

**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

_____ Валерій КИРИК

“ ____ ” _____ 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: розрахунок режимів
мережі з трансформаторними зв'язками»**

Виконав:

студент II курсу, групи ЕС-91мп

Волчков Ігор 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.

Третьякова Лариса Дмитрівна

Консультант з розділу «Стартап-проект»:

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 _____

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

_____ Валерій КИРИК

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Вочкову Ігорю Васильовичу

1. Тема дисертації: «Web-розрахункова модель електричної мережі: розрахунок режимів мережі з трансформаторними зв'язками», 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: є усталені симетричні режими роботи електричних мереж електроенергетичних систем.
4. Перелік завдань, які необхідно розробити:
 - 1) проаналізувати різні типи додатків та виділити основні вимоги до функціоналу, який необхідно реалізувати;
 - 2) обрати найбільш оптимальний математичний апарат для розрахунку, щоб забезпечити швидкість розрахунку на високому рівні;
 - 3) розробити серверну частину додатку;
 - 4) розробити клієнтську частину додатку;
 - 5) провести розрахунок тестової схеми з наявними трансформаторними зв'язками через web-додаток та порівняти результати з програмним комплексом PowerFactory.

5. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

- 1) порівняння аналогів та засоби реалізації web-додатку;
- 2) вибір оптимального методу розрахунку;
- 3) структура серверної частини web-додатку;
- 4) структура користувацького інтерфейсу;
- 5) алгоритмізація роботи web-додатку;
- 6) порівняння розрахунку тестової схеми з трансформаторними зв'язками;
- 7) розробка стартап-проєкту;
- 8) охорона праці під час монтажу трансформатора.

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 «Nauka i studia» – NR 11(213) – 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 «Nauka i studia» – NR 12(214) – 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	Третьякова 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 _____

Ігор ВОЛЧКОВ

Науковий керівник _____

Валерій КИРИК

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: «Web-розрахункова модель електричної мережі: розрахунок режимів
мережі з трансформаторними зв'язками»

Київ – 2020 року

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка виконана на 99 сторінках формату А4, яка включає в себе 32 рисунків, 31 таблиць, 18 джерел використаної літератури. Графічна частина містить 8 аркушів технічних креслень форматом А1.

В даній магістерській дисертації був розроблений web-додаток для розрахунку усталеного режиму електричної мережі з трансформаторними зв'язками.

Актуальність теми: відсутність web-додатків для розрахунку усталеного режиму електричної мережі на ринку та перспективи і попит на їх подальше використання. Також поява додатку, який має гнучкий функціонал подібний до десктоп-додатків, та не залежить від обчислювальних можливостей машини є досить конкурентоспроможним та перспективним на ринку.

Мета дослідження: розробка нового програмного забезпечення для розрахунку усталених режимів електричних мереж.

Завдання дослідження:

- проаналізувати різні типи додатків та виділити основні вимоги до функціоналу, який необхідно реалізувати;
- обрати найбільш оптимальний математичний апарат для розрахунку, щоб забезпечити швидкість розрахунку на високому рівні;
- розробити серверну частину додатку та реалізувати необхідний функціонал для розрахунку усталеного режиму електричної мережі з трансформаторними зв'язками;
- розробити клієнтську частину додатку;
- провести розрахунок тестової схеми з наявними трансформаторними зв'язками через web-додаток та порівняти результати з програмним комплексом PowerFactory.

Об'єкт дослідження: усталені симетричні режими роботи електричних мереж електроенергетичних систем.

Предмет дослідження: методи розрахунку параметрів усталених симетричних режимів роботи електричних мереж електроенергетичних систем.

Методи дослідження: математичне моделювання із застосуванням програмування на мовах Java та Javascript, імітаційне моделювання із застосуванням програмного комплексу PowerFactory.

Наукова новизна одержаних результатів: гнучкість функціоналу в порівнянні з вже існуючими аналогами на ринку та конкурентоспроможність з десктоп-рішеннями.

Практичне застосування одержаних результатів: впровадження web-додатку в проєктні організації, яким необхідне портативне рішення для розрахунку усталеного режиму електричної мережі.

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 «Nauka i studia» – NR 11(213) – 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 «Nauka i studia» – NR 12(214) – 2020 р.

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ, РЕЖИМИ РОБОТИ, РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ,
ПРОГРАМУВАННЯ, WEB-ДОДАТОК

ABSTRACT

The master's dissertation is consists of an explanatory note and a graphical part. The explanatory note is made on the 99 A4-size pages, which includes 32 drawings, 31 tables, 18 sources of used literature. The graphic part contains 8 sheets of technical drawings in A1 format.

In the course of the master's dissertation, the web-application for the calculation of operation modes of the electric grid with transformer links.

Actuality of the study: is tied with the availability of web-applications for the calculation of the steady regime of the electric grid on the market and the prospects of their further improvements. Also, flexible functionality of the application similar to desktop applications and not depend on the vast possibilities of the machine allow to be competitive and promising on the market.

The purpose of the master thesis: is the release of a new software for the protection of steady modes of electric grid.

Goals of the research:

- analyze different types of applications and identify the basic requirements for the functionality that needs to be implemented;
- find out the most optimal mathematical apparatus for a calculation, to disregard the swiftness of a calculation at a high level;
- develop the server part of the application and implement the necessary functionality to calculate the steady state electrical network with transformer connections;
- develop the client part of the application;
- calculate the test scheme with the available transformer connections through the web-application and compare the results with the PowerFactory software package.

The object of the study: is software product for the development of steady modes of electric grid.

The subject of study: is the portability of the machine and the independence of the machine.

Methods of improvement: and mathematical modeling from the use of programs on Java and Javascript, from the use of the PowerFactory software package.

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 solutions.

Practical storage of the obtained results: is the introduction of web-applications in the design of the organization, which requires a portable solution for the calculation of a steady mode of an electric grid.

Publications on the subject of research:

1. Chizhevsky V. V., Ilchenko D. V., Volchkov I. V., Lopuha V. In "The value of the optimal method of drawing parameters in fatigued modes of robots and electric fences for the criterion between the safety of the iterative process" // collection of "Nauka i studia" – NR 11(213) – 2020 p.

2. Chizhevsky V. V., Ilchenko D. V., Volchkov I. V., Lopuga V. V. "The peculiarities of the parameters in the fatigued modes of robots and electric fences with the optimization method" // collection "Nauka i studia" - NR 12 (214) - 2020 p.

ELECTRIC GRID, OPERATION MODES, CALCULATION MODEL,
SOFTWARE ENGINEERING, WEB-APPLICATION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	11
ВСТУП.....	12
1 ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ ТИПІВ ДОДАТКІВ ТА СТРУКТУРА МАЙБУТНЬОГО ДОДАТКУ	16
1.1. Переваги web-додатка над іншими типами програмного забезпечення у вирішенні поставленої задачі	16
1.1.1. Десктопний додаток.....	16
1.1.2. Мобільний додаток	17
1.1.3. Web-додаток	18
1.1.4. Результати аналізу різних видів додатків.....	19
1.2. Опис структури майбутнього додатку та оцінка наукової новизни	19
Висновки до розділу 1	20
2 ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА КРИТЕРІЄМ МЕЖІ ЗБІЖНОСТІ ІТЕРАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ	21
2.1. Особливості розрахунку усталених режимів роботи електричних мереж 21	
2.2. Опис методів для розрахунку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь вузлової моделі усталених режимів роботи електричних мереж	22
2.3. Результати дослідження математичних методів	24
Висновки до розділу 2	27
3 СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ 29	
3.1. Загальна структура програмного забезпечення.....	29
3.2. Структура серверної частини додатку	29
3.3. Структура бази даних.....	31
3.4. Приклад реалізації алгоритму метода Ньютона у web-додатку	35
Висновки до розділу 3	44
4 СТРУКТУРА КЛІЄНТСЬКОЇ ЧАСТИНИ WEB-ДОДАТКУ.....	46
4.1. Основні принципи побудови користувацького інтерфейсу.....	46
4.2. Збір вихідних даних та заповнення бази даних.....	51
4.3. Вивід результатів розрахунку	57
Висновки до розділу 4	60

5 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ТРАНСФОРМАТОРНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ	61
5.1 Опис розрахункової схеми та вихідні дані	61
5.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення вихідної мережі.....	63
5.3 Ініціалізація необхідних параметрів конфігурації мережі	65
Висновки до розділу 5	74
6. СТАРТАП ПРОЄКТ «WEB-ДОДАТОК ДЛЯ РОЗРАХУНКУ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ»	76
6.1 Опис основних характеристик проєкту.....	76
6.3 Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища стартапу.....	78
6.3 Проведення ступеневого аналізу конкуренції на ринку.....	80
6.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту.....	82
Висновки до розділу 6	84
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС МОНТАЖУ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГОЮ 110/35 кВ	85
7.1 Загальні положення	85
7.2 Технічні характеристики і вибір місць розміщення нового енергетичного устаткування.....	85
7.3 Визначення та оцінка показників умов праці на робочих місцях	85
7.4 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників ..	86
7.5 Розробка і розрахунок технічних та організаційних заходів з охорони праці	87
7.6 Вибір засобів індивідуального захисту для обмеження впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників	88
7.7 Вибір технічних та організаційних заходів для унеможливлення і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.....	89
7.8 Розрахунок захисного заземлення для трансформатора ТДН-25000/11090	
Висновки до розділу 7	92
ВИСНОВКИ.....	94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	96

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

БП – балансуєчий пункт.

ЛЕП – лінія електропередач.

ПК – персональний комп'ютер.

СНАР – системи нелінійних алгебраїчних рівнянь.

СУБД – система управління базами даних.

CRUD (англ. Create, Read, Update, Delete) – операції створення, читування, оновлення, видалення.

CSS (англ. Cascading Style Sheets) – таблиці каскадних стилів.

DAO (англ. Data Access Object) – об'єкт доступу до даних.

DTO (англ. Data Transfer Object) – об'єкт для передачі даних.

HTML (англ. HyperText Markup Language) – мова розмітки гіпертекстових документів

IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers) – міжнародна організація інженерів у галузі електротехніки, радіоелектроніки та радіоелектронної промисловості.

JPA (англ. Java Persistence API) – це специфікація Java EE і Java SE.

MVC (англ. Model-View-Controller) – паттерн проєктування Модель-Відображення-Контролер.

ORM (англ. Object-Relational Mapping) – об'єктно-реляційна проєкція.

URL (англ. Uniform Resource Locator) – уніфікований локатор ресурсів.

ВСТУП

На сьогоднішній день існує проблема залежності проектувальника, студента-інженера від десктопних-додатків для розрахунку режиму. В Україні немає аналогів більш портативного розрахунку зі смартфона, планшета а інколи виникають ситуації, коли немає поруч потужного комп'ютера, що унеможливило б проведення розрахунку.

Наразі існує ряд десктоп-програм для моделювання електричних мереж різних класів номінальної напруги та розрахунку ustalених 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 прямо пропорційна 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 Інтернет. Метою цього розділу є оцінка наявності таких додатків та їх функціональних характеристик.

Єдиним наразі існуючим онлайн-додатком для розрахунку ustalених 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 три-обмоткових трансформаторів. Зовнішній вигляд таблиць вводу параметрів показано на рис. 1 та рис. 2.

Расчет и анализ установившихся режимов электрических сетей

Статические характеристики Узлы Ветви Результаты Граф

№ 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. 3.

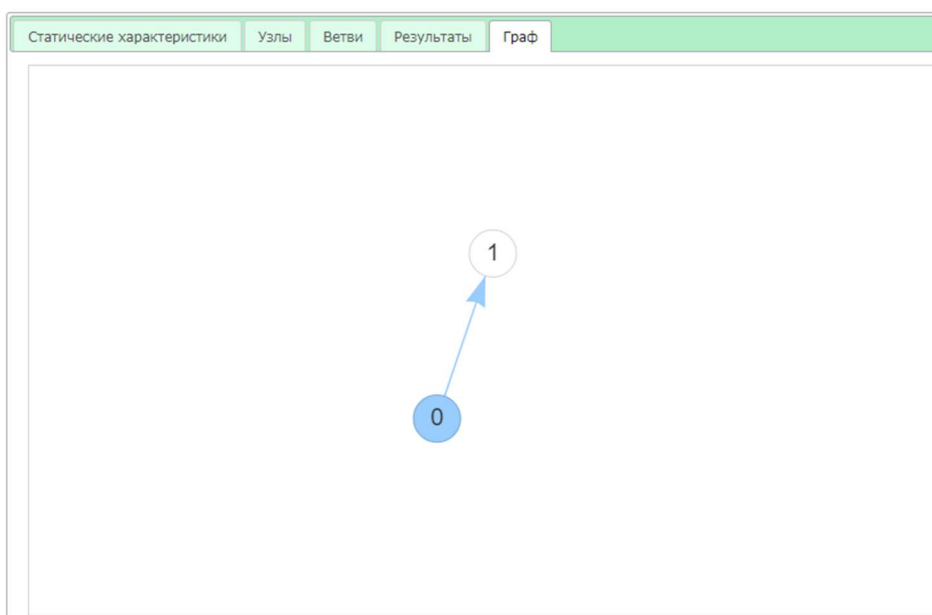




Рисунок 3 – Граф найпростішої мережі

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. 4.


Статистические характеристики	Узлы	Ветви	Результаты	Граф
-------------------------------	------	-------	------------	------


Таблица 1 - Потокораспределение


Ннач	Нкон	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	$\Delta P_{нб,г}$ МВт	$\Delta Q_{нб,г}$ МВар


Таблица 2 - Напряжения в узлах


N узла	Наименование узла	Номинальное напряжение, кВ	Фактическое напряжение, кВ	Отклонение от $U_{ном}$, %
--------	-------------------	----------------------------	----------------------------	-----------------------------


Таблица 3 - Перегруженные ветви

Ннач	Нкон	Наименование ветви	Ток ветви, А	Допустимый ток, А
------	------	--------------------	--------------	-------------------


Таблица 4 - Суммарные показатели

Параметр	P, МВт	Q, МВар
Нагрузка	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Генерация	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Генерация $Q_{вл}$	-	<input type="text"/>
Генерация $Q_{бск}$	-	<input type="text"/>
Потери всего	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Мощность балансирующего узла	<input type="text"/>	<input type="text"/>


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			
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

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 відображатись 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 десктоп-програм.

Метою виконання даної дисертації є розробка web-додатку для розрахунку усталених режимів роботи мереж з трансформаторними зв'язками. Web-додаток є більш гнучким у порівнянні з іншими, бо є можливість його використання з браузера не тільки комп'ютера, а смартфона, планшета та іншого пристрою, який має можливість виходу до мережі Інтернет.

Актуальність даної теми пов'язана з відсутністю web-додатків на ринку та перспективами і попитом на їх подальше використання. Також поява нового продукту на ринку призведе до появи конкуренції, що дасть змогу у подальшому конкурувати з десктоп рішеннями.

Основні вимоги до додатку, що розробляється:

- інтуїтивний дизайн;
- графічне відображення топології схеми;
- швидкість роботи;
- точність розрахунку режимних параметрів;
- портативність на різних пристроях.

1 ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ ТИПІВ ДОДАТКІВ ТА СТРУКТУРА МАЙБУТНЬОГО ДОДАТКУ

1.1. Переваги web-додатка над іншими типами програмного забезпечення у вирішенні поставленої задачі

Сьогодні програмне забезпечення розробляється для широкого спектру електронних пристроїв, які можуть значно відрізнятися продуктивністю, габаритами, функціональним призначенням та іншими характеристиками. Кожний з них вимагає індивідуального підходу до розробки програмного забезпечення. З найбільш популярних видів додатків можна виділити десктопний, мобільний та web-додаток. Пропонується окремо розглянути переваги і недоліки кожного типу.

1.1.1. Десктопний додаток

Десктопний додаток – це програмне забезпечення, яке встановлюється на комп'ютер (ноутбук або ПК) під конкретну операційну систему, а в деяких випадках – під конкретне апаратне забезпечення.

Переваги десктопних додатків.

1. Не залежать від мережі Інтернет (якщо вони не розраховані на взаємодію з іншими користувачами).
2. Безпека. Вся інформація користувача зберігається на власному комп'ютері, а не в мережі Інтернет.
3. Максимальне використання ресурсів комп'ютера для роботи. Розроблення програми під конкретне апаратне забезпечення дозволяє максимально використовувати потенціал комп'ютера.
4. Необов'язковість оновлення. Можливість встановлення старіших версій програми. Десктопні додатки не припиняють роботу з виходом нової версії та не змушують користувача виконати оновлення без попередньої згоди.

Недоліки десктопних додатків.

1. Відсутність портативності. Всі дані та налаштування додатка прив'язані до комп'ютера на якому були встановлені.
2. Необхідне встановлення. Десктопні додатки вимагають ручного встановлення, а також займають місце на жорсткому диску.
3. Складність оновлення десктопних додатків, необхідність підтримки старих версій.
4. Залежність від апаратного та програмного забезпечення.

1.1.2. Мобільний додаток

Мобільний додаток – програмне забезпечення призначене для роботи на мобільному пристрої. За своєю суттю мобільні додатки аналогічні до десктопних, але розраховані на більш портативні типи пристроїв.

Мобільні додатки мають такі ж переваги і недоліки як і десктопні, а також додаткові, що пов'язані з особливостями мобільних пристроїв.

Переваги мобільних додатків (додатково до десктопних).

1. Використання можливостей мобільних пристроїв. Мобільні пристрої оснащені різними інструментами (камери, GPS та NFC модулі, акселерометр, різні сканери та інше), можливості яких доступні для використовувати мобільними додатками.
2. Push-сповіщення.

3. Зручна система встановлення та оновлення. Мобільні додатки поширюються через спеціальні магазини (Play Market, Apple Store). Вони дозволяють користувачам легко інсталиувати та оновлювати мобільні додатки.

Недоліки мобільних додатків (додатково до десктопних).

1. Обмежені ресурси мобільних пристроїв. Додатки виконуються на пристроях з значними ресурсними обмеженнями.
2. Менша роздільна здатність екранів. Менший розмір екранів мобільних пристроїв ускладнює показ контенту додатків.

1.1.3. Web-додаток

Web-додаток – це програмне забезпечення, що зберігається на віддаленому сервері та керується через мережу Інтернет за допомогою web браузера.

Переваги web-додатків.

1. Не потребують встановлення та не займають додаткового місця на жорсткому диску.
2. Не потребують оновлення. Оновлення web-додатків відбувається на стороні сервера незалежно від користувачів.
3. Незалежність від платформи. Оскільки web-додатки використовуються за допомогою браузерів, то при їх розробці не потрібно підлаштовуватися під конкретну операційну систему.
4. Вільний доступ з різних пристроїв. Для доступу до програми потрібен будь-який пристрій з встановленим браузером та доступом до мережі Інтернет.
5. Пристосовані до збільшення робочого навантаження. Не потрібно потужне обладнання зі сторони клієнтів, оскільки вся обробка ведеться на стороні серверів. Коли навантаження на систему зростає, розробники просто додають нові сервери.

Недоліки web-додатків.

1. Безпека. Web-додатки зазвичай стикаються з більшими ризиками для безпеки, ніж десктопні чи мобільні. Користувач ніяким чином не контролює методи захисту конфіденційної інформації.
2. Залежність від мережі Інтернет та повільніша швидкість роботи. Неважливо наскільки потужний сервер чи пристрій клієнта. Якщо швидкість мережі не висока, web-додатки працюватимуть повільніше, ніж десктопні чи мобільні аналоги.
3. Сумісність з браузером. При розробці web-додатків потрібно враховувати їх сумісність з різними браузерами та їх версіями.

1.1.4. Результати аналізу різних видів додатків

Проаналізувавши описані вище переваги та недоліки, для розробки дипломного проєкту в якості типу програмного забезпечення було обрано web-додаток.

Головною причиною такого вибору полягає відсутність аналогів на ринку та можливість портативної роботи додатку на смартфонах, планшетах та інших пристроях з можливістю виходу до мережі Інтернет. Також незалежність від пропускної здатності машини, на якій використовується додаток та виконання усіх розрахунків на віддаленому сервері, є великою перевагою для користувачів зі слабкими комп'ютерами чи портативними пристроями.

