

□

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В
СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ
З *FACTS* ЕЛЕМЕНТАМИ»**

Виконав: студент VI курсу

групи Ен – 62 спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Телюк Я. Я.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник: _____ Левонюк В. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент: _____ Коробка С. В.
(прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2024

□

□

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)
д.т.н., професор Калахан О. С.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ _____ ” _____ 202__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Телюку Ярославу Ярославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Керування потоками реактивної потужності в системах електропостачання підприємств з FACTS елементами»

керівник роботи к.т.н., доцент Левонюк В. Р.
(наук. ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП № 133 / к - с від 28.04.2023 р.

2. Строк подання студентом роботи 18.01.2024 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

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

1. Аналіз методів та засобів керування потоками реактивної потужності
2. Створення адаптивної системи керування потоками реактивної потужності
3. Структурно-математичне моделювання системи електропостачання з активно-адаптивними елементами
4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях
5. Техніко-економічна оцінка

Висновки

Перелік джерел посилання

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	Городецький І. М., к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання 28.04.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Проведення аналізу методів та засобів керування потоками реактивної потужності	28.04.2023 – 19.05.2023	
2	Створення адаптивної системи керування потоками реактивної потужності	22.05.2023 – 8.09.2023	
3	Структурно-математичне моделювання системи електропостачання з активно-адаптивними елементами	11.09.2023 – 24.11.2023	
4	Розробка логіко імітаційної моделі процесу виникнення травми при обслуговуванні лінії електропередачі	27.11.2023 – 8.12.2023	
5	Здійснення техніко-економічної оцінки прийнятих рішень	11.12.2023 – 22.12.2023	
6	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації	25.12.2023 – 5.01.2024	
7	Завершення роботи в цілому	8.01.2023 – 18.01.2023	

Студент

Телюк Я. Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Левонюк В. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 621.425:4

Телюк Я. Я. «Керування потоками реактивної потужності в системах електропостачання підприємств з *FACTS* елементами». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 61 с. текстової частини, 4 таблиці, 31 рисунок, 33 джерел.

У кваліфікаційній роботі представлено можливі варіанти керування потоками реактивної потужності у системах електропостачання підприємств з *FACTS* елементами на межі балансової приналежності. Здійснено аналіз методів та засобів керування потоками реактивної потужності в системах електропостачання підприємств. На основі підходів штучних нейронних мереж, з використанням програмного комплексу *MatLab/Simulink*, було розроблено штучну нейронну мережу та алгоритм роботи СТАТКОМу. Для аналізу роботи системи електропостачання типового підприємства, розроблено її структурно-математичну модель в програмному комплексі *MatLab/Simulink*. У кваліфікаційній роботі розкрито питання охорони праці, які стосувалися ураження електричним струмом працівників підприємства. Представлено техніко-економічні обґрунтування застосування активно-адаптивних систем до компенсації реактивної потужності підприємства.

АКТИВНО-АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, СИСТЕМА
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ПІДПРИЄМСТВО, ШТУЧНА НЕЙРОННА
МЕРЕЖА, МОДЕЛЬ.



ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	9
1.1 Аналіз методів компенсації реактивної потужності.....	9
1.2 Пристрої компенсації реактивної потужності.....	12
1.3 Обґрунтування автоматизації керування потоками реактивної потужності.....	16
2 СТВОРЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	19
2.1 Структура системи керування.....	19
2.2 Штучні нейронні мережі для керування реактивними потоками потужності.....	22
2.2.1 Одношарові штучні нейронні мережі прямого поширення.....	23
2.2.2 Багатошарові штучні нейронні мережі прямого поширення...	24
2.2.3 Рекурентні мережі.....	25
2.3 Математична модель на основі ШНМ для адаптивного керування потоками реактивної потужності.....	26
3 СТРУКТУРНО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АКТИВНО-АДАПТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ...	29
3.1 Структурно-математичні моделі активно-адаптивної системи електрозабезпечення підприємства.....	30
3.2 Аналіз результатів числового експерименту.....	38
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	43
4.1 Дія струму на живі клітини.....	43
4.2 Місцеві електротравми.....	44

