{aligned} S_{p_1} &= S_{n_1} + Y_{p_1} \cdot (U_1)^2 = -18,3 + j30,9 + (j154,914)(155,404)^2 = \\ &= -18,3 + j34,641 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{p_2} &= S_{n_2} + Y_{p_2} \cdot (U_2)^2 = 94,2 + j28,7 + (j133,237)(156,551)^2 = \\ &= 94,2 + j31,965 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку матриці фізичних вузлових провідностей для решти вузлів:

$$S_p = \begin{bmatrix} -18,3 + j34,641 \\ 94,2 + j31,965 \\ 47,8 + j5,77 \\ 7,6 - j1,157 \end{bmatrix} \text{ МВА.}$$

Обчислюємо розрахунковий струм:

$$\begin{aligned} I'_{p_1} &= U_0(g_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) + b_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(0,003 \cdot \cos(0 - (-0,25)) - 0,03 \cdot \sin(0 - (-0,25))) + \\ &+ 156,5(0,006 \cdot \cos((-0,52) - (-0,25)) - 0,032 \times \\ &\times \sin((-0,52) - (-0,14))) = 1,054 \text{ кА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I''_{p_1} &= U_0(b_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) - g_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\
&+ U_2(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\
&= 139,92(-0,03 \cdot \cos(0 - (-0,25)) - 0,003 \cdot \sin(0 - (-0,25))) + \\
&+ 156,5(-0,03 \cdot \cos((-0,52) - (-0,25)) - 0,006 \cdot \sin((-0,52) - (-0,25))) = -8,976 \text{ кА}.
\end{aligned}$$

Результати розрахунку матриць розрахункових струмів активної та реактивної складової для решти вузлів:

$$I'_p = \begin{bmatrix} 1,054 \\ 3,368 \\ 6,972 \\ 5,056 \end{bmatrix} \text{ кА}.$$

$$I''_p = \begin{bmatrix} -8,976 \\ -10,231 \\ -23,592 \\ -18,036 \end{bmatrix} \text{ кА}.$$

Обчислюємо нев'язки потужностей у вузлах:

$$w_{p_1} = g_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I'_{p_1} - P_{p_1} = -0,009 \cdot (155,4)^2 + 155,4 \cdot 1,05 - (-18,3) = -43,67 \text{ МВт}.$$

$$w_{q_1} = b_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I''_{p_1} - Q_{p_1} = 0,061 \cdot (155,4)^2 + 155,4 \cdot (-8,976) - 34,641 = 53,512 \text{ МВАр}.$$

Результати розрахунку матриці нев'язок потужності для решти вузлів:

$$W = \begin{bmatrix} -43,67 \\ 29,642 \\ 17,27 \\ 2,603 \\ 53,512 \\ 39,104 \\ 6,187 \\ 0,052 \end{bmatrix} \text{ МВА}.$$

Визначаємо максимальну нев'язку у вузла та порівнюємо її з заданою інженерною точністю:

$$W_{max} = \max(|\overline{W}|) = 53,512.$$

$$W_{max} > \varepsilon = 53,512 > 0,01.$$

Найбільша нев'язка вузла більша за інженерну точність, тому розв'язок системи рівнянь не отримано, продовжуємо ітераційний розрахунок.

Обчислюємо елементи матриці Якобі:

Недіагональні елементи:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,2} &= U_1(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 155,404(0,006 \cdot \cos((-0,251) - (-0,522)) - \\ &- 0,032 \cdot \sin((-0,251) - (-0,522))) = -0,37 \text{ кА}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,2} &= U_1(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 155,404(0,006 \cdot \cos((-0,251) - (-0,522)) - \\ &- 0,032 \cdot \sin((-0,251) - (-0,522))) = -4,539 \text{ кА}. \end{aligned}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,2} = -U_2 \left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,2} = -156,551 \cdot (-4,539) = 788,659 \text{ МВт.}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,2} = -U_2 \left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,2} = 156,551 \cdot (-0,37) = -57,89 \text{ МВАр.}$$

Діагональні елементи:

$$\left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot g_{1,1} \cdot U_1 + I''_{p_1} = 2 \cdot (-0,009) \cdot 155,404 - 8,97 = -1,453 \text{ кА.}$$

$$\left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot b_{1,1} \cdot U_1 + I'_{p_1} = 2 \cdot (0,061) \cdot 155,404 + 1,054 = 10,11 \text{ кА.}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,1} = U_1 \cdot I''_{p_1} = 155,404 \cdot (-8,976) = -1394,888 \text{ МВт.}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,1} = -U_1 \cdot I'_{p_1} = -155,404 \cdot 1,054 = -163,861 \text{ МВАр.}$$

Результати розрахунку складових матриці Якобі для решти елементів по кожній з складових:

$$\frac{dP}{dU} = \begin{bmatrix} -1,453 & -0,37 & 0 & 0 \\ 2,3 & -2,577 & 1,1 & 0 \\ 0 & 2,013 & -6,551 & 4,937 \\ 0 & 0 & 5,049 & -4,99 \end{bmatrix} \text{ кА.}$$

$$\frac{dQ}{dU} = \begin{bmatrix} 10,11 & -5,038 & 0 & 0 \\ -4,539 & 11,139 & -5,807 & 0 \\ 0 & -5,468 & 23,747 & -18,013 \\ 0 & 0 & -18,013 & 18,022 \end{bmatrix} \text{кА.}$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \begin{bmatrix} -1394,888 & 788,659 & 0 & 0 \\ 705,386 & -1601,723 & 896,337 & 0 \\ 0 & 856,094 & -3641,557 & 2785,462 \\ 0 & 0 & 2780,374 & -2780,374 \end{bmatrix} \text{МВт.}$$

$$\frac{dQ}{d\delta} = \begin{bmatrix} -163,861 & -57,89 & 0 & 0 \\ 357,442 & -527,223 & 169,781 & 0 \\ 0 & 315,194 & -1076,192 & 760,998 \\ 0 & 0 & 779,383 & -779,383 \end{bmatrix} \text{МВАр.}$$

Формуємо матрицю Якобі:

$$dW = \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}.$$

Розв'язуємо систему рівнянь та знаходимо корені:

$$\begin{bmatrix} U_p \\ \delta_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} w_p \\ w_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -14,575 \\ -19,012 \\ -19,242 \\ -19,233 \\ 0,005 \\ 0,02 \\ 0,023 \\ 0,023 \end{bmatrix}.$$

Перераховуємо значення напруг та кутів:

$$U_1 = U_1 + U_p = 155,404 - 14,575 = 140,829 \text{ кВ.}$$

$$\delta_1 = \delta_1 + \delta_p = -0,251 + 0,005 = -0,246 \text{ кВ.}$$

Результати розрахунку нових значень модулів напруг та кутів для решти вузлів (без врахування балансуєчого вузла):

$$U = \begin{bmatrix} 140,829 \\ 137,539 \\ 135,116 \\ 134,922 \end{bmatrix} \text{кВ.}$$

$$\delta = \begin{bmatrix} -0,246 \\ -0,502 \\ -0,582 \\ -0,585 \end{bmatrix}.$$

Ітерація завершена.