1.2. 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 десктоп-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 триобмоткового, фазоповоротного і вольто-додаткового трансформаторів, оскільки вони є поширеними елементами електричних мереж України.

Ще однією корисною функцією, яку додаток перейме у своїх «десктоп-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 вищеназвані 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

В результаті аналізу різних видів додатків для розробки дипломного проєкту в якості типу програмного забезпечення обрано web-додаток через відсутність аналогів на ринку та можливість портативної роботи додатку на смартфонах, планшетах та інших пристроях з можливістю виходу до мережі Інтернет.

На основі порівняння існуючих онлайн-додатків для розрахунку усталених режимів роботи електричних мереж було встановлено, що:

- у деяких додатків відсутній графічний інтерфейс, який дозволяє працювати у більш інтуїтивному режимі;
- функціонал додатків не достатньо широкий, що не дає змогу конкурувати з десктоп рішеннями;
- результати розрахунку відображають досить малу частину усіх можливих параметрів та не дають змогу повністю аналізувати режим.

В результаті аналізу розрахункових можливостей програмних комплексів для ПК, були сформовані основні вимоги для розробки нового web-додатку.

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

2.1. Особливості розрахунку усталених режимів роботи електричних мереж

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 меншу кількість незалежних контурів від кількості вузлів схеми, що забезпечує для методів контурної моделі меншу розмірність системи рівнянь усталеного режиму, ніж для методів вузлової моделі. Однак, більшість електричних мереж експлуатують за нормально розімкненими схемами, що призводить до неможливості застосування для визначення параметрів усталених режимів роботи таких мереж методів контурної моделі. Крім того, для методів контурної моделі великою складністю є завдання автоматичного визначення топології (побудови контурної матриць інцидентів), яке для методів вузлової моделі вирішується значно простіше. Зазначені обставини призвели до того, що сучасні програмні комплекси визначення параметрів усталених режимів електричних мереж застосовують як правило методи вузлової моделі, зокрема – метод Ньютона [9,10].

Розв'язання задачі визначення параметрів усталених режимів роботи електричних мереж значно ускладнюється під час розрахунку цих параметрів для обтяжених чи після-аварійних режимів, для яких напруги вузлів електричної мережі наближаються до критичних значень [11]. В таких ситуаціях отримання результату пов'язане з необхідністю виконання надзвичайно великої кількості ітерацій, а для максимально обтяжених режимів отримання результату взагалі може виявитися неможливим. Це може негативно вплинути на можливість розв'язання задачі з оцінки стану електричної мережі і правильність вибору

заходів, що спрямовані на нормалізацію параметрів такого режиму. З цієї причини визначення методів розрахунку, які здатні забезпечити розв'язання задачі визначення параметрів усталеного режиму роботи для граничних режимів роботи, є досить актуальною проблемою.

2.2. Опис методів для розрахунку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь вузлової моделі усталених режимів роботи електричних мереж

Вирішення поставленого у роботі завдання ґрунтується на комп'ютерному математичному моделюванні та методах вузлової моделі розрахунку параметрів усталених режимів електричних мереж.

Рівняння системи вузлової розрахункової моделі ґрунтуються на I-му законі Кірхгофа і в загальному вигляді можуть бути подані так:

$$\dot{U}_i \cdot y_{i,i} + \sum_{j, j \neq i} \dot{U}_j \cdot y_{i,j} = \frac{\dot{S}_i}{\bar{U}_i}; \quad (2.1)$$

де всі позначення наведені в [12].

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.

Рекурентний вираз методу Зейделя можна подати наступним чином:

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

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.

Іншим підходом до розв'язання рівнянь системи вузлової моделі є застосування метода Ньютона, який ґрунтується на розвиненні неперервної цільової вектор-функції W у ряд Тейлора з обмеженням лінійними складовими розвинення [12]:

$$W(U^{(k+1)}) = W(U^{(k)} + \Delta U^{(k)}) \approx W(U^{(k)}) + \left[\frac{\partial W(U^{(k)})}{\partial U} \right]; \quad (2.3)$$

Застосування методу Ньютона, як правило, потребує виконання до декількох десятків ітерацій для отримання результатів розрахунку параметрів усталеного режиму роботи електричної мережі, але алгоритм ітерації (в порівнянні з методом Зейделя) суттєво ускладнюється через необхідність обчислення та обернення на кожній ітерації розрахунку матриці перших частинних похідних (якобіана) вектор-функції W . З метою спрощення процедури розрахунку можуть бути застосовані модифікації метода Ньютона – метод Ньютона без перерахунку або з періодичним перерахунком Якобіану та метод січних, під час реалізації якого похідну від вектор-функції $W'(U^{(k)})$ визначають числовими методами:

$$W'(U^{(k)}) = \frac{W(U^{(k)}) - W(U^{(k-1)})}{U^{(k)} - U^{(k-1)}}; \quad (2.4)$$

Застосування числових методів полегшує організацію процесу розрахунку та надає можливість визначити наближене значення похідної, коли розрахунок цього значення іншими методами є значно ускладненим або взагалі неможливим.

Такий підхід значно полегшує підхід до організації розрахунку, а також дозволяє використовувати такий підхід тоді, коли знаходження похідних ускладнено, або взяти похідну взагалі неможливо.

2.3. Результати дослідження математичних методів

Дослідження в рамках магістерської дисертації було проведено на основі чотирьох варіацій 14-вузлової схеми IEEE (рис. 2.1), параметри якої наведено в [13], 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. 2.2 – 2.5.

Аналіз графіків рис. 2.2 – 2.5 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 коефіцієнта обтяження, натомість для методу січної у випадку розрахунку параметрів усталених режимів розімкнених мереж це значення є суттєво меншим. Слід зазначити, що граничний коефіцієнт обтяження за методом Зейделя та Ньютона відповідає межі статичної стійкості мережі за напругою.

Крім того, кількість ітерацій, необхідних для досягнення розв'язку системи вузлових рівнянь для розглянутих методів розрахунку при максимальних обтяженнях режимів розглянутих електричних мереж для розглянутих методів може відрізнятися на порядки.

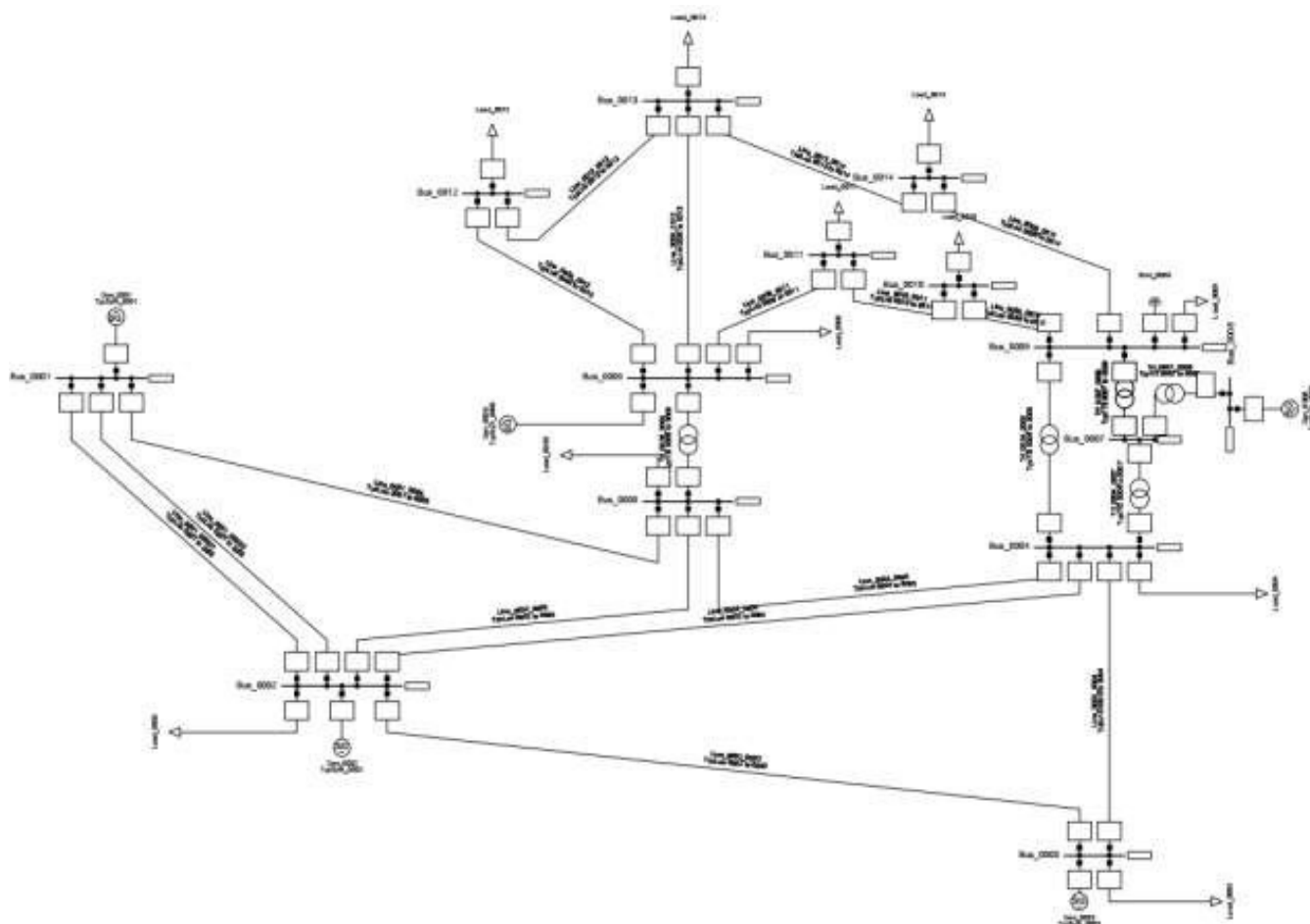


Рисунок 2.1 – Тестова схема електричної мережі IEEE-14

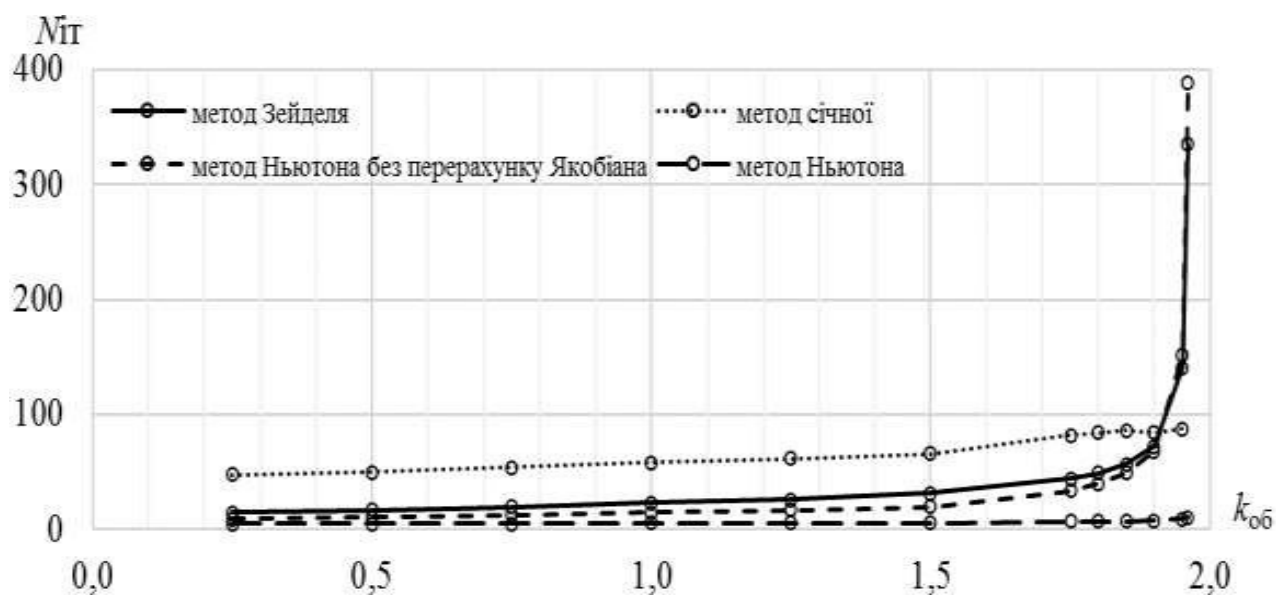


Рисунок 2.2 – Графіки залежності кількості ітерацій від значення коефіцієнту обтяження для Схеми 1 для різних методів розрахунку

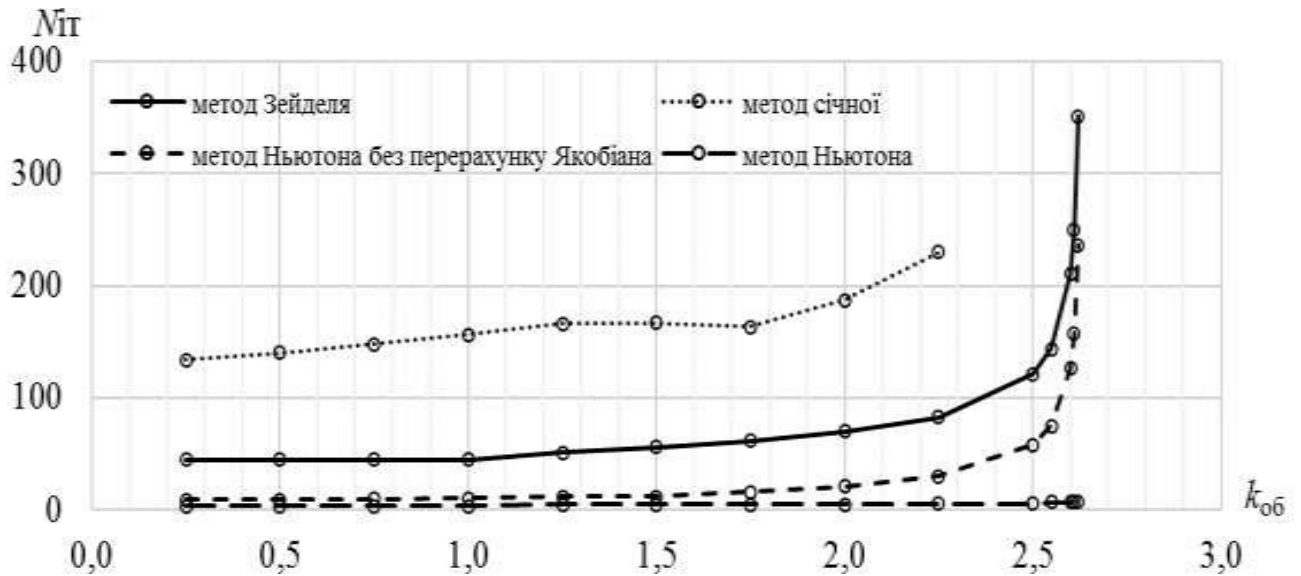


Рисунок 2.3 – Графіки залежності кількості ітерацій від значення коефіцієнту обтяження для Схеми 2 для різних методів розрахунку

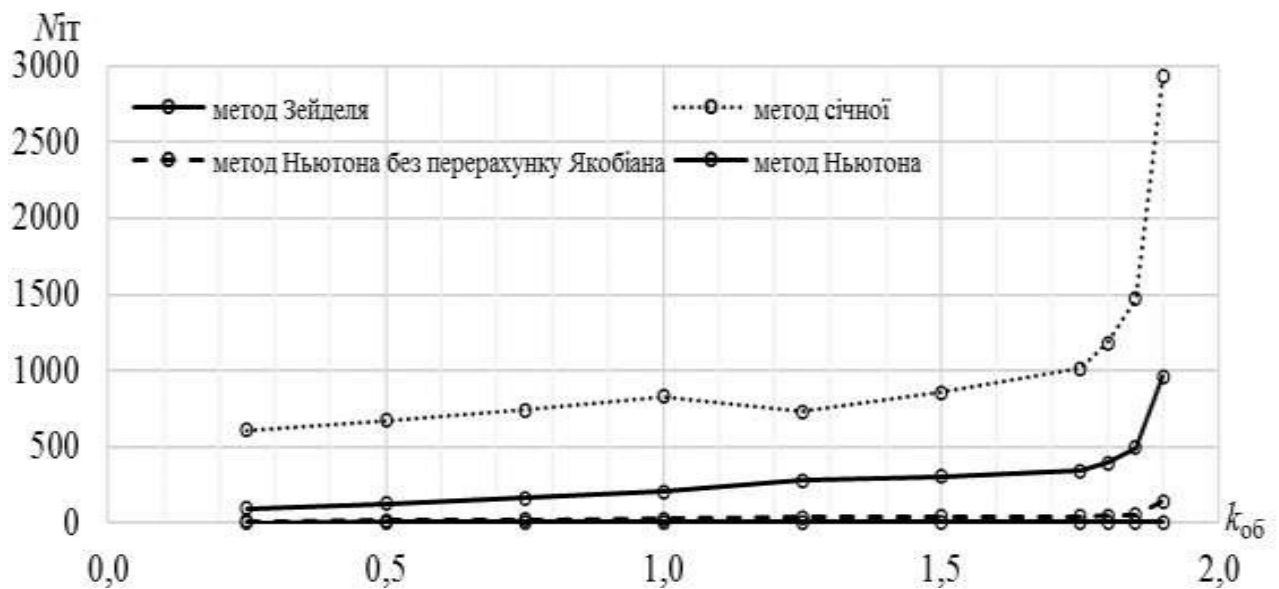


Рисунок 2.4 – Графіки залежності кількості ітерацій від значення коефіцієнту обтяження для Схеми 3 для різних методів розрахунку

У випадку розрахунку режимних параметрів електричних мереж, які містять тисячі вузлів це призведе до значних часових затримок в отриманні результату.

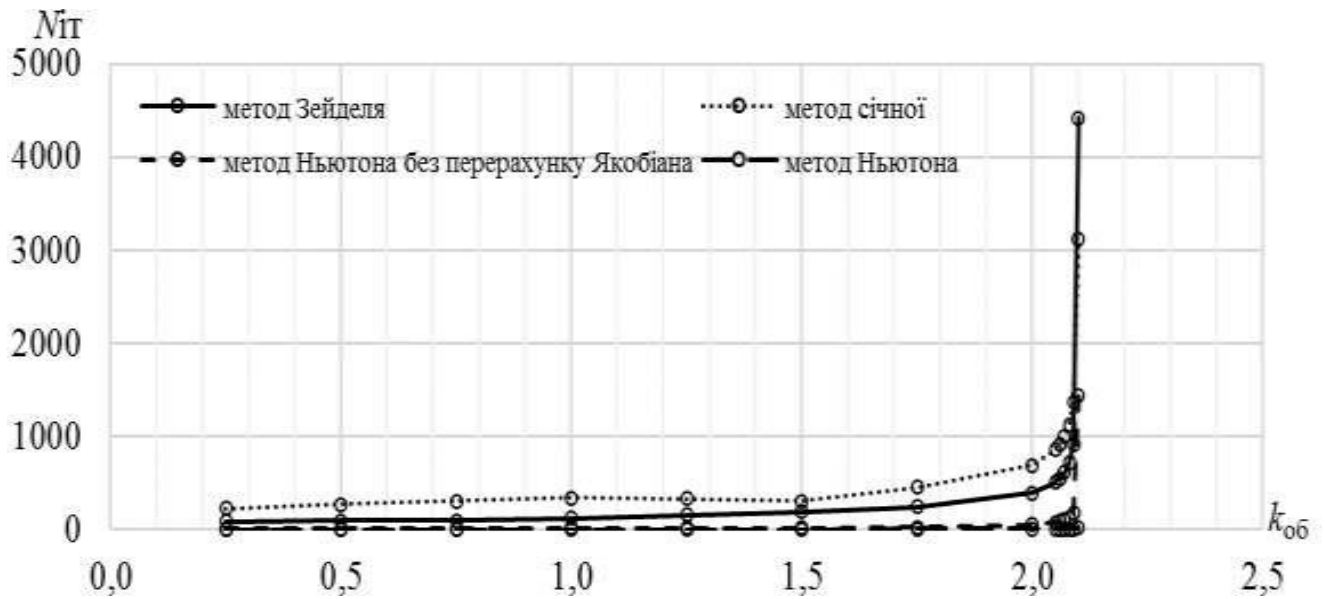


Рисунок 2.5 – Графіки залежності кількості ітерацій від значення коефіцієнту обтяження для Схеми 4 для різних методів розрахунку

Порівняння графіків рис. 2.2 – 2.5 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 навіть тисяч.