4.3	Модель процесу виникнення та формування виробничих небезпек при обслуговуванні обладнання на підприємстві.....	48
4.4	Розробка заходів з питань безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	51
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА	53
5.1	Аналіз рівня компенсації реактивної потужності.....	53
5.2	Обчислення можливого економічного ефекту.....	54
	ВИСНОВКИ.....	56
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	57
	ДОДАТКИ.....	60
	Додаток А Текст програми для навчання ШНР.....	60

ВСТУП

Для промислових підприємств ефективність споживання електричної енергії визначається своєчасним забезпеченням технологічного процесу, необхідною кількістю електроенергії належної якості при найменших втратах, з врахуванням умов збереження надійної та сталої роботи електричних приймачів. Найбільш суттєвою частиною заходів із покращання ефективності електроспоживання є зниження втрат шляхом регулювання напруги та компенсації реактивної потужності [1].

Компенсація реактивної потужності дає змогу покращити ефективність використання електричної енергії у трьох основних напрямках: збільшення пропускної можливості ліній та трансформаторів, зниження втрат активної енергії та нормалізація рівнів напруги. Встановлення компенсуючих пристроїв дає змогу зменшити активні втрати шляхом зменшення значень повного струму. Відтак, компенсація реактивної потужності може повноцінно рахуватися технологією енергозбереження. Навіть на підприємствах, де немає проблем із перевантаженням електромережевого обладнання, шляхом зменшення активних втрат, заходи щодо компенсації реактивної потужності окуплюються за відносно короткий період часу.

За значенням коефіцієнта реактивної потужності можна робити висновок про частину споживаної енергії, яка корисно використовується для здійснення роботи. Для наближення коефіцієнта потужності приймальних пристроїв до одиниці в основному полягає техніко-економічна проблема компенсації реактивної потужності [2].

Для регулювання потоків реактивної потужності при забезпеченні допустимих ДСТУ рівнів напруги в розподільчих мережах промислових підприємств та стійкості навантаження, потрібно розробляти централізовані та адаптивні системи керування параметрами засобів регулювання, які здатні миттєво оцінювати параметри поточного режиму, знаходити актуальні причинно-наслідкові закони функціонування електричної системи, керувати

групою різних елементів системи, з великою кількістю параметрів, які можуть змінюватися в часі.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи керування потоками реактивної потужності з використанням активно-адаптивних елементів для підтримки потрібного значення коефіцієнта реактивної потужності ($tg\varphi$) та забезпечення визначеного ДСТУ рівня напруги у системі електропостачання підприємств.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- здійснити аналіз досліджень у галузі керування потоками реактивної потужності у системах електропостачання;
- розробити адаптивну систему керування потоками реактивної потужності у системі електропостачання промислового підприємства із використанням штучної нейронної мережі та активно-адаптивних елементів;
- розробити імітаційну модель, яка дасть змогу відтворити керування потоками реактивної потужності на межі балансової приналежності підприємства та енергосистеми, та оцінити її ефективність.

Об'єктом кваліфікаційної роботи є система електропостачання промислового підприємства.

Методи дослідження. Для реалізації поставлених у кваліфікаційній роботі завдань використано такі методи: методи аналізу та синтезу; теорія систем автоматичного керування, методи оптимізації; методи моделювання, які ґрунтуються на структурно-математичному моделюванні (програмний комплекс МАТЛАБ).

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1 Аналіз методів компенсації реактивної потужності

Мета компенсації реактивної потужності є зовсім різною при проектуванні та експлуатації електричних мереж. Під час проектування електричних мереж є мінімізація сумарних витрат на нове будівництво шляхом зниження потоків реактивної потужності через елементи мережі, а під час експлуатації – надійне та якісне забезпечення споживачів електричною енергією при мінімальних додаткових вкладеннях та зниження експлуатаційних витрат.