Подальший хід ітераційного розрахунку наведено в табл 5.10.

Комплексне значення напруги:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\delta} = \begin{bmatrix} 139,920 \\ 133,623 - j34,268 \\ 116,266 - j65,253 \\ 108,237 - j73,152 \\ 107,818 - j73,401 \end{bmatrix} \text{кВ.}$$

Таблиця 5.10 – Результати розрахунку по кожній з ітерацій

№ ітер.	W _{max}	Напруга вузла							
		U ₁	δ ₁	U ₂	δ ₂	U ₃	δ ₃	U ₄	δ ₄
		кВ	рад	кВ	рад	кВ	рад	кВ	рад
0	–	132	0	132	0	132	0	132	0
1	94,2	155,4	–0,25	156,55	–0,52	154,36	–0,6	154,15	–0,61
2	53,512	140,83	–0,25	137,54	–0,5	135,12	–0,58	134,92	–0,59
3	5,097	138,16	–0,25	133,67	–0,51	131,03	–0,59	130,82	–0,6
4	0,244	137,96	–0,25	133,34	–0,51	130,66	–0,59	130,45	–0,6
5	0,012	137,95	–0,25	133,33	–0,51	130,64	–0,59	130,43	–0,6

Після досягнення точності розрахунку СНАР вважається розв'язаною і модулі та кути вектору напруги вважаються відомими.

Визначаємо поточкорозподіл в мережі:

$$\begin{aligned} S_{п0,1} &= (U_0 - U_1) \cdot y_{0,1} \cdot \overline{U_0} + 0,5 \cdot Y_{0,1} \cdot (|U_0|)^2 = \\ &= (139,92 - (133,623 - j34,268)) \cdot (0,003 - j0,03) \cdot 139,92 + \\ &+ 0,5 \cdot j163,068 \cdot (139,92)^2 = 144,24 - j10,23 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{к0,1} &= (U_0 - U_1) \cdot y_{0,1} \cdot \overline{U_1} - 0,5 \cdot Y_{0,1} \cdot (|U_1|)^2 = \\ &= (139,92 - (133,623 - j34,268)) \cdot (0,003 - j0,03) \times \\ &\times (133,623 - j34,268) + 0,5 \cdot j163,068 \cdot (137,947)^2 = \\ &= 140,65 + j22,48 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Результати розрахунку потоків початку та кінця для решти ділянок розрахованих за допомогою Web-додатку зображено на рис. 5.5.1 за допомогою PowerFactory- на рис. 5.7 та в табл. 5.11.

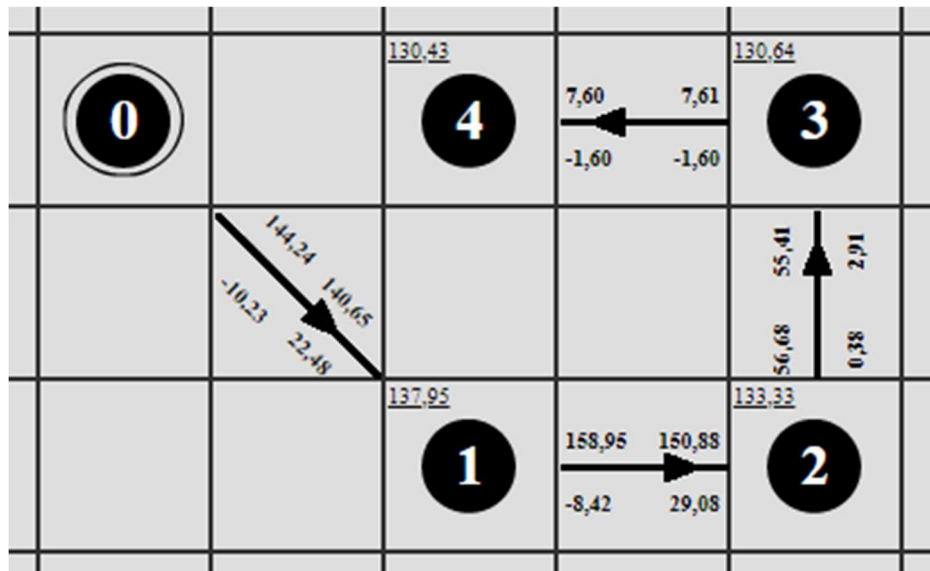


Рисунок 5.7 – Результати розрахунку схеми електричної мережі за допомогою Web-додатку