Висновки до розділу 2

В результаті аналізу визначено, що з точки погляду 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. Усі з названих методів мають однаковий результат за критерієм граничного значення коефіцієнту обтяження режиму роботи.

Встановлено, що методи Зейделя та Ньютона забезпечують можливість отримання результатів розрахунку параметрів усталеного режиму в діапазоні, обумовленому межею статичної стійкості електричної мережі.

При наближенні до межі збіжності ітераційного процесу кількість ітерацій, які необхідні для визначення параметрів усталених режимів роботи електричних мереж, значно зростає для всіх розглянутих вище методів, окрім метода Ньютона. Це може призвести до великих втрат часу при отриманні результаті розрахунку у випадку роботи з мережами, які містять велику кількість вузлів.

3 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 додатку

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. Проводить валідацію даних та обробку помилок при збереженні параметрів або під час розрахунку.

5. Реалізує функціонал для розрахунку схеми методом Ньютона.

Як було описано вище web-додаток реалізовано у вигляді MVC шаблону. Серверна частина у цій зв'язці виконує роль Моделі (М) та Контроллера (С). 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 [14], 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 [15]. Він реалізує шаблон Front Controller [16], 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.

DTO – інтерфейс для отримання даних з клієнтської частини. Містить дані, які відображаються при заповненні елемента чи схеми.

ORM – Object-Relational Mapping (укр. Об'єктно-реляційна проєкція) – це технологія програмування, яка дозволяє перетворювати несумісні типи моделей в ООП, зокрема, між сховищем даних і об'єктами програмування.

JPA (Java Persistence API) – це специфікація Java EE і Java SE, що описує систему управління збереженням Java-об'єктів в таблиці реляційних баз даних в зручному вигляді.

Model – інтерфейс для отримання даних з бази даних. Наявні усі поля, які зберігаються в базі даних.

3.3. Структура бази даних

Для розробки додатку з урахуванням усіх поставлених вимог, що були наведені в пункті 1 цієї дисертації, було розроблено схему реляційної бази даних. Таблиці бази даних, зв'язки між ними, зовнішні і первинні ключі та типи полів зображено у вигляді ER-діаграми (рис. 3.2). Усі таблиці нормалізовані у першу, другу та третю нормальні форми [17].

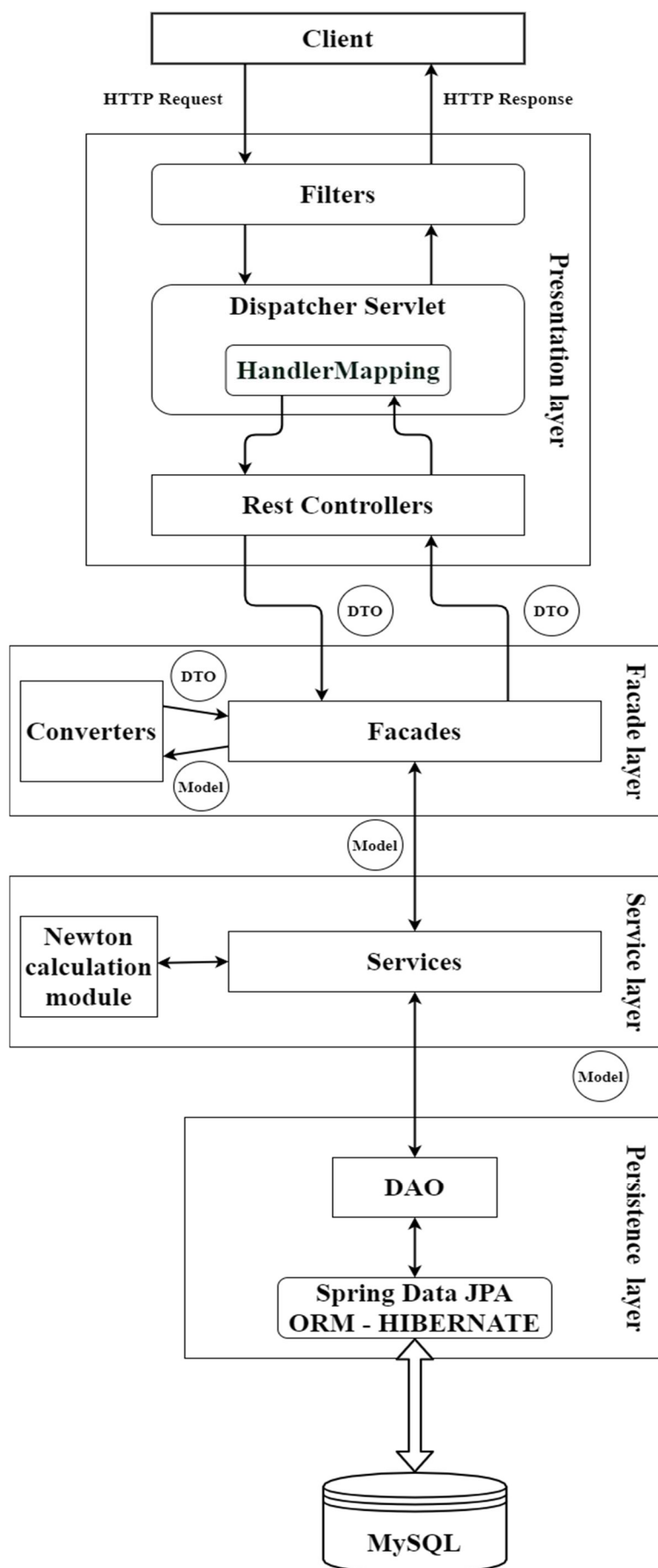


Рисунок 3.1 – Структура серверної частини web-додатка

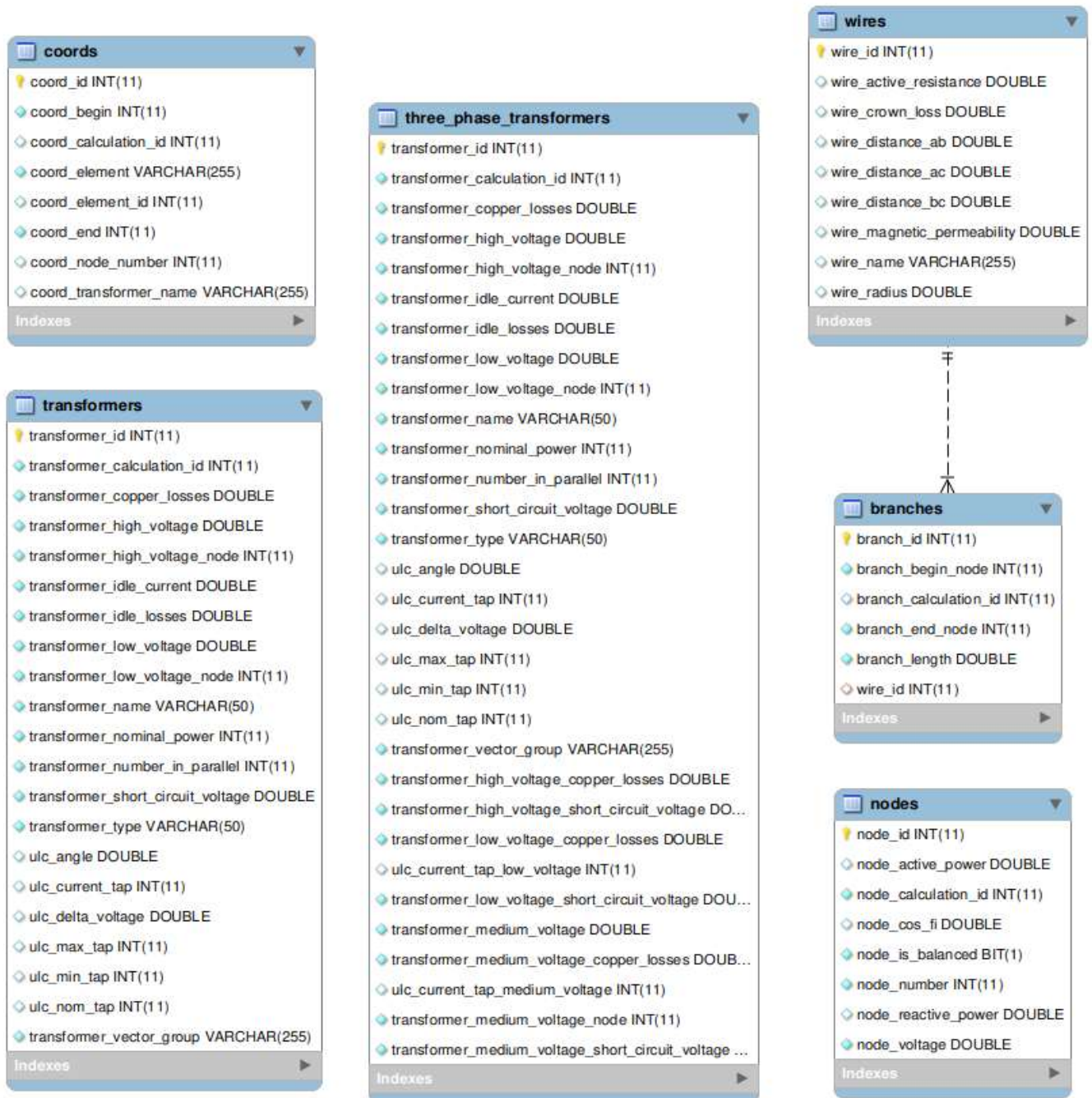


Рисунок 3.2 – Структура бази даних

Нижче наведено детальний опис кожної сутності розробленої ER-діаграми з описом їх призначення та атрибутів.

Координата (табл. coords) – точка на площині, де 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 вузлів:

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. Балансуючий вузол (is_balanced).
8. Cosφ (cos_fi).

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

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 АВ (distance_ab).
8. Відстань між фазами ВС (distance_bc).

9. Відстань між фазами АС (distance_ac).

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

3.4. Приклад реалізації алгоритму метода Ньютона у web-додатку

На основі аналізу різних ітераційних методів, було прийняте рішення реалізації методу Ньютона для розрахунку параметрів ustalених режимів роботи електричних мереж.

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 унеможливорює формування матриці Якобі, що являє собою матрицю перших похідних і має вигляд 3.20. Для того щоб вирішити цю проблему систему з n рівняннями розділяють окрема на дійсну уявну частину і отримують $2n$ рівнянь.

$$\dot{U}_i \underline{y}_{i,i} + \sum_{i \in j} \dot{U}_j \underline{y}_{i,j} = \frac{S_i}{\bar{U}_i} \quad (3.1)$$

В загальному випадку рівняння вузлової моделі має вигляд 3.1. А система рівнянь, в матричному вигляді має вигляд 3.2-3.3. Розкладемо цей вираз в ряд Тейлора та виділимо перші два члени цього розвинення 3.4.

$$W(U) = 0 \quad (3.2)$$

$$W(U^{(n)} + \Delta U) = 0 \quad (3.3)$$

$$W(U^{(n)} + \Delta U) \approx W(U^{(n)}) + \left[\frac{\partial W}{\partial U} \right]_{U=U^{(n)}} \Delta U = 0 \quad (3.4)$$

Проаналізуємо отриманий вираз 3.4. Запишемо отриманий вираз та помітимо що ми маємо систему рівнянь 3.5, вирішим цю систему в матричній формі відносно ΔU , отримуємо вид рівняння 3.6. Так, в лівій частині миємо

поправку по напрузі, а в правій частині – добуток Якобіана $(\frac{\partial W}{\partial U})$ на матрицю нев’язок $(W(U^{(n)}))$.

$$\left[\frac{\partial W}{\partial U} \right]_{U=U^{(n)}} \Delta U = -W(U^{(n)}) \quad (3.5)$$

$$\Delta U = - \left[\frac{\partial W}{\partial U} \right]_{U=U^{(n)}}^{-1} W(U^{(n)}) \quad (3.6)$$

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 3.7.

$$U^{(n)} = U^{(n-1)} + \Delta U \quad (3.7)$$

Розглянемо основну ідею метода Ньютона, для наочності будемо розглядати систему у двомірному просторі (Рис. 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.

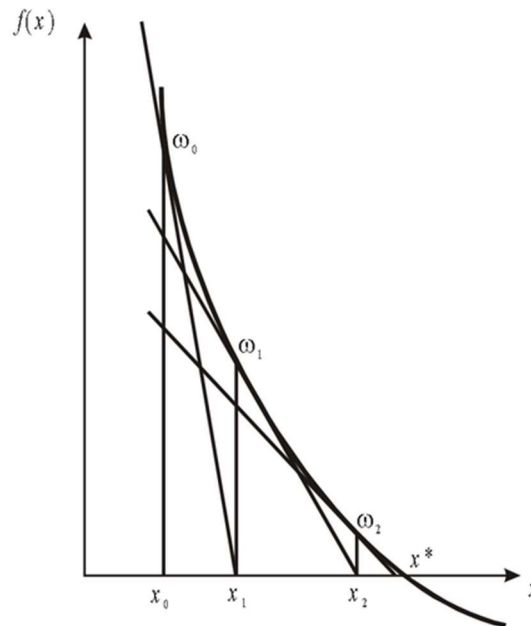


Рисунок 3.3 – Геометрична інтерпретація методу Ньютона

Сформуємо загальний вигляд цільової функції має вигляд 3.8. В якому розрахунковий струм (\dot{I}_{0i}) розраховується за формулою 3.9. Через те, що диференціювання комплексної функції в загальному вигляді неможливе розкладемо систему окремо на дійсну та уявну частини, відповідно записаних у вигляді 3.10–3.11. Відповідно необхідно перезаписати розрахунковий струм, через активну і реактивну складову відповідно 3.12–3.13.

$$\omega_i = \dot{U}_i \underline{y}_{i,i} + \hat{U}_i \dot{I}_{0i} - \dot{S}_i = 0 \quad (3.8)$$

$$\dot{I}_{0i} = \sum_{i \in j} \dot{U}_j \underline{y}_{i,j} \quad (3.9)$$

$$\omega_{P_i} = g_{i,i} U_i^2 + U_i' I_{0i}' + U_i'' I_{0i}'' - P_i = 0 \quad (3.10)$$

$$\omega_{Q_i} = b_{i,i} U_i^2 + U_i' I_{0i}' - U_i'' I_{0i}'' - Q_i = 0 \quad (3.11)$$

$$I_{0i}' = \sum_{i=j} (g_{i,j} U_j' - b_{i,j} U_j'') \quad (3.12)$$

$$I_{0i}'' = \sum_{i=j} (g_{i,j} U_j'' + b_{i,j} U_j') \quad (3.13)$$

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 3.14–3.19.

$$\dot{U} = U' + jU'' = Ue^{j\delta} = U(\cos \delta + j \sin \delta) \quad (3.14)$$

$$\omega_{P_i} = g_{i,i}U_i^2 + U_i \cos \delta_i I'_{0_i} + U_i \sin \delta_i I''_{0_i} - P_i = 0 \quad (3.15)$$

$$\omega_{Q_i} = b_{i,i}U_i^2 + U_i \cos \delta_i I'_{0_i} - U_i \sin \delta_i I''_{0_i} - Q_i = 0 \quad (3.16)$$

$$\omega_{P_i} = g_{i,i}U_i^2 + U_i \sum_{j=i} U_j (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}) - P_i = 0 \quad (3.17)$$

$$\omega_{Q_i} = b_{i,i}U_i^2 + U_i \sum_{j=i} U_j (g_{i,j} \sin \delta_{i,j} - b_{i,j} \cos \delta_{i,j}) - Q_i = 0 \quad (3.18)$$

$$\delta_{i,j} = \delta_i - \delta_j \quad (3.19)$$

Структура матриці перших похідних має вигляд 1.20. 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 3.21–3.28. Окремо похідні розділяють на діагональні 3.21–3.24 і недиагональні 3.25–3.28. Пара діагональної і недиагональної похідної формує окрему чверть Якобіану.

$$\partial W = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_P}{\partial U} & \frac{\partial \omega_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \omega_Q}{\partial U} & \frac{\partial \omega_Q}{\partial \delta} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial \omega_{P_i}}{\partial U_i} = 2g_{i,i}U_i + \sum_{j=i} U_j (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}) \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \omega_{Q_i}}{\partial U_i} = 2b_{i,i}U_i + \sum_{j=i} U_j (-g_{i,j} \sin \delta_{i,j} + b_{i,j} \cos \delta_{i,j}) \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial \omega_{P_i}}{\partial \delta_i} = U_i \sum_{j=i} U_j (-g_{i,j} \sin \delta_{i,j} + b_{i,j} \cos \delta_{i,j}) \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \omega_{Q_i}}{\partial \delta_i} = -U_i \sum_{j=i} U_j (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial \omega_{P_i}}{\partial U_j} = U_i (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial \omega_{Q_i}}{\partial U_j} = -U_i(g_{i,j} \sin \delta_{i,j} + b_{i,j} \cos \delta_{i,j}) \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial \omega_{P_i}}{\partial \delta_j} = -U_i U_j (g_{i,j} \sin \delta_{i,j} + b_{i,j} \cos \delta_{i,j}) \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial \omega_{Q_i}}{\partial \delta_j} = U_i U_j (g_{i,j} \cos \delta_{i,j} + b_{i,j} \sin \delta_{i,j}) \quad (3.28)$$

Алгоритм методу Ньютона:

1. Умовно вважають, що напруги всіх вузлів схеми дорівнюють номінальній напрузі електричної системи.

$$\dot{U}_i = U_H \quad (3.29)$$

2. Розраховують зведену потужність, тобто навантаження від провідності вузла (Лістинг 3.2).

3. Ініціалізація розрахункових струмів (Лістинг 3.7).

4. Ініціалізація матриці нев'язок (Лістинг 3.7).

5. Перевіряють умови збіжності ітераційного процесу. Якщо максимальна за модулем нев'язка потужності не перевищує інженерної точності

$$\max\{|\omega_i(U^{(n)})|\} \leq \varepsilon \quad (3.30)$$

то це свідчить про досягнення мети ітераційного розрахунку і виконання алгоритму зупиняють. В іншому разі переходять до пункту 3 алгоритму (Лістинг 3.3).

6. Ініціалізація елементів матриці Якобі. Визначають елементи матриці Якобі за поточних наближень невідомих напруг (Лістинг 3.4).

7. Знаходження зворотної матриці Якобі, розв'язок системи рівнянь. Розв'язують систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Розраховують нові наближення невідомих напруг. Далі переходимо до пункту 2 алгоритму для реалізації нового ітераційного процесу (Лістинг 3.6).

8. Визначення нових значень вектора напруг (Лістинг 3.7).