Традиційно компенсація реактивної потужності спрямована на вирішення балансового, економічного завдання, а також завдання регулювання напруги.

Розв'язання балансового завдання передбачає уникнення дефіциту реактивної потужності у системі в цілому, забезпечуючи необхідні рівні напруг на шинах генераторів електричних станцій. Уникнення місцевих дефіцитів реактивної потужності дає змогу відрегулювати напруги у центрах живлення. Бачимо, що економічне завдання є виключно оптимізаційним. Під час його розв'язання найчастіше цільовою функцією є витрати [3], які залежно від запропонованого методу включають різне поєднання параметрів: вартість компенсуючих пристроїв, втрати активної та реактивної потужності в мережі, відхилення напруги у споживачів, пропускна здатність елементів мережі, штрафні надбавки за наднормативне споживання реактивної потужності, вартість генерації реактивної потужності на електричних станціях. Для розв'язання оптимізаційних задач усі представлені складові записують як функції, залежні від генерованої реактивної потужності, що розглядаються джерелами реактивної потужності.

Відмінності методик компенсації реактивної потужності полягають у постановці та умовах розв'язуваної задачі, вигляді цільової функції, кількості

критеріїв оптимізації, типу використовуваних вихідних даних, способах пошуку рішення.

Незважаючи на відмінності у підходах до проведення компенсації реактивної потужності, основні технічні обмеження, які використовуються при її розв'язанні, завжди включали такі нерівності [4]:

$$Q_{\max} \geq Q \geq Q_{\min}, \quad (1.1)$$

де Q_{\max}, Q_{\min} – межі генерованої реактивної потужності розглядуваного пристрою; Q – фактичне значення реактивної потужності, отримані при оптимізації.

$$U_{\max} \geq U \geq U_{\min}, \quad (1.2)$$

де U_{\max}, U_{\min} – максимальне та мінімальне значення напруги; U – фактичне значення напруги.

$$\operatorname{tg} \varphi \geq \operatorname{tg} \varphi_{\max}, \quad (1.2)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ – фактичне значення коефіцієнта потужності в мережі; $\operatorname{tg} \varphi_{\max}$ – допустиме значення коефіцієнта потужності в мережі.

За наявності у мережі декількох джерел реактивної потужності потрібно розв'язувати задачу оптимального розподілу реактивної потужності між ними для зниження сумарних витрат, тобто спільне розв'язання балансової та економічної задачі компенсації реактивної потужності.

Завдання оптимізації потужності та місць встановлення засобів компенсації реактивних навантажень та регулювання напруги у загальному випадку представлена функцією витрат, до якої входять [5]:

- витрати на додаткові пристрої, які виконують лише функції регулювання напруги у кожному вузлі;
- витрати на додаткові компенсуючі пристрої у кожному вузлі,
- витрати, які пов'язані із втратами потужності та енергії в існуючих джерелах;
- збитки, які виникають у споживачів через неоптимальні напруги в кожному вузлі;

- витрати, які пов'язані з експлуатацією додаткових компенсуючих та регулюючих пристроїв.

При цьому підкреслюється невиправдана трудомісткість рішення, здійснивши яке можливо, після нехтування незначними складниками, тому в розрахунках економічного ефекту враховується ефект від зниження втрат активної та реактивної потужностей, від нормалізації якості напруги у вузлах і від збільшення пропускної спроможності елементів мережі. Усі складові ефекту визначаються через градієнт відповідної функції. Наявність трьох останніх складових ефекту залежить від ступеня впливу додаткових компенсаційних пристроїв на мережу, а основним є ефект від зниження втрат активної потужності. Додаткові компенсаційні пристрої доцільно встановлювати насамперед у вузлах [6].

При визначенні місць встановлення та потужностей компенсаційних пристроїв, у якості вихідних навантажень використовується триступінчастий графік навантаження, що не враховує реального характеру зміни навантаження та спочатку містить методичну похибку, яка може призводити до свідомо неоптимальних результатів. Застосування такого підходу можливе лише під час проектування, а не під час експлуатації.