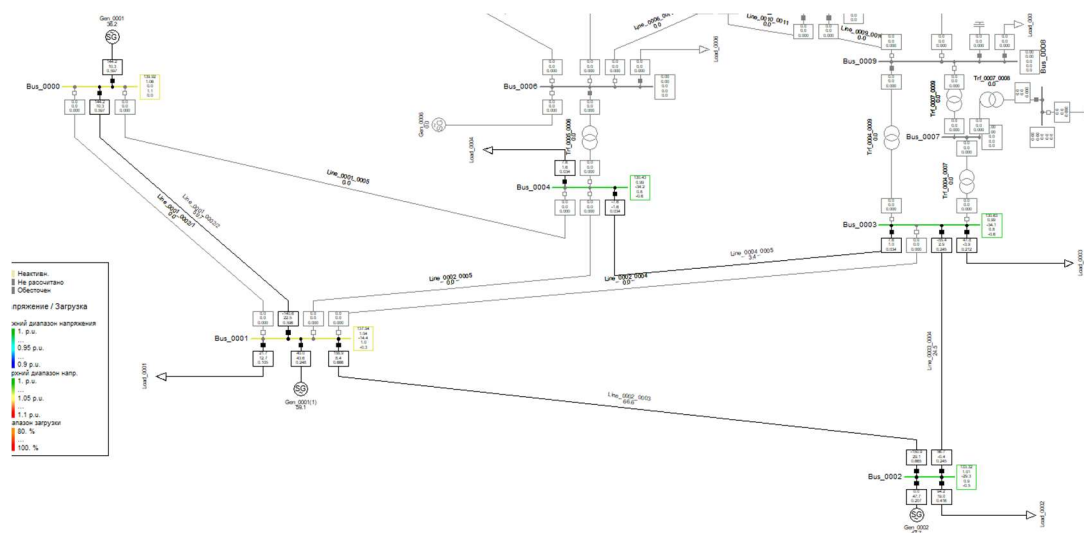


Рисунок 5.8 – Результати розрахунку схеми електричної мережі за допомогою Web-додатку

Таблиця 5.12 – Результати розрахунку напруг електричної мережі за допомогою PowerFactory

Вузол	1	2	3	4
U, кВ	$137,94 \cdot e^{j \cdot (-0,25)}$	$133,32 \cdot e^{j \cdot (-0,51)}$	$130,65 \cdot e^{j \cdot (-0,59)}$	$130,43 \cdot e^{j \cdot (-0,6)}$

Таблиця 5.13 – Результати розрахунку потоку потужності початку та кінця електричної мережі за допомогою PowerFactory

Ділянка	$S_{\text{поч}}, \text{МВА}$	$S_{\text{кін}}, \text{МВА}$
0-1	144,24-j10,23	140,65+j22,48
1-2	158,95-j8,42	150,88+j29,08
2-3	56,68-j0,38	55,41-j2,91
3-4	7,6-j1,6	7,61-j1,6

Розрахуємо втрати потужності в мережі:

$$\Delta S_{\text{сум}} = S_{\text{пo,1}} - \sum S_{\text{н}} = 144,24 - j10,23 - (131,3 + j61,9) = 12,94 - j72,13 \text{ МВА.}$$

Web-додаток дозволяє розраховувати також втрати потужності в ділянок в повздовжньому опорі, а також в поперечній провідності для ділянок та модуль і кут напруги для вузлів.

Додаткові результати розрахунку для вузлів та ділянок визначених за допомогою Web-додатку наведено на рис. 5.5.3.

<p>^ Загальні</p> <p>$\Delta S_{\text{сум}} = 12,94 - 72,13j \text{ МВА.}$</p>	<p>^ Ділянка 0-1</p> <p>$P_{\text{поч}} = 144,24 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 140,65 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -10,23 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = 22,48 \text{ МВАр.}$ ^ Додатково $Z = 3,59 - 32,71j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 9,39 + 34,79j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 3,15j \text{ МВА.}$</p>	<p>^ Ділянка 2-3</p> <p>$P_{\text{поч}} = 56,68 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 55,41 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = 0,38 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = 2,91 \text{ МВАр.}$ ^ Додатково $Z = 1,28 - 2,53j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 4,64 + 1,20j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 2,09j \text{ МВА.}$</p>
<p>^ Вузол №1</p> <p>$U = 137,95 \text{ кВ};$ $\delta U = -14,38^\circ.$ ^ Додатково</p>	<p>^ Ділянка 1-2</p> <p>$P_{\text{поч}} = 158,95 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 150,88 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -8,42 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = 29,08 \text{ МВАр.}$ ^ Додатково $Z = 8,06 - 37,50j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 30,07 + 27,87j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 2,70j \text{ МВА.}$</p>	<p>^ Ділянка 3-4</p> <p>$P_{\text{поч}} = 7,61 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 7,60 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -0,99 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = -1,60 \text{ МВАр.}$ ^ Додатково $Z = 0,01 + 0,61j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 0,05 - 0,01j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 0,63j \text{ МВА.}$</p>
<p>^ Вузол №2</p> <p>$U = 133,35 \text{ кВ};$ $\delta U = -29,30^\circ.$ ^ Додатково</p>		
<p>^ Вузол №3</p> <p>$U = 130,64 \text{ кВ};$ $\delta U = -34,05^\circ.$ ^ Додатково</p>		
<p>^ Вузол №4</p> <p>$U = 130,43 \text{ кВ};$ $\delta U = -34,25^\circ.$ ^ Додатково</p>		

Рисунок 5.9 – Додаткові результати розрахунку

Висновки до розділу 5

За результатами виконання п'ятого розділу встановлено, що:

- 1) практично перевірено, що розроблений Web-додаток розраховує режим електричної мережі аналогічно до програми PowerFactory, що підтверджує

- правильність реалізації математичних методів для розрахунку ustalених режимів електричних мереж, а також схема заміщення елементів схеми;
- 2) практично перевірено правильність виводу основних параметрів схеми на основному робочому полі додатку, додаткових значень втрат та потоків потужності по гілкам, а також загальних втрат за допомогою додаткового вікна виводу результатів;
 - 3) встановлено, що за результатами розрахунку ustalеного режиму електричної мережі за допомогою розробленого Web-додатку перший варіант розімкненої схеми є більш оптимальним з точки зору загальних втрат мережі, так для другої варіанту конфігурації схеми модуль загальних втрат становить 73,28 МВА, а для першого варіанту - 29,93 МВА.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ПЛ 110 кВ

6.1 Вступ

В першому розділі було спроектовано та виконано розрахунок електричної мережі напругою 110 кВ, яку в подальшому необхідно вводити в експлуатацію та обслуговувати. На ПЛЕП впливають різні механічні навантаження, а також ряд інших негативних факторів. Опори постійно сприймають вагу власних конструктивних деталей, а також проводів, ізоляторів і арматури, які в свою чергу мають витримувати навантаження від вітру та ожеледиці. Опори старіють, гниють і можуть бути пошкоджені корозією. Слід враховувати вплив електричного та магнітного полів, які створює струм, а при експлуатації можуть відбуватися обриви проводів. Все це сприяє виникненню особливо небезпечної робочої середовища, в якій працівники виконують обслуговування ПЛЕП. Тому я вважаю, що розгляд питання охорони праці та безпеки, пов'язаний з експлуатацією вищезазначеної мережі є дуже важливим, оскільки роботи на даному класі номінальної напруги несуть серйозні ризики та небезпеки.