Класичний метод Ньютона відноситься до групи методів вузлової моделі, що дає ряд переваг перед методами, що базується на контурній моделі. Основною перевагою є те, що не потрібно прив'язуватися до топографії схеми, що дозволяє найбільш ефективно та просто організовувати 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.

```
public ProcessingResult calculateRegime(List<NodeDTO> nodes, List<BranchDTO> branches,
List<TransformerDTO> transformers, List<ThreePhaseTransformerDTO> threePhaseTransformers, Integer
maxIterations, Double accuracy)
{
    int calculatedNodesSize = nodesCount - 2;
    transformerInitialization(threePhaseTransformers, transformers,
transformerInitParameters,
nodesCount, nodesCountWithoutTransformers);
inputParametersCalculator.setTransformerInitParameters(transformerInitParameters);

    IntStream.range(0, nodesCount - 1).forEach(i -> voltage[i] = nodesArr[i].getVoltage());

    initInputParameters(branches, activeResistance, length, radius, distanceByWiresAB,
distanceByWiresBC,
distanceByWiresAC, crownLosses);
}
```

Лістинг 3.1 – Ініціалізація розрахункових параметрів


```

private void powerInitialization(int nodesCount, Complex[][] conductivity, double[] voltage,
                                double[] activePower, double[] reactivePower,
                                double[] transformerActiveConductivity,
                                double[] transformerReactiveConductivity) {
    final int lastNode = nodesCount - 1;
    this.outputActivePower = new double[lastNode];
    this.outputReactivePower = new double[lastNode];
    final Complex[] fullPower = new Complex[lastNode];
    final Complex[] nodeConductivity = new Complex[nodesCount];

    for (int i = 0; i < lastNode; i++) {
        nodeConductivity[i] = new Complex(0, 0);

        for (int j = 0; j < nodesCount; j++) {
            if (conductivity[i + 1][j].abs() > 0) {
                Complex intermediateResult = conductivity[i + 1][j].multiply(0.5);
                Complex transformerConductivity =
                    new Complex(transformerActiveConductivity[i + 1],
                                transformerReactiveConductivity[i + 1]);

                nodeConductivity[i] =
                    intermediateResult.add(nodeConductivity[i]).add(transformerConductivity);
            }
        }
    }

    for (int i = 0; i < lastNode; i++) {
        fullPower[i] = new Complex(activePower[i], reactivePower[i]);
    }

    for (int i = 0; i < lastNode; i++) {
        Complex intermediateResult = nodeConductivity[i]
            .multiply(Math.pow(voltage[i], 2));

        fullPower[i] = intermediateResult.add(fullPower[i]);
        outputActivePower[i] = fullPower[i].getReal();
        outputReactivePower[i] = fullPower[i].getImaginary();
    }
}

```

Лістинг 3.2 – Розрахунок зведеної потужності

```

newtonCalculation(nodesCount,calculatedActiveConductivity,
                  calculatedReactiveConductivity, conductivity,
                  matrixW, voltage, activePower,
                  reactivePower, balancedNodeVoltage,
                  transformerInitParameters);

double maxW = Arrays.stream(matrixW)
    .map(Math::abs)
    .max()
    .orElseThrow(() -> new IllegalArgumentException("Matrix W is invalid"));

while (maxW > accuracy) {
    newtonCalculation(nodesCount,calculatedActiveConductivity,
                      calculatedReactiveConductivity, conductivity,
                      matrixW, voltage, activePower,
                      reactivePower, balancedNodeVoltage,
                      transformerInitParameters);

    double maxW = Arrays.stream(matrixW)
        .map(Math::abs)
        .max()
        .orElseThrow(() -> new IllegalArgumentException("Matrix W is invalid"));
}

```

Лістинг 3.3 – Перевірка збіжності розрахунку

```

private double[][] initializingJacobMatrix(int nodesCount,
                                          double[][] calculatedActiveConductivity,
                                          double[][] calculatedReactiveConductivity,
                                          double[][] deltaDifference, double[] voltage,
                                          double[][] absTransformationCoefficient,
                                          double[][] argumentTransformationCoefficient) {
    int privateDerivativesSize = 2 * nodesCount - 2;
    final double[][] privateDerivatives =
        new double[privateDerivativesSize][privateDerivativesSize];

    for (int i = 0, last = nodesCount - 1; i < last; i++) {
        for (int j = 0; j < last; j++) {
            if (i == j) {
                privateDerivatives[i][i] = 2 * calculatedActiveConductivity[i + 1][i + 1]
                    * voltage[i] + calculatedActiveCurrent[i];
                privateDerivatives[last + i][last + i] = -voltage[i]
                    * calculatedActiveCurrent[i];
                privateDerivatives[last + i][i] =
                    2 * calculatedReactiveConductivity[i + 1][i + 1]
                    * voltage[i] + calculatedReactiveCurrent[i];
                privateDerivatives[i][last + i] = voltage[i]
                    * calculatedReactiveCurrent[i];
            } else {
                privateDerivatives[i][j] = voltage[i]
                    * absTransformationCoefficient[j + 1][i + 1]
                    * (calculatedActiveConductivity[i + 1][j + 1]
                    * Math.cos(deltaDifference[i][j])
                    + argumentTransformationCoefficient[i + 1][j + 1])
                    + calculatedReactiveConductivity[i + 1][j + 1]
                    * Math.sin(deltaDifference[i][j])
                    + argumentTransformationCoefficient[i + 1][j + 1]));
                privateDerivatives[last + i][last + j] = voltage[j]
                    * privateDerivatives[i][j];
                privateDerivatives[last + i][j] = voltage[i]
                    * absTransformationCoefficient[j + 1][i + 1]
                    * (calculatedReactiveConductivity[i + 1][j + 1]
                    * Math.cos(deltaDifference[i][j])
                    + argumentTransformationCoefficient[i + 1][j + 1])
                    - calculatedActiveConductivity[i + 1][j + 1]
                    * Math.sin(deltaDifference[i][j])
                    + argumentTransformationCoefficient[i + 1][j + 1]));
                privateDerivatives[i][last + j] = -voltage[j]
                    * privateDerivatives[last + i][j];
            }
        }
    }

    return privateDerivatives;
}

```

Лістинг 3.4 – Ініціалізація елементів Матриці Якобі.

```

private double[] multiplyingMatrixAW(int nodesCount, double[][] matrixA, double[] matrixW) {
    int calculatedNodesSize = nodesCount - 2;
    final double[] matrixResult = new double[calculatedNodesSize];

    for (int i = 0; i < calculatedNodesSize; i++) {
        for (int j = 0; j < calculatedNodesSize; j++) {
            matrixResult[i] += matrixA[i][j] * matrixW[j];
        }
    }

    return matrixResult;
}

```

Лістинг 3.5 – Визначення нових наближень вектора напруг.

```

private double[][] angleDifference(int nodesCount, double[][] calculatedActiveConductivity,
                                   double[][] calculatedReactiveConductivity,
                                   double[] voltage,
                                   double[] calculatedActiveCurrent,
                                   double[] calculatedReactiveCurrent,
                                   double[] matrixW, double balancedNodeVoltage,
                                   double[][] absTransformationCoefficient,
                                   double[][] argumentTransformationCoefficient) {
    double[][] deltaDifference = new double[nodesCount][nodesCount];

    for (int i = 0; i < nodesCount; i++) {
        for (int j = 0; j < nodesCount; j++) {
            deltaDifference[i][j] = voltage[nodesCount + i] - voltage[nodesCount + j];
        }
    }

    for (int i = 0; i < nodesCount; i++) {
        calculatedActiveCurrent[i] = balancedNodeVoltage
            * absTransformationCoefficient[i + 1][0]
            * (calculatedActiveConductivity[i + 1][0]
            * Math.cos(voltage[nodesCount + i]
            + argumentTransformationCoefficient[i + 1][0])
            + calculatedReactiveConductivity[i + 1][0]
            * Math.sin(voltage[nodesCount + i]
            + argumentTransformationCoefficient[i + 1][0]));

        calculatedReactiveCurrent[i] = balancedNodeVoltage
            * absTransformationCoefficient[i + 1][0]
            * (calculatedReactiveConductivity[i + 1][0]
            * Math.cos(voltage[nodesCount + i]
            + argumentTransformationCoefficient[i + 1][0])
            - calculatedActiveConductivity[i + 1][0]
            * Math.sin(voltage[nodesCount + i]
            + argumentTransformationCoefficient[i + 1][0]));
    }

    for (int i = 0; i < nodesCount; i++) {
        for (int j = 0; j < nodesCount; j++) {
            if (i != j) {
                calculatedActiveCurrent[i] += voltage[j]
                    * absTransformationCoefficient[j + 1][i + 1]
                    * (calculatedActiveConductivity[i + 1][j + 1]
                    * Math.cos(deltaDifference[i][j]
                    + argumentTransformationCoefficient[i + 1][j + 1])
                    + calculatedReactiveConductivity[i + 1][j + 1]
                    * Math.sin(deltaDifference[i][j]
                    + argumentTransformationCoefficient[i + 1][j + 1]));

                calculatedReactiveCurrent[i] += voltage[j]
                    * absTransformationCoefficient[j + 1][i + 1]
                    * (calculatedReactiveConductivity[i + 1][j + 1]
                    * Math.cos(deltaDifference[i][j]
                    + argumentTransformationCoefficient[i + 1][j + 1])
                    - calculatedActiveConductivity[i + 1][j + 1]
                    * Math.sin(deltaDifference[i][j]
                    + argumentTransformationCoefficient[i + 1][j + 1]));
            }
        }
    }

    for (int i = 0; i < nodesCount; i++) {
        matrixW[i] = -(calculatedActiveConductivity[i + 1][i + 1]
            * Math.pow(voltage[i], 2) + voltage[i] * calculatedActiveCurrent[i]
            - outputActivePower[i]);

        matrixW[nodesCount + i] = -(calculatedReactiveConductivity[i + 1][i + 1]
            * Math.pow(voltage[i], 2) + voltage[i] * calculatedReactiveCurrent[i]
            - outputReactivePower[i]);
    }

    return deltaDifference;
}

```

Лістинг 3.6 – Ініціалізація розрахункових струмів та матриці нев'язок

```

private double[][] doubleFactorization(int nodesCount, double[][] privateDerivatives) {
    int calculatedNodesCount = nodesCount - 2;
    recalculatingDWMatrix(nodesCount, privateDerivatives);
    double[][] diagonalMatrixA = createDiagonalMatrix(calculatedNodesCount);

    System.arraycopy(privateDerivatives[0], 1, diagonalMatrixA[0], 1,
        calculatedNodesCount - 1);

    for (int k = 1; k < calculatedNodesCount; k++) {
        double[][] diagonalMatrixB = createDiagonalMatrix(calculatedNodesCount);

        System.arraycopy(privateDerivatives[k], k + 1, diagonalMatrixB[k], k + 1,
            calculatedNodesCount - k - 1);

        double[][] result = matrixMultiplyingAB(calculatedNodesCount, diagonalMatrixA,
            diagonalMatrixB);

        for (int i = 0; i < calculatedNodesCount; i++) {
            System.arraycopy(result[i], 0, diagonalMatrixA[i], 0, calculatedNodesCount);
        }
    }

    for (int k = calculatedNodesCount - 1; k >= 0; k--) {
        double[][] diagonalMatrixB = createDiagonalMatrix(calculatedNodesCount);

        for (int i = k; i < calculatedNodesCount; i++) {
            diagonalMatrixB[i][k] = privateDerivatives[i][k];
        }

        double[][] result = matrixMultiplyingAB(calculatedNodesCount, diagonalMatrixA,
            diagonalMatrixB);

        for (int i = 0; i < calculatedNodesCount; i++) {
            System.arraycopy(result[i], 0, diagonalMatrixA[i], 0, calculatedNodesCount);
        }
    }

    return diagonalMatrixA;
}

```

Лістинг 3.7 – Розрахунок зворотної матриці Якобі методом подвійної факторизації.

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) web-додаток реалізовано у вигляді MVC шаблону. Серверна частина у цій зв'язці виконує роль Моделі (М) та Контроллера (С). Вона реалізує всю логіку роботи системи, створюючи її Модель, та надає інтерфейс для взаємодії з нею – Контроллер;

2) для збереження даних було обрано реляційну модель, реалізацією якої у web-додатку є MySQL. Для зв'язку бази даних з алгоритмом було обрано фреймворк Spring Data, який дозволяє працювати з таблицями у вигляді об'єктів, що суттєво спрощує цей процес;

3) для розрахунку режимів було обрано алгоритм Ньютона, який є найбільш оптимальним серед інших, у web додатку реалізовано на мові програмування Java. Модуль розрахунку у додатку реалізовано на рівні бізнес-логіки, тобто перед розрахунком об'єкти проходять валідацію, що зменшує кількість помилок, ще до початку розрахунку.

4 СТРУКТУРА КЛІЄНТСЬКОЇ ЧАСТИНИ 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.

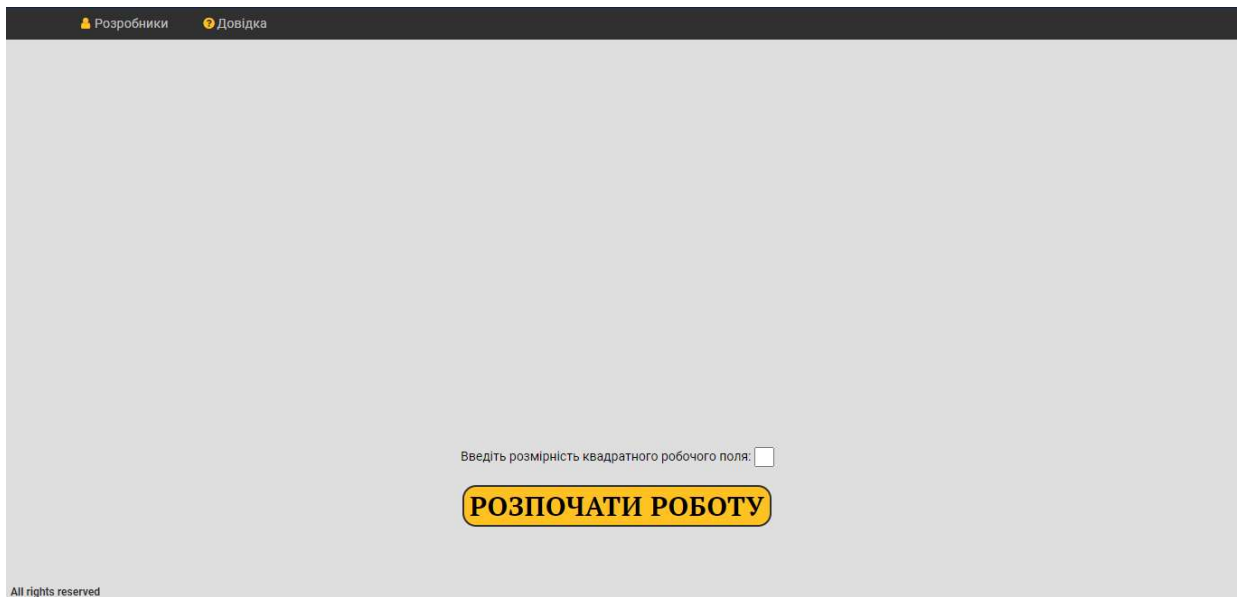


Рисунок 4.1 – Стартова сторінка додатку

Після введення розмірності робочого поля та натискання на кнопку початку роботи програма перенаправить користувача на сторінку робочого поля. Фактично додаток надішле запит на контролер, який і повертає нову сторінку з тою розмірністю поля, яку задав користувач. Її зовнішні вигляд показано на рис. 4.2.

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 браузері 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. При натисканні на будь яку клітинку, користувачу буде відкриватись спеціальне меню з основними класами елементів мереж.

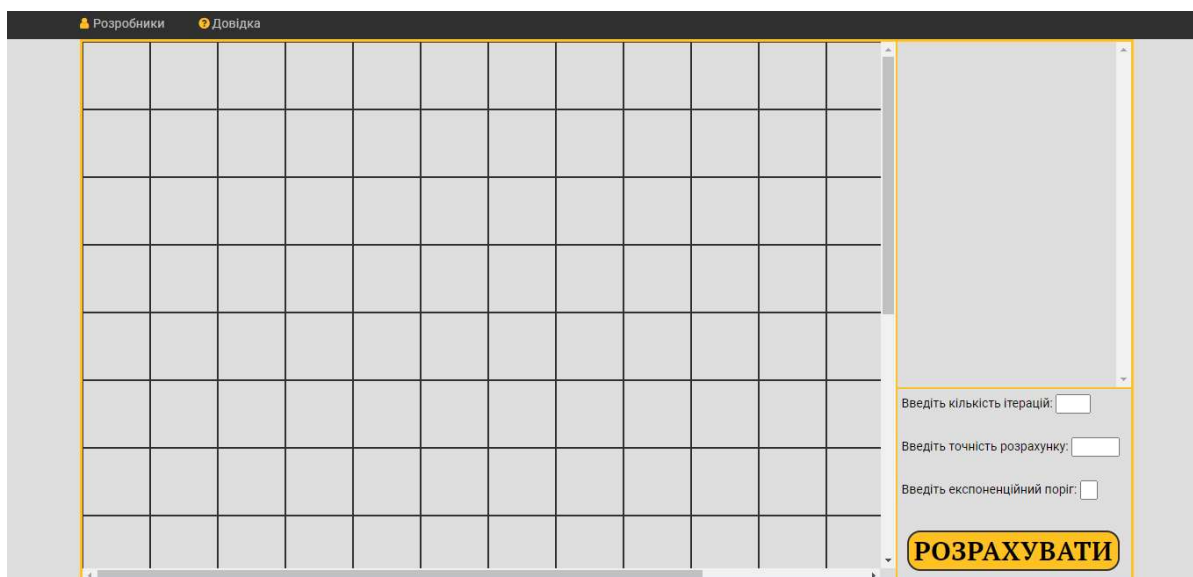


Рисунок 4.2 – Сторінка з робочим полем

Зовнішній вигляд цього меню показано на рис. 4.3. 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.

На рис. 4.4 показано найпростішу мережу яку створили в додатку.

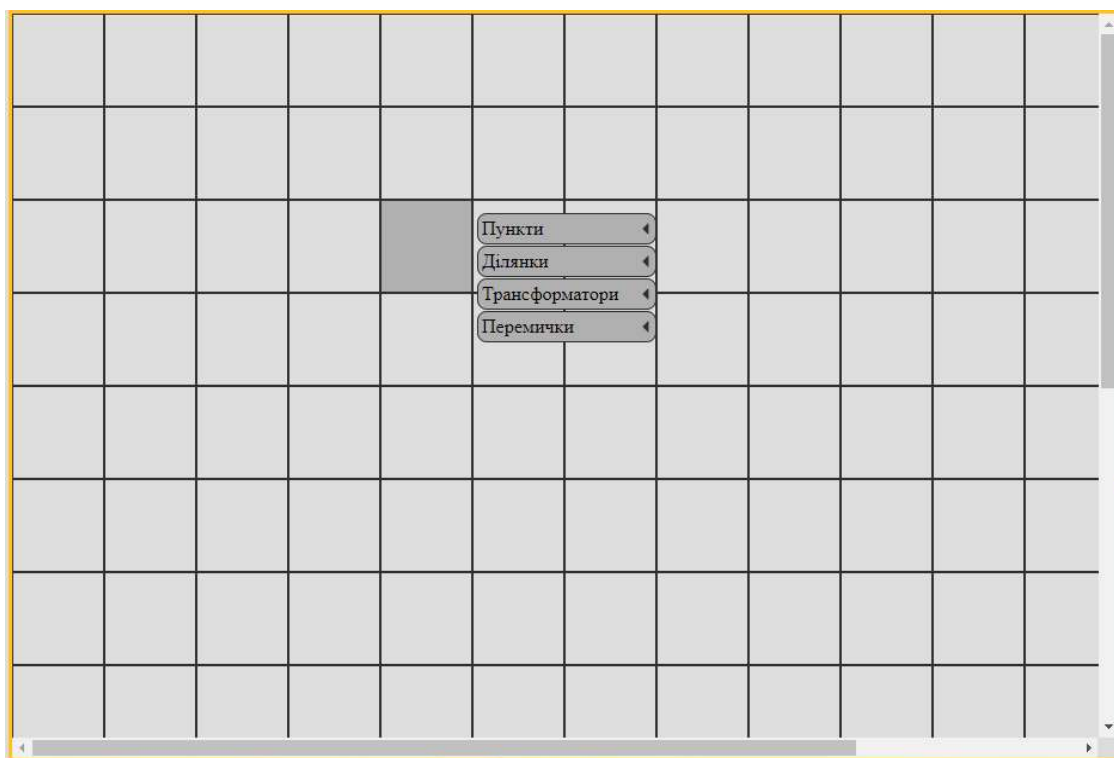


Рисунок 4.3 – Первинне меню елементів

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 рис. 4.5.

