

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Розробка заходів по оптимізації роботи системи керування
системою живлення підприємства

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКм-22
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)
та електромеханіка»

Володимир КУЗУРМАН

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник

к.т.н., доц., І. ГРИЦЮК

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Нормоконтроль:

Е. НЕМЦЕВ

(підпис)

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

(дата)

ЛУЦЬК – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Володимиру КУЗУРМАНУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка заходів по оптимізації роботи системи керування системою живлення підприємства

керівник роботи Ірина ГРИЦЮК, канд. техн. наук, доцент
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Графік активної та реактивної
потужності за добу, за місяць, за рік. Потужності окремих електроприймачів.
Річне число годин використання максимального навантаження: 4500 год/рік,
кількість споживачів I-категорії – 60%, довжина живлячих ліній: ГПП-1 – 600
м, ГПП-2 – 500 м, ГПП-3 – 550 м, ГПП-4 – 580 м, ГПП-5 – 520 м, ГПП-6 – 600
м, ГПП-7 – 550 м, ГПП-8 – 600 м, ГПП-9 – 550 м, ГПП-10 – 600 м. Значення
максимумів: вранішній взимку, влітку – з 8.30 до 11.30, вечірній взимку – з
17.30 до 21.30, вечірній влітку – з 19.30 до 22.00. Температура охолоджуючої
середовища трансформатора – 20 °С, припустиме перевищення середньої
температури масла над температурою охолоджуючої середовища – 5 °С,
припустиме перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки над
середньою температурою обмотки 12 °С, відношенні втрат КЗ до втрат ХХ –
5. Напруга на трансформаторі: первинна – 35 кВ, вторинна – 6 кВ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Значення систем управління енергопостачанням на сучасних підприємствах.

2. Пошук можливостей по оптимізації систем електропостачання підприємств.

3. Розробка плану заходів по покращенню оптимізації функціонування системи управління електропостачанням.

4. Розрахунок електричних навантажень.

5. Моделювання процесів по оптимізації роботи системи управління системою електропостачання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	І. ГРИЦЮК, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 2 жовтня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.10.23 – 15.10.23	
2.	Розділ 2	16.10.23 – 29.10.23	
3.	Розділ 3	30.10.23 – 12.11.23	
4.	Розділ 4	15.04.23 – 03.12.23	
5.	Розділ 5	04.12.23 – 10.12.23	
6.			

Студент _____
(підпис)

Володимир КУЗУРМАН _____
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ірина ГРИЦЮК _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Володимир КУЗУРМАН. Розробка заходів по оптимізації роботи системи керування системою живлення підприємства / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено огляд загальних принципів управління електропостачанням підприємств, наведено значення систем управління енергопостачанням на сучасних підприємствах, виконано пошук можливостей по оптимізації систем електропостачання підприємств та проаналізовано неефективність існуючих систем управління електропостачанням.

У другому розділі було виконано огляд проблеми підвищення якості керування електропостачанням, здійснено огляд літературних джерел по дослідженню підвищення якості керування електропостачанням та розроблено план заходів по покращенню оптимізації функціонування системи управління електропостачанням.

У третьому розділі здійснено розрахунок електричних навантажень.

У четвертому розділі було здійснено моделювання процесів по оптимізації роботи системи управління системою електропостачання.

Ключові слова: енергопостачання, управління, оптимізація, системи управління, якість керування, навантаження, нейронна мережа, нейрон, градієнт, моделювання

SUMMARY

Volodymyr Kuzurman. Development of measures to optimize the operation of the power supply management system of an enterprise / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

The first chapter provides an overview of the general principles of enterprise power supply management, the importance of power supply management systems at modern enterprises, a search for opportunities to optimize enterprise power supply systems, and an analysis of the inefficiency of existing power supply management systems.

Section 2 provides an overview of the problem of improving the quality of power supply management, reviews the literature on improving the quality of power supply management, and develops an action plan to improve the optimization of the functioning of the power supply management system.

In the third section, we calculated the electrical loads.

In the fourth section, we modeled the processes of optimizing the operation of the power supply management system.

Keywords: power supply, control, optimization, control systems, control quality, load, neural network, neuron, gradient, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ ПІДПРИЄМСТВ	9
1.1 Значення систем управління енергопостачанням на сучасних підприємствах	9
1.2 Пошук можливостей по оптимізації систем електропостачання підприємств	16
1.3 Неефективність існуючих систем управління електропостачанням	21
2 ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ	25
2.1 Огляд літературних джерел по дослідженню підвищення якості керування електропостачанням	25
2.2 План заходів по покращенню оптимізації функціонування системи управління електропостачанням	33
3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	43
4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПО ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	48
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	72
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	77
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	85

ВСТУП

Основний принцип сталого розвитку сучасних підприємств полягає у виваженому підході до використання наявних ресурсів та доступність і перетворення різних видів енергії.

Система енергетичного живлення енергоємних підприємств є основною для забезпечення його надійної та безперебійної роботи, підтриманні ефективності здійснення технологічних процесів при взаємодії з іншими допоміжними системами. На допомогу до цього можуть прийти сучасні системи керування енергоживленням, які дозволяють забезпечити принципи передбачуваності, гнучкості та адаптивності до різних змін.

Зростання складності виробничих процесів та вимог до якості енергоспоживання, необхідність оптимізувати системи керування системою енергоживлення говорить про актуальність визначеної задачі. Перешкодами на цьому шляху можуть бути: постійна модернізація обладнання, інтеграція з іншими системами, впровадження нових технологій, що вимагає здійснення глибокого аналізу, запровадження прогнозування та планування. Використання інноваційних методик та засоби керування енергоживленням дозволяє зменшити витрати, підвищити продуктивність процесів та швидко адаптуватися до змін у електричних мережах. Важливість розробки заходів по оптимізації роботи системи керування системами живлення також визначається економічною доцільністю.

Дослідження, аналіз та розробка новітніх методик і технологій у сфері оптимізації систем керування живленням відкривають широкі перспективи для реалізації потенціалу підприємства для досягнення поставлених цілей, збільшення строку служби обладнання, зменшення експлуатаційних витрат та інше.

Мета роботи – розробити заходи по оптимізації роботи системи керування системою живлення підприємства.

Завдання роботи:

- здійснити огляд загальних принципів управління електропостачанням підприємств,
- здійснити пошук можливостей по оптимізації систем електропостачання підприємств,
- дослідити неефективність існуючих систем управління електропостачанням,
- розробити план заходів по покращенню оптимізації функціонування системи управління електропостачанням,
- здійснити розрахунок електричних навантажень,
- здійснити моделювання процесів по оптимізації роботи системи управління системою електропостачання.

Об’єкт досліджень – системи керування електричних мереж змінного струму.

Предмет досліджень – параметри роботи системи керування електричної мережі.

1 ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Значення систем управління енергопостачанням на сучасних підприємствах

Ритм роботи сучасних енергоємних підприємств і виробництв суттєво залежить від ритму роботи систем електропостачання. Ці системи є основою для широкого кола промислової діяльності та є запорукою ефективності та стійкості їх роботи. Життєздатність та ефективність цієї системи залежить від закладених принципів керування енергопостачанням. Системи керування повинні забезпечити безперешкодний потік електричної енергії електрики з визначеними кількісними та якісними параметрами по лініях живлення до споживачів [1].

Необхідність застосування ефективних систем управління електропостачанням на енергетичних підприємствах зосереджена на меті оптимізації використання енергії при мінімізації експлуатаційних витратах за умов забезпечення вимог безпеки. Більш того, розширення та розвиток промислових підприємств вимагає використання надійних інтелектуальних системах керування постачанням електричної енергії, особливо в досить енергоємних галузях виробництва (оброблювана, сільськогосподарська, видобувна хімічна промисловість та інші).

Сучасність вносить свої корективи у можливості управління електропостачанням, серед яких можна відзначити [2]:

- широке впровадження інтелектуальних технологій, що підвищує ефективність і надійність енергетичних систем та забезпечує енергетичну стійкість,

- перехід до компенсації частини живлення від відновлюваних джерел енергії (сонячна, вітрова та інші), шляхом їх інтеграції до існуючих енергетичних структур. Ці джерела, при їх ефективному керуванні ними,

можуть виступати так званими «буферами» у періоди підвищеного попиту на енергію, що сприяє економії енергії та підвищенню ефективності роботи енергетичних систем з огляду на керування ними.

– поступовий перехід підприємств на використання «розумних мереж» (систем «Smart Grid») – рис. 1.1. Зазначені мережі реалізуються шляхом використання технологій вимірювання (за допомогою системи датчиків) і аналітичних обчислень, що дозволяє здійснювати спостереження в реальному часі та модулювати рухи потоків енергії у мережах. Шляхом використання значної кількості датчиків та здійснення аналітичних розрахунків, інтелектуальні мережі сприяють ширшому розумінню та контролю за використанням енергії на підприємствах, що, у свою чергу, значно покращує енергоефективність, скорочує втрати енергії та дозволяє отримати суттєву фінансову економію.

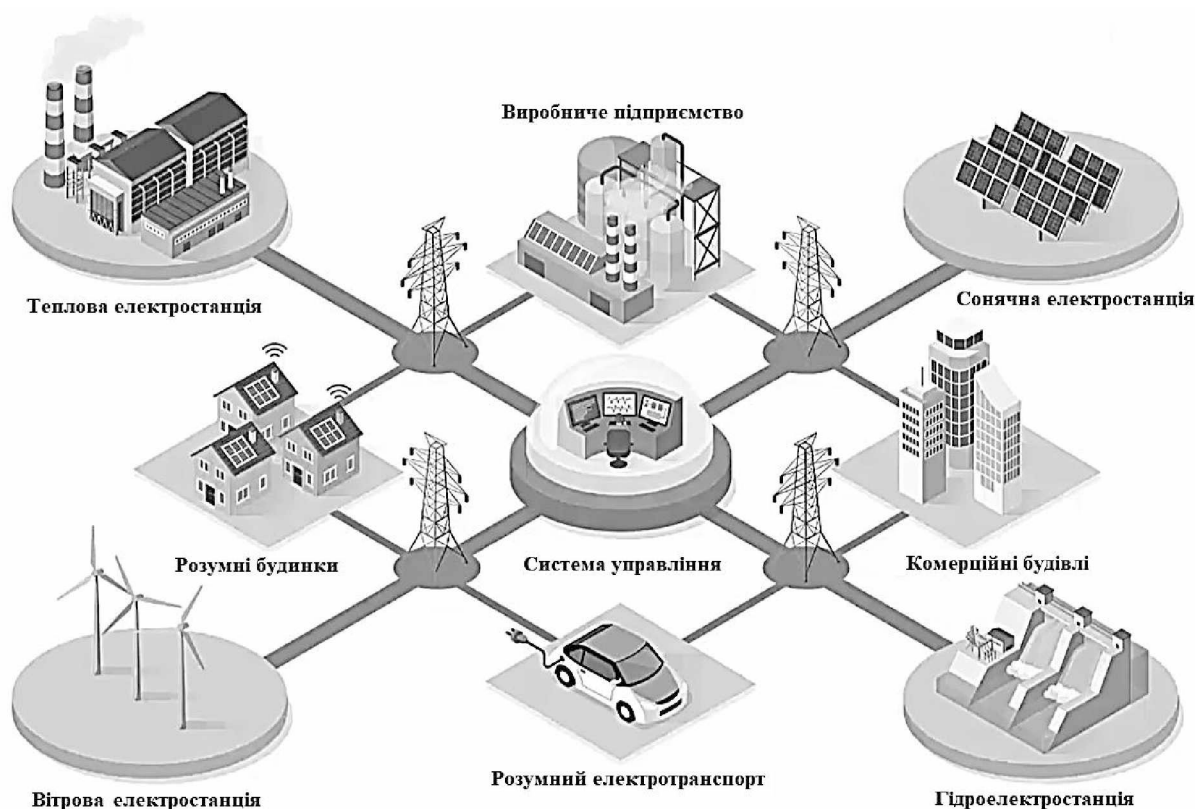


Рисунок 1.1 – Система «Smart Grid»

Для оптимізації управління енергопотоками кожне з підприємств намагається впровадити комплексні системи, які надають цим підприємствам можливість ретельно контролювати та керувати використанням різноманітних форм енергії. Це відбувається завдяки збиранню та аналізу даних у режимі реального часу, дає розуміння про тенденції споживання енергії та неефективність тих чи інших керуючих рішень. Виявляючи «вузькі місця» у енергетичній системі, вони дозволяють формувати, а інколи і здійснювати коригувальні заходи, спрямовані на підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності [3].

Шлях до «ідеального» управління потоками енергії на енергоємних підприємствах є складним та зустрічає всілякі непередбачувані виклики, але зайвий раз визначає ключову роль ефективних систем управління, що повинні однозначно бути застосовані, оскільки вони є «стрижнем» на шляху забезпечення енергоефективності та операційної швидкодії. Позитивні наслідки роботи систем керування виходять за межі підприємства, створюючи позитивний вплив на промисловий сектор і глобальну енергетичну картину.

Впровадження ефективних систем управління електропостачанням не можливо без дослідження питання по управлінню попитом (рис. 1.2). Тобто, необхідно дослідити таку складову, яка визначає змінні енергетичні потреби виробництв на різних етапах їх функціонування. Створені заздалегідь моделі енергоспоживання у режимі реального часу відгукуються на відповідні сигнали з боку споживача та узгоджують свою роботу з поведінкою як потужностей з генерації, так і з поведінкою елементів мережі. Зазначене призводить до можливості «пом'якшення» впливу від навантаження (поведінки споживачів) на енергетичну інфраструктуру у різні періоди та сприяє створенню більш стійкої та сталої енергетичної системи [4].



Рисунок 1.2 – Система управління попитом

Для більш універсальної компоновки системи керування, останню бажано розбити на низку підсистем, які постачені поширеною інфраструктурою датчиків вимірювання параметрів, системи зберігання енергії та враховує наявність розподілених енергетичних ресурсів. При наявності такої розвиненої системи, з'являються можливості для впровадження інтернет-технологій (рис. 1.3) [5].



Рисунок 1.3 – Схема впровадження інтернет-технологій

Ця остання платформа, завдяки використанню значної кількості датчиків і підключених пристроїв, забезпечує постачання надійної інформації для здійснення моніторингу та керування енергетичними системами в реальному часі. Комплексне використання інтернет-

технологій, аналітики великого об'єму даних і принципи штучного інтелекту дозволять значно розширити можливості системи керування електричною енергією, прогнозувати поведінку системи та окремих її складових, контролювати та керувати попитом – і все це за умови високого ступеня точності та надійності.

Будова системи керування електричною енергією на підприємствах повинна будуватися на основі наявних нормативно-правових актів, положень та вимог. Зазначені нормативи з певною періодичністю піддаються змінам та корегуванню, і більший акцент у них робиться на збільшення енергоефективності та безпеки. Складання систем керування повинно йти паралельно або з врахуванням у майбутньому змін у відповідних нормативах і вимогами, що в них зазначаються. Узгодження нормативної бази з цілями енергоефективності та безпеки є запорукою створення надійної системи енергетичного менеджменту на енергоємних підприємствах.

Інтеграція ефективної системи керування до технологічних процесів на підприємствах є не просто операційною вимогою, а стратегічним викликом, що забезпечить довгострокову життєздатність і стійкість підприємств на ринку відповідної продукції, дозволить їх бути більш конкурентоспроможними, особливо за наявності обмежених ресурсів. Робота підприємств визначається безліччю факторів невизначеності (коливання цін на енергоносії, перебої з постачанням енергії, непередбачувані погодні явища), що зайвий раз підвищує роль систем керування, завдяки стійкості у роботі, яку вони надають. Використання систем керування дозволяє створювати надійну енергетичну інфраструктуру, яка здатна швидко адаптуватися до мінливих умов та/або відновлюватися після настання критичних ситуацій, забезпечуючи таким чином безперебійну роботу та виключаючи або зменшуючи негативні наслідки від настання цих ситуацій [6].

Запорукою забезпечення стійкості роботи системи може бути концепція забезпечення резервування та ефективний розподіл в ланцюгах постачання енергії – це дозволить значно зменшити ризик перебоїв у постачанні енергії – і ефективні системи керування у такому разі будуть відігравати найважливішу роль в організації керування потоками запасеної та надлишкової енергії, задовольняючи таким чином усі потреби з енергозабезпеченням [6].

Розширення системи виробництва, об'єднання виробництв, переорієнтація дозволяє у разі застосування прогресивних систем керування охопити не лише внутрішні операційні команди, але й зовнішні – шляхом посилення взаємодії з постачальниками енергії. Ці зусилля сприятимуть створенню «нетоксичного» середовища взаємодій та забезпечать сталість розвитку за умови дотримання або підвищення параметрів ефективності.

Не останню роль у будові ефективних систем управління електропостачанням відіграє її схильність до масштабованості, що викликається швидкими змінами у технологічних процесах виробництва поряд зі зростаючими потребами в енергії та необхідністю оперативного реагування. Здатність систем до масштабування гарантує, що структура управління енергією на підприємстві буде завжди надійною та гнучкою, незалежно від змін у виробничій діяльності підприємства (рис. 1.4).

Необхідною рисою систем керування є точна їх взаємодія з іншими системами на підприємстві та зовнішніми енергетичними структурами. Функціональна сумісність сприяє безперебійному зв'язку та координації між розрізненими системами, що дозволяє говорити про цілісність та інтеграційний підхід до управління енергією. Наявність такої цілісності та інтеграції має першочергове значення для використання всього потенціалу сучасних енергетичних технологій і досягнення найкращих показників управління енергетичними потоками [7].

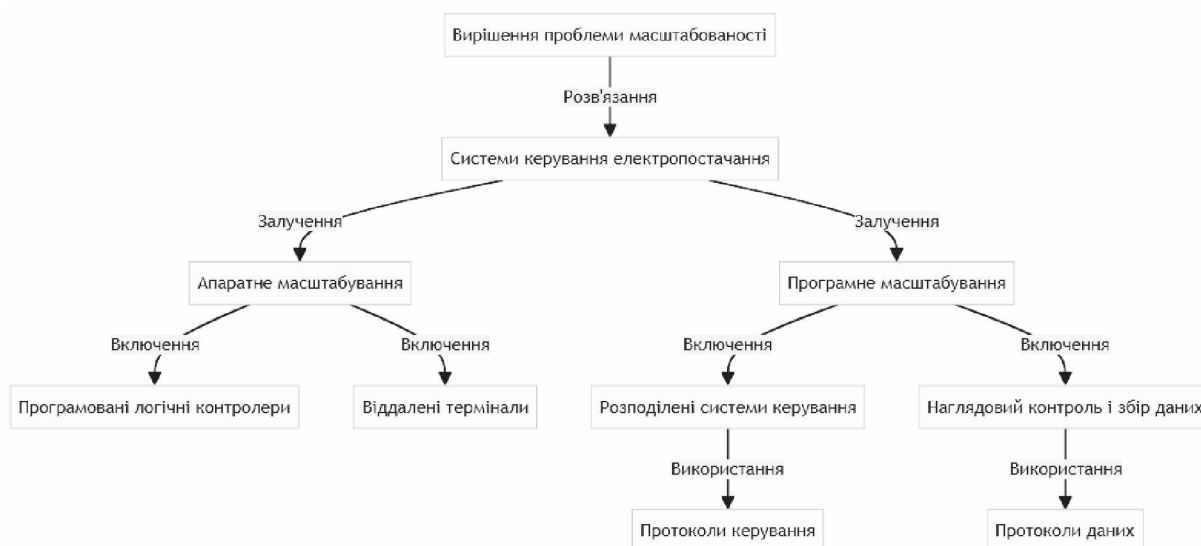


Рисунок 1.4 – Масштабованість систем керування

Початкові інвестиції в новітні технології систем керування необхідно розумно збалансовувати з очікуваною операційною економією та створенням довгострокової перспективи використання першої. Розроблена і впроваджена систем керування повинна не тільки оптимізувати використання енергії, але й забезпечити платформу для прогнозованого технічного обслуговування, тим самим зменшуючи простой технологічного та енергетичного обладнання й пов'язані з цим додатковими грошовими і людськими витратами. Це питання тісно пов'язано з необхідністю підготовки кваліфікованого персоналу, який здатен керувати та оптимізувати впроваджені системи [8].