При детермінуванні місць встановлення та потужностей компенсаційних пристроїв у якості вихідних даних використовують триступінчастий графік навантаження, який не враховує реального характеру зміни навантаження та спочатку містить методичну похибку, яка може призводити до свідомо неоптимальних результатів. Застосування такого підходу можливе лише під час проектування, а не під час експлуатації. Відтак, усі розглянуті методи та методики компенсації реактивної потужності використовують як цільову функцію наведені витрати, які залежно від запропонованого методу та області застосування включають різне поєднання таких параметрів як вартість компенсуючих пристроїв, втрати активної та реактивної потужності у мережі, відхилення напруг, пропускну здатність елементів мережі, штрафні надбавки за наднормативне

споживання реактивної потужності, вартість генерації реактивної потужності на електричних станціях і т.д. Використання наведених витрат як цільову функцію є абсолютно обґрунтованим, і при розробці методики компенсації реактивної потужності мають використовуватися саме вони, проте складові повинні відповідати сучасним умовам функціонування вітчизняної електроенергетики.

Розкриття невизначеності інформації зводиться до варіантного розрахунку серії характерних режимів із різними значеннями невідомих параметрів, тобто до перебору варіантів, що не є вирішенням проблеми.

Комплексне керування режимами електричних мереж за своєю суттю є важкою процедурою, оскільки це пов'язано із таким об'єктом керування, як електрична мережа підприємства, умови функціонування якого недостатньо вивчені, а модель об'єкта і мета керування слабо формалізована. Застосування штучної нейронної мережі для досягнення достатньої швидкості прийняття рішень керування дає потрібний розв'язок задачі в більшості практично-значущих випадках, що призводить лише до ускладнення пошуку розв'язку.

1.2 Пристрої компенсації реактивної потужності

На сучасному етапі розвитку силової електротехніки розроблено велику кількість пристроїв, які застосовуються при регулюванні рівнів напруг та потоків реактивної потужності, які знаходять своє застосування в електричних мережах різних класів напруг. Розглядаючи весь спектр технічних засобів, які застосовуються для керування режимами реактивної потужності, потрібно виділити найбільш прийнятні та ефективні компенсуючі пристрої.

Основну функцію регулювання напруг та керування потоками реактивної потужності у розподільчих мережах напругою 35 – 110 кВ виконують генератори електричних станцій та пристрої РПН і ПБЗ, які

встановлені на підстанціях, тобто централізовано вирішується балансова задача компенсації реактивної потужності та завдання регулювання напруги.

Великі промислові споживачі, які під'єднуються до мережі, зазвичай, самостійно проводять заходи щодо компенсації реактивної потужності. Вони використовують комутовані вимикачами або зустрічно-паралельнотиристорними вентилями додаткові конденсаторні установки [7], тиристорно-реакторні групи, перетворювачі з природною або штучною комутацією [8]. При наявності різкозмінних навантажень із накидами реактивної потужності у десятки та сотні МВАр застосовуються статично-тиристорні компенсатори, які покривають ці піки [50]. Крім того, на промислових підприємствах з електроприймачами, які погіршують якість електричної енергії, застосовують фільтрокомпенсуючі, симетруючі та фільтросиметруючі пристрої, які знижують рівень вищих гармонік в мережі і несиметрію напруг та виконують компенсацію реактивної потужності.

Для електричних мереж надвисоких класів напруг рекомендуються СТК, СТАТКОМ, КШР, СК, асинхронізовані компенсатори, керовані УПК, а також пристрої з комплексними функціями, які керують як потоками потужності, так і параметрами мережі – об'єднані регулятори потоків потужності [9]. Вони призначені для керування великими потоками потужності та мають відповідно значні одиничні потужності та вартості. Їх відносять до активно-адаптивних елементів керування в електричних мережах. Проте у пріоритеті для мереж надвисоких класів напруг залишаються пристрої, які обмежують рівні напруги у вузлах – ШР та КШР та їх різні варіанти виконання, оскільки на перше місце ставиться надійність та безаварійність мереж.