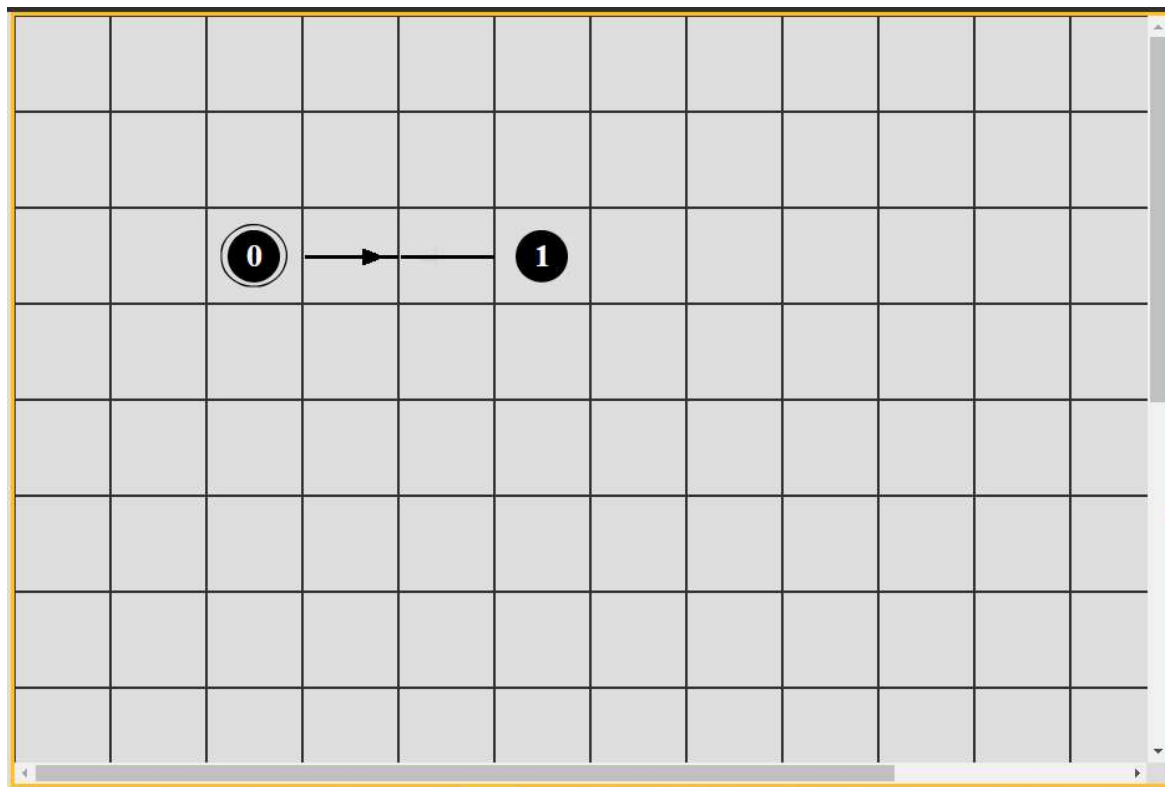


Рисунок 4.4 – Топографія найпростішої схеми

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.

Після створення схеми, режим якої слід розрахувати, користувачу слід заповнити форму параметрів ітераційного розрахунку. Її зовнішній вигляд показаний на рис. 4.6.

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



Рисунок 4.5 – Меню редагування та видалення

 A screenshot of a form with a light gray background and a yellow border. It contains three input fields with labels: 'Введіть кількість ітерацій:' (Enter the number of iterations:), 'Введіть точність розрахунку:' (Enter the calculation accuracy:), and 'Введіть експоненційний поріг:' (Enter the exponential threshold:). Below these fields is a large, yellow, rounded rectangular button with the text 'РОЗРАХУВАТИ' (Calculate) in bold black letters.

Рисунок 4.6 – Форма параметрів ітераційного розрахунку

4.2. Збір вихідних даних та заповнення бази даних

В пункті 1 цього розділу було пропущено процес вводу параметрів елементів в програму. В даному додатку це реалізовано шляхом використання форм. Форма – це елемент який переносить інформацію від користувача до сервера.

Для збору даних використовується технологія Thymeleaf. Вона дозволяє формувати об'єкти ще на рівні користувача. Зазвичай уся інформація з форми (дані, що вводить користувач) перетворюється в одну строку і передається на сервер, де формується об'єкт певного класу (в нашому випадку вузол, ділянка або трансформатор) і заповнюються його поля (параметри). Це вносить складнощі при необхідності передачі великої кількості об'єктів одного класу.

Thymeleaf дозволяє передати вже готовий об'єкт у форматі DTO (Data Transfer Object), який є одним із шаблонів проектування, та використовують для передачі даних між підсистемами програми. Уся інформація передається на відповідний контролер `RegimeCalculationController`, що викликає спеціальний метод сервісу `createNode()`, `createBranch()` або `createTransformer()`, що перетворює об'єкт формату DTO в Entity-об'єкт для якого забезпечується ORM (Object Relational Mapping). Класи Entity задаються анотацією `@Entity` або перелічуються у XML дескрипторі. Такий формат може бути збережений в базу даних.

При ініціалізації робочого поля кожному конкретному розрахунку присвоюється власний `calculationId` – індекс, який показує приналежність параметрів елементів до конкретного процесу розрахунку. Таким чином, при ініціалізації розрахунку метод `getAllByCalculationId()` дістає з бази даних параметри лише тих елементів, які були внесені туди в межах діючого розрахунку, ігноруючи всі елементи попередніх розрахунків. `CalculationId` присвоюється всім елементам внесеним в базу даних між ініціалізацією робочого поля і ініціалізацією власне розрахунку на сервері. Метод `calculate()` відправляє усю інформацію з бази даних на сервіс `RegimeCalculationService`, який розбиває її на окремі списки по кожному з класів.

На рис. 4.7 – 4.11 показані форми для кожного класу елементів додатку.

Слід зазначити, що використання Thymeleaf вносить обмеження на використання плагінів перевірки форм. Ця технологія конфліктує зі звичайною JavaScript технологією, оскільки створює динамічні об'єкти, до яких JavaScript не може прив'язатись. Ці обмеження були усунені шляхом заборони вводу в поля тих символів, які можуть спричинити конфлікт в алгоритмі і перенесенням валідації з сторони користувача на сервер. Таким чином в більшість форм користувач може ввести лише цифри від 0 до 9, знак мінус «-» і крапку «.»

Для балансуючого пункту вводиться лише дві характеристики: його напруга та порядковий номер. Слід зауважити, що для коректної роботи додатку було обмежено числа які можна записувати в поле номера БП. Користувач може ввести туди лише 0, в іншому випадку з'явиться повідомлення про помилку.

Рисунок 4.7 – Форма вводу параметрів БП

Для пунктів існує можливість задання реактивної потужності споживання (генерації) двома шляхами – власне ввівши задану величину в необхідне поле, або ж обрати спосіб задання через $\cos \varphi$.

Рисунок 4.8 – Форма вводу параметрів пункту з навантаженням

Окрім знайомих всім погонних параметрів ЛЕП, а також можливості вибору типу провідника з довідника, важливими параметрами є номери пунктів початку та кінця ділянки. Це визначає напрямок потоку потужності по ділянці і

є важливою складовою в правильному виводі результатів розрахунку. Крім того нумерацію ділянки треба проводити від меншого числа до більшого, незалежно від реального напрямку у форматі (x – початок, y – кінець, де $x < y$).

Для трансформаторів важливим полем з точки погляду графічного відображення є поле форми з назвою трансформатора, адже саме вона буде відображатись в «клітинці».

Ділянка

Початок ділянки: ; Кінець ділянки: ;

Довжина ділянки: км.

Задати параметри ділянки: ☐ Каталог ☒ Персонально

Каталог

Оберіть тип провідника: ;

Персональні

Тип провідника: ;

Активний опір: Ом/км;

Середньгеометрична відстань:

АВ: м; ВС: м; СА: м;

Радіус провідника: мм;

Втрати на корону: кВт/км;

Магнітна проникність: .

ПРИЙНЯТИ

Рисунок 4.9 – Форма вводу параметрів ділянки

Таким чином рекомендується вводити назву у форматі «Т1», оскільки довга назва може зламати алгоритм графічного виводу і видати помилку, яку

користувач не зможе виправити. Це не впливатиме на функціонал, а лише на візуальну складову.

Двообмотковий трансформатор

Пункт приєднання ВН: ; Пункт приєднання НН: ;
Найменування: ; $\text{tap}_{\text{роб}}$: ; $N_{\text{пар}}$: ;
Векторна група: .
Задати параметри трансформатора: ☐ Каталогом ☒ Персонально

Каталог

Оберіть тип трансформатора: ;

Персональні

Тип трансформатора: ;

Ном. потужність: МВА;

Ном. напруга ВН: кВ;

Ном. напруга НН: кВ;

$U_{\text{кз}}$: %; $\Delta P_{\text{кз}}$: кВт;

$I_{\text{нх}}$: %; $\Delta P_{\text{нх}}$: кВт.

РПН/ПБЗ

ΔU : %; $\Delta \beta$: deg;

tap_{min} : ; $\text{tap}_{\text{ном}}$: ; tap_{max} : .

ПРИЙНЯТИ

Рисунок 4.10 – Форма вводу параметрів двох обмоткового трансформатора

Після кліку по кнопці «Прийняти» програма надсилає об'єкт на контролер `create/elem()` , який записує його параметри в базу даних та повертає на сторінку зображення відповідного елемента. Приклади коду контролера для створення ділянок наведено в лістингу 4.1. Схожий процес відбувається при видаленні чи редагуванні відповідного елемента.

```

@PostMapping("/createBranch")
public ModelAndView createBranch(@Valid BranchDTO branch, BindingResult bindingResult,
                                @RequestParam(name = "calculationId") Integer calculationId,
                                @RequestParam(name = "constant") Element constant,
                                @RequestParam(name = "lineId") Integer lineId,
                                @RequestParam(name = "fieldSize") Integer fieldSize) {

    if (bindingResult.hasErrors()) {
        return new ModelAndView(WORK_PAGE);
    }

    branch.setCalculationId(calculationId);
    BranchDTO branchWithId = branchService.createBranch(branch);
    CoordsFieldDTO field = coordsService.updateElement(lineId, constant, calculationId,
    fieldSize, branchWithId.getId());

    return initField(field);
}

```

Лістинг 4.1 – Контролер створення ділянки

Трьохобмотковий трансформатор

Пункт приєднання ВН: ; Пункт приєднання СН: ; Пункт приєднання НН: ;

Найменування: ; tap_{pos} : ; $N_{\text{пар}}$: ;

Векторна група: .

Задати параметри трансформатора: ☐ Каталогом ☒ Персонально

Каталог

Оберіть тип трансформатора: ;

Персональні

Тип трансформатора: ;

Ном. потужність: МВА;

Ном. напруга ВН: кВ;

Ном. напруга СН: кВ;

Ном. напруга НН: кВ;

$U_{\text{кз(ВН)}}$: %; $U_{\text{кз(СН)}}$: %; $U_{\text{кз(НН)}}$: %;

$\Delta P_{\text{кз(ВН)}}$: кВт; $\Delta P_{\text{кз(СН)}}$: кВт; $\Delta P_{\text{кз(НН)}}$: кВт;

$I_{\text{нк}}$: %; $\Delta P_{\text{нк}}$: кВт.

РПН/ПБЗ

ΔU : %; $\Delta \beta$: deg;

tap_{min} : ; $\text{tap}_{\text{ном}}$: ; tap_{max} : .

ПРИЙНЯТИ

Рисунок 4.11 – Форма вводу параметрів триобмоткового трансформатора

4.3. Вивід результатів розрахунку

Після натискання користувачем кнопки «Розрахувати» додаток перенаправляє його на сторінку виводу результатів розрахунку.

Розрахунок починається з виклику методу `initInputParameters()`, який перетворює списки об'єктів одного класу в масив матриць однорідних елементів, і використовується для підготовки параметрів ділянок до розрахунку. Метод `calculate()` виконує ті ж операції з параметрами вузлів та ініціалізує початок розрахунку методом `calculateRegime()`. Цей метод формує симетричні матриці, розраховує діагональні елементи і формує матриці провідностей. Після формування усіх матриць, він викликає метод розрахунку Ньютона, який виконується поки цикл не зупинить розрахунок через досягнення заданої в нього точності. Далі запускається метод `calculatePowerFlowAndPowerLosses()`, який розраховує вихідні параметри (струми, втрати і т.д.) за результатами розрахунку метода Ньютона.

Початковий вигляд розробленої сторінки показаний на рис. 4.12. Це реалізується роботою контролера `calculate()`, який збирає всі параметри режиму для конкретного розрахунку і надсилає їх у відповідні елементи на стороні користувача. Текс коду даного контролера наведено у лістингу 4.2.

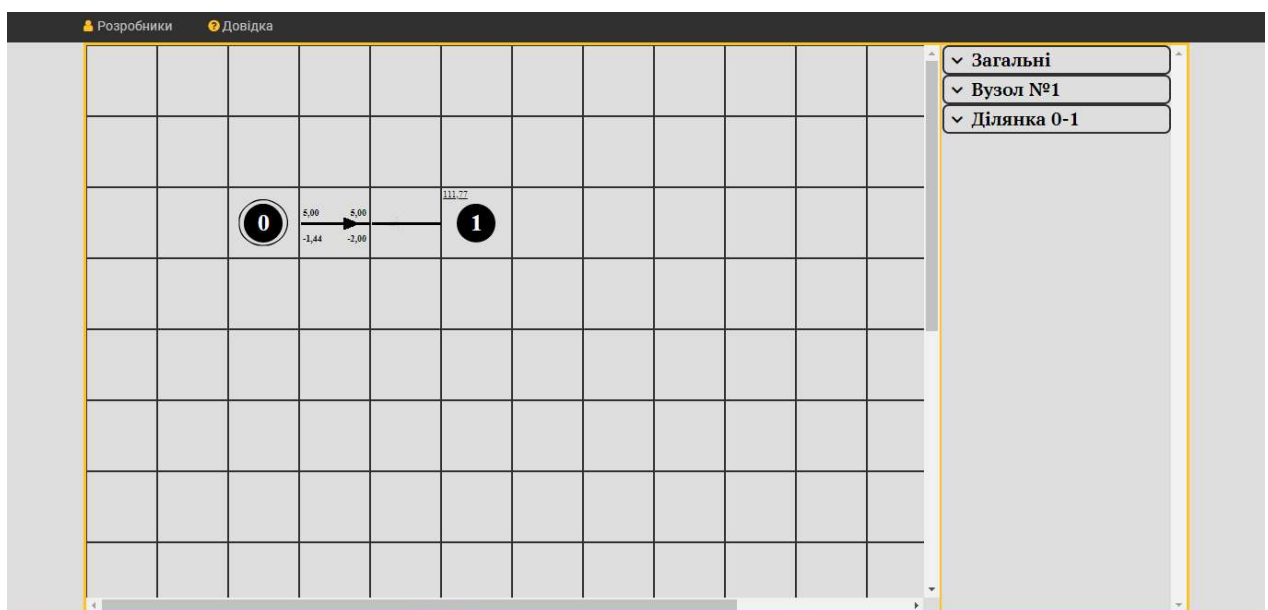


Рисунок 4.12 – Сторінка виводу результатів

В «клітинки» завантажуються найважливіші параметри для кожного з класів: напруга для пунктів, потоки потужності для ділянок та завантаження для трансформаторів. Це дозволяє візуально оцінити режим не розглядаючи детально результати. Детальні результати наводяться додатком у правому вікні сторінки. Результати групуються за класами елементів. Таким чином спочатку будуть показуватись вікна з параметрами вузлів, потім ділянок і потім трансформаторів.

```
@PostMapping("/calculate")
public ModelAndView calculate(@RequestParam(name = "calculationId") Integer calculationId,
                             @RequestParam(name = "iterations") Integer iterations,
                             @RequestParam(name = "accuracy") Double accuracy,
                             @RequestParam(name = "fieldSize") Integer fieldSize,
                             @RequestParam(name = "exponentialThreshold") Integer
exponentialThreshold) {
    ModelAndView modelAndView = new ModelAndView();
    List<BranchDTO> branches = branchService.getAllByCalculationId(calculationId);
    List<TransformerDTO> transformers = transformerService.getAllByCalculationId(calculationId);
    List<ThreePhaseTransformerDTO> threePhaseTransformers =
threePhaseTransformerService.getAllByCalculationId(calculationId);
    List<NodeDTO> nodes = nodeService.getAllByCalculationId(calculationId);
    CoordsFieldDTO field = coordsService.getFieldByCalculationId(fieldSize, calculationId);

    ProcessingResult result = calculationService.calculateRegime(nodes, branches, transformers,
threePhaseTransformers,
        iterations, accuracy);

    Map<Integer, BranchDTO> idToBranch =
branches.stream().collect(Collectors.toMap(BranchDTO::getId, item -> item));
    Map<Integer, TransformerDTO> idToTransformer =
transformers.stream().collect(Collectors.toMap(TransformerDTO::getId, item -> item));

    modelAndView.addObject("result", result);
    modelAndView.addObject("field", field);
    modelAndView.addObject("exponentialThreshold", exponentialThreshold);
    modelAndView.addObject("transformers", idToTransformer);
    modelAndView.addObject("branches", idToBranch);
    modelAndView.addObject("zeroObject", Complex.valueOf(0.0, 0.0));
    modelAndView.addObject("counter", new Counter());
    modelAndView.setViewName("results");

    return modelAndView;
}
```

Лістинг 4.2 – Контролер виводу результатів розрахунку

При натисканні на вікно елемента, буде розкриватись прихований раніше список розрахованих параметрів, а саме вікно буде підсвічуватись для акцентування уваги користувача на ньому. Розраховані параметри діляться на дві категорії: основні, які показуються додатком одразу, і додаткові, які будуть показані лише при натисканні користувачем на відповідну кнопку «Додатково». Візуальна різниця між такими варіантами виводу показана на рис. 4.12 (на основі розрахованих параметрів ділянки). Загальний вигляд розробленого вікна виводу детальних параметрів показаний на рис. 4.13. При великій кількості елементів у вікні їх також можна гортати, проте лише в вертикальному напрямку.

<p>^ Ділянка 0-1</p> <p>$P_{\text{поч}} = 5,004 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 5,000 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -1,436 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = -2,000 \text{ МВАр};$ ^ Додатково</p>	<p>^ Ділянка 0-1</p> <p>$P_{\text{поч}} = 5,004 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 5,000 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -1,436 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = -2,000 \text{ МВАр};$ ^ Додатково $Z = 0,004 + 0,564j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 0,016 + 0,014j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,000 + 0,585j \text{ МВА};$</p>
---	--

Рисунок 4.13 – Основні та додаткові параметри виводу

<p>^ Загальні</p> <p>$\Delta S_{\text{сум}} = 0,004 + 0,564j \text{ МВА};$</p>
<p>^ Вузол №1</p> <p>$U = 111,770 \text{ кВ};$ $\delta U = -0,201^\circ;$ ^ Додатково $U = 111,770 - 0,391j \text{ кВ};$</p>
<p>^ Ділянка 0-1</p> <p>$P_{\text{поч}} = 5,004 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 5,000 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -1,436 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = -2,000 \text{ МВАр};$ ^ Додатково $Z = 0,004 + 0,564j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 0,016 + 0,014j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,000 + 0,585j \text{ МВА};$</p>

Рисунок 4.14 – Розгорнуте вікно виводу результатів

Висновки до розділу 4

1) У додатку користувацький інтерфейс було реалізовано за допомогою мови розмітки сторінки HTML та таблиці каскадних стилів CSS. За анімацію відповідає бібліотека на мові програмування Javascript – jQuery.

2) Зв'язок зі серверною частиною створений через фреймворк Thymeleaf, що дозволяє достатньо легко отримувати доступ до динамічних параметрів сторінки.

3) Структура сторінок користувацького інтерфейсу є досить інтуїтивною, також додаток має довідку з основною інформацією по роботі з ним.

4) Користувацький інтерфейс має валідацію вхідних даних, що дозволяє проводити перевірку на стороні користувача, що підвищує швидкість роботи додатку.