Таким чином, шлях до ефективного управління енергопостачанням на підприємствах є багатогранним завданням, що поєднує операційні, технологічні, економічні та соціальні аспекти. Поєднання передових технологій, кваліфікованого персоналу, нормативно-правової бази та співпраці зацікавлених сторін є основою успішного впровадження систем управління електричною енергією.

1.2 Пошук можливостей по оптимізації систем електропостачання підприємств

Оптимізація систем керування електропостачанням є важливим кроком для досягнення операційної досконалості системи живлення. Останнім часом, поява та поступове вдосконалення технологій відновлюваної енергетики відкрили перспективні шляхи для підприємств, які прагнуть впровадити захист від нестабільності електропостачання при користуванні традиційними джерелами енергії. Інтеграція систем з альтернативного виробництва електричної енергії демонструє можливість розширення існуючої енергетичної інфраструктури та впровадження інноваційних рішень по зберіганню енергії. Створені таким чином системи дозволяють підприємствам використовувати запасену енергію в періоди високого попиту, тим самим забезпечуючи значну економію коштів і підвищуючи загальну енергоефективність (рис. 1.5) [9].



Рисунок 1.5 – Інтеграція систем з альтернативного виробництва електричної енергії

Питання оптимізації тісно пов'язані з технологією «Smart Grid», що являють собою певне «злиття» електротехніки та інформаційних

технологій. «Smart Grid» або розумні електромережі, оснащені широким набором датчиків і складних аналітичних інструментів, та надають у режимі реального часу інформацію про режими споживання енергії на підприємстві. Детальна інформація сприяє можливості динамічного управління попитом і пропозицією, забезпечити оптимальне використання енергетичних ресурсів, мінімізацію втрат й скорочення операційних витрат. При цьому отримуємо стійку енергетичну інфраструктуру, здатну швидко реагувати на потенційні збої, тим самим підвищуючи надійність і стійкість системи електропостачання (рис. 1.6) [10].

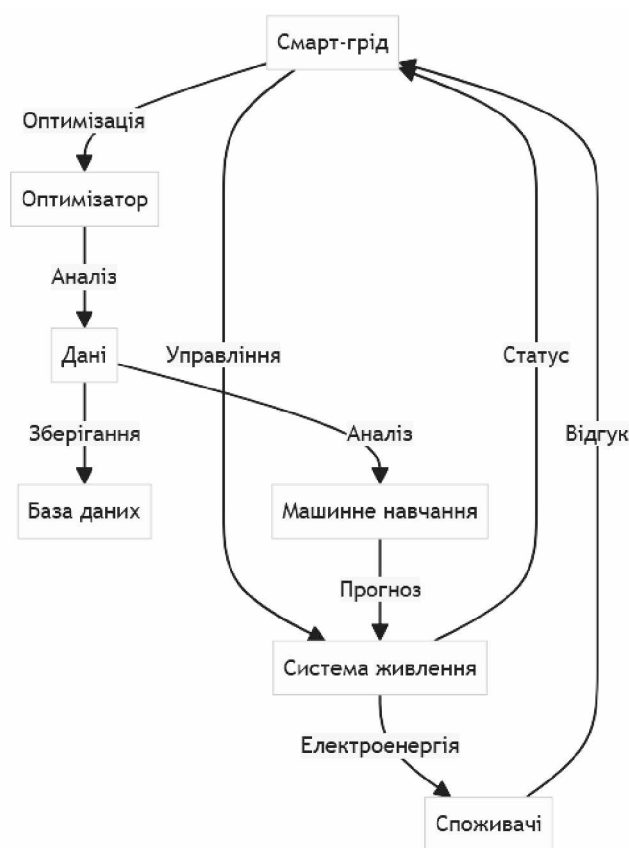


Рисунок 1.6 – Оптимізація системи керування електропостачанням за допомогою «Smart Grid»

Іншим, або паралельним, напрямком оптимізації може бути використання новітніх систем енергетичного менеджменту. Зазначені системи постачені засобами моніторингу в реальному часі та засобами

первинних аналітичних розрахунків, що дозволяє ретельно контролювати та керувати споживанням енергії у різних режимах та надавати чітке уявлення про споживання енергії у цих режимах, ідентифікувати та виправляти неефективні керуючі дії, дозволяє значно економити енергію та покращувати режими роботи енергетичного обладнання.

Іншим способом оптимізації може бути використання цілісного підходу, який може охопити не лише технологічні параметри, а й організаційні та поведінкові стани. Це вимагає не простих технічних рішень, що дозволяють здійснити певну модернізацію із заглибленням у культуру енергетичної свідомості, наявних програмних засобів, наслідків збільшення втрат енергії, відповідність визначеним стандартам і правилам, можливість впровадження ефективних систем електропостачання, можливість удосконалення способів споживання енергії, наявність відновлюваних джерел енергії та інших чинників (рис. 1.7) [11].



Рисунок 1.7 – Оптимізація системи керування електропостачанням за допомогою цілісного підходу

Розвиток сфери інформаційних технологій дозволяє більш широко використати нові рішення, серед яких можна виділити системи машинного навчання та штучного інтелекту. Зазначені технології можуть значно покращити прогностні та аналітичні можливості систем управління енергетичними потоками. Це стає можливим завдяки використанню значних масивів даних, які можуть бути отримані завдяки контролю роботи різноманітного обладнання підприємства. Алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту можуть з високою точністю прогнозувати

попит на енергію, оптимізувати постачання електричної енергії, виявляти несправності та аварійні стани та виправляти несумісності у режимі реального часу, що позитивним чином позначиться на підвищенні рівня оптимізації систем електропостачання (рис. 1.8) [12].



Рисунок 1.8 – Оптимізація системи керування електропостачанням за допомогою машинного навчання та штучного інтелекту

У останній час для підприємств у більшій мірі стали доступними інструментарії по оптимізації завдяки впровадженню інтернет-технологій, до яких приєднуються пристрої та датчики для збирання широкого кола детальної інформації, візуалізувати динаміку поведінки систем при

споживанні енергії. Інтеграція всіх зазначених складових до єдиної цифрової структури сприяють більш точному розумінню перетікання потоків енергії при її споживанні тим самим забезпечуючи більш цілеспрямовану та ефективну стратегію оптимізації систем електропостачання.

У промисловому секторі набуває популярності концепція використання мікромереж, які дозволяють підвищити надійність та ефективність систем електропостачання. Це досягається завдяки здатності мікромереж працювати незалежно та в поєднанні з основною мережею, підвищують гнучкість та стійкість системи живлення, забезпечують безперервне постачання електричної енергії, сприяють мінімізації часу простоїв та пов'язаних з ними витрат [13].



Рисунок 1.9 – Оптимізація системи керування електропостачанням за допомогою мікромереж

Розробка заходів по оптимізації охоплює здійснення завчасного технічного обслуговування з регулярним оновленням структури. Обслугована належним чином енергосистема не тільки працює з більшою ефективністю але і значно зменшує ризик неочікуваних простоїв, що негативним чином впливає на безперервність роботи підприємств. Застосування стратегії прогнозованого технічного обслуговування на основі даних, що були отримані завдяки сучасним інформаційним

технологіям та існуючих аналітичних інструментів може значно подовжити безпроблемну роботу та ефективність роботи системи електропостачання [14].

Питання оптимізації може бути розглянуто з точки зору налагодження покращених відносин з постачальниками електричної енергії, постачальниками технологій та іншими зацікавленими сторонами. Спільне цілеполягання та прояв позитивних ініціатив може призвести до розробки індивідуальних рішень, обміну найкращими практиками та використання колективного досвіду для вирішення складних енергетичних проблем – такі відносини дозволяють запровадити взаємовигідні сценарії по їх оптимізації.

Шлях до оптимізації систем електропостачання є багатограним завданням, яке потребує узгоджених зусиль по технологічному, організаційному та нормативному напрямках. Будь-які стратегії оптимізації визначають ключову роль ретельного планування, аналізу існуючої інфраструктури, визначення критичних областей та розуміння структури роботи підприємства. Даний аналіз слугує основою для розробки та впроваджуються стратегій оптимізації.

1.3 Неефективність існуючих систем управління електропостачанням

Неефективність існуючих систем управління електропостачанням у контексті енергоємних галузей є досить критичним питанням. Загалом, сучасна індустріальна економіка характеризується використанням різних енергетичних перетворень – механічних, теплових, хімічних й інших, що вимагає постачання значної кількості електричної енергії для того, щоб забезпечити їх продуктивну і безперервну діяльність. Наведені вище технологічні рішення визначення стану роботи в енергетичних системах,

нібито здатні підвищити ефективність та надійність енергозабезпечення. Однак під цим можна визначити непоодинокі випадки неефективності систем керування електропостачанням [15].

Додатковими викликами до такої неефективності стало широке приєднання до існуючих мереж генерації від відновлюваних джерел енергії. Інтеграція таких джерел енергії в існуючу структуру енергопостачання підприємств не тільки порушує енергетичний баланс, але і призводить до певної нестабільності енергопостачання, з якою не можуть впоратись більшість систем управління.

Впровадження інтелектуальних мережевих технологій («Smart Grid»), які часто називають панацеєю на шляху вирішення проблем управління енергопостачанням, безумовно, пропонують більш ефективні рішення з покращення процесу управління. Це можна пояснити тим, що такі мережі містять розгалужену мережу датчиків і наділені потужним аналітичним апаратом, – це дозволяє здійснювати моніторинг стану більш досконало та дозволяє у більшій мірі оптимізувати використання електричної енергії на підприємствах. Тим не менш, впровадження систем енергетичного менеджменту не позбавлений недоліків, які можуть бути пояснені їх інтеграцією до існуючих систем управління електропостачанням, відсутністю цілісного підходу до принципів управління енергією, неоптимальні алгоритми розподілу енергії. Досить часто існуючі системи часто працюють у системах, що характеризують розрізнені підсистеми та обробляють різні види енергії та керують різними процесами. Усе зазначене не тільки породжує неефективності але й перешкоджає повному розумінню протікання процесів та управлінню енергетичними процесами на підприємствах [16].

Перешкодою також можуть бути підвищені вимоги та потреби в обробці значної кількості даних та швидко приймати рішення в реальному часі, що може перевищувати можливості існуючих систем. Затримка у передачі даних може проявитись на будь-якому етапі – збиранні, обробці та

використанні даних при обчисленні, що часто перешкоджає своєчасному прийняттю рішень, що має ключове значення для досягнення цілей мінімізації втрат та оптимізації енергоспоживання. Зазначена проблема може бути суттєво погіршена через використання застарілої інфраструктури та морально і фізично застарілих електронних пристроїв.

Існуючі системи керування електропостачанням часто проявляють недостатню адаптивність до структури енергетичної мережі, яка може змінюватися як у просторі, так і у часі та не встигати забезпечувати високий рівень гнучкості та адаптивності. Застарілим системам, які працюють за жорсткими алгоритмами та протоколами поведінки, досить важко пристосуватися до зазначених швидких змін, що перешкоджає оптимальному управлінню енергією та перешкоджає повній інтеграції нових технологій [15].

Відсутність однозначності вимог у нормативних документах та відсутність у деяких випадках стимулів до модернізації систем управління електропостачанням ще більше погіршує неефективність такого керування. Це можна пояснити відсутністю фінансових стимулів або достатньої інформації про ефективність модернізації для підприємств, що призводить до упередженості по відношенню до впровадження зазначених заходів.

У деяких випадках знижена ефективність від впроваджених заходів пояснюється відсутністю достатньої кваліфікації персоналу для управління, експлуатації та обслуговування складних систем управління енергопостачанням. Сучасні енергетичні структури вимагають від персоналу спеціальних навичок та знань у сфері електротехніки, електроніки, обробки даних та інформаційних технологій.

Удосконалення принципів енергетичного менеджменту дозволило досягти певних успіхів у царині систем керування енергопостачанням але неефективність, притаманна існуючим енергетичним системам, значно перешкоджає реалізації ефективного, надійного та сталого керування енергетичною структурою енергоємних підприємств. Зазначена

неефективність пояснюється інколи передчасним та неефективним поєднанням технологічних, нормативних, людських та інформаційних ресурсів. Для розв'язання зазначених проблем необхідно здійснити та запровадити цілісний підхід, що охоплює оновлення технологічних факторів, нормативної бази, наявність і підготовку відповідного людського ресурсу. Пошук найкращих шляхів усунення зазначеної неефективності потребує узгоджених зусиль зацікавлених сторін: державних установ, представників відповідної галузі та наукові установи [17].

Шлях до усунення недоліків, притаманних існуючим системам управління електропостачанням, необхідно почати з визнання системного характеру наявних проблем: визначення можливості або необхідності модернізації інфраструктури, застосованих систем управління, наявність технологій по збиранню даних та здійснення аналітичних розрахунків у реальному часі та надійність мереж передачі даних. Необхідною умовою також є впровадження інновацій та адаптивність до нових умов роботи і включати клієнтоорієнтований підхід. Довгострокове бачення відносно усунення неефективності існуючих систем управління електропостачанням вимагає системного підходу, поглиблення взаємодії між різними енергетичними системами та цифровими платформами. Однак, реалізація зазначених передових концепцій потребує фундаментального перегляду існуючих систем керування електропостачанням для забезпечення і оснащення цих систем необхідними обчислювальними та комунікаційними можливостями. Системи машинного навчання та штучного інтелекту можуть стати у нагоді для подолання існуючої неефективності та розробки систем управління електричною енергією, що самонавчаються, здатних до постійної оптимізації складених моделей споживання енергії на основі отриманих даних у реальному часі та здійснення прогнозової аналітики.

2 ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ

2.1 Огляд літературних джерел по дослідженню підвищення якості керування електропостачанням

У статті [18] розглядаються питання управління продуктивністю, як ключовим фактором в реалізації стратегії роботи енергоємного підприємства. При цьому відзначається важливість управління наявними ресурсами в умовах конкуренції. Автори вказують, що це можна здійснити шляхом використання принципу збалансованості системи показників. У роботі представлено аналіз та проектування системи управління, яка включає стратегічне управління, планування, консультування та оцінювання. Була розроблена система, яка використовує сучасні інформаційні технології, і включає модулі для управління даними, стратегією, продуктивністю та визначає комунікативні зв'язки. Складена система дозволяє ефективно інтегрувати цілі для їх практичної реалізації. Зазначається, що система потребує подальшого удосконалення для більш детальної функціональності та зручності керування.

У статті [19] розглядаються питання комплексної оцінки системи управління відносинами з клієнтами на енергопостачальних підприємствах. Для спрощення системи показників були використані методи визначення головних компонентів та підходів на основі розрахунків опорних векторів. У роботі були розглянуті лінійні та нелінійні випадки та здійснено практичний аналіз на базі реального енергопостачального підприємства. Зроблені висновки визначають, що складена модель може ефективно класифікувати та оцінювати поведінку складових системи, за умови високої точності роботи. Вибір різних базових підходів та вихідних даних може вплинути на точність роботи системи та вимагає подальших досліджень.

У статті [20] розглядаються питання проектно-орієнтованого управління на енергопостачальних підприємствах. Автори акцентують увагу на необхідності переходу від традиційних підходів керування до проектно-орієнтованого управління. При цьому розглядаються два типи проектних команд: зосереджені на операційній діяльності та на інноваційній діяльності. Операційні команди фокусуються на виробничо-управлінській роботі та працюють на «нижньому рівні» керування, а інноваційні команди зосереджуються на «вищому рівні» досліджень та нових технологіях. Запропонована система керування допомагає адаптуватися до нових вимог у сфері енергопостачання за умови забезпечення специфічних вимог до їх функціонування.

У статті [21] розглядається динаміка ринку електричної енергії на основі здійснення моделювання системи. Визначається необхідність ефективного управління динамічними процесами на ринку електричної енергії, особливо в умовах існуючої дерегуляції та принципів конкуренції. Модель поведінки системи враховує зв'язки та залежності між генерацією, розподілом та споживанням при можливості керування цим процесом. Складена модель базується на використанні чисельних нелінійних диференціальних рівняннях зі зворотними зв'язками та часовими затримками. Модель враховує розмір інвестицій, витрати на генерацію, оперативні витрати та можливі прибутки. У роботі здійснено чисельний аналіз для конкретних умов генерації та розподілу електроенергії в конкретних умовах господарювання. Результати показали відповідність та доцільність використання складеної моделі.

У статті [22] розглядаються модель визначення цін на електроенергію та управління перевантаженням в об'єднаних енергетичних ринках. Основна ідея полягає в використанні принципу «Market Splitting», який вже використовується у ряді країн Європи для створення єдиного ринку електроенергії. Стаття описує складену імітаційну модель, у якій реалізується метод, що визначає компроміс між ціноутворенням та

розбиттям ринку на зони – основним критерієм для управління є мінімізація витрат. Авторами також були розглянуті математичні моделі для оптимізації роботи систем електропередач з використанням кривих споживання для різних зон у якості критеріїв оптимізації. У статті представлені результати чисельних досліджень, які підтверджують ефективність запропонованого методу для управління потужностями в складних електроенергетичних системах. Доводиться, що представлена метода має потенціал для розв’язання проблеми управління потужностями з економічної та технологічної точок зору.

У статті [23] увага зосереджена на дослідженні систем управління аварійними ситуаціями на електропостачальних підприємствах. Автори пропонують до застосування модель управління аварійними ситуаціями для енергоємних підприємств, для яких суттєвими є як внутрішні так і зовнішні фактори ризику. Для цього модель використовує інтерпретативне структурне моделювання для здійснення тестів з метою оптимізації системи на основі градації станів. Модель аналізує значну кількість ключових факторів, що впливають на безпеку та ефективність роботи електропостачальних підприємств. Серед цих факторів можна відзначити природні, економічні, соціальні, технічні, організаційні та інші. Автори приходять до висновку, що для забезпечення стабільної роботи електропостачальних підприємств необхідно не лише впроваджувати пряме управління, але і суттєво враховувати вплив зміни зазначених факторів.