Мета дослідження: аналіз заходів та визначення методів запобігання небезпечним та шкідливим чинникам під час експлуатації ПЛ 110 кВ.

Об'єкт дослідження: повітряна лінія 110 кВ

Предмет дослідження: заходи з охорони праці та засоби особистої безпеки працівників

6.2 Технічні характеристики устаткування спроектованої мережі

В табл. 6.1 наведена інформація про розглянуту в першому розділі електричну мережу.

Таблиця 6.1 – Технічна характеристика мережі

Показники	Значення показників
Номінальна напруга	110 кВ
Кількість підстанцій	9
Кількість та найменування трансформаторів	2хТДТН-25000/110, 2хТМН-6300/110, 2хТДН-10000/110, 8хТДТН-10000/110, 4хТДТН-16000/110
Кількість ПЛ	12
Мінімальна довжина ПЛ	22 км
Максимальна довжина ПЛ	50 км
Перелік використовуваних перерізів ПЛ	АС-70/11, АС-120/19, АС-240/39
Розташування проводів на опорах	у вигляді трикутника

6.3 Аналіз умов праці під час експлуатації ПЛ 110 кВ

В період експлуатації ПЛ повинні періодично оглядатися і при необхідності піддаватися поточному чи капітальному ремонту. Періодичний огляд ПЛ по всій довжині повинен здійснюватися не рідше одного разу на рік. Крім того, не рідше одного разу на рік інженерно-технічний персонал повинен проводити вибіркові огляди окремих ліній або ділянок. За необхідності, здійснюються верхові огляди з вибірковою перевіркою проводів в місцях кріплення їх на опорах. Після стихійних лих (сильна гроза, буря), автоматичного відключення, при ожеледі необхідно проводити позачергові огляди ліній. Така робота завжди несе в собі значні ризики для працівників.

Під час огляду ПЛ мають виконуватись наступні перевірки:

- перевірка стану траси;
- візуальна перевірка і вимір (при необхідності) габаритів від проводів до рослинності (дерев, кущів, тощо);
- візуальна перевірка стану ізоляторів і лінійної арматури;
- перевірка стану опор, проводів, тросів;
- перевірка відстаней від проводів до поверхні землі і різних об'єктів, а також до споруд, що пересікаються.

В табл. 6.2 наведена інформація щодо поточного та капітального ремонтів, проаналізувавши яку, можна виявити небезпечні фактори при роботі персоналу.

Таблиця 6.2 – Поточний та капітальний ремонт

Вид ремонту	Характеристика ремонту
Поточний ремонт	Передбачають виправку і зміцнення опор, підтяжку бандажів, перевірку гаків і штирів, заміну пошкоджених та очищення забруднених ізоляторів, підтяжку проводів, перевірку надійності з'єднань проводів і контактів, перевірку запобіжників і перемичок, відновлення нумерації стовпів і вводів, перевірку габаритів
	лінії, очищення проводів від накидів, ремонт і фарбування кабельних спусків і кінцевих муфт, перевірку стану верхньої частини опор і спусків заземлення.
Капітальний ремонт	Виконуються в міру необхідності і в залежності від їх стану, але не рідше одного разу на 12 років для ВЛ з металевими і залізобетонними опорами і одного разу на 6 років для ПЛ з дерев'яними опорами. При цьому замінюють опори, встановлюють нові приставки, замінюють дефектні ізолятори, підтягують і замінюють дроти.

Таким чином, можна виокремити показники, які визначають умови праці (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Основні показники, які визначають умови праці

Найменування показника	Основні характеристики	Фактичне значення
Кваліфікація працівників	Кількість Група з електробезпеки	6 II-V групи
Місце виконання робіт	Відкрите Площа Тимчасове	Від 2 м ²
Розташування робочого місця	На поверхні землі На висоті [2.5]	Контроль за станом заземлюючих пристроїв Перевірка відсутності напруги Монтаж/демонтаж проводів на опорі Монтаж/демонтаж гірлянд ізоляторів
Параметри мікроклімату	Температура повітря Вологість Швидкість вітру	Взимку: -10 Влітку: +30 Не більша за 90% (у разі використання поліпропіленових канатів) Не більша за 98% (у разі використання ізольованих канатів із атмосферним захисним покриттям) До 3 балів (3-5 м/с) під час установки опор До 6 балів (11-14 м/с) під час монтажу проводів
Важкість праці	Переміщення вантажів Робоче положення Статичні та динамічні навантаження	Великої ваги (провід, гірлянда ізоляторів) На поверхні землі та на верхівці опори (28-32 м) Велике фізичне навантаження опорно-рухової системи внаслідок роботи на висоті
Напруженість праці	Довге перебування на значній висоті Напруженість органів чуття Контроль працівників, нагляд за лінією Робота біля струмопровідних частин	28-32 м Висока напруженість органів зору
Освітлення	Штучне (вночі) Природне (вдень)[3.1]	Світлодіодний прожектор Feron LL-503 на штативі SP65 (9000лм)
Шкідливі речовини	Пил	
Оцінка умов праці	Шкідливі [7.4]	I категорія

6.4 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників

Небезпечні і шкідливі виробничі чинники (НШВЧ), які виникають у ході виконання певних робіт, наведені у табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Перелік небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Перелік НШВЧ	Фактичне значення	Граничнодопустиме значення та номер нормативного документу
Статичні та динамічні навантаження	Шкідливий I ступінь	[1]
Нервово-психологічні перевантаження	Шкідливий (важка праця) II ступінь	[2]
Робота на висоті	Верхолазні роботи (ризик падіння людини) 28-32м Ризик падіння сторонніх предметів на людину	[2]
Хімічні речовини	Пил	[2]
Несприятливі погодні умови	Вітер, до 12м/с	[2]
	Несприятлива температура, +30, -20	

6.5 Розробка і розрахунок технічних та організаційних заходів з охорони праці

Технічні і організаційні заходи та їх показники наводять у табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Технічні і організаційні заходи