5 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ТРАНСФОРМАТОРНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

5.1 Опис розрахункової схеми та вихідні дані

Для визначення оптимальної конфігурації електромережі було обрано стандартну схему розрахункового комплексу PowerFactory, конфігурацію схеми наведено на рис. 5.1, вихідні дані схеми наведені в табл. 5.1–5.3.

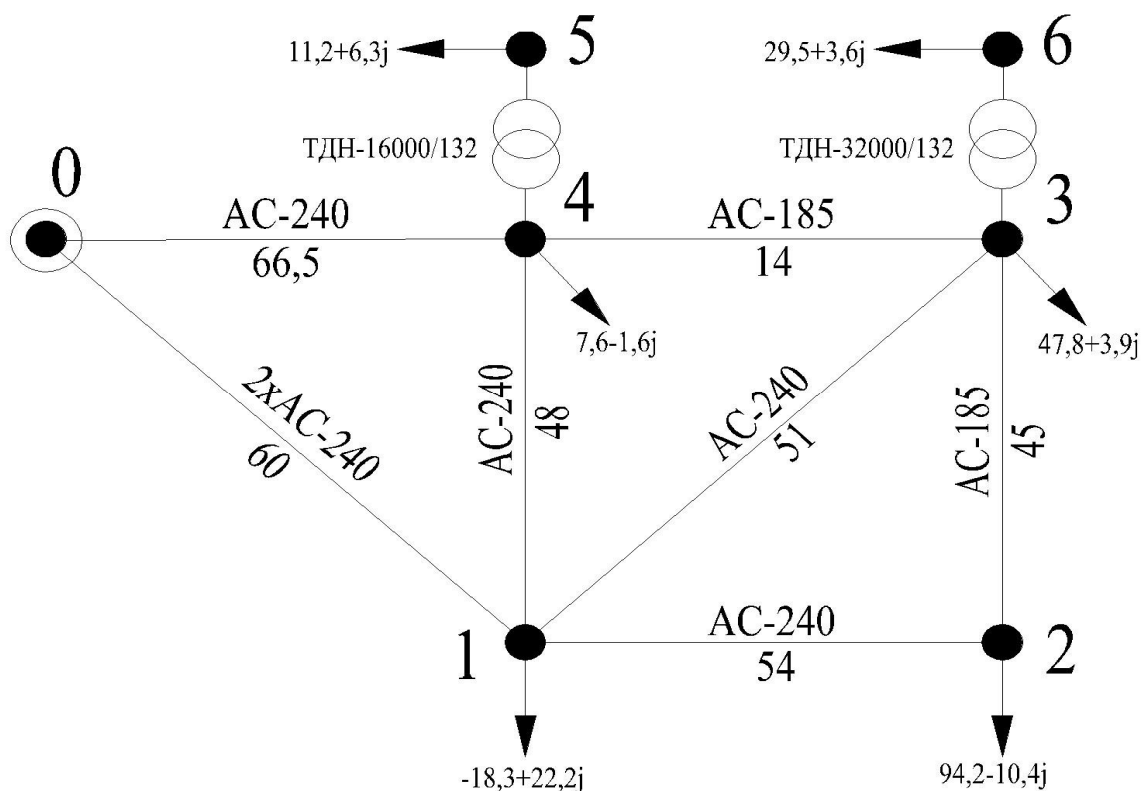


Рисунок 5.1 – Вихідна схема

Для ділянок обрано опору П110-5, яка має відстані між фазами А–В – 7,3 метри, А–С – 6,3 метри, В–С – 6,3 метри.

Схема складається з 6 вузлів навантаження і одного балансуючого вузла, в першому, другому, п'ятому 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.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані 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×АС-240	АС-240	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-185
Опора	П110-5	П110-5	П110-5	П110-5	П110-5	П110-5	П110-5
Провід	Опір, Ом/км				Радіус, мм		
АС-240	0,112				10,8		
АС-185	0,157				9,4		

Таблиця 5.2 – Величини навантажень у вузлах

Номер вузла	Потужність, МВА
1	$21,7-j12,7-S_{g1}$
2	$94,2-j19-S_{g2}$
3	$47,8+j3,9$
4	$7,6-j1,6$
5	$11,2-j7,5-S_{g5}$
6	$29,5-j16,6+S_{sh}$

Таблиця 5.3 – Параметри трансформаторів

Тип	$S_{ном}$, МВА	Межі регулювання	Каталожні дані					
			$U_{ном}$, кВ		U_k , %	ΔP_k , кВт	ΔP_x , кВт	I_x , %
			ВН	НН				
ТДН-16000/132	16	$\pm 8 \times 1,50 \%$	132	6,6; 11,0; 38,5	11,0	85	21	0,80
ТДН-32000/132	32	$\pm 8 \times 1,50 \%$	132	6,3; 10,5; 38	10,5	145	35	0,70

Також встановлений один шунтуючий реактор у 6 вузлі, величина потужності генерації наведено в табл. 5.4 та шунтуючого реактору табл. 5.5.

Таблиця 5.4 – Величина потужності генераторів у вузлах

Генератори	Значення, МВА
S_{g1}	$40-j34,9$
S_{g2}	$-j8,6$
S_{g5}	$-j13,8$

Таблиця 5.5 – Величина потужності шунтуючого реактору

Шунтуючий реактор	Значення, МВА
S_{sh}	$j20,2$

5.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення вихідної мережі

Розрахуємо параметри схеми заміщення на основі паспортних даних за допомогою [8], наведених в табл. 5.1-5.3.

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:

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

Реактивний опір:

$$\begin{aligned} x_{0,1} &= \frac{(0,144 \cdot \lg\left(\frac{D_{\text{ср}0,1}}{R_{\text{е}0,1}}\right) + 0,016 \cdot \mu) \cdot L_{0,1}}{k_{0,1} n_{0,1}} = \\ &= \frac{0,144 \cdot \lg\left(\frac{6,6}{0,01}\right) + 0,016 \cdot 1}{2 \cdot 1} \cdot 60 = 33,517 \text{ Ом} \\ x_{0,4} &= \frac{(0,144 \cdot \lg\left(\frac{D_{\text{ср}0,4}}{R_{\text{е}0,4}}\right) + 0,016 \cdot \mu) \cdot L_{0,4}}{k_{0,4} n_{0,4}} = \\ &= \frac{0,144 \cdot \lg\left(\frac{6,6}{0,01}\right) + 0,016 \cdot 1}{1 \cdot 1} \cdot 66,5 = 37,148 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Реактивна провідність:

$$\begin{aligned} b_{0,1} &= \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{D_{\text{ср}0,1}}{R_{\text{е}0,1}}\right)} \cdot L_{0,1} k_{0,1} n_{0,1} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{6,6}{0,01}\right)} \cdot 60 \cdot 2 \cdot 1 = 163,068 \text{ См} \\ b_{0,4} &= \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{D_{\text{ср}0,4}}{R_{\text{е}0,4}}\right)} \cdot L_{0,4} k_{0,4} n_{0,4} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{6,6}{0,01}\right)} \cdot 66,5 \cdot 1 \cdot 1 = 180,734 \text{ См} \end{aligned}$$

Комплексні опір та провідність:

$$Z_{0,1} = r_{0,1} + jx_{0,1} = 3,36 + j33,517 \text{ Ом}$$

$$Y_{0,1} = jb_{0,1} = j163,068 \text{ СМ}$$

Розрахуємо основні параметри двох-обмоткових трансформаторів.

Активний опір:

$$r_{T1} = \frac{\Delta P_{K3} U_{0B}^2}{S_T^2 \cdot 10^{-3}} = \frac{85 \cdot 10^3 \cdot 132 \cdot 10^3}{(16 \cdot 10^6)^2 \cdot 10^{-3}} = 2,467 \text{ Ом}$$

$$r_{T2} = \frac{\Delta P_{K3} U_{0B}^2}{S_T^2 \cdot 10^{-3}} = \frac{145 \cdot 10^3 \cdot 132 \cdot 10^3}{(32 \cdot 10^6)^2 \cdot 10^{-3}} = 5,785 \text{ Ом}$$

Реактивний опір:

$$x_{T1} = \frac{U_{KP} U_{0B}^2 \cdot 10}{S_{TH}} = \frac{11 \cdot 132 \cdot 10^3 \cdot 10}{16 \cdot 10^6} = 57,172 \text{ Ом}$$

$$x_{T2} = \frac{U_{KP} U_{0B}^2 \cdot 10^3}{S_{TH}} = \frac{10,5 \cdot 132 \cdot 10^3 \cdot 10}{32 \cdot 10^6} = 119,79 \text{ Ом}$$

Активна провідність:

$$g_{T1} = \frac{\Delta P_{HX} \cdot 10^{-3}}{U_{0B}^2} = \frac{21 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}{(132 \cdot 10^3)^2} = 2,009 \cdot 10^{-6} \text{ СМ}$$

$$g_{T2} = \frac{\Delta P_{HX} \cdot 10^{-3}}{U_{0B}^2} = \frac{35 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}{(132 \cdot 10^3)^2} = 1,205 \cdot 10^{-6} \text{ СМ}$$

Реактивна провідність:

$$b_{T1} = -\frac{I_{HX} S_T \cdot 10^{-5}}{U_{0B}^2} = -\frac{0,8 \cdot 16 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5}}{(132 \cdot 10^3)^2} = -14,692 \cdot 10^{-6} \text{ СМ}$$

$$b_{T1} = -\frac{I_{HX} S_T \cdot 10^{-5}}{U_{0B}^2} = -\frac{0,7 \cdot 32 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5}}{(132 \cdot 10^3)^2} = -7,346 \cdot 10^{-6} \text{ СМ}$$

Комплексні опір та провідність:

$$Z_{T1} = r_{T1} + jx_{T1} = 2,467 + j57,172 \text{ Ом}$$

$$Y_{T1} = g_{T1} + jb_{T1} = (2,009 - j14,692) \cdot 10^{-6} \text{ СМ}$$

Результати розрахунку параметрів схем заміщення для решти ділянок наведені в табл. 5.7.

Таблиця 5.6 – Параметри схем заміщення трансформаторів

№	Опір, Ом			Провідність, 10^{-6} СМ		
	R_m	X_m	Z_m	G_m	B_m	Y_m
T1	2,467	57,172	$2,467 + j57,17$	2,009	-14,692	$2,009 - j14,692$
T2	5,785	119,79	$5,785 + j119,79$	1,205	-7,346	$1,205 - j7,346$

Таблиця 5.7 – Параметри схем заміщення ділянок

№	S, мм ²	L, км	Опір, Ом			Провідність, См		
			r_l	x_l	Z_l	g_l	b_l	Y_l
0-1	2×240	60	3,36	33,517	$3,36 + j33,517$	0	81,534	$j163,068$
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 конфігурації мережі

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 за [8]:

$$N_{T1} = N_{T2} = 0$$

$$k_{T1} = \frac{U_q}{U_{0B} \cdot (1 + N_{T1})} = \frac{33 \cdot 10^3}{132 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0)} = 0,250$$

$$k_{T2} = \frac{U_q}{U_{0B} \cdot (1 + N_{T2})} = \frac{33 \cdot 10^3}{132 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0)} = 0,250$$

Алгебраїчні взаємні провідності:

$$y_{0,1} = \frac{1}{Z_{0,1}} = \frac{1}{3,36 + j33,517} = 0,003 - j0,03 \text{ См}$$

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

Алгебраїчні власні провідності:

$$y_{1,1} = -(y_{0,1} + y_{1,2} + y_{1,3} + y_{1,4}) = -(0,003 - j0,03 + 0,006 - j0,032 + 0,007 - j0,034 + 0,007 - j0,036) = -0,02 + j0,131 \text{ См}$$

$$y_{2,2} = -(y_{1,2} + y_{2,3}) = -(0,006 - j0,032 + 0,01 - j0,036) = -0,016 + j0,068 \text{ См}$$

Результати розрахунку матриці алгебраїчних провідностей для решти ділянок:

$$y = \begin{bmatrix} -0,023 + j0,131 & 0,006 - j0,032 & 0,007 - j0,034 & 0,007 - j0,036 & 0 & 0 \\ 0,006 - j0,032 & -0,016 + j0,068 & 0,01 - j0,036 & 0 & 0 & 0 \\ 0,007 - j0,034 & 0,01 - j0,036 & -0,05 + j0,205 & 0,032 - j0,12 & 0 & 0,001 - j0,02 \\ 0,007 - j0,036 & 0 & 0,032 - j0,12 & -0,045 + j0,187 & 0,001 - j0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,001 - j0,01 & -0,006 + j0,133 & 0 \\ 0 & 0 & 0,001 - j0,02 & 0 & 0 & -0,012 + j0,279 \end{bmatrix} \text{См}$$

Фізичні вузлові провідності:

$$Y_{p_1} = 0,5(Y_{0,1} + Y_{1,2} + Y_{1,3} + Y_{1,4}) = 0,5(j163,068 + j180,734 + j138,608 + j130,454) = j289,445 \text{ мкСм}$$

$$Y_{p_2} = 0,5(Y_{1,2} + Y_{2,3}) = 0,5(j180,734 + j119,713) = j133,237 \text{ мкСм}$$

Результати розрахунку матриці фізичних вузлових провідностей для решти вузлів:

$$Y_p = \begin{bmatrix} j289,445 \\ j133,237 \\ 2 + j133,309 \\ 1,205 + j166,869 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{мкСм}$$

5.4 Організація ітераційного розрахунку для першого варіанту роботи мережі

Ітерація 1

Уточнюємо розрахункове навантаження з урахуванням втрат потужності від провідності ділянок[8]

$$S_{p_1} = S_{n_1} + Y_{p_1} \cdot (U_1)^2 = -18,3 + j11,5 + (j289,4) \cdot (132)^2 = -18,3 + j27,24 \text{ МВА}$$

$$S_{p_2} = S_{n_2} + Y_{p_2} \cdot (U_2)^2 = 94,2 + j4,7 + (j133,2) \cdot (132)^2 = 94,2 + j8,078 \text{ МВА}$$

Результати розрахунку матриці фізичних вузлових провідностей для решти вузлів:

$$S_p = \begin{bmatrix} -18,3 + j27,24 \\ 94,2 + j8,078 \\ 47,8 + j6,219 \\ 7,6 + j1,3 \\ 11,2 + j6,3 \\ 29,5 + j3,6 \end{bmatrix} \text{МВА}$$

Обчислюємо розрахунковий струм за формулами (3.12–3.13):

$$\begin{aligned} I'_{p_1} &= U_0(g_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) + b_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(g_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + b_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(0,003 \cdot \cos(0 - 0) - 0,03 \cdot \sin(0 - 0)) + \\ &+ 132(0,006 \cdot \cos(0 - 0) - 0,032 \cdot \sin(0 - 0)) = 3,1 \text{ кА} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I''_{p_1} &= U_0(b_{1,0} \cdot \cos(\delta_0 - \delta_1) - g_{1,0} \cdot \sin(\delta_0 - \delta_1)) + \\ &+ U_2(b_{2,1} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) - g_{2,1} \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1)) = \\ &= 139,92(-0,03 \times \cos(0 - 0) - 0,003 \cdot \sin(0 - 0)) + \\ &+ 132(-0,032 \cdot \cos(0 - 0) - 0,006 \cdot \sin(0 - 0)) = -17,53 \text{ кА} \end{aligned}$$

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

$$I'_p = \begin{bmatrix} 3,1 \\ 2,172 \\ 6,594 \\ 6,001 \\ 0,212 \\ 0,397 \end{bmatrix} \text{ кА}$$

$$I''_p = \begin{bmatrix} -17,53 \\ -9,01 \\ -26,99 \\ -24,89 \\ -4,39 \\ -9,21 \end{bmatrix} \text{ кА}$$

Обчислюємо нев'язки потужностей у вузлах за формулами (3.15–3.16):

$$\begin{aligned} w_{p_1} &= g_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I'_{p_1} - P_{p_1} = -0,023 \cdot (132)^2 + 132 \cdot 3,1 - (-18,3) \\ &= 21,396 \text{ МВт} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{q_1} &= b_{1,1} \cdot (U_1)^2 + U_1 \cdot I''_{p_1} - Q_{p_1} = 0,131 \cdot (132)^2 + 132 \cdot (-9,01) - \\ &- 14,1 = -58,12 \text{ МВАр} \end{aligned}$$

Результати розрахунку матриці нев'язок потужності для решти вузлів:

$$W = \begin{bmatrix} 21,396 \\ -94,2 \\ -47,835 \\ -2,197 \\ -11,2 \\ -29,5 \\ -58,12 \\ 8,078 \\ -6,219 \\ -28,363 \\ -6,3 \\ -3,6 \end{bmatrix} \text{ МВА}$$

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 за формулами (3.21–3.28):

Недіагональні елементи:

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

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

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

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

Діагональні елементи:

$$\left(\frac{dP}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot g_{1,1} \cdot U_1 + I''_{p_1} = 2 \cdot (-0,009) \cdot 132 - 17,53 = -3,076 \text{ кА}$$

$$\left(\frac{dQ}{dU}\right)_{1,1} = 2 \cdot b_{1,1} \cdot U_1 + I'_{p_1} = 2 \cdot (0,061) \cdot 132 + 3,1 = 17,06 \text{ кА}$$

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{1,1} = U_1 \cdot I''_{p_1} = 132 \cdot -17,53 = -2314,865 \text{ МВт}$$

$$\left(\frac{dQ}{d\delta}\right)_{1,1} = -U_1 \cdot I'_{p_1} = -132 \cdot 3,1 = -409,2 \text{ МВАр}$$

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

$$\frac{dP}{dU} = \begin{bmatrix} -3,076 & 0,843 & 0,893 & 0,948 & 0 & 0 \\ 0,843 & -2,173 & 1,329 & 0 & 0 & 0 \\ 0,893 & 1,329 & -6,594 & 4,273 & 0 & 0,397 \\ 0,948 & 0 & 4,273 & -5,959 & 0,212 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,53 & -0,212 & 0 \\ 0 & 0 & 0,99 & 0 & 0 & -0,397 \end{bmatrix} \text{кА}$$

$$\frac{dQ}{dU} = \begin{bmatrix} 17,06 & -4,207 & -4,454 & -4,733 & 0 & 0 \\ -4,207 & 9,01 & -4,803 & 0 & 0 & 0 \\ -4,454 & -4,803 & 27,63 & -1,544 & 0 & -9,218 \\ -4,733 & 0 & -1,544 & 24,48 & -4,395 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1,099 & 4,395 & 0 \\ 0 & 0 & -2,305 & 0 & 0 & 9,218 \end{bmatrix} \text{кА}$$

$$\frac{dP}{d\delta} = \begin{bmatrix} -2314,8 & 555,3 & 587,9 & 624,7 & 0 & 0 \\ 555,3 & -1189,1 & 634,3 & 0 & 0 & 0 \\ 587,9 & 634,3 & -3564,3 & 2038,2 & 0 & 304,2 \\ 624,7 & 0 & 2038,2 & -3286,3 & 145,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 145,1 & -145,1 & 0 \\ 0 & 0 & 304,2 & 0 & 0 & -304,2 \end{bmatrix} \text{МВт}$$

$$\frac{dQ}{d\delta} = \begin{bmatrix} -409,2 & 111,336 & 117,9 & 125,2 & 0 & 0 \\ 111,336 & -286,8 & 175,4 & 0 & 0 & 0 \\ 117,9 & 175,4 & -870,6 & 564,2 & 0 & 13,13 \\ 125,2 & 0 & 564,2 & -791,8 & 7,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7,01 & -7,01 & 0 \\ 0 & 0 & 13,13 & 0 & 0 & -13,13 \end{bmatrix} \text{МВАр}$$

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:

$$\begin{bmatrix} U_p \\ \delta_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{dP}{dU} & \frac{dP}{d\delta} \\ \frac{dQ}{dU} & \frac{dQ}{d\delta} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} w_p \\ w_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10,497 \\ 6,401 \\ 8,649 \\ 9,377 \\ 3,651 \\ 2,414 \\ -0,161 \\ -0,264 \\ -0,215 \\ -0,179 \\ -0,258 \\ -0,313 \end{bmatrix}$$

Перераховуємо значення напруг та кутів:

$$U_1 = U_1 + U_p = 132 + 10,497 = 142,497 \text{ кВ}$$

$$\delta_1 = \delta_1 + \delta_p = 0 - 0,161 = -0,161 \text{ кВ}$$

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

$$U = \begin{bmatrix} 142,497 \\ 138,401 \\ 140,649 \\ 141,377 \\ 36,651 \\ 35,414 \end{bmatrix} \text{ кВ} \quad \delta = \begin{bmatrix} -0,161 \\ -0,264 \\ -0,215 \\ -0,179 \\ -0,258 \\ -0,313 \end{bmatrix}$$

Ітерація завершена. Подальший хід ітераційного розрахунку наведено в табл. 5.8.