У статті [24] розглядаються питання, що дозволяють здійснити аналіз для покращення надійності електропостачання. У роботі було розглянуто ключові аспекти управління надійністю: планування, проектування, будівництво, експлуатацію та обслуговування електроенергетичних систем. Основна увага приділяється статистичному аналізу показників надійності та існуючим проблемам енергетики. Робота містить аналіз існуючих проблем при огляді статистичних даних про надійність

електропостачання – визначені невідповідність статистичних параметрів, застарілі методи статистики та недостатність уваги до управління надійністю у деяких важливих елементах енергетичних систем. Автори пропонують систему статистичного аналізу для оцінки надійності, що зможе забезпечити ефективну підтримку прийняття рішень для покращення надійності електропостачання. Були розглянуті причини непередбачених відключень, впливи магістральних мереж та розподільчі мережі. Визначено основні причини відключень магістральних мереж, пов'язаних з обслуговуванням, тестуванням та будівництвом, та такі ж причини для розподільчих мереж – зношення, порушення ізоляції та природні фактори.

У статті [25] розглядається можливість використання значення споживання (навантаження) як даних для забезпечення надійності електроенергетичних систем. Сучасні технології комунікацій та управління дозволяють для деяких видів навантаження здійснювати регулювання та управління. Знання про ступінь навантаженості системи може бути використаний для підвищення надійності роботи системи через точність керування. Розглядаються проблеми, пов'язані з моніторингом значних скупчень незначних навантажень та пропонує можливі рішення зазначеної проблеми. У роботі розглядається концепція оптимізації, що може вирішує проблеми електропостачання при наданні енергетичних послуг. Автори пропонують розв'язання зазначених проблем, зокрема шляхом диференційованого підходу при наданні послуг з постачання енергії.

У статті [26] розглядається критична роль покращеного управління для надійної та ефективної роботи електроенергетичних систем. Автори акцентують увагу на нестандартних проблемах управління, які виникають через велику різноманітність контролерів, які в теперішній час діють в різних режимах та на різних рівнях системи електропостачання. У статті пропонується новий підхід до покращення системи управління, який

дозволяє енергетичній системі функціонувати досить надійно у широкому діапазоні навантажень та при різних станах обладнання. Основна ідея полягає у використанні комп'ютерних інструментаріїв для підтримки прийняття рішень операторами в аварійних режимах роботи системи. Запропоновано багаторівневий підхід, який полягає у здійсненні кількох шляхів: он-лайн збір характерних показників, моніторинг стану споживачів на основі кількісних показників їх роботи, використання отриманих даних для корегування сигналів управління з одночасним визначенням змін у системі при переході з одного режиму в інший. У статті також аналізуються переваги покращеного управління на прикладі складеної моделі та розглядає можливість ефективного використання ресурсів в нормальних режимах роботи за допомогою складеної багаторівневої архітектури моніторингу та управління електричною системою.

У статті [27] аналізуються існуючі методи керування електроенергетичними системами, та досліджується, як ці методи дозволяють адаптуватися до нових регулятивних та технологічних змін. Були визначені ключові питання, які визначають майбутні методи керування, що дозволяють підтримати задану надійність, покращити рівень обслуговування та вплив зовнішніх факторів на роботу системи передачі. У роботі обговорюється підхід по визначенню «помилки керування», яка може бути мірою ефективності здійсненого керування. Була також розглянута концепція «розподілених послуг» під час керування виробництвом, передачею, розподілом, наданням послуг за умови справедливого ціноутворення. Зазначене може сприяти більш ефективному наданню послуг з керування потоками енергії та провокує поглиблення та посилення ринкової динаміки в наданні послуг з зазначеного керування. Пропонується розвивати більш відкритий ринок, що керується законами попиту та пропозиції та вимагає розробки покращених стандартів для надання послуг з керування енергопостачанням.

У статті [28] було розглянуто новітні досягнення у сфері керування електроенергетичними системами. Особлива увага акцентується на проблемах «вузьких місць» при передачі керуючих сигналів та недостатність керуючої інформації через наявні обмеження по її отриманню.

У роботі представлено опис гнучких систем передач змінного струму, як ефективне рішення для підвищення гнучкості під час керування електроенергетичними системами. Зазначені системи здатні ефективно керувати як активною, так і реактивною потужністю, тим самим збільшуючи ефективність роботи існуючих засобів. Були розглянуті різні варіанти та наповнення пропонованих систем: широке використання статичних та керованих компенсаторів реактивної потужності, що дозволяє ефективно компенсувати реактивну потужність. У роботі підсумовується, що запропонована технологія може бути кошовною на початку її впровадження, але згодом дозволить вирішувати організаційні, фінансові та експлуатаційні проблеми.

У статті [29] були розглянуті проблеми в області керування електроенергетичними системами та можливі шляхи їх вирішення. Основну увагу було приділено питанням реактивної потужності та керуванню напругою, як ключовим факторам, що можуть ускладнити оперативне керування. Автори пропонують використання пристроїв для зберігання енергії, що керуються мікропроцесорами та засобами силової електроніки, що з'єднуються через комунікаційну мережу для покращення властивостей керування. Особлива увага приділяється новітнім технологіям на базі волоконно-оптичної комунікації, які можуть бути інтегровані в загальну структуру керування для ефективного управління електроенергетичними системами. Автори проаналізували ключові фактори, які ускладнюють процеси ефективного керування, існуючі на цьому шляху обмеження та зростаючу конкурентність між різними електроенергетичними системами.

У статті [30] основну увагу зосереджено на аналізі нестабільності живлення з корекцією коефіцієнта потужності при взаємодії з різними джерелами змінного струму. Були розглянуті математичні моделі різних типів джерел та їхня взаємодія з точки зору вимог до стабільності електропостачання. Визначено не сумісність між окремими джерелами, що може призвести до системної нестабільності та повної втрати контролю керування, що може викликати ризики виникнення коливань напруги та струму. До практичного застосування автори пропонують кілька методів аналізу стабільності, включаючи вивчення вхідних та вихідних характеристик джерел живлення. Наводяться приклади нестабільних систем та обговорюються можливі рішення проблем з покращення стабільності, здійснюється глибокий аналіз та розуміння проблем, пов'язаних з їх важливістю їх вирішення для систем живлення.

У статті [31] з метою підвищення стабільності та безпеки електроенергетичних систем, розглянуто можливість використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для оптимізації кількості, якісних параметрів та розташування обладнання для здійснення керування реактивною потужністю. У якості ШНМ було обрано два типи – багатошаровий перцептрон та мережа, що самостійно навчається. Обидва типи мереж здійснюють оцінку різних способів встановлення компенсуючих пристроїв, а якість роботи ШНМ оцінюється шляхом визначення стабільності роботи системи та дотримання показників безпеки – для цього було визначено чотири рівні прийнятності. Для тренування ШНМ автори розробили відповідні математичні моделі та алгоритми, використали різні методики навчання (з «вчителем» та «без вчителя»), а також способи і критерії адаптації ваг. Результати досліджень можуть бути корисним для застосування в практичних цілях, оскільки вони пропонують новітні методики для оптимізації способів керування електроенергетичних систем.

У статті [32] здійснено аналіз стабільності роботи електричної мережі з потужними споживачами, що живляться від перетворювачів, при цьому основна увага приділяється впливу роботи цих систем на якість електричної енергії в мережах середньої напруги. Було представлено математичний аналіз явищ, що виникають в промислових електричних мережах, а також визначено теоретичне і практичне використання комп'ютерних моделей для аналізу зазначених явищ. Особлива увага приділяється проблемам вищих гармонік та способам їх компенсації. Зокрема, розглядається використання активних фільтрів потужності для зниження рівня цих гармонік. Також розглядається проблема резонансу, що може виникати в електричних системах при використанні статичних перетворювачів, і пропонуються різні способи і методи контролю для усунення зазначених проблем. У статті також представлено результати комп'ютерного моделювання та натурні випробування, які доводять адекватність представлених моделей для їх використання з метою підвищення стабільності та якості електричної енергії в промислових мережах.

У статті [33] наведено ґрунтовний аналіз методів, що використовуються для компенсації реактивної потужності в електроенергетичних системах. Для її оцінки пропонується здійснити аналіз спрощеного коефіцієнта спотворення і представлено два основних методи її компенсації. Перший метод базується на рівності між явною та уявною активною потужностями, а другий – акцентує увагу на рівності між активною та повною потужністю. В статті були складені математичні рівняння та розглянуті моделі, що описують наведені методи, які використовуються для оцінки параметрів стабільності. Симуляції поведінки системи проводились для різних сценаріїв. Було зазначено, що вибір методу компенсації реактивної потужності може суттєво впливати як на стабільність напруги. Визначено і доведено ефективність застосування розроблених моделей для контролю процесів у електричних системах.

2.2 План заходів по покращенню оптимізації функціонування системи управління електропостачанням

Для визначення заходів по покращенню оптимізації функціонування системи управління електропостачанням можна скласти план дій, який визначає методичний підхід, заснований на глибокому розумінні поточних показників роботи системи, визначені потенційних областей для вдосконалення та застосуванні сучасних знань для досягнення бажаного ступеня оптимізації. Складемо такий план з описом його складових.

1. Оцінка поточного стану системи електропостачання та здійснення порівняльного аналізу – на початковому етапі оптимізації системи управління електропостачанням необхідно здійснити її ретельну оцінку для розуміння існуючих робочих параметрів і визначення контрольованих показників. На цьому етапі необхідно здійснити дві дії: оцінку системи та порівняльний аналіз [34]:

- оцінка системи полягає у здійсненні комплексного аудиту системи управління електропостачанням для оцінки поточних показників ефективності та надійності її роботи та швидкості реагування на зміни в роботі мережі. Для цієї роботи необхідно залучити кваліфікованих виконавців здатних використати розширені інструменти діагностики для виявлення наявних проблем та відхилень, що перешкоджають досягненню оптимальної продуктивності роботи мережі. Наостанок необхідно задокументувати результати вимірювань, які стануть основою для здійснення порівнянь після здійснення оптимізації,

- порівняльний аналіз полягає у проведенні роботи з порівняння показників роботи системи управління електропостачанням з галузевими стандартами та показниками роботи аналогічних систем, які працюють в подібних режимах. Порівняльний аналіз виявляє «слабкі місця» та виокремлює області, що можуть бути поліпшені з точки зору оптимізації.

Для здійснення аналізу можуть бути використані програмні інструменти та методи розрахунку, що забезпечують точність і адекватність цього процесу. Результати порівняльного аналізу надають чітку картину стану системи, що досліджується, та визначає порядок дій для її ефективної оптимізації.

2. Збирання і аналіз даних – більш надійний підхід до оптимізації можна реалізувати шляхом збирання і аналізу даних, які отримують при безпосередньому функціонуванні системи на різних режимах [35]:

- збирання даних дозволяє отримати масив статистичних відомостей про минулі параметри роботи системи та параметри у реальному часі, пов'язаних з роботою систем управління електропостачанням. Для збирання даних про роботу системи бажано використовувати провідні високоточні прилади та вимірювальні системи, які визначають розподіл навантаження і його параметри, ефективність роботи системи керування та випадки виникнення збоїв у роботі мереж живлення. Необхідно також збирати дані про зовнішні фактори, що можуть вплинути на роботу системи керування. Точність і повнота зібраних даних може мати вирішальне значення для здійснення подальшого аналізу,

- для аналізу зібраних даних можна використати сучасні аналітичні методи розрахунків, статистичний аналіз, алгоритми машинного навчання та прогнозне моделювання. Ці методи дозволяють виявити стійкі закономірності, аномалії поведінки та потенційні області та/або межі, де спостерігається неефективність роботи системи керування. Метою цієї роботи є отримання корисної інформації, що може стати основою для подальшої оптимізації систем керування електропостачання,

- синтез результатів аналізу зібраних даних дозволяє скласти зрозумілі звіти та візуалізувати їх. Для цього можуть бути використані програмні продукти та інструменти візуалізації статистичної інформації. Отримані візуальні картини сприяють кращому розумінню поточного стану систем управління електропостачанням.

3. Визначення можливостей оптимізації – після накопичення значної кількості даних і попереднього розуміння процесів на попередніх етапах, можна сконцентруватися на визначенні конкретних можливостей по оптимізації систем управління електропостачанням, для чого можна використати оброблені дані [36]:

- виявлення неефективності систем управління електропостачанням можна здійснити на основі результатів аналізу даних про втрати енергії, виникнення дисбалансу потужності, неспрацьовування захисту від перенапруг або неоптимальний розподіл потужностей по гілкам,

- пошук сучасних технологій і методологій, які можна згодом використати для усунення виявленої неефективності роботи системи управління електропостачанням. Для цього якнайкраще підійдуть останні досягнення в енергетичній електроніці, технології розумних мереж і систем управління потоками енергії,

- проведення техніко-економічного аналізу для обраних способів оптимізації. Цей аналіз повинен охоплювати технічну, економічну та технологічну можливість здійснення оптимізації, і дозволить визначити найкращий варіант,

- здійснений аналіз дозволяє визначити пріоритети по оптимізації систем управління електропостачанням на основі таких факторів, як їх потенційний вплив, економічна ефективність та узгодженість з цілями досліджень. Це можна реалізувати шляхом встановлення ієрархії оптимізаційних факторів, що дозволить більш ефективно розподіляти наявні ресурси при здійсненні оптимізації за умови максимізації кінцевого результату.

4. Розробка стратегій оптимізації систем управління електропостачанням – є ключовим етапом у переході від визначених можливостей до чітко сформульованої стратегії, яка поєднує технологічні, операційні та управлінські рішення, спрямовані на досягнення бажаної оптимізації. Формулювання детальної стратегії повинна містити бажане

оновлення технологічного обладнання, модифікацію процесів та навчання персоналу – усе, що необхідно для досягнення бажаних результатів, встановлюються чіткі цілі, часові рамки та бажані показники ефективності, за якими можна оцінити кожну стратегію [37]:

- оновлення технологічного обладнання визначається ситуативно і полягає у інтеграції сучасної енергетичної електроніки, впровадження технологій розумних мереж або сучасних систем управління перерозподілу потоків енергії. Запропоновані до застосування технології повинні бути сумісними з існуючою інфраструктурою системи управління електропостачанням і нормативно відповідають галузевим стандартам,

- відповідним чином модифікувати процеси, спрямовані на підвищення ефективності роботи, покращення керування навантаженням і зменшення втрат енергії. Цей процес може включати перегляд операційних протоколів функціонування елементів, оптимізацію робочих процесів з одночасним впровадженням нових механізмів моніторингу та контролю. Модифікація процесів не повинна порушувати функціональність системи управління електропостачанням.

- необхідна цілеспрямована розробка комплексної програми навчання персоналу, що наділяє їх необхідними знаннями та навичками, необхідними для ефективного впровадження стратегій оптимізації. Підготовка має охоплювати як отримання теоретичних знань, так і для набуття практичних навичок, з адаптацією до конкретних технологій і процесів,

- визначення ресурсів, необхідні для реалізації стратегій оптимізації фінансових, людських та технологічних, що полягає у розробці детального бізнес-плану із зазначенням передбачуваних витрат і визначення достатності фінансування для безперебійної реалізації стратегій оптимізації,

- оцінка ризиків, які полягають у визначенні потенційних проблем або перешкод, що можуть виникнути на етапі впровадження, що нівелюється

шляхом розробки плану ліквідації надзвичайних ситуацій, щоб зменшити ризики при здійсненні оптимізації.

5. Реалізація стратегій оптимізації – провідний етап, важливість підходу до якого полягає у ретельності планування та координації для забезпечення успішного втілення розроблених стратегій у відчутне покращення систем управління електропостачанням [37]:

- поетапне впровадження, що дозволить зменшити непередбачуваність та забезпечити плавність переходу до «нового» якісного стану. При цьому необхідно розставити пріоритети реалізації стратегій на основі їх потенційного впливу, здійсненності та готовності системи та персоналу,

- здійснення моніторингу для відстеження прогресу впровадження в режимі реального часу, для чого необхідно використати вдосконалені інструменти та системи для збору даних про ключові показники ефективності за мірою їх прояву при впровадженні. Будь-які відхилення від запланованих часових рамок або очікуваних результатів повинні бути негайно виявлені та усунені,

- нормативна відповідність та забезпечення якості – усі технологічні впровадження та удосконалення повинні знаходитися у відповідності до галузевих стандартів та нормативних вимог. Це можна перевірити на різних етапах впровадження, щоб переконатися, що досягаються бажані рівні ефективності та надійності.

- керування змінами шляхом запровадження структурованої програми управління змінами для сприяння більш плавному переходу за умови використання комунікаційних стратегій для поточного інформування всіх зацікавлених сторін,

- усунення несправностей та поточне налаштування, що можна реалізувати шляхом створення спеціальної команди для усунення несправностей і внесення необхідних коригувань під час впровадження. Команда повинна бути добре оснащена відповідним інструментарієм та

повноваженнями для оперативного вирішення будь-яких технічних або операційних проблем для запобігання розвитку аварійних та непередбачуваних ситуацій,

- процес впровадження повинен бути ретельно задокументований, зафіксовані деталі технологічних оновлень, змінні поточного процесу, ситуації, що виникли, та рішення, що були прийняті. Накопичена документація використовується для оцінки успішності заходів з оптимізації та для планування майбутніх напрямків оптимізації.

6. Моніторинг продуктивності та постійність удосконалення, що може стати надійною основою для визначення продуктивності систем управління електропостачанням для гарантування, реалізації та підтримки запланованих покращень з огляду на мінливі операційні стани та протікання технологічного процесу [38]:

- створення надійної структури моніторингу ефективності, оснащеною провідними інструментами та системами, що мають змогу збирати дані в режимі реального часу по відношенню до ключових показників ефективності,

- створення структурованої системи зворотного зв'язку для спрямування інформації, отриманої від системи моніторингу, у зворотній бік для покращення процесу оптимізації. Створення цього циклу має полегшити ідентифікацію будь-яких відхилень, не ефективних рішень або пошуку нових можливостей по оптимізації,

- спонукання ініціативи постійного вдосконалення та подальших технологічних оновлень і удосконалення процесів, що керуються даними, отриманими з системи моніторингу,

- оцінка ефективності стратегій оптимізації та запроваджених ініціатив з постійного вдосконалення на основі зібраних системою моніторингу даних і порівняння показників ефективності після оптимізації з контрольними показниками, що були визначені до оптимізації, та у відповідності до встановлених цілей,

- періодичне порівняння нових параметрів продуктивності систем управління електропостачанням із галузевими стандартами, що надає уявлення про позиціонування системи у загальних структурах та відносність до галузевих еталонних показників для висвітлення областей, придатних для подальшого вдосконалення,

- оцінка адаптивності систем управління електропостачанням до нових технологій та оновлених галузевих стандартів, що дозволить підтримувати процес оптимізації в довгостроковій перспективі.

7. Належне документування та передача отриманих відомостей (знань) для забезпечення того, щоб зусилля з оптимізації були зрозумілими, легко відтворюваними та забезпечили основу для майбутніх удосконалень [39]:

- важливо ретельно документувати кожен аспект процесу оптимізації: результати початкової оцінки, аналіз даних, стратегію оптимізації, процедури впровадження, оцінку ефективності та запроваджені ініціативи. Документація повинна бути структурована, зручна для обробки та зберігання і надійно захищена,

- процес передачі знань повинен бути структурований для того, щоб гарантувати їх отримання усіма зацікавленими сторонами, проведення навчальних занять, семінарів та підведення підсумків процесу оптимізації,

- визначення та документування найкращих поведінкових сценаріїв (практик), що були отримані під час процесу оптимізації. Ці практики можуть слугувати орієнтиром для визначення напрямку зусиль з оптимізації в майбутньому,

- створення централізованої бази даних (сховища) для зберігання документації, навчальних матеріалів та інших ресурсів і знань, отриманих у процесі оптимізації. Зазначена база повинна бути легкодоступною для всіх відповідальних і зацікавлених сторін,

- запровадження процесу оновлення наявної документації – необхідно встановити порядок періодичного перегляду та оновлення документації,

щоб переконатися, що вона залишається точною, актуальною та відображає будь-які зміни чи запроваджені вдосконалення, внесені до систем управління електропостачанням.