Вид заходу	Опис, показники і характеристики
Технічні заходи	Перевірка справності важкопідйомних механізмів, страхувальних канатів, тросів
	Підготовка робочого місця (виконують 2 працівника): відсутність напруги перевіряється ізолюючою штангою
	Перевірка захисного заземлення опор
	Після вимкнення роз'єднувачів і вимикачів навантаження з ручним управлінням треба візуально переконатись в їх вимкненому положенні і відсутності шунтувальних перемичок.
	Відключення силових та керуючих кіл у приводів комутаційних апаратів
	Плакат «Не вмикати! Робота на лінії!» вивішується на приводах відключених роз'єднувачів РГ-110
	Встановлення плакату «Заземлено» після встановлення захисних заземлень
	Перевірка відсутності напруги показниками напруги заводського виготовлення
	Встановлення заземлення на опорі (знизу вгору), на якій проводиться робота, або на сусідній. Допускається встановлення заземлень з обох боків дільниці лінії, на якій працює бригада, якщо відстань між заземленнями не перевищує 2 м
	Перевірка працівником стійкості та непохитності опори перед тим, як він на неї залізе, закріплення стропом та кліщами на ній
При заміні гірлянди ізоляторів необхідно виключити її зміщення або падіння. На одноланцюговій натяжній гірлянді необхідно працювати, лежачи на ній і зачепившись ногами за траверсу для фіксації тіла. При роботі на підтримувальній гірлянді строп паска закріплюється за траверсу	
Організаційні заходи	-Формування складу бригади з 6 працівників, які мають групу з електробезпеки починаючи з 3
	-Призначення керівника бригади, який має 5 групу з електробезпеки, суворий нагляд за роботою бригади з його боку
	-Видача наряд-допуску, в якому вказані назва вимкненої та вже заземленої ПЛ і роз'єднувача
	-Проведення інструктажу на робочому місці [7.1]
	Періодичні перевірки в денний час за складеним графіком
Обслуговування та капітальний ремонт зі зняттям напруги	
Перевірка натягу та відтягнення опор зі зняттям напруги	
Позачергові роботи при виникненні на проводах та тросах ожеледі, при галопуванні проводів, після стихійних лих, при відключенні ЛЕП релейним захистом зі зняттям робочої напруги	

6.6 Вибір засобів індивідуального захисту для обмеження впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Результати вибору потрібних ЗІЗ надати у вигляді табл. 6.6

Таблиця 6.6 – Засоби індивідуального захисту

Види ЗІЗ	Призначення	Марка або маркування, термін носки	Технічні характеристики	Нормативні документи
Захисний одяг	Захист від забруднень	ТВН «ОПТИМА» Кобінезон, куртка, 2 роки	100% бавовна	ДСТУ EN 136
Захисне взуття	Захист від механічних ушкоджень, забруднень	ТМ «BellotaShoe» Чоботи, 1 рік	Зносостійка підошва	ДСТУ EN ISO 20345:2009
Захист рук	Захист від механічних ушкоджень	«Osprey» Рукавиці, 1 рік	100% бавовна	ДСТУ EN 388:2005
Захист голови	Захист від механічних ушкоджень	ТМ "DIMOND-V" Каска, до зносу	З амортизуючи пристроєм	ДСТУ EN 397
Захист очей	Захист від електричної дуги ті ультра-фіолетового випромінювання	ТМ «Delta plus galeras» Окуляри, до зносу	Захисні, закриті, подвійні	EN166:2001
Захист для роботи на висоті	Захист від падіння з висоти	Кліщі універсальні КУ-1, кліщі КВН-1, (ПБ-1,2,3)-пояс безлямковий запобіжний зі стропом, (ПЛК1,2,3)-пояс лямковий, (К20) - страхувальний канат, до зносу	Допомагають утримуватись працівнику на опорі	ДСТУ 4262:2003
Пояс для робочого інструменту	Захист від падіння сторонніх предметів з висоти	NEO 84-330	Універсальний	ДСТУ EN ISO 13688:2016

Результати вибору потрібних електрозахисних засобів (ЕЗЗ) надають у вигляді табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – Електрозахисні засоби

Вид ЕЗЗ	Найменування	Технічні характеристики	Позначення і норми випробувань
Контрольно-сигнальні прилади	Ізолювальні штанги [5.2]	ШОУ-110 Оперативні, вимірювальні, універсальні.	0,4 – 500 кВ Раз у 24 місяці
	Ізолювальні кліщі [5.2]	Накладання муфт, заміна плавких вставок	35-110 кВ Раз у 24 місяці
	Електровимірювальні кліщі [5.2]	Вимірювання струму	35- 110 кВ Раз у 12 місяці
	Показчики напруги (контактні та безконтактні)	УВН-110 Наявність напруги	35 – 110 кВ Раз у 12 місяці
	Сигналізатори напруги [5.2]	Наближення до частин ЕУ під напругою	35 – 110 кВ Раз у 12 місяці
Захисні пристосування	Захисне переносне заземлення	ЗМПЗ, загальна вага заземлення 3,9 кг	Загальна вага заземлення 3,9 кг

6.7 Вибір технічних та організаційних заходів для унеможливлення і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

Попередньо виконують аналіз імовірних небезпек, які можуть створити надзвичайні ситуації та призвести до нещасних випадків серед працівників. Результати досліджень наводять у табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – Основні джерела небезпек

Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
Падіння матеріалів, елементів металоконструкцій ЛЕП, оснащення і т.д.	Порушення вимог правил безпеки	Виникнення нещасного випадку
Неправильне встановлення захисного заземлення	Порушення вимог правил безпеки	Виникнення нещасного випадку
Розряд блискавки	Протікання струму і наведення електромагнітного поля	Виникнення пожежі
Падіння з висоти працівника	Невиконання привал з безпеки, відсутність запобіжних поясів, невірне їх використання, порушення координації	Виникнення нещасного випадку
Падіння з висоти сторонніх предметів працівника	Невиконання привал з технічної безпеки	Виникнення нещасного випадку

Залежно від наведеної інформації в табл. 6.7, вибираємо потрібні техніко-організаційні заходи для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (табл. 6.9)

Таблиця 6.9 – Перелік заходів і засобів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