Комплексне значення напруги за [8]:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\delta} = \begin{bmatrix} 139,920 \\ 136,253 - j21,540 \\ 129,054 - j33,495 \\ 132,875 - j27,909 \\ 134,747 - j23,526 \\ 34,281 - j8,542 \\ 32,536 - j10,024 \end{bmatrix} \text{ кВ}$$

Таблиця 5.8 – Результати розрахунку по кожній з ітерацій

№ ітер.	0	1	2	3	4	5
W_{max}	–	94,2	14,799	0,744	0,023	0,00067
U_1 , кВ	132	142,497	138,229	137,954	137,85	137,85
δ_1 , рад	0	–0,161	–0,157	–0,157	–0,157	–0,157
U_2 , кВ	132	138,401	133,669	133,341	133,21	133,21
δ_2 , рад	0	–0,264	–0,254	–0,254	–0,254	–0,254
U_3 , кВ	132	140,649	136,086	135,784	135,64	135,64
δ_3 , рад	0	–0,215	–0,207	–0,207	–0,207	–0,207
U_4 , кВ	132	141,377	137,07	136,793	136,67	136,67
δ_4 , рад	0	–0,179	–0,173	–0,173	–0,173	–0,173
U_5 , кВ	33	36,651	35,406	35,332	35,30	35,30
δ_5 , рад	0	–0,258	–0,244	–0,244	–0,244	–0,244
U_6 , кВ	33	35,414	34,129	34,047	34,01	34,01
δ_6 , рад	0	–0,313	–0,299	–0,299	–0,299	–0,299

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

Визначаємо потокорозподіл в мережі за [8]:

$$\begin{aligned}
 S_{п0,1} &= (U_0 - U_1) \cdot y_{0,1} \cdot \overline{U_0} + 0,5 \cdot Y_{0,1} \cdot (|U_0|)^2 = \\
 &= (139,92 - 136,253 - j21,540) \cdot (0,003 - j0,03) \cdot 139,92 + \\
 &+ 0,5 \cdot 163,068j \cdot (139,92)^2 = 90,6 - j5,03 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{к0,1} &= (U_0 - U_1) \cdot y_{0,1} \cdot \overline{U_1} - 0,5 \cdot Y_{0,1} \cdot (|U_1|)^2 = \\
 &= (139,92 - 136,253 - j21,540) \cdot (0,003 - j0,03) \cdot (136,253 + \\
 &+ j21,540) + 0,5 \cdot j163,068 \cdot (137,85)^2 = 89,18 + j5,95 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

Результати розрахунку потоків початку та кінця для решти ділянок розрахованих за допомогою Web-додатку зображено на рис. 5.2.

Результати розрахунку за допомогою PowerFactory наведені в табл. 5.9-5.10.

Розрахуємо втрати потужності в мережі:

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{\text{сум}} &= S_{п0,1} + S_{п0,4} - \sum S_{\text{н}} = 90,6 - j5,03 + 89,02 - j0,32 - \\
 &- (172 + j24) = 7,62 - j29,35 \text{ МВА}
 \end{aligned}$$

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. 5.3–5.5.

^ Загальні	
$\Delta S_{\text{сум}} = 7,62 - 29,35j \text{ МВА.}$	
^ Вузол №1	^ Вузол №4
$ U = 137,85 \text{ кВ};$ $\delta U = -8,99^\circ.$ v Додатково	$ U = 136,67 \text{ кВ};$ $\delta U = -9,91^\circ.$ v Додатково
^ Вузол №2	^ Вузол №5
$ U = 133,21 \text{ кВ};$ $\delta U = -14,57^\circ.$ v Додатково	$ U = 35,30 \text{ кВ};$ $\delta U = -14,01^\circ.$ v Додатково
^ Вузол №3	^ Вузол №6
$ U = 135,64 \text{ кВ};$ $\delta U = -11,87^\circ.$ v Додатково	$ U = 34,01 \text{ кВ};$ $\delta U = -17,14^\circ.$ v Додатково

Рисунок 5.3 – Додаткові результати розрахунку по вузлам

^ Трансформатор Т2	^ Трансформатор Т1
$S_{\text{вн}} = 29,65 + 0,64j \text{ МВА};$ $K_{\text{вн}} = 0,93 \text{ \%};$ $S_{\text{нн}} = 29,50 + 3,60j \text{ МВА};$ $K_{\text{нн}} = 0,93 \text{ \%};$ $\Delta S_{\text{сум}} = 0,19 - 3,20j \text{ МВА};$ $\tan \rho_{\text{роб}} = 0.$ ^ Додатково $I_{\text{вн}} = 0,13 \text{ кА};$ $I_{\text{нн}} = 0,50 \text{ кА};$ $\Delta S_Z = 0,15 - 2,96j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,04 - 0,24j \text{ МВА.}$	$S_{\text{вн}} = 11,27 + 5,17j \text{ МВА};$ $K_{\text{вн}} = 0,77 \text{ \%};$ $S_{\text{нн}} = 11,20 + 6,30j \text{ МВА};$ $K_{\text{нн}} = 0,80 \text{ \%};$ $\Delta S_{\text{сум}} = 0,09 - 1,27j \text{ МВА};$ $\tan \rho_{\text{роб}} = 0.$ ^ Додатково $I_{\text{вн}} = 0,05 \text{ кА};$ $I_{\text{нн}} = 0,21 \text{ кА};$ $\Delta S_Z = 0,07 - 1,13j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,02 - 0,14j \text{ МВА.}$

Рисунок 5.4 – Додаткові результати розрахунку по трансформаторам

^ Ділянка 1-2 $P_{\text{поч}} = 61,50 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 60,25 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -10,35 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = -6,85 \text{ МВАр}.$ ^ Додатково $Z = 1,25 - 3,53j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 4,93 + 4,00j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 2,70j \text{ МВА}.$	^ Ділянка 1-4 $P_{\text{поч}} = 12,04 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 11,97 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -2,51 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = -4,61 \text{ МВАр}.$ ^ Додатково $Z = 0,07 + 2,10j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 0,21 + 0,10j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 2,46j \text{ МВА}.$	^ Ділянка 0-1 $P_{\text{поч}} = 90,60 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 89,18 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -5,03 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = 5,95 \text{ МВАр}.$ ^ Додатково $Z = 1,42 - 10,98j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 3,46 + 13,77j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 3,15j \text{ МВА}.$
^ Ділянка 1-3 $P_{\text{поч}} = 33,94 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 33,55 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -3,39 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = -3,98 \text{ МВАр}.$ ^ Додатково $Z = 0,39 + 0,60j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 1,27 + 1,27j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 2,59j \text{ МВА}.$	^ Ділянка 2-3 $P_{\text{поч}} = -33,95 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = -34,45 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = 3,57 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = 3,31 \text{ МВАр}.$ ^ Додатково $Z = 0,50 + 0,26j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 1,38 + 1,04j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 2,16j \text{ МВА}.$	^ Ділянка 0-4 $P_{\text{поч}} = 89,02 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = 85,98 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -0,32 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = 11,41 \text{ МВАр}.$ ^ Додатково $Z = 3,04 - 11,73j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 3,72 + 14,89j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 3,46j \text{ МВА}.$
^ Ділянка 3-4 $P_{\text{поч}} = -78,31 \text{ МВт};$ $P_{\text{кін}} = -79,11 \text{ МВт};$ $Q_{\text{поч}} = -5,44 \text{ МВАр};$ $Q_{\text{кін}} = -3,09 \text{ МВАр}.$ ^ Додатково $Z = 0,80 - 2,35j \text{ Ом};$ $\Delta S_Z = 1,43 + 2,37j \text{ МВА};$ $\Delta S_Y = 0,00 + 0,69j \text{ МВА}.$		

Рисунок 5.5 – Додаткові результати розрахунку по ділянкам

Висновки до розділу 5

В результаті проведення розрахунку для електричної мережі з трансформаторними зв'язками встановлено, що:

1) результати розрахунку електричної мережі через Web-додаток співпадають результатами у PowerFactory, що підкреслює правильність реалізації математичних методів у додатку;

2) електрична мережа з трансформаторними зв'язками характеризується наявністю трансформаторів, які успішно були змодельовані у додатку та їх параметри правильно розраховані;

3) перевірено підтримку розрахунку електричної мережі з різними рівнями напруги у додатку, результати якої аналогічні до програмного комплексу PowerFactory;

4) показані додаткові параметри для вузлів, ділянок та трансформаторів, які розраховує web-додаток, що підкреслює інформативність розрахунку.

6. СТАРТАП ПРОЄКТ «WEB-ДОДАТОК ДЛЯ РОЗРАХУНКУ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ»

У даному розділі проведено аналіз стартап проєкту для визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямків реалізації цього впровадження.

6.1 Опис основних характеристик проєкту

В табл. 6.1 представлена систематизація матеріалів розробки стартапу з основними їх характеристиками.

Таблиця 6.1 – Опис основних характеристик стартап-проєкту

Показник	Характеристика
1. Сутність ідеї	Розробка web-додатку для розрахунку режимів роботи електричних мереж, що дозволить проводити розрахунки достатньо швидко незалежно від потужності машини.
2. Наявність аналогів або прототипів ідеї	Наразі існують три основних аналоги для розрахунку режимів електричної мережі: Онлайн Електрик, FaultAn, LineXL.
3. Основна потреба, яку задовольнить реалізований стартап	Основною проблемою зараз є відсутність портативних рішень з інтуїтивним графічним інтерфейсом для розрахунку режимів електричної мережі.
4. Ступінь розробленості технології реалізації	Для реалізації стартапу необхідні основні технології для розробки: <ul style="list-style-type: none"> - Серверної частини; - користувацького інтерфейсу; - поєднання серверної частини із базою даних; - інтеграційна середа розробки додатку; Усі ці технології доступні для використання, що значно підвищує строки реалізації.
5. Очікувана потужність стартапу	Мале підприємство
6. За рівнем спеціалізації	Вузькопрофільне
7. За чисельністю персоналу	Мале
8. Споживачі	Споживачами даного стартапу є проєктні підприємства та заклади для навчання.
9. Модель підприємництва	Бізнес для бізнесу: B2B

В табл. 6.2 описаний аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів.

Таблиця 6.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї даного проєкту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (Слабка сторона)	N (Нейтральна сторона)	S (Сильна сторона)
	Мій проєкт	«Онлайн Електрик»	PowerFactory			
1	2	3	4	5	6	7
Графічне відображення схеми	+	+	+		2	1, 3
Кількість розрахункових вузлів	5000	200	20000	2	1	3
Розрахунок режимів для схем різних типів напруг	+	–	+	2		1, 3
Можливість користуватися каталогом елементів	+	–	–	2, 3		1
Можливість запуску додатку на смартфонах і планшетах	+	+	–	3		1, 2
Можливість вибору методу ітераційного розрахунку	–	–	+	1, 2		3

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

6.3 Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища стартапу

В даному підрозділі визначенні основні загрози та можливості з зовнішнього середовища, які тим чи іншим чином впливають на підприємство. Проведений аналіз факторів зовнішнього оперативного середовища.

Сплановано напрями розвитку проєкту з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проєктів конкурентів. Аналіз динаміки та розвитку попиту на проєкт проведено та представлено результат у табл. 6.4

На табл. 6.3 показаний аналіз загроз та можливостей за факторами зовнішнього середовища.

Також необхідно проаналізувати основні фактори оперативного середовища на основі конкурентів та споживачів, показаних на табл. 6.4.

Зовнішнє оперативне середовище формує переваги і недоліки підприємства, яке є суб'єктом реалізації стартап-проєкту порівняно з конкурентами, визначає підходи до вибору постачальників, тощо.

Таблиця 6.3 – Аналіз загроз і можливостей зовнішнього середовища

Назва фактору	Загрози	Можливості
Економіка		
1. Створені лояльні умови оподаткування для ІТ-сектору	Є можливість впровадження законопроєкту про поступове підвищення податків.	Підтримання зарплатні для розробників на високому рівні, що підвищує їх конкурентноспроможність та покращує якість продукту.
2. Темпи інфляції	Можливість знецінення вартості продукту, що впливає на рівень зарплатні робітників.	Початок переведення комерційної складової додатку з національної валюти в іноземну.
Політика		
3. Кредитна політика місцевої влади	Потрібно стежити за оновленням умов кредитування малих підприємств, що може призвести до зменшення прибутку підприємства.	Можливість кредитування у іноземних банків, що дає більшу надійність для підтримання прибутку на одному рівні.
Науково-технічний прогрес		
4. Поява нової технології на ринку	Додаткові кошти на міграцію проєкту на дану технології при позитивному технічно-економічного аналізу.	Підвищення якості продукту, швидкості розробки нових функціональних особливостей, що може зменшити витрати на розробку.

Таблиця 6.4 – Аналіз факторів зовнішнього оперативного середовища

Фактор	Переваги	Недоліки
Конкуренти		
1. Наявність графічного інтерфейсу у додатку	Більш інтуїтивний підхід для роботи, що покращує зацікавленість користувача у даному додатку.	Відсутність приємного дизайну, що не дозволяє у повній мірі розкрити
2. Відсутність web-інтерфейсу у додатку	Підвищення рохрахункових можливостей додатку, за рахунок відсутності втрат на передавання та отримання даних через мережу Інтернет.	Відсутність портативності додатку та залежність від потужності машини.
Споживачі		
3. Недостатня мотивація споживача	Web-додаток для розрахунку електричних мереж є інновацією на ринку програмних засобів для працівників енергетичних спеціальностей та наявність більш потужних варіантів для розрахунку.	Необхідність поширення додатку через рекламні агенції, презентація додатку на енергетичних конференціях, та пошук майбутніх потенціальних клієнтів.
4. Ціна на ліцензію	Можливість відсутності додаткового заробітку від споживачів, які не мають змогу дозволити собі покупку ліцензії.	Підтримка заробітної плати розробників на достатньому рівні для їх зацікавленості в проєкті та підтримання його на високій якості.

Зовнішнє оперативне середовище формує переваги і недоліки підприємства, яке є суб'єктом реалізації стартап-проєкту порівняно з конкурентами, визначає підходи до вибору постачальників, тощо.

Аналіз внутрішнього середовища підприємства забезпечує визначення сильних та слабких сторін в процесі реалізації стартап-проєкту, що саме буде сприяти забезпеченню розробки, впровадженню, а що створюватиме перешкоди (ризики) в розробці, впровадженні та реалізації ідеї стартап-проєкту (табл 6.5).

За результатами аналізу зовнішнього, зовнішнього оперативного і внутрішнього середовищ можна побудувати бізнес-план, який буде запропоновано до розгляду потенційним інвесторам.

Таблиця 6.5 – Переваги і недоліки внутрішнього середовища

Фактор	Переваги	Недоліки
Маркетинг	<ul style="list-style-type: none"> Ефективні канали поширення та просування через навчальні заклади та енергетичні конференції. 	<ul style="list-style-type: none"> Високі витрати на створення іміджу за кородоном; відсутність коштів на вивчень конкретних потреб ринку; Брак коштів на рекламу.
Фінанси	<ul style="list-style-type: none"> Можливість отримання доходів у іноземній валюті; наявність значного власного капіталу. 	<ul style="list-style-type: none"> Інфляційне знецінювання накопичень при отримання прибутку у національній валюті; нестабільний фінансовий стан; обмежені інвестиційні можливості.
Персонал	<ul style="list-style-type: none"> Власна база підготовки кадрів; можливість забезпечення достатнього мотиваційного рівня для збереження працівника в компанії. 	<ul style="list-style-type: none"> Висока плинність кваліфікованих кадрів.
Організація управління	<ul style="list-style-type: none"> Раціональна організаційна структура підприємства; використання переваг організаційно-правових форм організації бізнесу. 	<ul style="list-style-type: none"> Неефективний менеджмент; незнання переваг організаційно-правових форм організації бізнесу.

6.3 Проведення ступеневого аналізу конкуренції на ринку

В даному підрозділі проводиться аналіз конкурентоспроможності стартап-проекту, обґрунтування цих факторів та проведено SWOT-аналіз для розуміння слабких та сильних сторін.

Загальні риси конкуренції на ринку представлені у табл. 6.6. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності описано у табл. 6.7.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища

Таблиця 6.6 – 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	Програми для розрахунку режимів існують у якості десктопних додатків.	Впровадження маркетингових інформаційних стратегій, які підкреслюють портативність додатку.
Рівень конкурентної боротьби – національний.	В межах України не існує аналогів web-додатків.	Провести локалізацію додатку, щоб вийти на міжнародний ринок.
Галузева ознака – внутрішньогалузева	Додаток має конкретну спеціалізацію.	Розширення функціоналу для виходу із власної галузі.
Вид конкуренції – товарно родова	В межах України не існує аналогів web-додатків.	Проведення аналізу для конкурентоспроможності з десктоп додатками.
Характер конкуренції – цінова	Даний продукт матиме фіксовану ціну на разову, місячну та річну підписку. Спеціальні пропозиції для корпоративних підписок.	На ціну впливатимуть безліч факторів.
Інтенсивність – марочна	На певних енергетичних підприємствах уже працюють з десктоп додатками.	Розвиватись та шукати шляхи для конкуренції з десктоп-додатками

Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 6.7 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Новизна	Аргументованість результатів	Простота використання
Обґрунтування	Конкурентна середа не має аналогів продукції, що випускає компанія.	Програма надає клієнту аргументовані результати та пояснення до них.	Кожний клієнт має можливість використання даного продукту без використання спеціальних додаткових ресурсів. Також при необхідності є довідка для користувача.

Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового

фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза). Результат проведення SWOT аналізу представлено у табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони	<ul style="list-style-type: none"> - новизна проєкту – відсутність аналогів на ринку; - простота використання додатку; - портативність для смартфонів та планшетів; - швидкість роботи додатку.
Слабкі сторони	<ul style="list-style-type: none"> - новизна проєкту – багато ризиків; - висока вартість послуг представників галузі інформаційних технологій; <p>сильна конкуренція з десктоп додатками.</p>
Можливості	<ul style="list-style-type: none"> - розширення функціональності для конкуренції з десктоп додатками; - впровадження локалізації для виходу у міжнародний ринок; - інтеграція з іншими програмними засобами для переходу у міжгалузеву складову.
Загрози	<ul style="list-style-type: none"> - зростання конкуренції; - висока ціна підтримки додатку та впровадження нових функціональних можливостей; - підтримання безпеки додатку при збереженні даних у cloud-платформах.

6.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

В даному підрозділі описується вибір основних груп потенційних споживачів, базова стратегія розвитку та стратегія позиціювання.

Опис цільових груп споживачів представлено у таблиці 6.9

Таблиця 6.9 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
Підприємства енергетичної сфери	Помірна	Високий	Висока	Середня
Вищі навчальні заклади	Помірна	Середній	Низька	Середня

Базова стратегія розвитку стартап-проєкту визначена та представлена у табл. 6.10.

Таблиця 6.10 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Free to Play	Концентрація основних зусиль не на продажу товару, а на затопленні визнання «продукту»	Інформаційні, комунікаційні системи, взаємодія підприємствами, які належать до енергетичної галузі	Концентрований маркетинг

На основі обраної базової стратегії розвитку проводиться вибір стратегії конкурентної поведінки проєкту. Результати представлені у табл. 6.11.