9. Перевірка відповідності нормативним вимогам і управління ризиками полягає у забезпеченні дотримання відповідних нормативних вимог і ефективного управління ризиками для пом'якшення потенційних аварій [39]:

- здійснення ретельної оцінки заходів для того, щоб переконатися, що всі ініціативи по оптимізації відповідають чинним законам, стандартам і галузевим нормативам, що можна зробити із залученням експертів з правових і галузевих питань,

- визначити потенційні ризики та небажані стани, які можуть перешкодити процесу оптимізації або негативно вплинути на продуктивність систем управління електропостачанням. Зазначене може охоплювати технічні, операційні, фінансові та регуляторні ризики. Оцінку ризиків можна оцінити за допомогою теорії ймовірності та потенційні впливи цих ризиків,

- розробити комплексний план зменшення ризиків та небажаних станів із зазначенням підходів і засобів, які необхідно вжити для зменшення негативних проявів. Це можна здійснити шляхом запровадження превентивних заходів для уникнення цих проявів та зменшити ризики, шляхом складання плану дій на випадок непередбачених ситуацій та плани на випадок необхідності здійснення відновлення до нормального стану після настання будь-яких несприятливих подій,

- здійснення постійного моніторингу відповідності і дотримання всіх відповідних нормативних вимог для відстеження всіх показників відповідності в режимі реального часу,

- здійснення постійного моніторингу для негараздів та управління ризиками для постійного відстеження цих явищ, оцінки ефективності

заходів з пом'якшення впливу негативних явищ та виявлення будь-яких потенційних ризиків. Оновлена структура сприяє своєчасному прийняттю рішень і швидкому реагуванню для пом'якшення несприятливих впливів, ризиків та явищ,

- ретельне документування всіх дій та прийнятих рішень з дотримання вимог та управління ризиками, що вимагає створення регулярних звітів, які містять інформацію для зацікавлених сторін, забезпечувати прозорість і підзвітність у процесі оптимізації.

10. Оцінка та звітність – етап оцінювання має вирішальне значення для оцінки загального успіху заходів з оптимізації, звітність забезпечує прозорість і створює основу для прийняття обґрунтованих рішень щодо визначення майбутніх заходів з оптимізації [39]:

- ретельна оцінка ефективності дозволяє оцінити вплив запроваджених стратегій оптимізації, направлених на покращення продуктивності роботи систем управління електропостачанням. Дані, зібрані системою моніторингу можна використати для порівняння показників ефективності після здійснення оптимізації з контрольними показниками, виміряними перед оптимізацією. Оцінювання повинно охоплювати технічні, операційні та фінансові аспекти для забезпечення цілісного уявлення про успішність оптимізації,

- порівняння контрольних показників для оцінки кінцевого застосування оптимізованої системи управління електропостачанням і що вона відповідає галузевим стандартам та нормативним актам. зазначене порівняння дозволить зрозуміти конкурентоспроможність застосованої систем управління електропостачанням після оптимізації та висвітлити додаткові сфери її вдосконалення,

- здійснення аналізу витрат, вигод та прибутків для оцінки економічної доцільності оптимізації. Це можна виконати шляхом оцінки витрат, що були понесені під час процесу оптимізації, здійснити порівняння отриманих вигод з точки зору економії енергії, підвищення

ефективності та надійності роботи системи і покращення параметрів безпеки,

- оцінка отриманого досвіду для фіксації знань, отриманих під час процесу оптимізації, аналіз задокументованих успіхів, труднощів та ефективних стратегій, застосованих і виявлених під час оптимізації,

- створення докладних звітів, що пояснюють результати оцінки ефективності, порівняння контрольних показників, аналіз витрат та вигод для оцінки отриманого досвіду. Структура звітів повинна бути зрозумілою, доступною та мала певний ступень захисту від стороннього втручання,

- розробка на основі результатів оцінки проведеної роботи рекомендацій щодо майбутньої оптимізації.

3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Схему розташування трансформаторних підстанцій наведено на рис. 3.1.

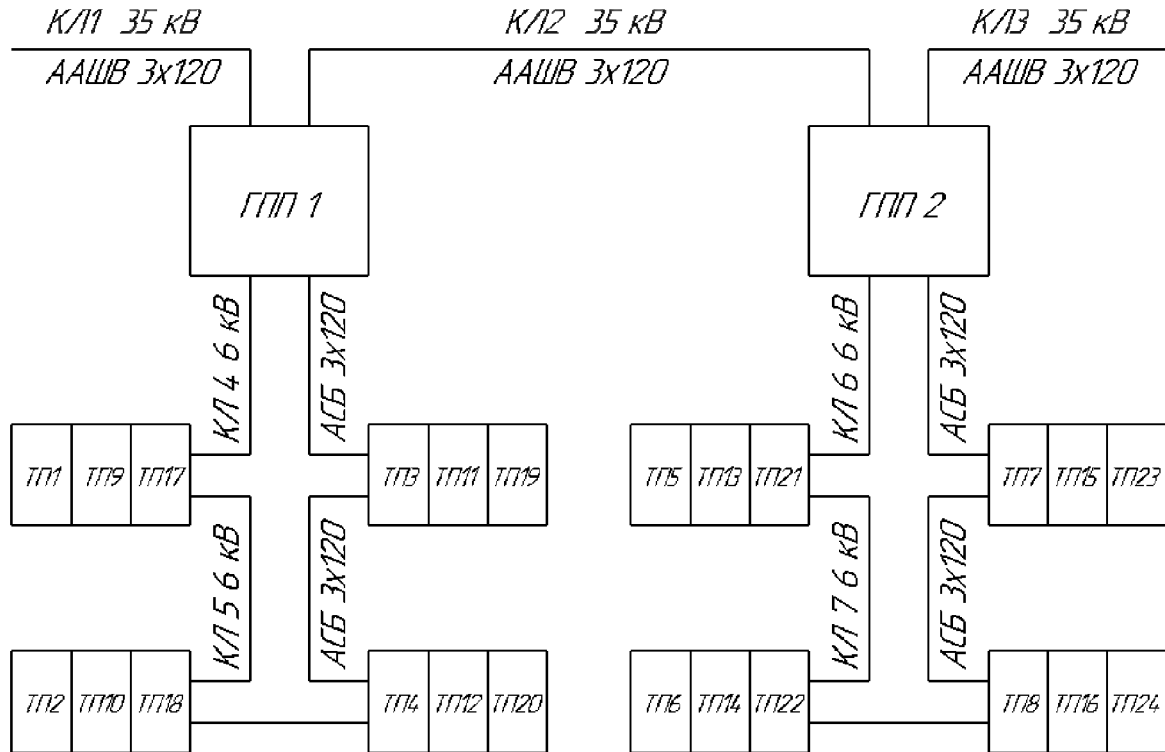


Рисунок 3.1 – Схема розташування трансформаторних підстанцій

Розрахункове навантаження визначаємо методом коефіцієнта попиту [22].

Розрахункове активне навантаження споживача, кВт [40]:

$$P_p = k_{\text{поп.}} \cdot P_{\text{вст.}} \quad (3.1)$$

де $k_{\text{поп.}}$ – коефіцієнт попиту,

$P_{\text{вст.}}$ – встановлена потужність об'єкта, кВт.

Схему трансформаторної підстанції ТП-16 наведено на рис. 3.2.

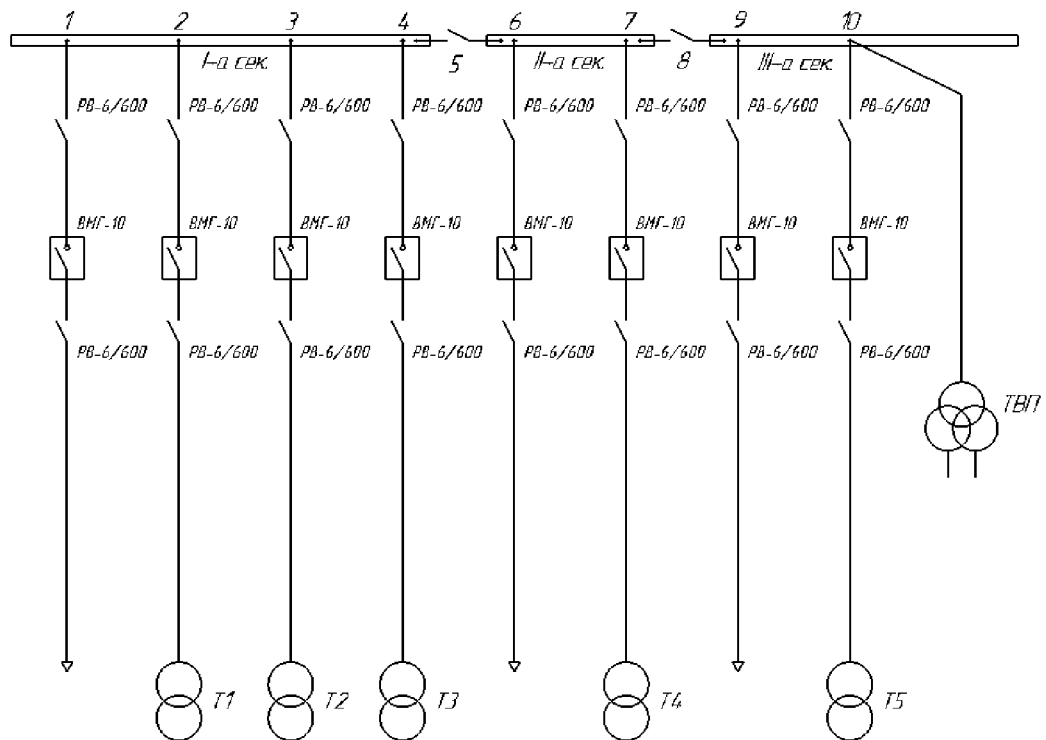


Рисунок 3.2 – Схема трансформаторної підстанції ТП-16

Розрахункове реактивне навантаження, кВАр [40]:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (3.2)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності навантаження.

Повна розрахункова потужність, кВА [40]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (3.7)$$

Результати розрахунків електричних навантажень зводимо до табл.

3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунок електричних навантажень

№	Номер ТП	$P_{\text{вст.}},$ кВт	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$k_{\text{non.}}$	$P_p,$ кВт	$Q_p,$ кВАр	$S_p,$ кВА
1	ТП 1	1800	0,850	0,620	0,81	1458,0	903,6	1715,3
2	ТП 2	1950	0,850	0,620	0,83	1618,5	1003,1	1904,1
3	ТП 3	1750	0,800	0,750	0,8	1400,0	1050,0	1750,0
4	ТП 4	1600	0,900	0,484	0,84	1344,0	650,9	1493,3
5	ТП 5	1900	0,650	1,169	0,82	1558,0	1821,5	2396,9
6	ТП 6	1820	0,800	0,750	0,79	1437,8	1078,4	1797,3
7	ТП 7	1780	0,900	0,484	0,81	1441,8	698,3	1602,0
8	ТП 8	1700	0,850	0,620	0,8	1360,0	842,9	1600,0
9	ТП 9	320	0,850	0,620	0,83	265,6	164,6	312,5
10	ТП 10	375	0,850	0,620	0,82	307,5	190,6	361,8
11	ТП 11	310	0,800	0,750	0,82	254,2	190,7	317,8
12	ТП 12	385	0,900	0,484	0,8	308,0	149,2	342,2
13	ТП 13	340	0,650	1,169	0,79	268,6	314,0	413,2
14	ТП 14	360	0,800	0,750	0,83	298,8	224,1	373,5
15	ТП 15	325	0,900	0,484	0,82	266,5	129,1	296,1
16	ТП 16	315	0,850	0,620	0,8	252,0	156,2	296,5
17	ТП 17	380	0,850	0,620	0,84	319,2	197,8	375,5
18	ТП 18	335	0,850	0,620	0,85	284,8	176,5	335,0
19	ТП 19	345	0,800	0,750	0,86	296,7	222,5	370,9
20	ТП 20	330	0,900	0,484	0,78	257,4	124,7	286,0
21	ТП 21	320	0,650	1,169	0,86	275,2	321,7	423,4
22	ТП 22	365	0,800	0,750	0,87	317,6	238,2	396,9
23	ТП 23	310	0,900	0,484	0,76	235,6	114,1	261,8
24	ТП 24	340	0,850	0,620	0,81	275,4	170,7	324,0
	Разом:					16101,1	11133,1	19745,9

Для ефективнішого електропостачання об'єднуємо кілька діляниць у загальну систему. Проводимо розрахунок при різних навантаження. Провідники повітряних ліній обираємо за економічною щільністю струму [40]:

$$j_{ек.} \geq j_p. \quad (3.8)$$

де $j_p.$ – розрахункова щільність струму у мережі [40]:

$$j_p. = \frac{I_{д.м.}}{n_k \cdot F_{ст}} \quad (3.9)$$

де $I_{д.м.}$ – струм на визначеній ділянці мережі, А,

n_k – кількість ліній,

$F_{ст}$ – перетин провідників, що обрано у якості стандартного, мм².

$j_{ек.}$ – економічна щільність струму, $j_{ек.} = 0,85$ А/мм².

Відносні втрати потужності у нормальному режимі роботи [40]:

$$\Delta P_{i\%} = \frac{\Delta P_i}{P_p} 100 \% \quad (3.10)$$

де P_p – значення розрахункової активної потужності, Вт,

ΔP_i – втрати активної потужності в i -ому елементі мережі,

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків струму і щільності струму

№ ТП	ТП 1	ТП 2	ТП 3	ТП 4	ТП 5	ТП 6	ТП 7
Струм, А	75,3	83,7	72,3	69,6	80,7	74,4	74,7
Розрахункова щільність струму, А/м ²	0,487	0,542	0,580	0,558	0,522	0,598	0,483

Продовження табл. 3.2

ТП 8	ТП 9	ТП 10	ТП 11	ТП 12	ТП 13	ТП 14	ТП 15	ТП 16
70,5	13,8	15,9	13,2	15,9	13,8	15,6	13,8	12,9
0,566	0,111	0,103	0,106	0,103	0,111	0,101	0,111	0,104

Продовження табл. 3.2

ТП 17	ТП 18	ТП 19	ТП 20	ТП 21	ТП 22	ТП 23	ТП 24
16,5	14,7	15,3	13,2	14,1	16,5	12,3	14,1
0,107	0,118	0,099	0,106	0,091	0,132	0,080	0,113

Гарним показником якості енергоживлення є значення відхилення напруги, що визначається за умовою [40]:

$$\Delta U = \left| \frac{U_{\phi} - U_{необ.}}{U_{необ.}} \right| \cdot 100\% \leq \frac{\Delta U_{ст.}}{2}, \quad (3.11)$$

де U_{ϕ} – фактичний рівень напруги на шинах ТП, кВ,

$U_{необ.}$ – необхідний рівень напруги, кВ,

$\Delta U_{ст.}$ – ступінь регулювання напруги на навантаженні, %.

Результати розрахунків представлено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків струму і щільності струму

№ ТП	ТП 1	ТП 2	ТП 3	ТП 4	ТП 5	ТП 6	ТП 7
Відхилення	±2	±2	±2	±6	±6	±2	±2

Продовження табл. 3.3

ТП 8	ТП 9	ТП 10	ТП 11	ТП 12	ТП 13	ТП 14	ТП 15	ТП 16
±6	±6	±2	±2	±2	±9	±9	±6	±6

Продовження табл. 3.3

ТП 17	ТП 18	ТП 19	ТП 20	ТП 21	ТП 22	ТП 23	ТП 24
±2	±2	±2	±9	±9	±9	±6	±6

Аналіз табл. 3.3 говорить про те, що необхідний рівень напруги забезпечується у всіх режимах навантаження.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПО ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Поставимо мету розробки нейронної мережі для оптимізації роботи системи управління системою електропостачання промислового підприємства з метою підвищення ефективності використання електроенергії, забезпечення стабільності електропостачання та мінімізації втрат (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Загальні відомості по трансформаторах підстанцій

№	Назва трансформатора	Номинальна потужність, кВА	Фактичне завантаження, кВА
1	ТП-1	2х1000	1800
2	ТП-2	2х1000	1950
3	ТП-3	2х1000	1750
4	ТП-4	2х1000	1600
5	ТП-5	2х1000	1900
6	ТП-6	2х1000	1820
7	ТП-7	2х1000	1780
8	ТП-8	2х1000	1700
9	ТП-9	400	320
10	ТП-10	400	375
11	ТП-11	400	310
12	ТП-12	400	385
13	ТП-13	400	340
14	ТП-14	400	360
15	ТП-15	400	325
16	ТП-16	400	315
17	ТП-17	400	380
18	ТП-18	400	335
19	ТП-19	400	345
20	ТП-20	400	330
21	ТП-21	400	320
22	ТП-22	400	365
23	ТП-23	400	310
24	ТП-24	400	340

Складена нейронна мережа повинна бути здатна аналізувати поточні параметри роботи системи електропостачання, такі як номінальні потужності силових трансформаторів, стан кабельних ліній та інших елементів мережі, для визначення оптимальних режимів їх роботи. Кінцева мета – забезпечити найбільш ефективне та надійне електропостачання підприємства.

Таблиця 4.2 – Довжина ліній живлення

№	Назва лінії	Довжина кабелю (м)
1	ГПП-1	600
2	ГПП-2	500
3	ГПП-3	550
4	ГПП-4	580
5	ГПП-5	520
6	ГПП-6	600
7	ГПП-7	550
8	ГПП-8	600
9	ГПП-9	550
10	ГПП-10	600

Для того, щоб побудувати ефективну нейронну мережу, необхідно пройти довгий шлях.

Попередня обробка даних є важливим кроком і полягає або у стандартизації або у нормалізації даних, які в подальшому допоможуть у навчанні моделі. Обираємо для подальших досліджень нормалізацію. Значення досліджуваної величини, що визначає нормалізоване значення визначається за формулою [41]:

$$x_{\text{норм.}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4.1)$$

де x – вихідне значення,

$x_{\min}$ – мінімальне значення у виборці,

$x_{\max}$ – максимальне значення у виробці.

Результати розрахунків заносимо до табл. 4.3.

Коли мова йде про аналіз завантаження трансформаторів, важливо вибрати правильні характеристики, які дадуть найбільше інформації про їх поточний стан. Серед таких характеристик визначимо наступні [42]:

- поточне завантаження (кВА) – ця характеристика показує поточне споживання потужності трансформатора, з її допомогою можна визначити, чи працює трансформатор в межах своєї номінальної потужності,
- коефіцієнт завантаження – відображає відношення поточного завантаження до номінальної потужності трансформатора і допомагає визначити, на якому рівні завантаженості працює трансформатор,
- температура масла – зростання температури масла може свідчити про перевантаження або несправності в трансформаторі,
- вологість масла – підвищена вологість може вказувати на проблеми з герметичністю або конденсацією води в маслі, що може призвести до високовольтних розрядів,
- рівень масла – зниження рівня масла може свідчити про витоки або інші проблеми,
- кількість включень та відключень – часті відключення можуть свідчити про проблеми в мережі або з трансформатором.