Група заходів	Вид заходу	Критерії вибору
Технічні	Наявність первинних засобів до тушіння пожеж (вогнегасник, пожежний інвентар)	Вогнегасник через 40...70м. Порошкові або вуглекислотні вогнегасники. Щит з інвентарем (1 щит на 500 м ²)
	Наявність грозозахисного обладнання	По всій території
Організаційні	Інструктажі для новачків	Вступний, первинний
	Навчання та тренінги	Постійні періодичні (раз на рік)
	Перевірка засобів пожеже тушіння	Відповідно до технічних умов
	План дій з попередження надзвичайних ситуацій	Відділ з охорони праці

6.8 Розрахунок захисного заземлення опори на ПЛЕП 110 кВ

Таблиця 6.10 – Вихідні дані для розрахунку

Тип ґрунту	Чорнозем
Горизонтальний заземлювач	Сталева пластина 4x12 мм
Глибина закладання горизонтального заземлювача	0,8 м
Вертикальний заземлювач	Сталева труба діаметром 50 мм
Глибина закладання вертикального заземлювача	2,5 м
Довжина вертикального заземлювача	4 м

Розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикального та горизонтального заземлювача має значення:

$$\rho_{розр}^{ВЗ} = \rho_{табл}^{чорн} \cdot \psi_2 = 15 \cdot 1,3 = 19,5 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\rho_{розр}^{ГЗ} = \rho_{табл}^{чорн} \cdot \psi_2 = 15 \cdot 3,5 = 52,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Відстань від поверхні ґрунту до середини вертикального заземлювача:

$$t = l_2 + \frac{l_g}{2} = 0,8 + \frac{4}{2} = 2,8 \text{ м}.$$

Опір розтікання вертикального заземлювача:

$$R_{B1} = \frac{\rho_{розр}^{B3}}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_g}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l_g}{4 \cdot t - l_g} \right) =$$

$$= \frac{19,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 4} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 4}{0,05} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2,8 + 4}{4 \cdot 2,8 - 4} \right) = 4,23 \text{ Ом.}$$

Відповідно до [3], допустимий опір розтікання струму для мережі напругою 110 кВ становить $R_{дон} = 0,5$ Ом. Оскільки $R_{B1} > R_{дон}$, необхідно паралельно з'єднати декілька вертикальних заземлювачів.

$$n' = \frac{R_{B1}}{R_{дон} \cdot \eta_e} = \frac{4,23}{0,5 \cdot \frac{1}{2}} = 16,91 \approx 17 \text{ шт.}$$

За табл. А4[3] фактичний коефіцієнт екранування становить $\eta_{Веф} = 0,55$.

Довжина горизонтального заземлювача при розміщенні вертикального заземлювача в контурі:

$$l_{\Gamma} = 2 \cdot (L + D) \approx a \cdot n = 2 \cdot 17 = 34 \text{ м.}$$

Опір струму розтікання горизонтального прямокутного заземлювача:

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{розр}^{\Gamma3}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Gamma}} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_{\Gamma}^2}{b_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma}} \right) = \frac{52,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 34} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 34^2}{0,05 \cdot 0,8} \right) = 2,70 \text{ Ом.}$$

За табл. А5[333] фактичний коефіцієнт екранування має значення $\eta_{Геф} = 0,50$.

Еквівалентний опір струму розтікання штучного заземлювача має значення:

$$R'_{ум} = \frac{R_{B1} \cdot R_{\Gamma}}{R_{B1} \cdot \eta_{Геф} + R_{\Gamma} \cdot n \cdot \eta_{Веф}} = \frac{4,23 \cdot 2,70}{4,23 \cdot 0,50 + 2,70 \cdot 34 \cdot 0,55} = 0,42 \text{ Ом.}$$

Отримане значення опору штучного заземлення не перевищує значення $R_{ум}$, що дорівнює 0,5 Ом, тому розрахунок виконаний вірно.

Висновки до розділу 6

У цьому розділі розглянуто основні заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час експлуатації електричної мережі ПЛ 110 кВ.

Визначено умови праці і встановлено перелік надзвичайних і шкідливих виробничих чинників:

- напруга 110 кВ;

Розроблено заходи з електробезпеки працівників:

- захисний заземлювальний пристрій з опором 0,42 Ом;
- огорожа;
- блокувальні засоби.

Усі працівники мають IV групу з електробезпеки і забезпечені засобами індивідуального захисту.

7. СТАРТАП-ПРОЄКТ «WEB-РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ»

У даному розділі проведено аналіз можливості ринкової реалізації та визначенні можливі напрямки впровадження стартап-проєкту.

7.1. Опис ідеї проєкту

В табл. 7.1 наведено інформацію щодо можливостей та змісту проєкту, напрямки його застосування та потенційні ринки реалізації.

Таблиця 7.1. Опис ідеї стартап-проєкту.

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення розрахункового комплексу для розрахунку усталеного режиму електричної мережі з залученням можливості серверного дистанційного розрахунку без участі потужних desktop-додатків на ПК.	1. Навчальне – застосування програми в навчальних закладах.	1. Наглядне застосування теоретичного матеріалу студентів енергетичних спеціальностей на практиці.
		2. Набуття базових навичок розрахунку мереж різної конфігурації та рівня напруги.
		3. Підвищення кваліфікації персоналу у сфері енергетики.
	2. Комерційне – надання платних послуг приватним та державним організаціям.	1. Збільшення різноманітності на ринку програмного забезпечення
		2. Можливість проведення розрахунку за допомогою будь-якого, підключеного до інтернету, девайсу.
	4. Наукове – можливість розширення функціоналу додатку.	1. Можливість отримання нового конкурентоспроможного розрахункового комплексу з необмеженим потенціалом.

В табл. 7.2 наведено результати аналізу техніко-економічних переваг ідеї в порівнянні з пропозиціями конкурентів.

Даний перелік характеристик та властивостей продукту є підставою для формування його конкурентоспроможності на ринку.

Таблиця 7.2. Основні характеристики ідеї проєкту.

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні товари/концепції конкурентів)				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	LineXL	Online Electric	FaultAn			
1	Швидкість розрахунку	середня	висока	середня	низька		1, 3, 4	2
5	Редагування параметрів ітераційного розрахунку	так	ні	ні	ні	2, 3, 4		1
7	Інформативний графічний вивід результатів	так	ні	ні	ні	2	3, 4	1
4	Редагування вхідних даних	так	так	ні	ні	3, 4	2	1
2	Максимальна розмірність схеми	5000	необм.	200	200		3, 4	1, 2
8	Можливість розробки оновлення програми	так	ні	ні	ні	2, 3, 4		1
3	Графічний вивід схеми	так	ні	так	так	2	3, 4	1
6	Наявність інструкції для користувача	так	так	ні	ні	3, 4	1, 2	

7.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

В даному підпункті проведено аудит технологій, за допомогою яких можна реалізувати ідею проєкту, їх перелік наведений у табл. 4.3.