У розподільчих мережах 35 – 110 кВ основними джерелами реактивної потужності є конденсаторні установки. Вони можуть бути нерегульованими та регульованими. Оскільки, не кожне промислове підприємство має у наявності постійно працюючі синхронні двигуни і не може розраховувати на

генеруючі потужності, то доцільно розглядати ефективність установки нових компенсуючих пристроїв.

Концепція керування *Smart Grid* передбачає використання найбільш прогресивних пристроїв, які виконують як поздовжню, так і поперечну компенсацію реактивної потужності [10].

На основі проаналізованих пристроїв, здійснено поділ типів пристроїв компенсації реактивної потужності за рівнями номінальної напруги мережі. Результати аналізу представлено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні засоби КРП залежно від рівня напруги мережі

Клас напруги	Тип обладнання
220 кВ і вище	СТАТКОМ, СТК
	КШР та БСК
	FACTS
	УПК та керовані УПК
	СК
110 кВ	СТАТКОМ, СТК
	КШР + БСК
	БСК
0,4 – 35 кВ	СТК
	СКРП
	СД
	БК, КУ

Статичні компенсатори СТАТКОМ і СТК широко застосовуються для класів високих та надвисоких напруг, а їх використання для класів середньої напруги майже не відбувається. Однак за рубежом вже існує позитивна практика використання таких систем КРП [11]. Одним з таких прикладів служить високоекономічний статичний регульований компенсатор *SVC PLUS* компанії *Siemens* (рис. 1.1), який є вдосконаленою версією СТАТКОМ, який дає змогу збільшити динамічну стабільність та якість електричної енергії в мережах різних класів напруг (таблиця 1.3).



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд установки *SVC PLUS* від *Siemens*

SVC PLUS забезпечує такі експлуатаційні переваги, як мінімальне технічне обслуговування, стабілізацію координат режимів мережі та високу динамічність за рахунок дуже малого часу спрацьовування. Завдяки резервуванню силових модулів, досягається дуже висока експлуатаційна готовність системи.

Таблиця 1.2 – Типи *SVC PLUS*

Реактивна потужність, МВАр	Класи напруг, кВ				
	8	11	14	36	110+
25	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>S, M, L, C</i>
35	–				
50		–	<i>2L</i>	<i>2C</i>	<i>4L, 2C</i>
100			<i>4L</i>		
200		–	–	<i>4C</i>	
400					

SVC PLUS має ряд таких переваг:

- покращання динамічної стабільності систем електропередачі;
- покращання якості енергії, зниження ризиків падіння напруг та відмикання живлення;
- високоефективне зменшення коливань частоти у промисловості;
- пониження генерування гармонік та зниження завад, завдяки використанню модульного багаторівневого конвертера;
- мінімальний обсяг робіт із проектування, завдяки стандартизованій компонентній конструкції;
- швидке, ефективне, модульне та економічно вигідне рішення.

SVC PLUS може бути адаптований до індивідуальних характеристик реактивної потужності. У нього є три стандартні конфігурації *SVC PLUS S* (+/- 25 МВАр), *SVC PLUS M* (+/- 35 МВАр), *SVC PLUS L* (+/- 50 МВАр) та *SVC PLUS C* (+/- 100 МВАр). Він поставляються як рішення контейнерного типу. До чотирьох таких блоків може бути об'єднано в одну систему і можуть працювати у повністю паралельному режимі. Рішення без трансформаторів можливі до 36 кВ. Для більш високої напруги системи використовуються стандартні трансформатори змінного струму. Ця унікальна модульна конструкція робить *SVC PLUS* високоадаптивним рішенням із чудовими робочими характеристиками та високою економічною ефективністю [12].