Вибравши ці характеристики, ми отримаємо докладний «образ» роботи трансформатора і зможемо виявити потенційні проблеми або місця, що потребують вдосконалення. На основі цих даних можна буде розробити стратегії для оптимізації роботи та забезпечення довговічності трансформаторів.

Таблиця 4.3 – Зведена таблиця характеристик трансформаторів

№	Поточе завантаження, кВА	Коефіцієнт завантаження	Нормалізоване завантаження	Температура масла, °C	Вологість масла, %	Рівень масла, л	Включення/ відключення
ТП-1	850	0,81	0,70	47	1,1	153	4/1
ТП-2	950	0,83	0,90	46	1,0	152	3/1
ТП-3	900	0,8	0,80	45	1,5	150	3/1
ТП-4	875	0,84	0,75	48	1,2	154	4/2
ТП-5	920	0,82	0,84	46	1,1	152	3/2
ТП-6	890	0,79	0,78	45	1,4	150	2/1
ТП-7	860	0,81	0,72	47	1,2	153	4/1
ТП-8	940	0,80	0,88	46	1,3	152	3/1
ТП-9	930	0,83	0,86	47	1,1	153	4/2
ТП-10	910	0,82	0,82	46	1,2	152	3/2
ТП-11	870	0,82	0,74	47	1,3	153	3/2
ТП-12	840	0,80	0,68	45	1,2	151	3/1
ТП-13	820	0,79	0,64	44	1,4	150	2/1
ТП-14	905	0,83	0,81	46	1,1	152	3/2
ТП-15	880	0,82	0,76	46	1,2	152	4/1
ТП-16	835	0,80	0,67	45	1,3	151	3/1
ТП-17	915	0,84	0,83	47	1,0	153	4/2
ТП-18	925	0,85	0,85	48	1,1	155	3/2
ТП-19	960	0,86	0,92	49	1,0	156	4/3
ТП-20	830	0,78	0,66	43	1,5	148	2/1
ТП-21	945	0,86	0,89	49	1,2	156	4/2
ТП-22	965	0,87	0,93	50	0,9	157	4/3
ТП-23	810	0,76	0,62	42	1,6	147	2/1
ТП-24	855	0,81	0,71	47	1,4	154	3/2

Для прогнозування завантаженості та інших характеристик трансформаторів в електромережі, важливо розуміти, які властивості даного процесу є ключовими. Враховуючи характер даних та можливу послідовність спостережень використаємо рекурентну нейронну мережу (RNN), а конкретно – мережу з довготривалою короткочасною пам'яттю (LSTM) [43].

LSTM – це підтип RNN, який дозволяє запобігти проблемі затухання градієнта звичайних RNN і може запам'ятовувати довготривалі залежності і вчасно адаптуватися до змін у даних.

Попередньо, архітектура мережі може виглядати так:

1. Вхідний шар – приймає вхідні характеристики.
2. LSTM шари – один або декілька LSTM шарів для вивчення часових залежностей між даними.
3. Ущільнюючий шар (Dense) – призначений для агрегації інформації з LSTM шарів і передачі її до наступного шару.
4. Вихідний шар – передбачає завантаженість та інші характеристики для кожного трансформатора.

Додатковими можливостями з оптимізації можуть бути [43]:

- використання Dropout-шарів між LSTM для уникнення перенавчання,
- використання перерегулювання,
- експерименти з кількістю LSTM блоків в кожному шарі для досягнення найкращих результатів,
- використання різних оптимізаторів та функцій втрат для навчання моделі.

Важливо провести також здійснити належне налаштування гіперпараметрів та перевірку моделі на тестовому наборі даних, щоб переконатися у її ефективності.

Для прогнозування завантаженості та інших характеристик трансформаторів в електромережі на основі наявних даних попередньо формуємо наступну структуру нейронної мережі (рис. 4.1):

- вхідний шар – кількість нейронів відповідає кількості вхідних характеристик,
- перший LSTM шар – містить 50 нейронів і визначає основні короткочасні залежності між даними,

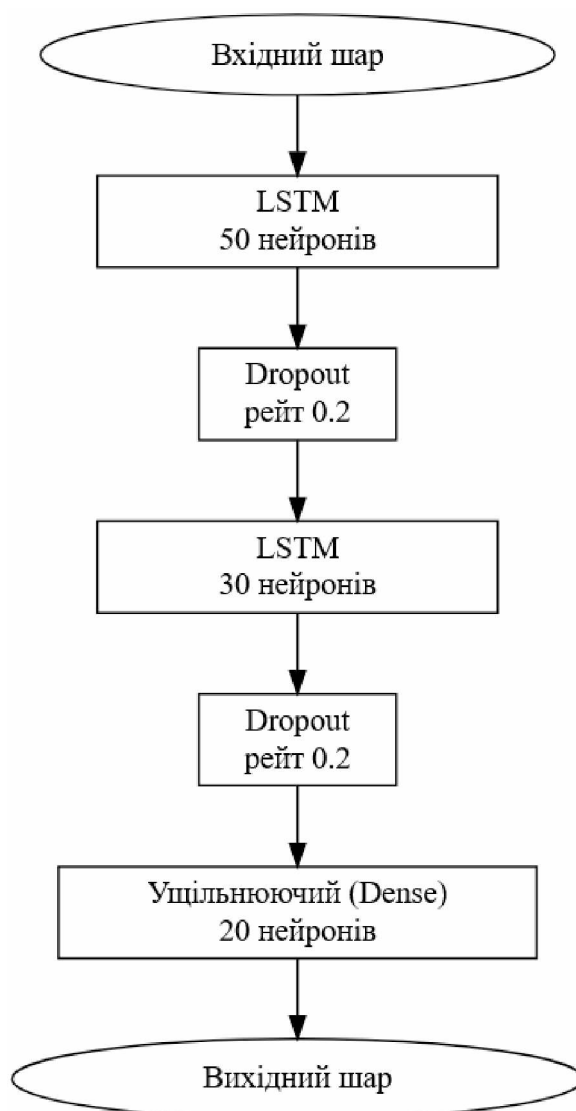


Рисунок 4.1 – Попередня структура нейронної мережі

- додатковий Dropout шар з рейтом 0,2 для запобігання перенавчання,
- другий LSTM шар – містить 30 нейронів і визначає більш складні довготривалі залежності,
- додатковий Dropout шар з рейтом 0, 2 для запобігання перенавчання,
- ущільнюючий шар Dense – має 20 нейронів і агрегує інформацію з LSTM шарів та передає її до вихідного шару,
- вихідний шар – кількість нейронів відповідає кількості прогнозованих характеристик – у нашому випадку це 1 нейрон, який передбачає нормалізоване завантаження для кожного трансформатора.

Ця архітектура є базовою і вимагатиме налаштування гіперпараметрів в залежності від конкретних даних та потреб.

Для визначення оптимальних функцій активації в різних шарах нейронної мережі слід враховувати тип завдання та специфіку даних. Для поставленої задачі прогнозування завантаженості трансформаторів використаємо наступні функції активації:

Вхідний шар: функція активації не використовується, оскільки це просто передача вхідних даних до наступного шару.

LSTM шари: активаційна функція вже вбудована в їх архітектуру. Зазвичай використовуються «tanh» або «sigmoid».

Dropout шари: функція активації не використовується, оскільки ці шари просто випадково вимикають деякі нейрони для запобігання перенавчанню.

Ущільнюючий шар Dense: функція активації ReLU (Rectified Linear Unit), яка забезпечує нелінійність без насичення, що може сприяти швидшому навчанню.

Вихідний шар: функція активації лінійна для завдання регресії (у випадку ознак класифікації також можна використовувати функції «sigmoid» або «softmax»).

Для ініціалізації ваг нейронів в моделях нейронних мереж, особливо при глибокому навчанні, вибір правильної стратегії ініціалізації може суттєво вплинути на швидкість збіжності та ефективність навчання моделі.

Ініціалізація ваг «He» (також відома як ініціалізація «He-et-al») призначена для активаційних функцій ReLU та її варіацій (наприклад, Leaky ReLU, Parametric ReLU) і може бути описана формульно [44]:

$$\omega = N\left(0; \sqrt{2 / n_{\text{non.}}}\right) \quad (4.2)$$

де N – закон нормального розподілу,

$n_{\text{non.}}$ – кількість нейронів у попередньому шарі.

Ініціалізація Xavier (також відома як Glorot) краще оптимізована для активаційних функцій «sigmoid» та «tanh» і може бути описана формульно [44]:

$$\omega = N\left(0; \sqrt{2/(n_{non.} + n_{nom.})}\right) \quad (4.3)$$

де $n_{nom.}$ – кількість нейронів у поточному шарі.

Ініціалізація LeCun, яка є оптимальною для активаційної функції «sigmoid» і може бути описана формульно [44]:

$$\omega = N\left(0; \sqrt{1/n_{non.}}\right) \quad (4.4)$$

Оскільки ми використовуємо активаційну функцію ReLU в щільних шарах використаємо ініціалізацію «He». Ця ініціалізація забезпечить швидше та стабільніше навчання, а також допоможе уникнути проблеми «мертвого» ReLU – випадки, коли нейрони ніколи не активуються.

Для використання ініціалізації «He» у нейронній мережі необхідно ініціалізувати ваги кожного шару за допомогою нормального розподілу з математичним сподіванням 0 та дисперсією $\sqrt{2/n_{non.}}$. Використовуючи ініціалізацію «He», забезпечуємо те, що ваги не будуть ні занадто великими, ні занадто малими на початкових етапах навчання, що сприяє швидшій збіжності та меншому ризику зникання градієнтів при використанні активаційних функцій ReLU або її варіацій.

Враховуючи, що ваша задача полягає у прогнозуванні характеристик та показників трансформаторів на основі заданих даних (регресійна задача), використовуємо функцію втрат Mean Squared Error (MSE), яка не допускає значних помилок і має наступний формульний запис [44]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4.5)$$

де N – загальна кількість спостережень.

y_i – дійсне значення цільової змінної для i -го спостереження,

$\bar{y}_i$ – прогнозоване значення для i -го спостереження.

Для оптимізації параметрів нейронної мережі в контексті регресійної задачі використаємо алгоритм оптимізації Adam (Adaptive Moment Estimation), який комбінує переваги двох інших алгоритмів: AdaGrad і RMSProp. Основними перевагами алгоритму Adam є автоматичне коригування швидкості навчання у залежності від даних за допомогою адаптивного швидкісного коефіцієнта та більш стабільне навчання. При цьому використовуються прийоми, які допомагають прискорити своє навчання в напрямку мінімального градієнта і долати невеликі локальні мінімуми.

Застосування прийнятих функції втрат та алгоритму оптимізації можна дещо зменшити кількість нейронів у прихованих шарах та отримати наступну структуру нейронної мережі.

Остаточна структура нейронної мережі наступна:

1. Вхідний шар: 7 нейронів (за кількістю вхідних характеристик).
2. Приховані шари:
 - перший прихований шар: 14 нейронів з функцією активації ReLU,
 - другий прихований шар: 8 нейронів з функцією активації ReLU.
3. Вихідний шар: 1 нейрон з лінійною функцією активації.
4. Функція ініціалізації ваг: ініціалізація «He».
5. Функція втрат: «MSE».

Структуру даної нейронної мережі наведено на рис. 4.2.

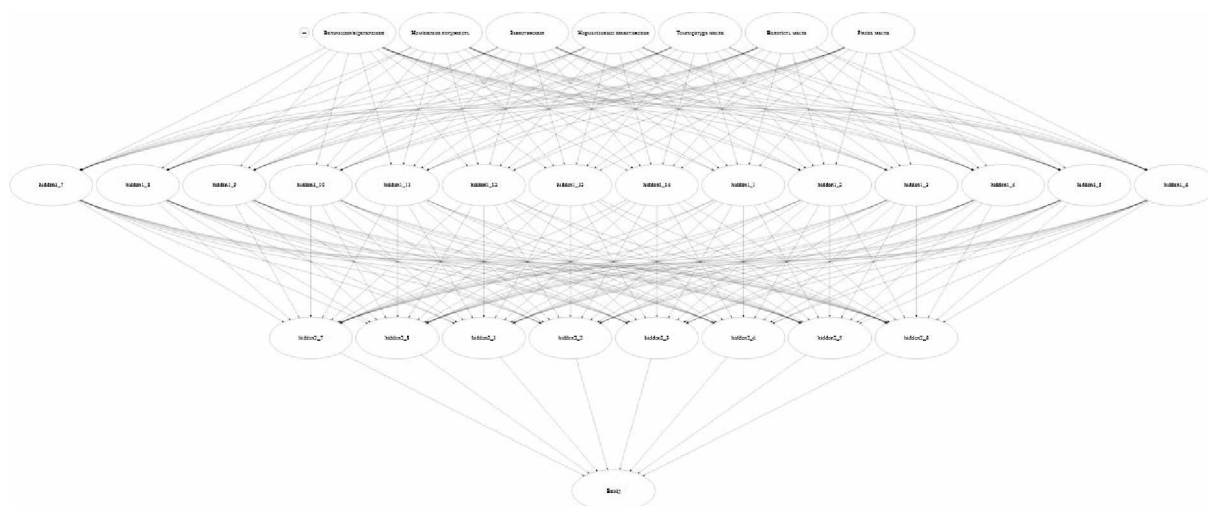


Рисунок 4.2 – Остаточна структура нейронної мережі

Така архітектура мережі добре слугуватиме для ефективного навчання мережі на вихідних даних.

Алгоритм оптимізації, який відповідає поставленій меті, пройдемо за кілька кроків:

1. Ініціалізація гіперпараметрів оптимізатора Adam: традиційно, рекомендовані значення для швидкості навчання (α) встановлюються дорівнюючими 0,001, тоді як параметри β_1 , β_2 та ϵ встановлюються дорівнюючими 0,9; 0,999 та $1 \cdot 10^{-8}$ відповідно. Ці гіперпараметри відповідають за експоненційне згладжування оцінок обчислювачів першого та другого порядку [44].

2. Обчислення градієнтів: на кожному кроці ітерації під час тренування Adam обчислює градієнти функції втрат відносно ваг мережі. Ці градієнти використовуються для обчислення експоненційно згладжених середніх величин та експоненційно згладжених середніх величин квадратів градієнтів [44].

3. Оновлення ваг: застосовуючи обчислені оцінки параметрів, Adam коригує швидкість навчання для кожного параметра індивідуально, що допомагає оптимізувати ваги в глибоких архітектурах нейронних мереж [44].

4. Корекція зсуву з урахуванням ініціалізації: у зв'язку з тим, що обидва обчислювачі (першого та другого порядку) ініціалізуються нулями, вони мають певний зсув до 0 на початкових етапах обчислення. Adam використовує коефіцієнти коригування для виправлення цього зсуву, що допомагає уникнути ділення на дуже малі числа та нуль [44].

5. Адаптивне налаштування швидкості навчання: однією з ключових переваг оптимізатора Adam є його здатність адаптивно коригувати швидкість навчання для кожного параметра – якщо для певного параметра функції втрат градієнт змінюється різко, Adam зменшить швидкість навчання для цього параметра, і навпаки [44].

6. Оновлення параметрів: після отримання виправлених оцінок для моментів першого та другого порядку та коригування швидкості навчання, Adam виконує оновлення параметрів (ваг нейронів), що формульно записується наступним чином [44]:

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \frac{\alpha \times \bar{m}_t}{\sqrt{\bar{v}_t} + \varepsilon} \quad (4.5)$$

де θ_n , θ_{n-1} – поточний і попередній параметр моделі,

α – швидкість навчання,

$\bar{m}_t$ – коригувальний обчислювач першого порядку,

$\bar{v}_t$ – коригувальний обчислювач другого порядку,

ε – дуже маленьке число, що запобігає діленню на нуль.

Для здійснення навчання для корекції ваг та зміщень з метою мінімізації функції втрат також необхідно виконання певного алгоритму дій [44]:

1. Підготовка даних: перед початком навчання необхідно підготувати дані – це може включати в себе нормалізацію вхідних даних, розбиття їх на навчальну та тестову вибірки та рандомізацію порядку зразків.

2. Ініціалізація параметрів: використовуючи ініціалізацію He, параметри моделі (ваги та зміщення) ініціалізуються невеликими випадковими значеннями, що забезпечує достатньо малі, але не нульові значення для градієнтного спуску.

3. Прямий прохід (Feedforward): під час цього процесу вхідні дані проходять через мережу, і за допомогою ваг та функцій активації генерують прогнози на виході.

4. Обчислення функції втрат: за допомогою функції втрат MSE обчислюємо різницю між прогнозованими та дійсними значеннями. Дана різниця вказує на те, наскільки добре або погано модель працює на даному етапі навчання.

5. Визначення зворотного поширення помилки (Backpropagation) і супутнє обчислення градієнта: за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки обчислюється градієнт функції втрат відносно кожної ваги, враховуючи поточне значення на вході та поточну помилку моделі.

6. Оновлення ваг та зміщень: використовуючи оптимізатор Adam та розраховані градієнти, проводиться корекція ваг і зміщень моделі. Adam адаптує швидкість навчання для кожного параметра на основі історії градієнтів, що допомагає швидше досягти оптимального рішення.

7. Повторення процедур: навчання не завершується після одного «проходу» по набору даних. Процес передачі даних через мережу, обчислення втрат, зворотнє поширення помилки та корекції ваг і зміщень повторюється кілька разів. Кількість таких проходів (epoch) зазвичай вибирається на підставі вимог до точності моделі та можливостей обчислювального обладнання.

8. Перевірка на збіжність: під час навчання важливо слідкувати за зміною функції втрат на навчальних та валідаційних даних. Якщо втрати на навчальних даних продовжують зменшуватися, але на валідаційних даних починають зростати, це може вказувати на перенавчання моделі.

Для ефективного навчання та перевірки моделі нейронної мережі досить важливо розділити доступний набір даних на декілька підмножин, що допомагає не тільки перевіряти якість моделі на етапі навчання, але й налаштовувати гіперпараметри та запобігати перенавчанню [44]:

1. Навчальний набір даних (Training Set) – це найбільша підмножина, яка використовується для безпосереднього навчання моделі.

2. Валідаційний набір даних (Validation Set) – використовується для налаштування гіперпараметрів, таких як швидкість навчання, кількість шарів чи нейронів у моделі і допомагає відслідковувати ефективність моделі під час навчання та діагностувати проблеми, такі як перенавчання.

3. Тестовий набір даних (Test Set) – після того, як модель була навчена та налаштована, вона перевіряється на тестовому наборі даних, який не брав участі у навчанні, що дає об'єктивну оцінку того, як модель буде працювати на реальних, раніше невідомих даних.

Розділимо весь доступний набір даних на ці три підмножини у співвідношенні: 70% – навчання, 15% – валідація, 15% – тест.

З урахуванням вищенаведених даних приймаємо:

– навчальний набір даних (Training Set): $70\% \text{ з } 24 = 16,8$, округлюємо до 17.

– валідаційний набір даних (Validation Set): $15\% \text{ з } 24 = 3,6$, округлюємо до 4.

– тестовий набір даних (Test Set): решта 3.