Проєкт є здійсненним. Усі технології, необхідні для реалізації проєкту, знаходяться у вільному доступі, в тому числі і інструкції з організації ітераційного розрахунку різними математичними методами для адаптації під роботу з серверами.

Таблиця 7.3. Можливість технічного створення ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Адаптовані математичні моделі для розрахунку усталених режимів	Java	Наявні	Необхідно розробити
2	Інтерфейс користувача	JavaScript, Java, Html, CSS	Наявні	Необхідно розробити
3	База даних для збереження даних вводу та виводу параметрів	MySQL	Наявні	Необхідно розробити

7.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В межах даного підпункту визначено ринкові можливості, що можуть бути використані під час ринкового впровадження проекту, та загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту на ринку. Розроблено напрями розвитку проекту з урахуванням потреб потенційних клієнтів, стану ринкового середовища та пропозицій проектів-конкурентів. У табл. 7.4 наведено аналіз динаміки та зміни попиту на проект.

Встановлено, що ринок має середню ступінь привабливості для входження, а також перспективному впровадженню на ринок сприяє відсутність подібних розвинених онлайн-додатків. Основні групи клієнтів стартапу та їх характеристика визначено у табл. 7.5. У табл. 7.6 та 7.7 представлено аналіз ринкового середовища з точки зору загроз та можливостей.

Спираючись на конкурентну ситуацію проект може існувати на ринку інформаційних та енергетичних послуг за умови постійного оновлення та аналізу попиту на власні послуги та послуги товарів-замінників (аналогів).

Таблиця 7.4. Особливості потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість основних гравців	4
2	Динаміка розвитку ринку	стагнує
3	Наявні обмеження для входу на ринок	Необмежений
4	Нестандартні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні

Таблиця 7.5. Особливості потенційних клієнтів стартап-проєкту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Організація розрахунку режимів електричної мережі різних класів напруг, конфігурації та трансформаторними зв'язками (ноутбук, персональний комп'ютер, планшет, смартфон)	Інженери-проектанти, працівники служби режимів, студенти.	Не передбачено	Доступність, портативність, оптимізованість розрахунку, ефективність, зручність інтерфейсу

Таблиця 7.6. Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Оновлення програми	Постійна підтримка роботи серверної частини.	Найняти людину на посаду відповідального за технічний стан програми, анонсувати нові оновлення та постійно оновлювати програмний функціонал.
2	Ціна на послуги	Розробка інформаційних ресурсів коштує значних коштів.	Система Free to Play.
3	Недостатня мотивація споживача	Сайт є інновацією на ринку, тому споживачі можуть упереджено ставитися до нового продукту. Наявність desktop рішень.	Реклама та розповсюдження серед потенційних клієнтів.

У табл. 7.9 наведено загальні риси конкуренції на ринку. У табл. 7.8 наведено детальний аналіз умов конкуренції.

Ринкові загрози та можливості складаються на основі аналізу загроз та можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та можливості є результатами впливу факторів, і ще не реалізовані на ринку та мають певну ймовірність здійсненості. У табл. 7.12 наведено результат проведення SWOT-аналізу.

Таблиця 7.7. Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Новизна	Відносно просте, швидке та портативне рішення, без залучення потужної розрахункової техніки.	Створення реклами інноваційного продукту.
3	Портативність	Можливість розрахунку режиму будь-де та з будь-якого пристрою, що підключений до мережі Internet.	Більш прискіпливо адаптувати дизайн додатку під формат різних типів екранів.
2	Простота використання	Наявність наочного робочого поля, що дозволяє найбільш інформативно виводити отримані результати та проводити аналіз режиму електричних мереж. Широкі можливості вводу з застосування готових бібліотек обладнання.	Модернізація функціоналу та інтерфейсу користувача.

Таблиця 7.8. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Web-додатки для розрахунку усталених режимів роботи електричних мереж	Desktop-програми для розрахунку усталених режимів роботи електричних мереж	Корисність Новизна Портативність Зручність Простота Використання	Рецензії	Відсутні
Висновки	Через специфічність ринку продукту конкурентоспроможність є специфічною і не може бути чітко визначеною	Присутня можливість виходу на ринок. Розробники інших web-додатків є найбільш потенційними конкурентами	Постачальники помірно диктують умови ринку	Постачальники помірно диктують умови ринку	Обмеженнями для роботи на ринку є відсутність необхідної кваліфікації у постачальників товарів замінників

Таблиця 7.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції – чиста	Окрім Internet аналогів, комплекси для розрахунку усталених режимів існують також в desktop варіанті	Основною перевагою розробленого продукту буде портативність
Інтенсивність – марочна	Подібні додатки для розрахунку в Україні відсутні	Розвивати додаток для створення конкуренції desktop аналогам
Рівень конкурентної боротьби – національний	Подібні додатки для розрахунку в Україні відсутні	Розвивати продукт у напрямку потенційного його виходу на міжнародний ринок
Вид конкуренції – товарно-родова	Подібні додатки для розрахунку в Україні відсутні	Розвивати додаток для створення конкуренції desktop аналогам
Характер конкуренції – цінова	Додаток матиме різні варіанти підписки (денна, місячна, річна), а також можливість реєстрації студентів для отримання доступу до demo-версії програми	Ціна формується на основі багатьох факторів
Галузева ознака – внутрішньогалузева	Програма є вузькоспеціалізованою	Розробка додаткового функціоналу, спрямованого на розширення кількості галузей, яким надається послуга

Таблиця 7.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Новизна	Продукція, що випускає компанія, не має аналогів у конкурентному середовищі
2	Аргументованість результатів	Додаток видає лаконічну, обґрунтовану інформацію щодо висновків та рекомендацій
3	Простота використання	Клієнт може використовувати продукт без залучення додаткових продуктів та ресурсів