Відтак, така модульна конструкція стає високоадаптивним рішенням із потрібними робочими характеристиками та високою економічною ефективністю для компенсації реактивної потужності на стороні 10 кВ, що у сукупності із керуванням РПН трансформаторів на головних понижувальних підстанціях, дасть змогу автоматизувати керування потоками реактивної потужності в системах електропостачання підприємства.

1.3 Обґрунтування автоматизації керування потоками реактивної потужності

Керування режимами системами електропостачання поділяється на автоматичне та оперативне. Ці обидва керування характеризуються недостатньою інформаційною забезпеченістю, недосконалістю методів обробки інформації та прийняття рішень. Розвиток математичних методів та засобів обчислювальної техніки, застосування мікропроцесорів та їх удосконалення дають змогу суттєво зняти обмеження на якість керування режимами систем електропостачання. На практиці, якісне керування системами електропостачання можливе при якісно-новому підході до прийняття рішення – від умов найгіршого та найважчого випадку до

формування оптимальних керуючих впливів, які відповідають характеру збурення у темпі процесу, до адаптації системи керування до поточного режиму.

Вирішенню цих завдань сприяє інтеграція систем керування на єдиній технічній, інформаційній та модельно-програмній основі [13]. Взаємозв'язки інформаційних автоматизованих систем диспетчерського керування, автоматизованих систем керування технологічними процесами об'єктів, автоматизованих систем комерційного та технічного обліку електричної енергії, систем захисту, керування та контролю, засобів керування у нормальних та аварійних режимах. По суті, тут можна сказати про накладання на електричну мережу інформаційної мережі з інтелектуальними вузлами, у яких здійснюється обробка інформації та прийняття локальних рішень. Основу інформаційної мережі у завданнях оперативного керування режимами у реальному часі становлять телеметричні вимірювання перетоків потужності, рівнів напруг у вузлах та телесигнали про стан основного обладнання мережі.

У зв'язку із цим, одним із ефективних керунків економії електричної енергії є впровадження на промислових підприємствах сучасних автоматизованих систем контролю, обліку та керування споживанням електричної енергії. На багатьох підприємствах вже встановлено такі системи. Слід звернути увагу, що автоматизація системи керування електроспоживанням цих підприємств працює далеко не на межі своїх технічних та інформаційних можливостей. Насамперед, це пов'язано з тим, що згадана система використовується в основному для комерційних обчислень з енергопостачальною організацією, а також для дотримання заявленого максимуму активної потужності, ліміт якої, навіть при наявності автоматичної системи, може необґрунтовано перевищуватися. Окрім того є утруднений доступ до баз даних цієї системи. Показники якості електричної енергії зазвичай не фіксуються у споживача. Такі АСКЕС прийнято називати АСКЕС пасивного типу. Тут явно виражено пріоритет збору інформації про

події в електричній мережі та відсутній механізм впливу на них. Для того щоб АСКЕС грала активну роль у процесі електропостачання, алгоритм її роботи, крім збору інформації, повинен або включати керуючі впливу на цей процес для споживача, або інформувати споживача та постачальника електроенергії про прийняте рішення із зазначенням причин. Така реалізація активної АСКЕС є інтегральним варіантом, за якого технологічний комплекс вирішує економічні завдання та виконує функції АСУТП [14].

Відтак, АСКЕС використовується як інструмент керування електроспоживанням, а не як засіб для керування режимами мережі. АСКЕС має такі властивості в галузі керування режимами систем електропостачання:

1) ідентифікаційні властивості – однозначне визначення режимів та параметрів режимів роботи об'єкта та елементів системи у будь-який момент часу; іншими словами – це наочне уявлення картини електроспоживання кожного підрозділу підприємства та миттєвих значень параметрів режиму в контрольних точках, максимально наближених до реального часу (бажано з великою частотою зняття показань із лічильників);

2) керуючі властивості – прийняття рішень та формування керуючих впливів на елементи системи в різних режимах за заданими алгоритмами при поєднанні централізованого та місцевого керування виконавчими пристроями електроустановок (трансформаторів з РПН) та наявності вибірковості.