Для оцінки продуктивності нейронної мережі на тестовому наборі даних необхідно виконати наступні кроки:

– здійснення прогнозування: після навчання та налаштування гіперпараметрів нейронної мережі використовуємо модель для отримання прогнозованих значень на виході, що працює на тестовому наборі даних.

– розрахунок мірил продуктивності: для оцінки різниці між реальними і прогнозованими значеннями необхідно використати адекватні мірила. Завдяки застосуванню для навчання функції втрат MSE, її і можна буде

використати у якості мірила для оцінки продуктивності. Крім того, у якості мірила можна використати середньоквадратичну помилку (RMSE) та середню абсолютну помилку (MAE).

Складена програма має вигляд:

```
import numpy as np
import pandas as pd
# Введення початкових даних
data = {
    'ТП': ['ТП-18', 'ТП-19', 'ТП-20', 'ТП-21', 'ТП-22', 'ТП-23', 'ТП-24'],
    'Номінальна потужність (kVA)': [1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000, 1000],
    'Завантаження (kVA)': [925, 960, 830, 945, 965, 810, 855],
    'Нормалізоване завантаження': [0.85, 0.92, 0.66, 0.89, 0.93, 0.62, 0.71]
}
df = pd.DataFrame(data)
print(df)
import tensorflow as tf
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras import layers
# Вхідний шар
input_layer = keras.Input(shape=(3,)) # 3 вхідні характеристики: Номінальна
потужність, Завантаження, Нормалізоване завантаження
# Приховані шари
hidden_layer_1 = layers.Dense(6, activation='relu')(input_layer)
hidden_layer_2 = layers.Dense(4, activation='relu')(hidden_layer_1)
# Вихідний шар
output_layer = layers.Dense(1, activation='sigmoid')(hidden_layer_2)
# Створення моделі
```

```

model = keras.Model(inputs=input_layer, outputs=output_layer)
model.summary()
# Ініціалізація вагів за допомогою методу He
initializer = tf.keras.initializers.HeNormal()
# Перебудова моделі з використанням ініціалізації He
input_layer = keras.Input(shape=(3,))
hidden_layer_1 = layers.Dense(6, activation='relu',
kernel_initializer=initializer)(input_layer)
hidden_layer_2 = layers.Dense(4, activation='relu',
kernel_initializer=initializer)(hidden_layer_1)
output_layer = layers.Dense(1, activation='sigmoid',
kernel_initializer=initializer)(hidden_layer_2)
model = keras.Model(inputs=input_layer, outputs=output_layer)
# Компіляція моделі з використанням функції втрат MSE і оптимізатора
Adam
model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')
# Параметри навчання
batch_size = 32
epochs = 100
# Навчання моделі
history = model.fit(
    X_train, y_train,
    batch_size=batch_size,
    epochs=epochs,
    validation_data=(X_val, y_val),
    verbose=1
)
# Відображення історії навчання
import matplotlib.pyplot as plt
plt.plot(history.history['loss'], label='train_loss')

```

```

plt.plot(history.history['val_loss'], label='val_loss')
plt.title('Model Loss Progress')
plt.ylabel('Mean Squared Error')
plt.xlabel('Epoch')
plt.legend(['Training Set', 'Validation Set'], loc='upper right')
plt.show()

from sklearn.model_selection import train_test_split
# Розділення даних на навчальний, валідаційний і тестовий набори
X_temp, X_test, y_temp, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.1,
random_state=42)
X_train, X_val, y_train, y_val = train_test_split(X_temp, y_temp, test_size=0.2,
random_state=42)
print("Розмір навчального набору:", X_train.shape)
print("Розмір валідаційного набору:", X_val.shape)
print("Розмір тестового набору:", X_test.shape)
# Передбачення моделлю на тестовому наборі даних
y_pred = model.predict(X_test)
# Оцінка моделі за допомогою MSE
from sklearn.metrics import mean_squared_error
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
print(f"Середньоквадратична похибка на тестовому наборі даних:
{mse:.4f}")

```

Для візуалізації результатів можна побудувати графіки, що характеризують прогнозовані значення та оцінити, як працює нейронна мережа на тестових даних. Аналіз графічних залежностей може показати надмірні відхилення та аномалії, визначити припустимі діапазони значень та адекватність моделі. Зазначене може допомогти виявити потенційні проблеми або області для подальшого вдосконалення моделі (рис. 4.3 – 4.10).

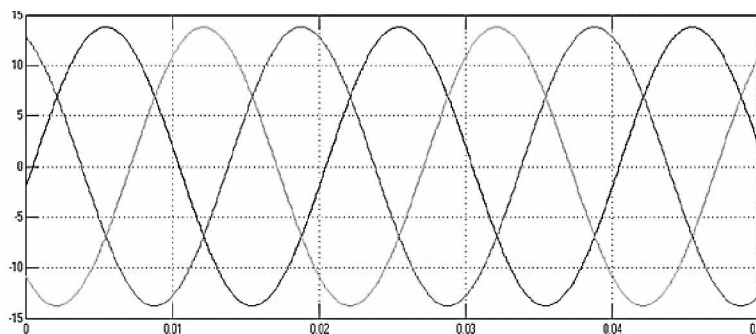


Рисунок 4.3 – Форми хвиль напруг на первинній обмотці трифазного трансформатора без порушень у приєднаній мережі

Форми напруг (рис. 4.3) являють собою періодичний графік, що відображає форму напруги на первинній обмотці трифазного високовольтного трансформатора. Три ліній на графіку вказують на три фази: А, В та С, кожна з яких зсунута відносно інших на 120° , що є характерною особливістю для трифазних систем. Амплітуда кожної фази є стабільною, що свідчить про відсутність порушень у приєднаній мережі. Така стабільна форма напруги є важливою для забезпечення надійної роботи обладнання та споживачів, підключених до трансформатора.

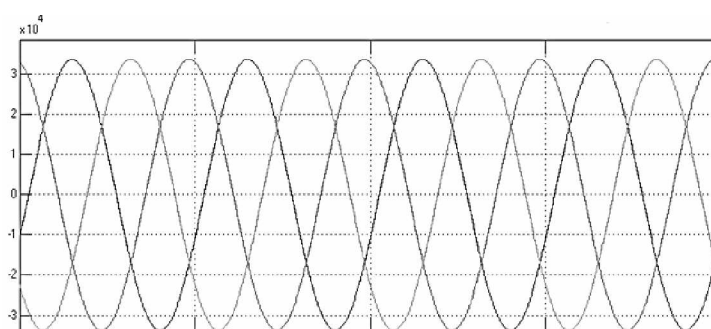


Рисунок 4.4 – Форми хвиль напруг на вторинній обмотці трансформатора без порушень у приєднаній мережі

Графіки напруги на вторинній обмотці трифазного високовольтного трансформатора (рис. 4.4) ілюструють три синусоїдні хвилі, що відповідають трьом фазам: А, В та С і зсунуті одна відносно одної на 120° , що є типовим для трифазних електричних систем. Амплітуда кожної з фаз

є незмінною, що вказує на стабільну роботу трансформатора і відсутність збоїв або порушень в мережі, яка до нього приєднана.

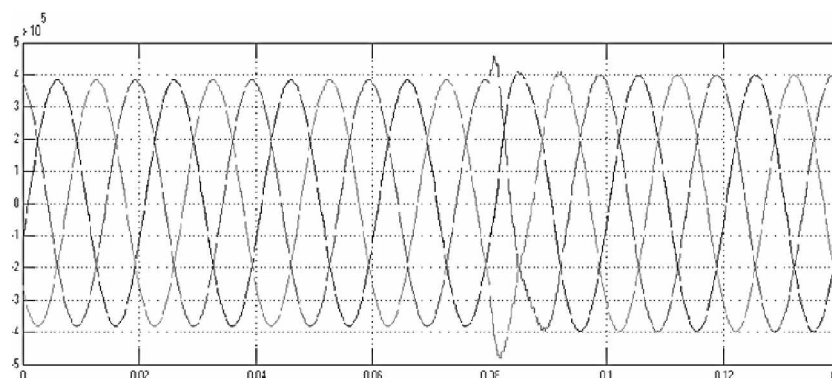


Рисунок 4.5 – Форми хвиль напруг у лінії приєднання при комутації високовольтного вимикача

Три синусоїдальні хвилі на графіку (рис. 4.5) відображають трифазний характер електричної системи. На відміну від стабільних графіків напруги, тут можна спостерігати кілька аномалій у вигляді стрибків амплітуди. Ці сплески вказують на моменти ввімкнення або вимкнення високовольтного вимикача. Ці комутаційні перешкоди можуть виникати через властивості вимикача, властивості навантаження та/або особливості електричної мережі. Форма графіків може свідчити про перехідні процеси в системі, що виникають під час комутації, та може вказувати на потенційні джерела перешкод або втрат.

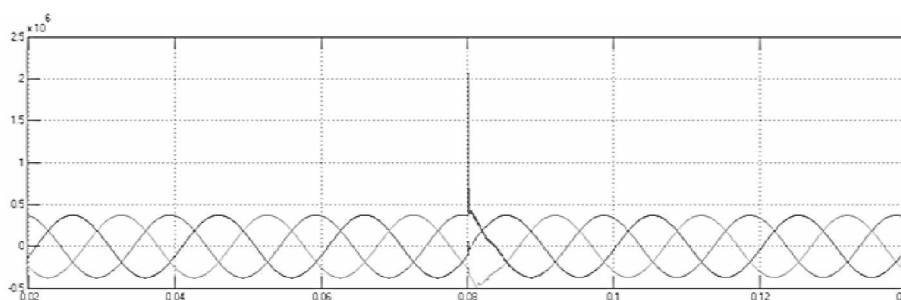


Рисунок 4.6 – Форми хвиль напруги у високовольтній лінії при комутації високовольтного вимикача

На рис. 4.6 бачимо форму напруг у фазах високовольтної лінії під час комутації високовольтного вимикача. Один з графіків має сплеск, що може бути відображенням моменту комутації, коли високовольтний вимикач вмикається або вимикається. Даний пік сигналізує про раптове змінення у напрузі, що може викликати перехідні електромагнітні явища в лінії. У решті місць графіку відсутні значні перешкоди або збої в амплітуді синусоїди, що свідчить про стабільну роботу високовольтного вимикача і відсутність значущих порушень у системі під час комутації.

На рис. 4.7 – 4.10 наведено результати роботи складеної нейронної мережі по передбаченню споживання і одночасно показано реальне споживання.

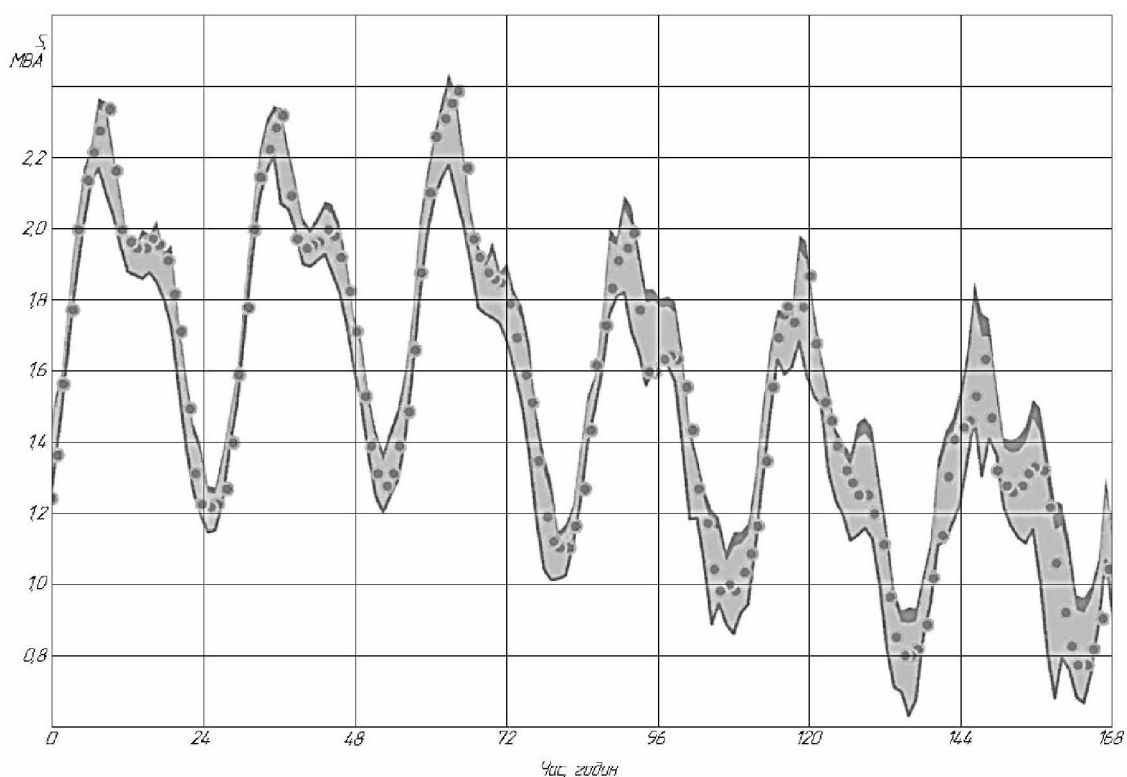


Рисунок 4.7 – Порівняння реальних графіків споживання енергії з передбаченням ШНМ для ТП 1

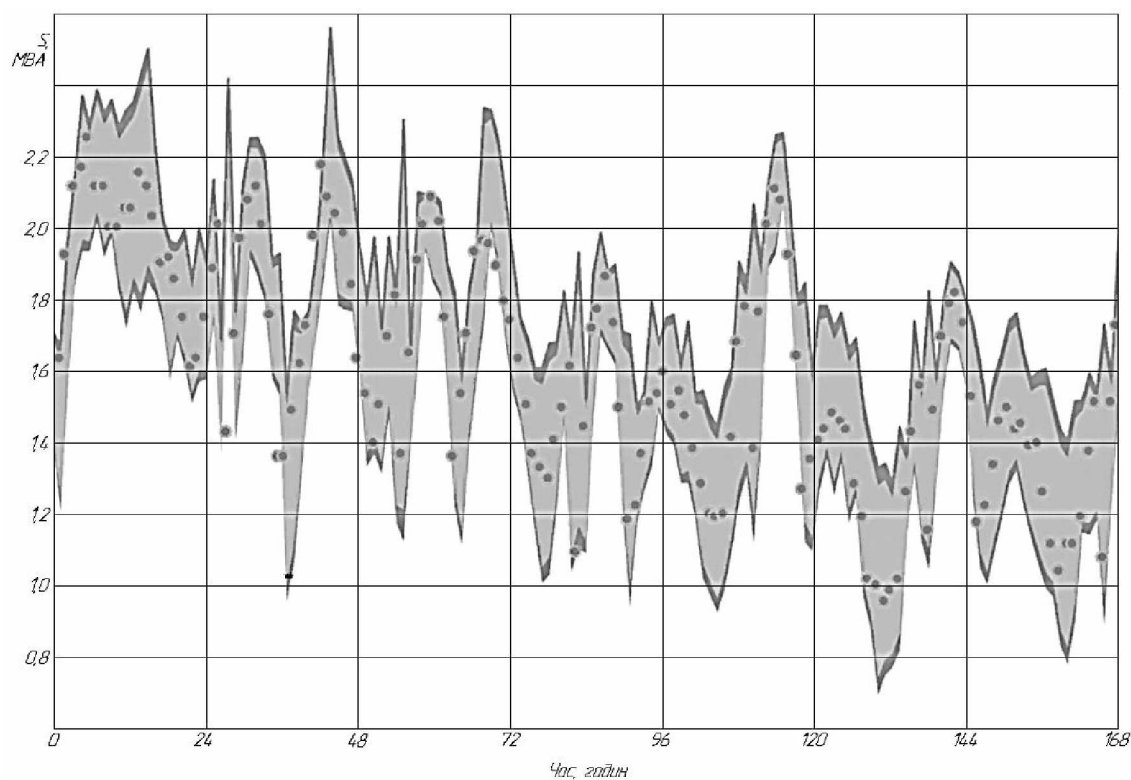


Рисунок 4.8 – Порівняння реальних графіків споживання енергії з передбаченням ШНМ для ТП 2

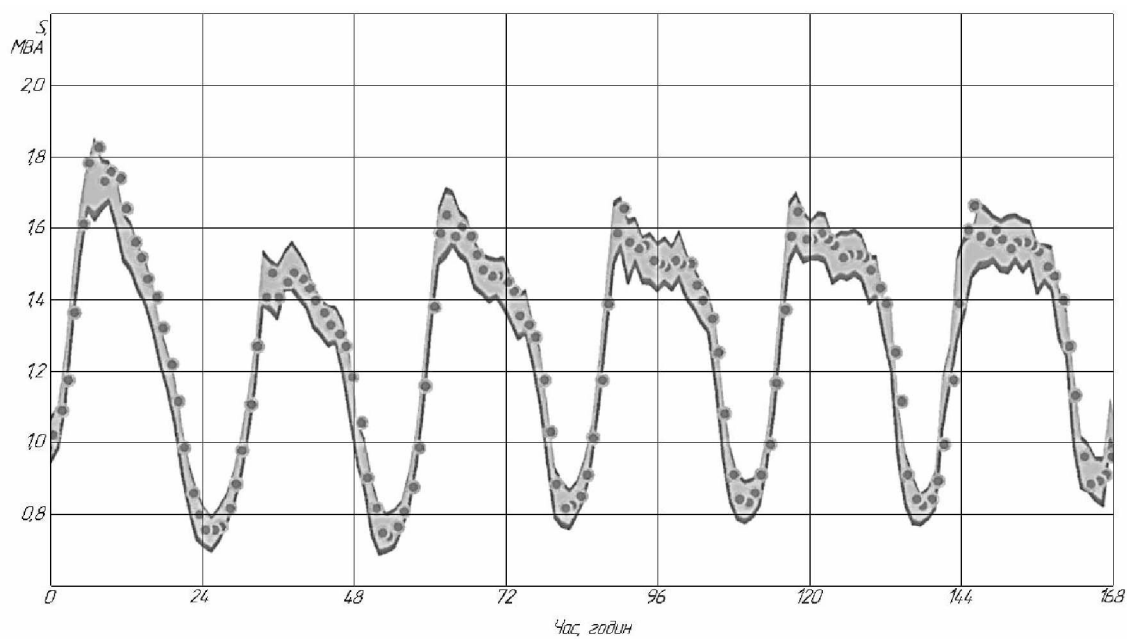


Рисунок 4.9 – Порівняння реальних графіків споживання енергії з передбаченням ШНМ для ТП 4

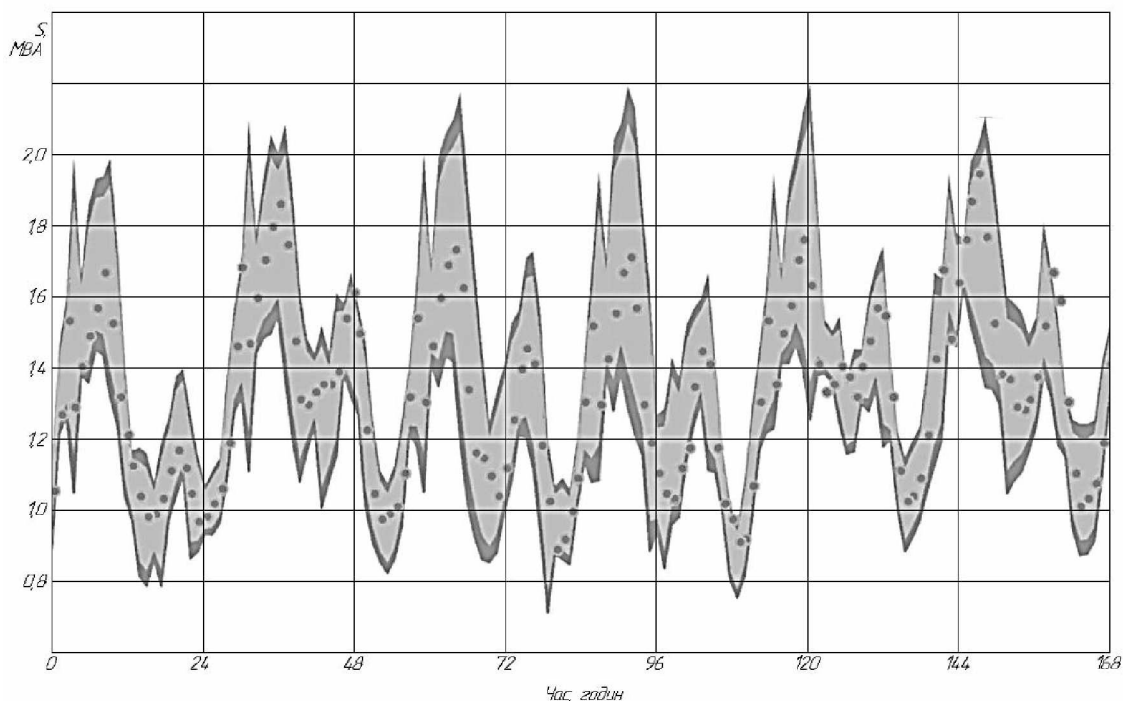


Рисунок 4.10 – Порівняння реальних графіків споживання енергії з передбаченням ШНМ для ТП 8

Аналіз роботи штучної нейронної мережі (ШНМ) в контексті передбачення споживання енергії заслуговує на увагу з різних аспектів. Перше, що варто зауважити, - це адекватність моделі. Судячи з графіку, пунктирна лінія передбачення знаходиться в межах довірчого інтервалу великої частини реальних даних. Однак існують певні моменти, коли передбачення виходять за межі цього інтервалу, що вказує на потенційні неточності в роботі ШНМ.