Таблиця 6.11 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і як?	Стратегія конкурентної поведінки
Проект є першопрохідцем ринку	Компанія буде шукати нових споживачів	Не буде, так як продукція компанії поки що не має аналогів	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 6.12 – Визначення стратегії позиціювання

Потреба	Вигода, яку пропонує	Ключові переваги перед конкурентами
Можливість швидкого розрахунку без наявності десктопного комп'ютера наявності десктопного комп'ютера	Наявність розрахунку тільки за умови наявності мережі Інтернет.	Наявність зручного інтерфейсу та більш широкі функціональні можливості.
Відсутність функції розрахунку топологічних схем з великою кількістю вузлів та різними рівнями напруги.	Технологія побудови додатку дозволяє будувати достатньо великі схеми з різними рівнями напруги, що дає змогу конкурувати з десктоп-додатками.	Високі розрахункові можливості розробленого математичного апарату.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розроблена стратегія

позиціонування. що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Висновки до розділу 6

В даному розділі був проведений маркетинговий аналіз стартап-проекту «Web-додаток для розрахунку ustalених режимів електричної мережі», основною ідеєю якого є створення нового продукту у сфері інформаційних технологій для портативного користування розрахунковим математичним апаратом.

Був проведений аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища проекту, ступеневого аналізу конкурентоспроможності. Розглянуто слабкі та сильні сторони в порівнянні з вже існуючими аналогами на ринку. Проведено SWOT-аналіз, що покаже основні загрози та можливості додатку.

В результаті досліджень можна зазначити, що є можливість комерційного використання додатку. Існує попит на проект, через його форм фактор портативності, динаміка ринку помірна. Перспективи впровадження є і досить значні. В Україні не існує аналогів даному додатку. Бар'єром для входження може бути сильна конкуренція з десктоп додатками та висока ціна на розробку. Стан конкуренції – помірний, конкурентоспроможність проекту досить висока, навіть при довгострокових перспективах розвитку.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС МОНТАЖУ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГОЮ 110/35 кВ

7.1 Загальні положення

Мережа с трансформаторними зв'язками характеризується наявністю понижуючого трансформатора. В моєму проєкті необхідно встановити трансформатор напругою 110/35 кВ і потужністю 25 МВА.

Мета досліджень – розробка заходів щодо запобігання або зменшення впливу на працівників шкідливих і небезпечних виробничих чинників, які виникають під час монтажу трансформатора.

Об'єкт дослідження – монтаж трансформатора 110/35 кВ.

Предмет досліджень – монтаж трансформатора 110/35 кВ.

7.2 Технічні характеристики і вибір місць розміщення нового енергетичного устаткування

Технічні характеристики трансформаторів ТДН–25000/110 кВ надано в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Технічні характеристики трансформатора ТДН–25000/110

Показник	Значення
Напруга	ВН – 115 кВ, НН – 38,5 кВ
Потужність	25 000 кВА
Маса масла	11 500 кг
Маса повна	45 000 кг
Маса транспортна	38 000 кг
Габаритні розміри	5515 x 790 x 5080 мм

7.3 Визначення та оцінка показників умов праці на робочих місцях

Для безпечного та надійного встановлення трансформатору необхідно мати кваліфіковану бригаду для його монтажу. Для встановлення

трансформатора ТДН–25000/110 достатньо мати 10 кваліфікованих працівників. Склад бригади для монтажу трансформатора представлений у табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Склад технічної бригади для монтажу трансформатор

Кваліфікація робітника	Кількість робітників
електромонтер IV розряду	2
електромонтер V розряду	1
електромонтер III розряду	2
електромонтер II розряду	1
водій автокрану (посвідчення категорії C)	1
стропувальник	1
1 – водій вантажного автотранспорту (посвідчення категорії C1E)	1
Водій автобусу (посвідчення категорії D1)	1

Показники умов праці для певної групи електротехнічних працівників надають у табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Показники умов праці

Найменування показника	Основні характеристики	Фактичне значення
Кваліфікація працівників	Кількість Група з електробезпеки	10 осіб IV група
Місце виконання робіт	Відкрите чи закрите Площа	Відкрите 55,15 м ²
Розташування робочого місця	На землі На висоті	На поверхні землі
Зовнішнє освітлення	Природне	Природня освітленість
Важкість праці	Робоче положення Вага вантажів	Стоячи <15 кг
Важкість праці	Тип навантаження	Динамічне навантаження внаслідок перенесення вантажів та статична робота з обладнанням
Оцінка умов праці		Шкідливі II категорії

7.4 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників

Небезпечні і шкідливі виробничі чинники (НШВЧ), які виникають у ході виконання монтажу трансформатора 110/35 кВ потужністю 25 МВА, наведені у табл. 7.4.

Таблиця 7.4 – Перелік небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Перелік НШВЧ	Фактичне значення	Граничнодопустиме значення та номер нормативного документу
Електричного походження		
Напруга під час запуску	110 кВ	6 В [1]
Струм під час запуску	>200 А	0,6 мА [1]
Електрична дуга	6000 В	6 В [1]
Фізичні		
Розташування робочого місця на висоті >5,6 м відносно землі	Приєднання обладнання до введів трансформатора(робота на висоті)	НПАОП 0.00-1.15-07 [5]
Хімічні		
Хімічні речовини	Трансформаторне масло марки Т-1500У	
Психофізіологічні		
Статичні і динамічні навантаження	Робота з монтажними інструментами, перенесення вантажів (II ступеня)	Гігієнічні нормативи ГН 3.3.5-8-6.6.1-2014 [6]
Нервово-психічні перевантаження	Монотона робота, розумове перенапруження	НПАОП 0.00-8.24-05 [7]



7.5 Розробка і розрахунок технічних та організаційних заходів з охорони праці

Для забезпечення безпеки робіт у діючих електроустановках належить виконувати наступні технічні і організаційні заходи безпеки, які наведені у табл. 5.5.

Таблиця 7.5 – Технічні і організаційні заходи

Назва заходу	Опис та основні характеристики
1	2
Організаційні	
Призначення осіб, які відповідають за організацію та проведення робіт	Призначається керівництвом, яке відповідає за конкретну установку з енергетичних компаній, наприклад «НЕК Укренерго».
Оформлення наряду проведення робіт	Працівник, який видає наряд, встановлює можливість безпечного виконання роботи. Він відповідає за достатність і правильність зазначених у наряді заходів безпеки, за якісний і кількісний склад бригади і призначення працівників, відповідальних за безпечне виконання робіт, а також за відповідність груп з електробезпеки працівників, які зазначені в наряді, роботі, що виконується. [1]

Продовження табл. 7.5.

1	2
Технічні	
Обгородження робочого місця	Силові трансформатори обгороджуються огорожею висотою 1,6 м. [1]
Блокувальні засоби	Електромагнітне блокування дверей для трансформаторів та реакторів за наявності напруги.
Знак безпеки	
Захисне заземлення	Заземлюються корпус трансформаторів, апаратів, приводи електричних апаратів, металеві конструкції розподільних пристроїв, металеві огорожі. Виконується у вигляді сіток, що складаються з горизонтальних (сталеві полоса 4x40 мм ²) і вертикальних заземлювачів (кутики 40x40x5 мм), і охоплює всю територію. Найбільш допустиме значення опору становить 0,5 Ом.
Знак безпеки	Знаки безпеки «Обережно! Електрична напруга!» прикріплені до сітчастого огороження трансформатору 
Сигнальна стрічка при монтажі	Використання сигнальної стрічки біло-червоного кольору для обмеження потрапляння сторонніх осіб на територію виконання робіт 

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

Для виконання монтажних робіт та всіх оперативних і ремонтних робіт, працівники мають бути оснащені спеціальним одягом та іншими засобами індивідуального захисту.

Результати вибору потрібних засобів індивідуального захисту наведені у табл.7.6.

Таблиця 7.6 – Засоби індивідуального захисту при монтажі обладнання

Тип захисту	Марка	Призначення	Технічні характеристики	Нормативні документи
1	2	3	4	5
Захист голови	Delta Plus GRANITE PEAK	Уникнення пошкоджень голови, та ізоляція від струмопровідних частин	Матеріал: ABS-пластик	ДСТУ EN 397

Продовження табл. 7.6.

1	2	3	4	5
Захист рук	Vitlux RNIT - PAS	Захист від опіків, порізів та проколів	Матеріал: Резина- ПВХ-трикотаж	ДСТУ EN 50237:2006
Робочий одяг (напівкомбенізон)	Delta Plus Mach2 Corporate	Захист від забруднень від монтажних робіт, механічних пошкоджень	Тип тканини: поліестер, бавовна, без утеплювача	ДСТУ EN 136
Захист очей	OZON	Призначені для захисту очей від ультрафіолетового випромінювання, механічних пошкоджень, впливу твердих частинок.	Панорамна лінза завтовшки 2 мм -	ДСТУ EN 60903:2017

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

Попередньо виконується аналіз імовірних небезпек, які можуть створити надзвичайні ситуації та призвести до нещасних випадків серед працівників. Результати досліджень наведені у табл. 7.7.

Аналізуючи основні джерела небезпек, потрібно зазначити основні заходи та засоби протидії. Взагалі ці засоби поділяються на технічні та організаційні. Запропонований перелік заходів представлений у табл. 5.8.

Таблиця 7.7 – Основні джерела небезпек

Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
Неправильне встановлення захисного заземлення	Порушення вимог правил безпеки	Виникнення нещасного випадку
Падіння з висоти працівника	Невиконання правил безпеки, відсутність запобіжних поясів, невірне їх використання	Виникнення нещасного випадку
Падіння з висоти сторонніх предметів на працівника	Невиконання правил безпеки	Виникнення нещасного випадку
Розряд статичної електрики	Вплив або наведення електромагнітного поля	Виникнення пожежі

Таблиця 7.8 – Перелік заходів і засобів

Група заходів	Вид заходу	Критерії вибору
Технічні	Наявність первинних засобів до тушіння пожеж (вогнегасник, пожежний інвентар)	– Вогнегасник через 30-60м. Порошкові або вуглекислотні вогнегасники. – Щит з інвентарем (1 щит на 600 м ²).
	Наявність грозозахисного обладнання	По всій території
Організаційні	Інструктаж перед виконанням наряду Проведення тренінгів для підтримання навичок та ознайомлення з роботою засобів з охорони праці	Первинний Постійні періодичні (раз на рік)

7.8 Розрахунок захисного заземлення для трансформатора ТДН-25000/110

Таблиця 7.9 – Вихідні дані розрахунку

Тип ґрунту	Чорнозем
Горизонтальний заземлювач (ГЗ)	Сталева пластина 4х12 мм
Глибина закладання ГЗ	0,8 м
Вертикальний заземлювач (ВЗ)	сталь круглого перерізу діаметром 50 мм
Глибина закладання ВЗ	0,7 м
Довжина ВЗ	5 м

Розрахунок заземлювального пристрою виконуємо за методом коефіцієнта використання електродів [2].

Визначаємо розрахунковий опір ґрунту при середній вологості ґрунту:

$$\rho_{розр}^{ВЗ} = \rho_{табл}^{чорн} \cdot \psi_2 = 30 \cdot 1,3 = 39 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\rho_{розр}^{ГЗ} = \rho_{табл}^{чорн} \cdot \psi_2 = 30 \cdot 3,5 = 105 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Відстань від поверхні ґрунту до середини вертикального заземлювача:

$$t = l_z + \frac{l_g}{2} = 0,7 + \frac{5}{2} = 3,2 \text{ м}.$$

Розраховуємо опір розтікання струму одного ВЗ:

$$R_{ВЗ} = \frac{\rho_{розр.г}}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \left(\ln \frac{2 \cdot l_g}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_g}{4t - l_g} \right) = \frac{39}{2 \cdot 3,14 \cdot 5} \left(\ln \frac{2 \cdot 5}{0,05} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) =$$

$$= 6,58 \text{ Ом}.$$

Допустимий опір розтікання струму для мережі напругою 110 кВ становить $R_{um} = 0,5$ Ом. Оскільки $R_{B1} > R_{um}$, необхідно паралельно з'єднати декілька вертикальних заземлювачів.

Потрібна кількість ВЗ становить:

$$n' = \frac{R_{\epsilon 1}}{R_{um} \cdot \eta_e} = \frac{6,58}{0,5 \cdot 1} = 13,16 \Rightarrow n = 14 \text{ шт.}$$

де: η_e – попередній коефіцієнт екранування (використання) заземлювачів.

Фактичне значення коефіцієнту екранування, для отриманого значення заземлювачів за табл. В4, становить $\eta_{Be\phi} = 0,47$.

Перерахуємо кількість ВЗ за фактичного значення $\eta_{Be\phi}$

$$n' = \frac{R_{\epsilon 1}}{R_{um} \cdot \eta_e} = \frac{6,58}{0,5 \cdot 0,47} = 28 \Rightarrow n = 28 \text{ шт.}$$

Довжина горизонтального заземлювача при розміщенні вертикального заземлювача у контурі:

$$l_{\Gamma} = 2 \cdot (L + D) \approx a \cdot n = 3 \cdot 28 = 84 \text{ м.}$$

Схему плану заземлення підстанції представлено на рис. 5.1.

Опір струму розтікання горизонтального прямокутного заземлювача:

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{\text{розр}}^{\Gamma 3}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Gamma}} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_{\Gamma}^2}{d_{\Gamma} \cdot t_{\Gamma}} \right) = \frac{105}{2 \cdot 3,14 \cdot 84} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 84^2}{0,05 \cdot 0,8} \right) = 2,543 \text{ Ом.}$$

За табл. В5 фактичний коефіцієнт екранування має значення $\eta_{\Gamma e\phi} = 0,22$.

Еквівалентний опір струму розтікання штучного заземлюючого пристрою визначається наступним чином:

$$R'_{um} = \frac{R_{B1} \cdot R_{\Gamma}}{R_{B1} \cdot \eta_{e\phi} + R_{\Gamma} \cdot n \cdot \eta_{\Gamma e\phi}} = \frac{6,58 \cdot 2,543}{6,58 \cdot 0,22 + 2,543 \cdot 28 \cdot 0,47} = 0,479 \text{ Ом.}$$

Опір заземлюючого пристрою підстанції не перевищує допустимого значення опору розтікання струму: $R_z < 0,5$ Ом; таким чином опір заземлювача відповідає умовам ПУЕ.

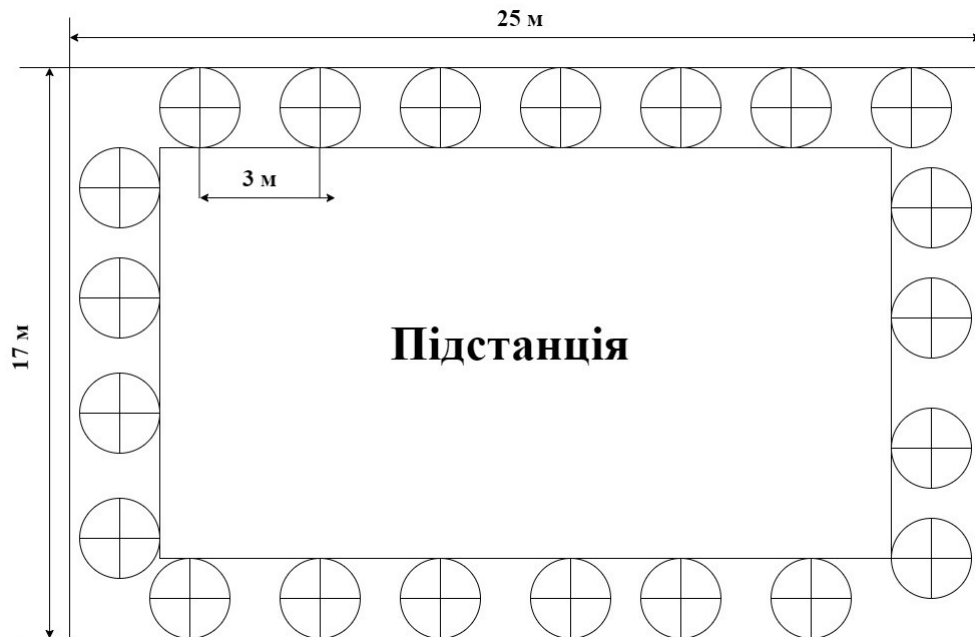


Рисунок 7.1 – План заземлення підстанції 110/35 кВ

Висновки до розділу 7

У даному розділі магістерської дисертації розглянуто заходи щодо запобігання або зменшення впливу на працівників шкідливих і небезпечних виробничих чинників, які виникають при щоденних роботах під час монтажу трансформатора ТДН-25000/110. Для захисту працівників від прямого і непрямого дотику, та напруги кроку необхідно виконати заземлення обладнання підстанції, де виконуються роботи, з допустимим опором 0,5 Ом. Виконано розрахунок опору заземлюючого пристрою підстанції, який становить 0,467 Ом. Також виконується захисна сітчаста огорожа для трансформатора висотою 1,6 м.

Проаналізовані основні джерела небезпек, які можуть виникнути під час монтажу та запропоновані технічні та організаційні заходи щодо протидії таким ситуаціям.

Під час виконання робіт працівникам необхідно надати засоби індивідуального захисту, які наведені в табл. 7.6.

При виникненні аварії на трансформаторі з виникненням пожежі необхідно виконати його вимкнення від мережі з усіх сторін і заземлити. Після цього

гасіння пожежі потрібно проводити будь-якими засобами пожежогасіння (розпиленою водою, повітряно-механічною піною, вогнегасниками).

ВИСНОВКИ

За результатами проведених в магістерської дисертації досліджень:

1) типом програмного забезпечення було обрано web-додаток для розрахунку усталеного режиму електричної мережі з трансформаторними зв'язками. Визначено основні вимоги щодо функціоналу, який буде розроблюватись у додатку;

2) для розрахунку усталених режимів електричної мережі було обрано метод Ньютона;

3) розроблено серверну частину додатку:

- мовою програмування було обрано Java із застосуванням фреймворку для об'єднання компонент Spring Core, фреймворку для розбивки функціоналу на шари, де кожен шар відповідає за окрему частину функціоналу – Spring MVC;
- для збереження даних було обрано реляційну модель, реалізацією якої у web-додатку є MySQL. Для зв'язку бази даних з алгоритмом було обрано фреймворк Spring Data;
- реалізовано алгоритм методу Ньютона для розрахунку усталених режимів електричної мережі на мові програмування Java;
- розроблено функціонал для створення робочого поля користувача, можливість виконувати основні CRUD операції для моделей, використання каталогу для швидкого заповнення елементів схеми, урахування кількості ітерацій розрахунку та поле з результатами розрахунку;
- виконана реалізація розрахунку схеми з різними рівнями номінальної напруги у web-додатку. Для цього спроектовано моделювання двохобмоткових та триобмоткових трансформаторів на схемі;

4) розроблено клієнтську частину додатку;

5) проведено розрахунок тестової схеми з наявними трансформаторними зв'язками через web-додаток та порівняно результати з програмним комплексом

PowerFactory, що підкреслює правильність розрахунку та відповідність отриманих результатів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок : [арх. 22 серпня 2018] / Міненерговугілля України. — 5-те вид., перероб. і доп. (станом на 22.08.2018) (чинне з 22.11.2018). — Харків : [б. в.], 2018. — 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 небезпекою»;
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 р.
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/eaaCatalog/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>.

ДОДАТОК А

Результати перевірки на плагіат

Ім'я користувача:
Чижевський Володимир

ID перевірки:
1005413064

Дата перевірки:
09.12.2020 15:08:35 EET

Тип перевірки:
Doc vs My Database

Дата звіту:
09.12.2020 15:09:03 EET

ID користувача:
38476

Назва документа: ПЗ_Волчков І.В. ЕС-91мп

Кількість сторінок: 99 Кількість слів: 15818 Кількість символів: 122522 Розмір файлу: 1.61 MB ID файлу: 1005704820

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

3.91%
Схожість

Найбільша схожість: 1.42% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: EF-100000000025)

Пошук збігів з Інтернетом не проводився

0% Джерела з Бібліотеки

243

Сторінка 101

0.79% Цитат

Цитати

5

Сторінка 102

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнено

0%
Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

248

Підозріле форматування

22
сторінки