Таблиця 7.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «web-розрахункова модель електричної мережі»

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з проектом						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Різноманітність функціоналу	5						V	
2	Новизна продукту	3						V	
3	Ціна продукту	3			V				
4	Корисність	6					V		
5	Експлуатація	5		V					
6	Термін розробки програми	3			V				
7	Оновлення додатку	4			V				

Таблиця 7.12. SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Попит на розрахункові комплекси з інтуїтивним дизайном	Необхідність залучення великорозмірної бази даних для збереження вхідних та вихідних даних, що збільшує можливість ненадійної роботи продукту
Новизна проєкту – відсутність інформативного виводу результатів розрахунку в аналогічних додатках.	
Інтуїтивність користувацького інтерфейсу	Новизна проєкту – велика кількість ризиків
Можливість використання продукту будь-де	Висока вартість послуг за умови залучення нових розробників з метою підтримання та розвитку продукту
Можливості:	Загрози:
Розширення функціональних можливостей для виходу на ринок desktop аналогів	Висока вартість підтримки та розвитку програми
Використання додатку для проєктування в електроенергетичній галузі промисловості	Високий ризик виникнення помилок при застосуванні додатку на різних типах дисплеїв

Таблиця 7.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Free to play	Вище середнього. Цілком залежить від якості продукції	2 роки
2	Використання матричної моделі розрахунку	Досить низька через велику ймовірність взлому та зниження якості функціоналу	3 роки
3	Спільна робота з іншими розробниками	Середня. Залежить від якості продукції та можливості співробітництва з іншими підприємствами	1 рік

Висновки до розділу 7

Метою розділу є маркетинговий аналіз стартап-проєкту «web-розрахункова модель електричної мережі», що дозволяє визначити принципові можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації. Проведено технологічний аудит ідеї проєкту та аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.

Комерціалізація проєкту можлива за умови врахування деяких особливостей (демо-версія продукту, партнерські угоди). Попит на проєкт наявний, динаміка ринку помірна, рівень рентабельності роботи на ринку трохи нижче середнього, у порівнянні з іншими можливими проєктами-конкурентами. Перспективи впровадження доволі значні. В світі відсутні портативні розрахункові комплекси, які б не вимагали суттєвих обчислювальних ресурсів, що в свою чергу може стати поштовхом для впровадження даного проєкту. Проблемами входження може стати низька довіра споживача а також низький початковий капітал. Стан конкуренції помірний, конкурентоспроможність проєкту досить висока, особливо на початкових етапах

ВИСНОВКИ

- 1) визначено, що з огляду на забезпечення отримання результату розрахунку параметрів ustalених режимів роботи електричних мереж різної конфігурації в режимах, граничних за збіжністю ітераційного процесу, можуть бути застосовані такі методи вузлової моделі: Зейделя, Ньютона та Ньютона без перерахунку Якобіана. Зазначені методи забезпечують однаковість результатів за критерієм граничного значення коефіцієнта обтяження режиму;
- 2) встановлено, що з наближенням до межі збіжності ітераційного процесу розрахунку кількість ітерацій, необхідних для визначення параметрів ustalених режимів роботи електричних мереж, різко зростає для всіх розглянутих методів, окрім метода Ньютона, що може призвести значних часових затримок в отриманні результатів у випадку роботи з електричними мережами, що містять велику кількість вузлів;
- 3) встановлено, що методи Зейделя та Ньютона забезпечують можливість отримання результатів розрахунку параметрів ustalеного режиму в діапазоні, обумовленому межею статичної стійкості електричної мережі;
- 4) практично перевірено, що розроблений Web-додаток розраховує режим електричної мережі аналогічно до програми PowerFactory, що підтверджує правильність реалізації математичних методів для розрахунку ustalених режимів електричних мереж, а також схема заміщення елементів схеми розроблених у додатку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок: [арх. 22 серпня 2015] / Міненерговугілля України. — 5-те вид., перероб. і доп. (станом на 22.08.2014) (чинне з 22.11.2014). — Харків : [б. в.], 2014. — 793 с.
2. Третьякова Л.Д. 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». — К.: КПІ ім. І. Сікорського, ІЕЕ, 2019 — 52 с.
3. ДБН В.2.5-28-2006: «Державні будівельні норми. Природне і штучне освітлення»;
4. ДБН.В.2.5-16-99 Інженерне обладнання спорудження зовнішніх мереж. Визначення розмірів земельних ділянок для обласних електричних мереж;
5. НПАОП 0.00-1.15-07: «Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті»;
6. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. Гігієнічний норматив: ГН 3.3.5-3.3.8; 6.6.1- 083-2014. [Чинний від 01-03-2014]. — К. : Відділ поліграфії Українського центру держсанепіднагляду МОЗ України, 2014. — 46 с. [1] с.
7. НПАОП 0.00-4.12-2005: «Перелік робіт з підвищеною безпекою»;
8. Електричні мережі та системи. Режими роботи розімкнених мереж: навч. Посіб./ В.В. Кирик, Т.Б. Маслова. — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 256 с.
9. DIgSILENT PowerFactory 15. User Manual. Online Edition [Електронний ресурс]. — DIgSILENT GmbH. — 1427 p.
10. СОУ–Н МЕВ 40.1–00100227–68:2012. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки [Текст]. — Введ. 21.10.2012 р. — К. : 2012. — 29 с.

11. NEPLAN Electrical. User's Guide [Електронний ресурс]. – Busarello + Cott + Partner Inc.; ABB Utilities GmbH. – Version 5. – 575 p.
12. Сулейманов В. М. Розрахунок і регулювання усталених режимів роботи електричних мереж енергосистем: Навч. посібник [Текст] / В. М. Сулейманов. – К.: НМК ВО. – 1992. – 208 с.
13. 14 Bus System. DIGSILENT PowerFactory [Електронний ресурс]. – 9 p.
14. Richards, M. Software Architecture Patterns [Text] / Mark Richards – O'Reilly Media, Inc., 2015 – 46 p. – ISBN: 978-1-491-92424-2.
15. Spring Boot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://spring.io/projects/spring-boot#overview>.
16. Front Controller [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://martinfowler.com/eaCatalog/frontController.html>
17. Database Normalization Explained [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bit.ly/35KelZ0>.
18. Features of Java [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.javatpoint.com/features-of-java>.