Аналізуючи динаміку відхилень, можна зробити висновок про стабільність роботи мережі. Певні різкі стрибки або аномалії у передбаченнях можуть вказувати на те, що мережа неадекватно реагує на неочікувані зміни у вхідних даних. Це може бути результатом недостатньої тренувальної вибірки або її низької якості.

Також важливим є аналіз швидкості адаптації ШНМ до нових даних. Якщо мережа повільно реагує на зміни, це може бути критично для реальних систем, де необхідний оперативний відгук.

Загалом, судячи з графіку, ШНМ виявилася досить ефективною у передбаченні споживання енергії, але для глибокого аналізу її роботи необхідно мати доступ до додаткових даних та параметрів моделі.

Моделювання дозволило оцінити зміни струму, напруги в елементах системи: трансформаторах, лініях передачі та споживачах. На основі отриманих даних можна здійснювати обґрунтоване планування енергетичних параметрів.

ВИСНОВКИ

Основні напрямки оптимізації систем керування електропостачанням включають в себе налаштування автоматичних вимикачів та реле, що сприяє підвищенню надійності та стабільності системи. Детальний аналіз короткого замикання та перехідних процесів дозволив ідентифікувати потенційні ризики та внести рекомендації щодо їх усунення.

Аналіз існуючих систем управління електропостачанням виявив суттєві недоліки в їхній ефективності та надійності. Відсутність гнучких методів регулювання та застарілі алгоритми управління призводять до неоптимального використання ресурсів та підвищеного ризику нештатних ситуацій. Результати цього дослідження підкреслюють необхідність реформування систем управління, що, в свою чергу, може поліпшити стабільність та ефективність електропостачання на підприємствах.

У процесі розробки штучної нейронної мережі було проведено ряд етапів, які були вирішальними для побудови ефективної моделі. Було визначено структуру мережі: вхідний шар з 7 нейронами, що відображає 7 вхідних характеристик, два приховані шари з 14 та 8 нейронами відповідно, а також вихідний шар з одним нейроном для регресійного прогнозування. Для активації нейронів прихованих шарів було обрано функцію ReLU через її ефективність та широке застосування у глибокому навчанні. Вихідний нейрон використовує лінійну функцію активації, що відповідає регресійному характеру. Особлива увага була приділена процесу ініціалізації ваг нейронів. Застосування методу ініціалізації Хе допомогло оптимізувати процес навчання, оскільки він спеціально розроблений для активаційних функцій типу ReLU. Функція втрат MSE була обрана для оцінки різниці між прогнозованими та дійсними значеннями. Завдяки її використанню, ми можемо точно визначити якість навчання мережі. У підсумку, побудована нейронна мережа представляє

собою добре продуману структуру, оптимізовану для конкретного завдання. Кожен вибір, зроблений під час проектування мережі, має на меті забезпечити її високу продуктивність та точність прогнозування.

Складена нейронна мережа була застосована для комплексного аналізу потоку електричної енергії та перехідних і аварійних режимів в мережах електропередач.

Ключовою перевагою комп'ютерного моделювання є можливість аналізу даних у реальному часі, виходячи з наявної бази даних. Це надає можливість для попереднього втручання та корекції реальних систем, забезпечуючи тим самим краще розуміння поведінки системи і дозволяючи ефективно реагувати на аварійні ситуації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник / М. С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
2. Каплун В. В. Smart Grid як інноваційна платформа розвитку електроенергетичних систем / В. В. Каплун, В. В. Козирський // Енергетика та електрифікація. – 2011. – № 5 (333). – С. 13-18.
3. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071.
4. Франчук І.А. Особливості державного регулювання енергетики в ринкових умовах /І.А. Франчук // Вісник НАДУ при Президентіві України. – 2008. – № 4. С. 91-98.
5. Семюел Грінгард. Інтернет речей. Майбутнє вже тут. – Альпіна Паблішер, 2017. – 188 с.
6. Черемісін М. М., Зубко В.М. Автоматизація обліку та управління електроспоживанням: Посібник для вищих навчальних закладів. – Харків: Факт, 2005. – 192 с.
7. Проблеми загальної енергетики: наук. зб. № 2 / ред.: М.М. Кулик; Ін-т заг. енергетики НАН України. – Київ, 2000. – 76 с.
8. Пупена О.М., Ельперін І.В., Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. Навчальний посібник / К.: Ліра-К, 2011. – 552 с.
9. Стан і перспективи розвитку технологій «інтелектуальних» електромереж, управління попитом та систем режимного управління в умовах розвитку поновлюваних джерел енергії у зарубіжній енергетичній сфері [Електронний ресурс] // НЕК "Укренерго". – 2018.
10. Smart Power Grids – Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009.

11. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О.В. Кириленко, Ю.С. Петергеря, Т.О. Терещенко, В.Я. Жуйков. - К.: Медіа ПРЕС, 2005. - 212 с.
12. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні: монографія / А.І.Шевченко, С.В.Барановський, О.В.Білокобильський та інші [За заг. ред. А.І.Шевченка], Київ: ШШІ, 2023 – 305 с.
13. Лежнюк П.Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем / Л. Н. Добровольська, В. В. Кулик, П. Д. Лежнюк // Під редакцією Лежнюка П.Д. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
14. Клімов С.В. Експлуатація і обслуговування машин: Навч. посібник. – Рівне: НУВГП, 2010. – 218 с.
15. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>
16. Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments. – European Union, 2011. – 118 p.
17. Енергетичний аудит: Навчальний посібник / О.І. Соловей, В.П. Розен, Ю.Г. Лета, О.О. Ситник А.В. Чернявський, Г.В. Курбаса. – Черкаси, 2005. – 299 с.
18. Ye Feng, Li Na. The Research of All-Around Performance Management System in Power Supply Enterprise. International Conference on Management and Service Science, 2009. DOI: 10.1109/ICMSS.2009.5301227.
19. Wei Sun, Shan Li. PCA-SVM-Based Comprehensive Evaluation for Customer Relationship Management System of Power Supply Enterprise. International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2007. DOI: 10.1109/ICMLC.2007.4370810.
20. Wu Yunna, Shen Yue, Huang Yong. Notice of Retraction: Power Supply Enterprise Project Management Organization-oriented System Design. International Conference on E-Business and E-Government. 2010. DOI: 10.1109/ICEE.2010.308.

21. H. Yang, G. Wang, L. Zhou, R. Zhou. A Study of Power Market Dynamics Based on System Dynamics Modeling. International Conference on Power System Technology. 2006. DOI: 10.1109/ICPST.2006.321448.
22. K. Uhlen, L. Warland, O.S. Grande. Model for area price determination and congestion management in joint power markets. International Symposium CIGRE/IEEE PES, 2005. DOI: 10.1109/CIGRE.2005.1532732.
23. Xue Zhenyu, Liu Haibo, Huang Xin. Research of risk management system on power supply enterprise. 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation, ICMRA. 2015. DOI 10.2991/icmra-15.2015.146.
24. Gong Jianping, Wu Guopei, Luo Zhenhai. Power supply reliability analysis and improvement measures of regional power grid. China International Conference on Electricity Distribution. 2008. DOI: 10.1109/CICED.2008.5211657.
25. B.J. Kirby. Load Response Fundamentally Matches Power System Reliability Requirements. IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2007. DOI: 10.1109/PES.2007.386227.
26. M.D. Ilic, H. Allen, W. Chapman, C.A. King, J.H. Lang, E. Litvinov. Preventing Future Blackouts by Means of Enhanced Electric Power Systems Control: From Complexity to Order. Proceedings of the IEEE. Volume: 93, Issue: 11, 2005. DOI: 10.1109/JPROC.2005.857496.
27. K.N. Zadeh, R.C. Meyer, G. Cauley. Practices and new concepts in power system control. IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 11, Issue: 1, 1996. DOI: 10.1109/59.485975.
28. D. Sutanto. A review of new innovations in power system control. Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 1995. DOI: 10.1109/PEDS.1995.404985.
29. W.R. Lachs, D. Sutanto, D.N. Logothetis. Power system control in the next century. IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 11, Issue: 1, 1996. DOI: 10.1109/59.485976.

30. C.M. Hoff, S. Mulukutla. Analysis of the instability of PFC power supplies with various AC sources. Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1994. DOI: 10.1109/APEC.1994.316330.
31. M. Wu, P. Rastgoufard. Optimum decision by artificial neural networks for reactive power control equipment to enhance power system stability and security performance. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. DOI: 10.1109/PES.2004.1373257.
32. Z. Szymanski. Analysis of the stability an electro energetic grid with great load converter power supply system. Compatibility in Power Electronics. 2007. DOI: 10.1109/CPE.2007.4296497.
33. B. Brusilowicz, J. Szafran. Comparison of reactive power compensation methods. Electric Power Networks. 2016. DOI: 10.1109/EPNET.2016.7999369.
34. Оцінювання якості електропостачання у локальних системах з джерелами розосередженої генерації: Монографія / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янка / К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – 166 с.
35. Царьов Р.Ю. Структуровані кабельні системи: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. / Царьов Р.Ю., Нікітюк Л.А., Резніченко П. І. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2013. – 260 с.
36. Терешкевич Л.Б. Оптимізація режимів електроспоживання: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 112 с.
37. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989. – 386 pp.
38. Володарський Є.Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання / Є.Т. Володарський, А.В. Волошко // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. – №. 318 (69). С. 10-18.
39. M.H.J. Bollen, Understanding power quality – voltage sags and interruptions, IEEE Press, 2000.

40. Бурбело М.П., Бірюков О.О., Мельничук Л.М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків. Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2011. – 204 с.

41. Субботін С.О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень. Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – 341 с.

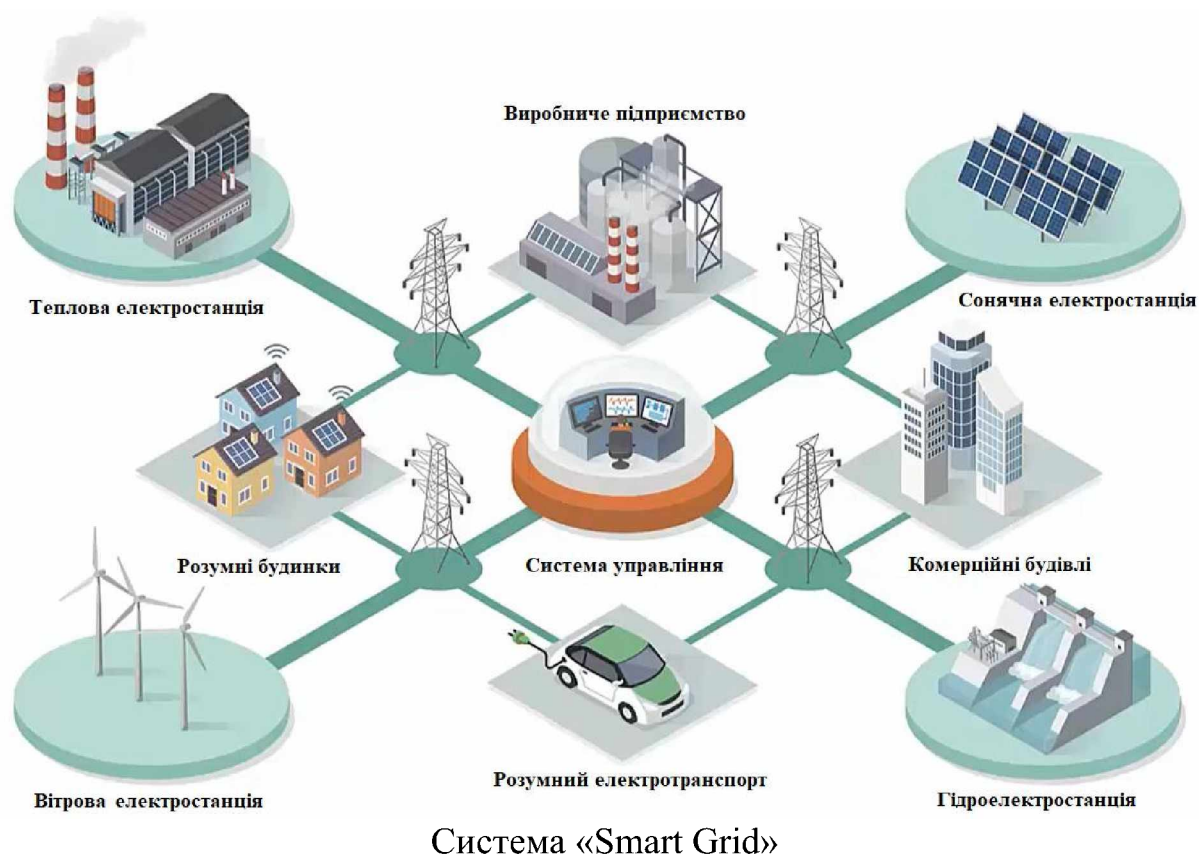
42. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв: навч. посібник / Грабко В. В., Бабій С. М., Мошноріз М. М. та ін. Вінниця: ВНТУ, 2011. – 137 с.

43. Глібовець М.М. Штучний інтелект: Підруч. для студ. вищ. навч. закладів / М.М. Глібовець, О.В. Олецький. – Київ: Видавничий дім «КМ Академія», 2002. – 336 с.

44. Кононюк А.Ю. Нейронні мережі і генетичні алгоритми / А.Ю.Кононюк. – К.: Корнійчук. 2008. – 446 с.

45. Правила безопасной эксплуатации энергоустановок. – Киев, 1998. – 142 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



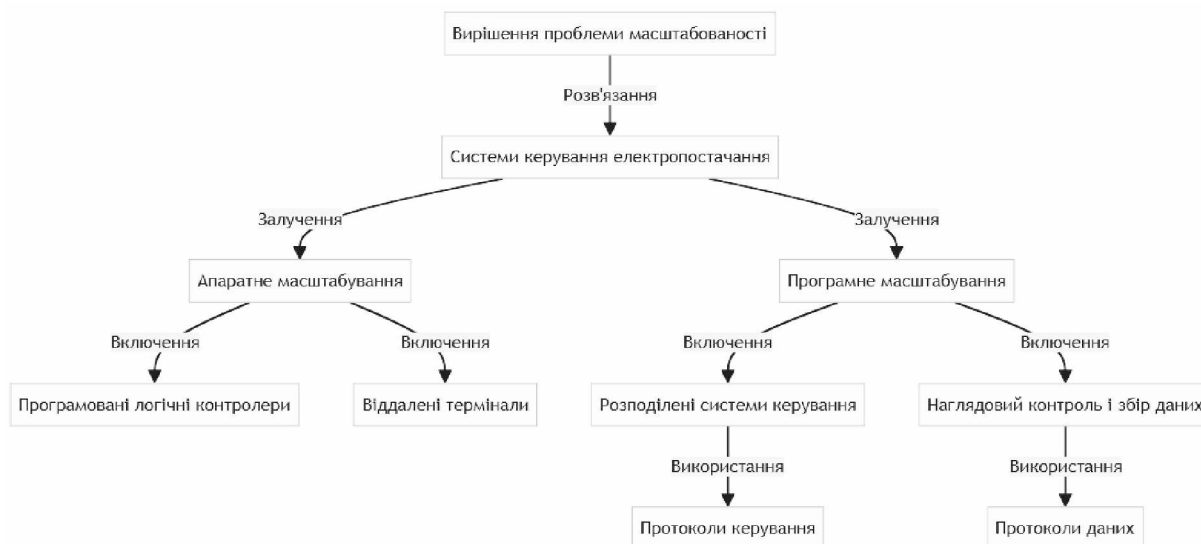
Інтеграція систем з альтернативного виробництва електричної енергії



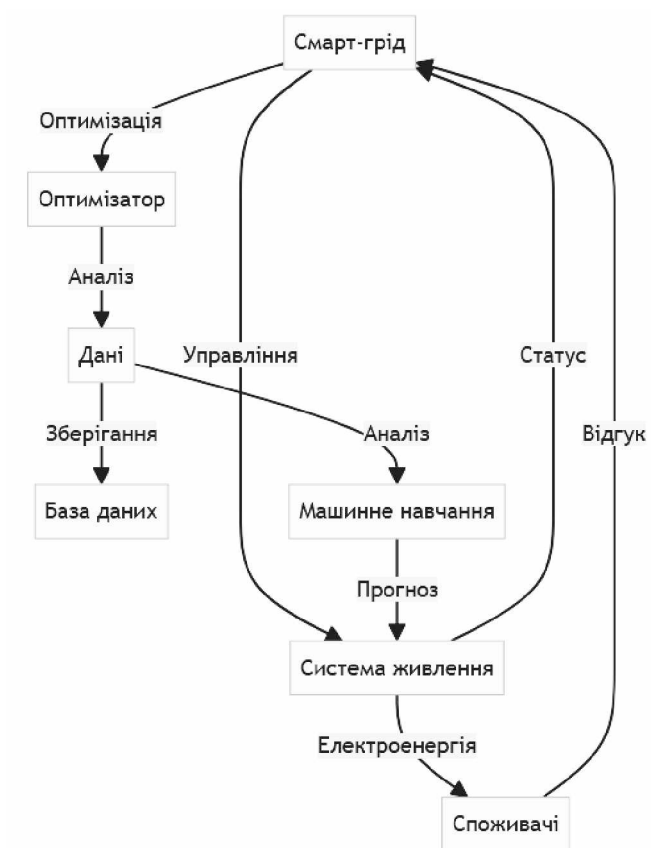
Система управління попитом



Схема впровадження інтернет-технологій



Масштабованість систем керування



Оптимізація системи керування електропостачанням за допомогою «Smart Grid»



Оптимізація системи керування електропостачанням за допомогою цілісного підходу



Оптимізація системи керування електропостачанням за допомогою машинного навчання та штучного інтелекту



Оптимізація системи керування електропостачанням за допомогою мікромереж

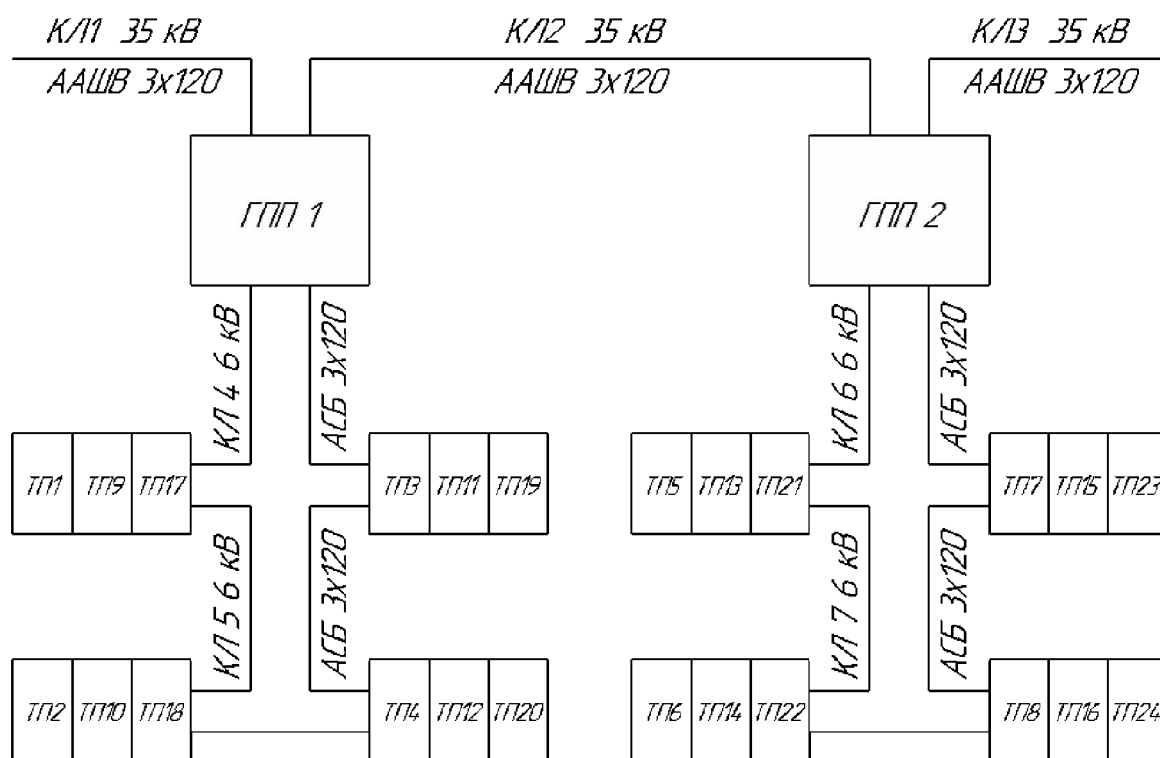


Схема розташування трансформаторних підстанцій

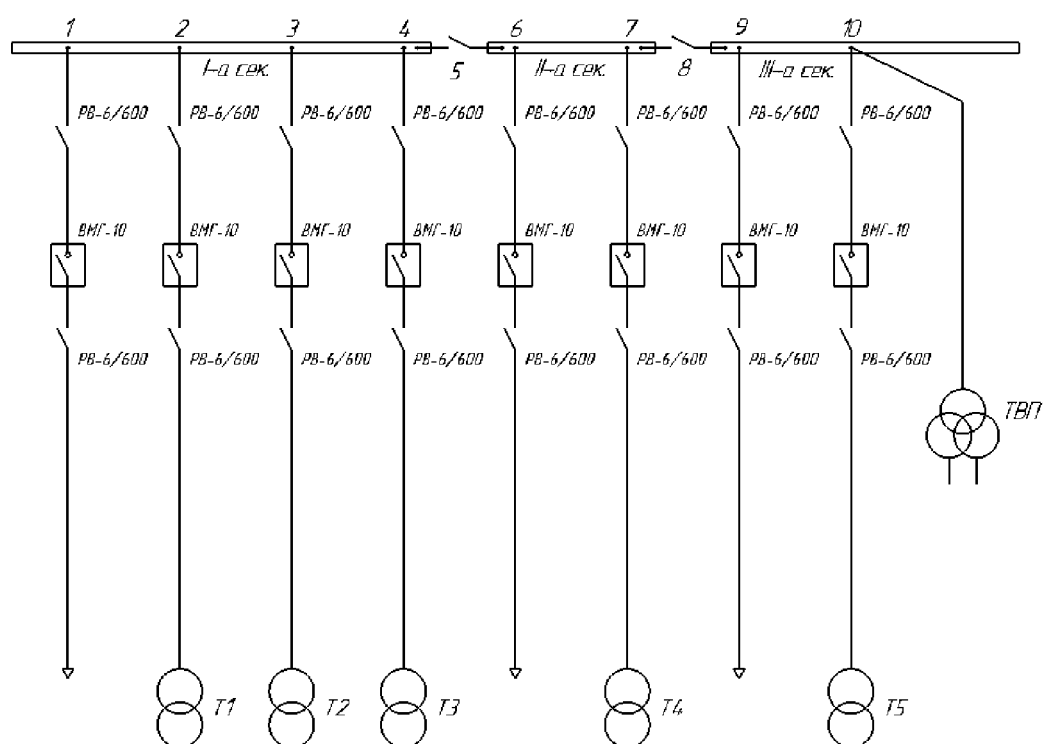
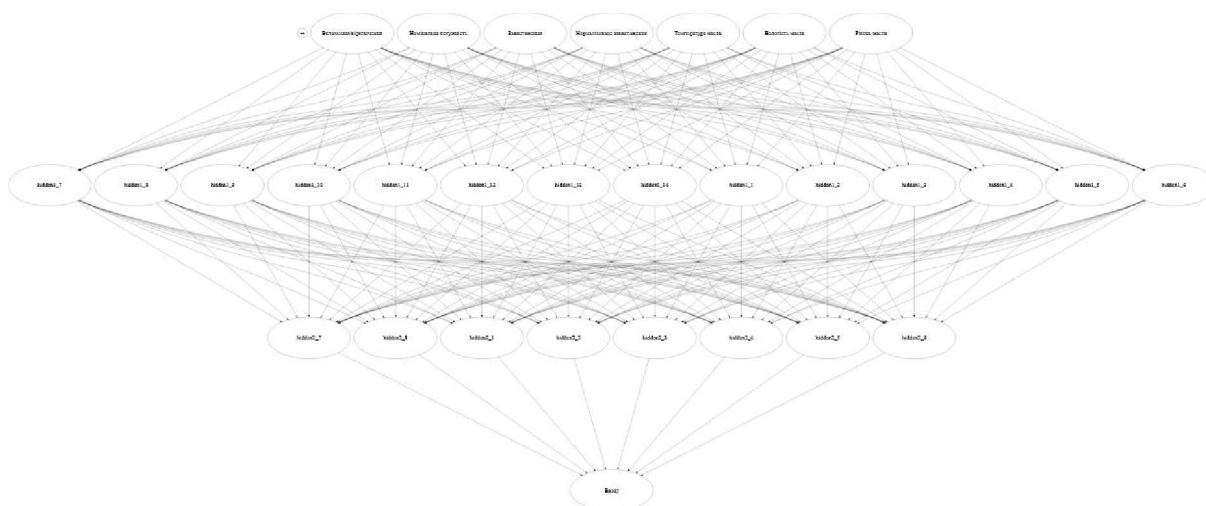
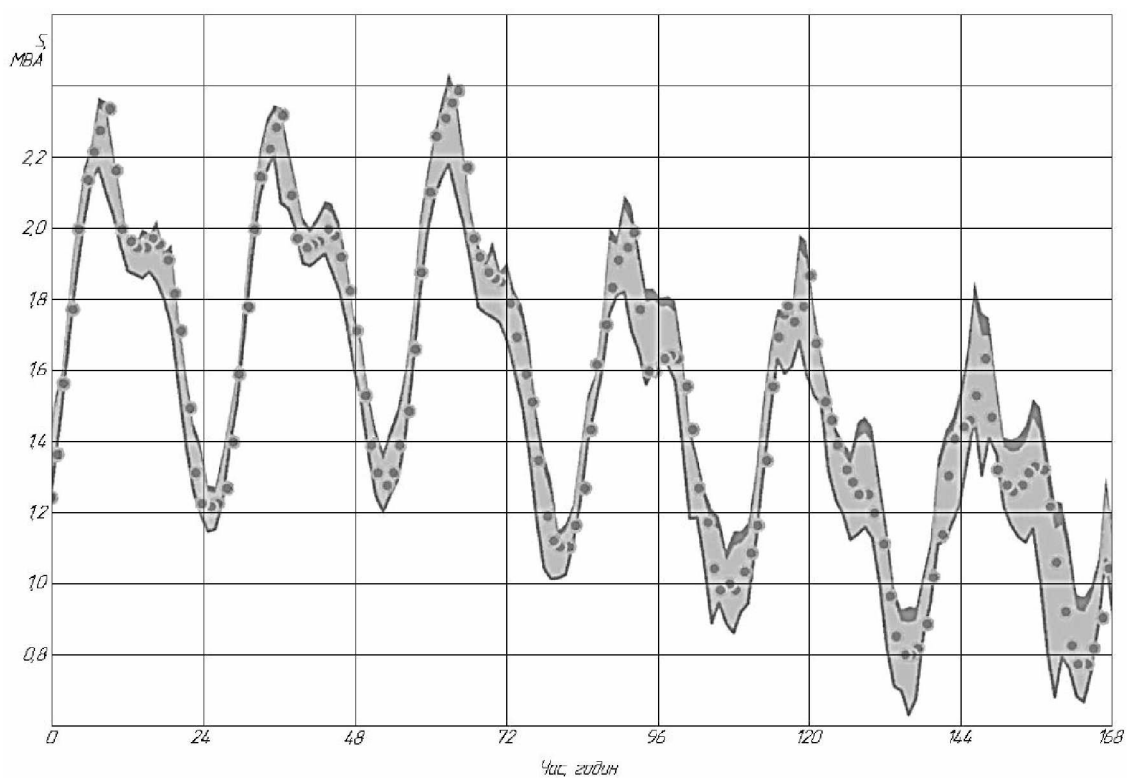


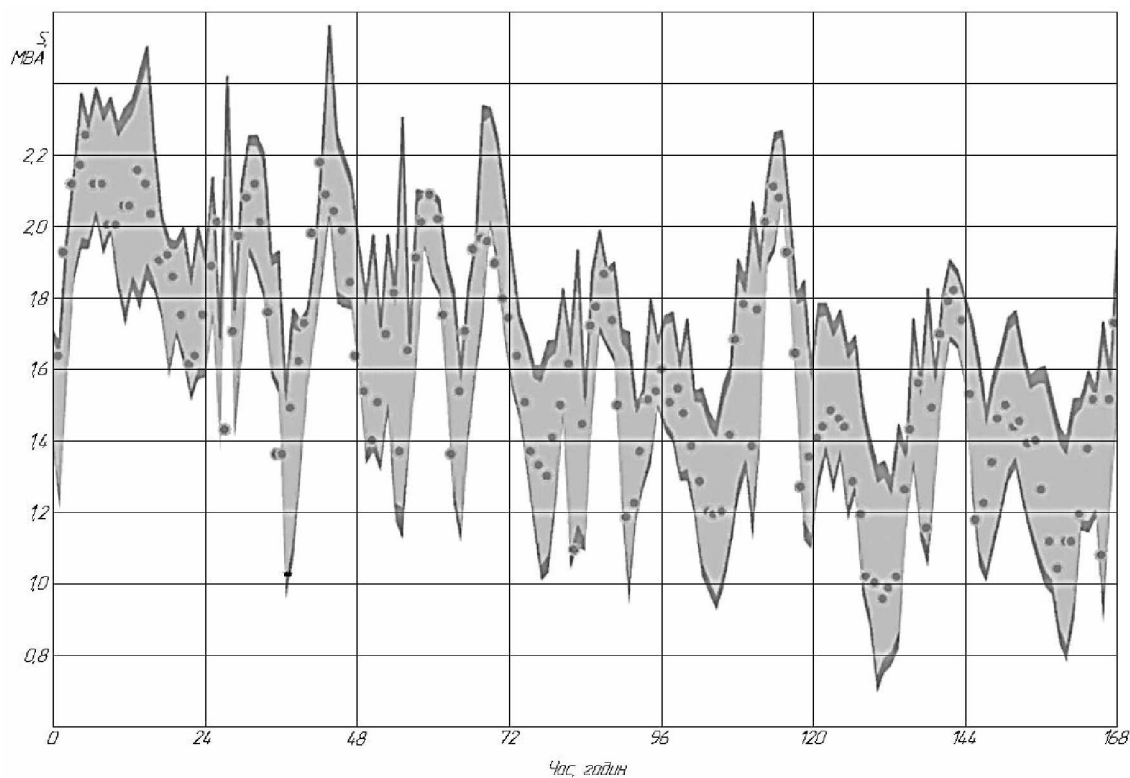
Схема трансформаторної підстанції ТП-16



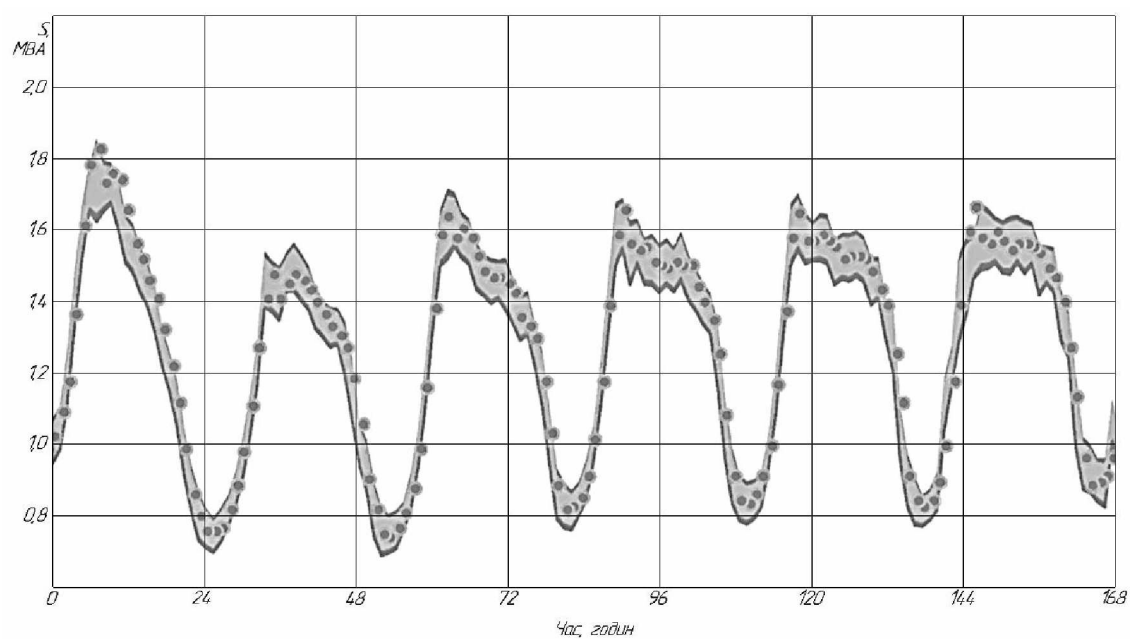
Остаточна структура нейронної мережі



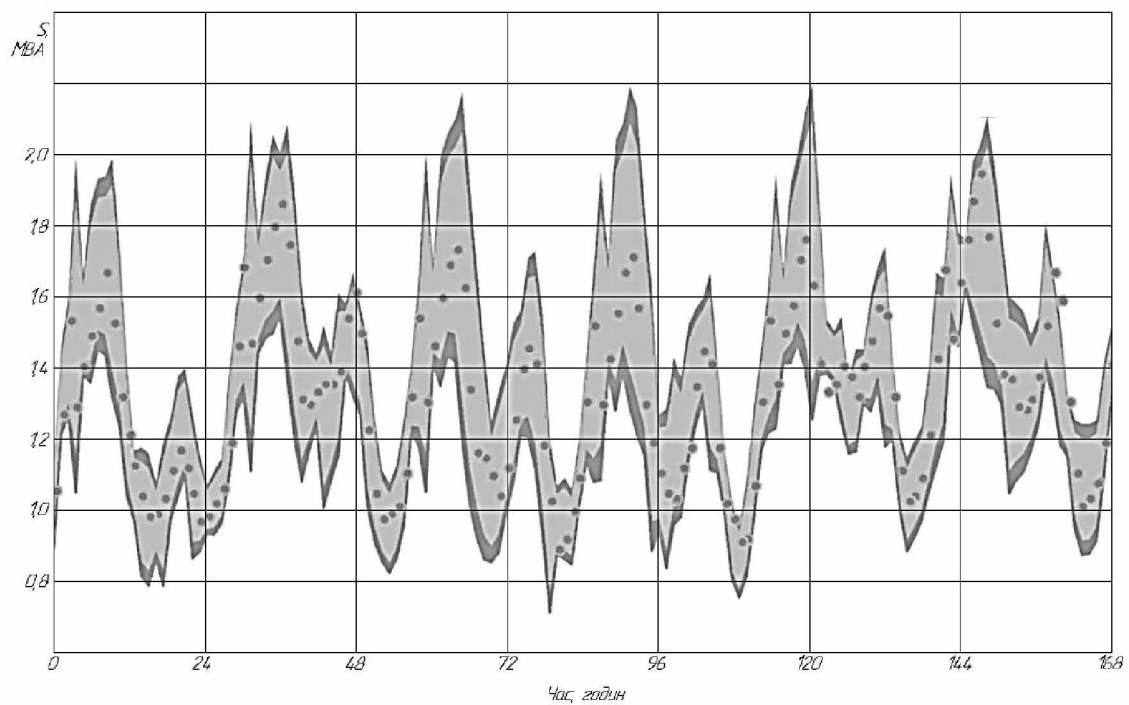
Порівняння реальних графіків споживання енергії з передбаченням ШНМ для ТП 1



Порівняння реальних графіків споживання енергії з передбаченням ШМ для ТП 2



Порівняння реальних графіків споживання енергії з передбаченням ШМ для ТП 4



Порівняння реальних графіків споживання енергії з передбаченням ШНМ
для ТП 8

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____