У якості елементів АСКЕС зараз виступають різні мікропроцесорні засоби (електронні лічильники – основа АСКЕС) із досить великим обсягом функцій. Наприклад, у лічильників *NIK* є такі основні можливості, які можна використовувати під час керування режимами систем електропостачання:

а) вимірювання активної та реактивної енергії та потужності у двох напрямках;

б) вимірювання та відображення напруги та струму пофазно, частоти мережі, коефіцієнта потужності, кутів зсуву фаз струму та напруги.

Проблема управління режимами систем електропостачання за допомогою АСКЕС на сьогоднішній день не нова. Раніше, ще в 70-ті – 80-ті роки ХХ століття, існували «предки» АСКЕС – різні реєстратори та прилади для вимірювання параметрів режиму СЕС, проте їх показники не були узгоджені між собою, а рішення приймалися на локальному рівні. При цьому, також використовувалися трансформатори струму та напруги, вони застосовуються і зараз для підключення електронних лічильників та слугують як датчики на нижчому рівні АСКЕС [15].

АСКЕС повинна працювати як людинно-машинна система, яка поєднує застосування ефективних сучасних засобів обчислювальної техніки з діяльністю людини-інженера, роль якого полягає у прийнятті остаточного рішення за завданням економічного режиму роботи систем електропостачання підприємства у масштабі реального часу в ручному, та діалоговому режимах.

У зв'язку із проблемами щодо вилучення інформації про режими систем електропостачання підприємств, у цьому підрозділі виявлено лише можливість використання АСКЕС як інформаційну базу для керування режимами систем електропостачання, але не більше. Тому, далі це питання ми будемо порушувати лише з очки зору цієї позиції.

2 СТВОРЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Для відтворення роботи системи нам необхідно здійснити моделювання роботи адаптивного управління потоками реактивної потужності і рівнів напруг в електричній мережі. Для цього потрібно мати такі вихідні дані [16]:

- а) схему заміщення електричної мережі системи електропостачання промислового підприємства із зазначенням значень активних та реактивних опорів ліній, асинхронних двигунів, трансформаторів, СТАТКОМ;
- б) діапазони регулювання реактивної СТАТКОМ;
- в) діапазони регулювання коефіцієнтів трансформації трансформаторів за допомогою РПН;
- в) межі допустимих змін напруги у всіх вузлах електричної мережі.

2.1 Структура системи керування

Створити модель адаптивного керування, з фізичними параметрами елементів системи електропостачання промислового підприємства, дає змогу програмний комплекс *Matlab/Simulink*. У *Matlab/Simulink* просто поєднати інформаційну мережу з електротехнічною, при цьому надавши функцію керування штучній нейронній мережі, але у силу обліку особливостей блоків моделей *FACTS*, реалізованих у програмному комплексі *Matlab/Simulink*, необхідна обробка вихідних значень нейронної мережі для коректної інтерпретації блоками сигналів керування [17].

На рисунку 2.1 представлено структуру системи керування для якої вхідними параметрами є значення напруги трьох фаз (U_{BH}). Окрім того, для створення адаптивної моделі поведінки штучної нейронної мережі (ШНМ) необхідно мати зворотний зв'язок із об'єктом керування, а саме із трьома фазами напруг у кожній контрольній точці електропостачання підприємства (U_{HH}).

Перш ніж передати сигнали керування від ШНМ на активно-адаптивні елементи моделі, потрібно обробити вихідний сигнал для коректної роботи блоків імітаційної моделі:

- задати затримку часу приблизно 0,5 с для запобігання виникнення резонансів та посилення перехідних процесів у контурі середньої напруги та успішного керування СТАТКОМом;
- блок РПН має обмеження в логіці при використанні керування ним ззовні, окрім того, у РПН існує фізична затримка, обґрунтована швидкістю перемикавання між відпаюваннями, яка приблизно рівна 3 с.

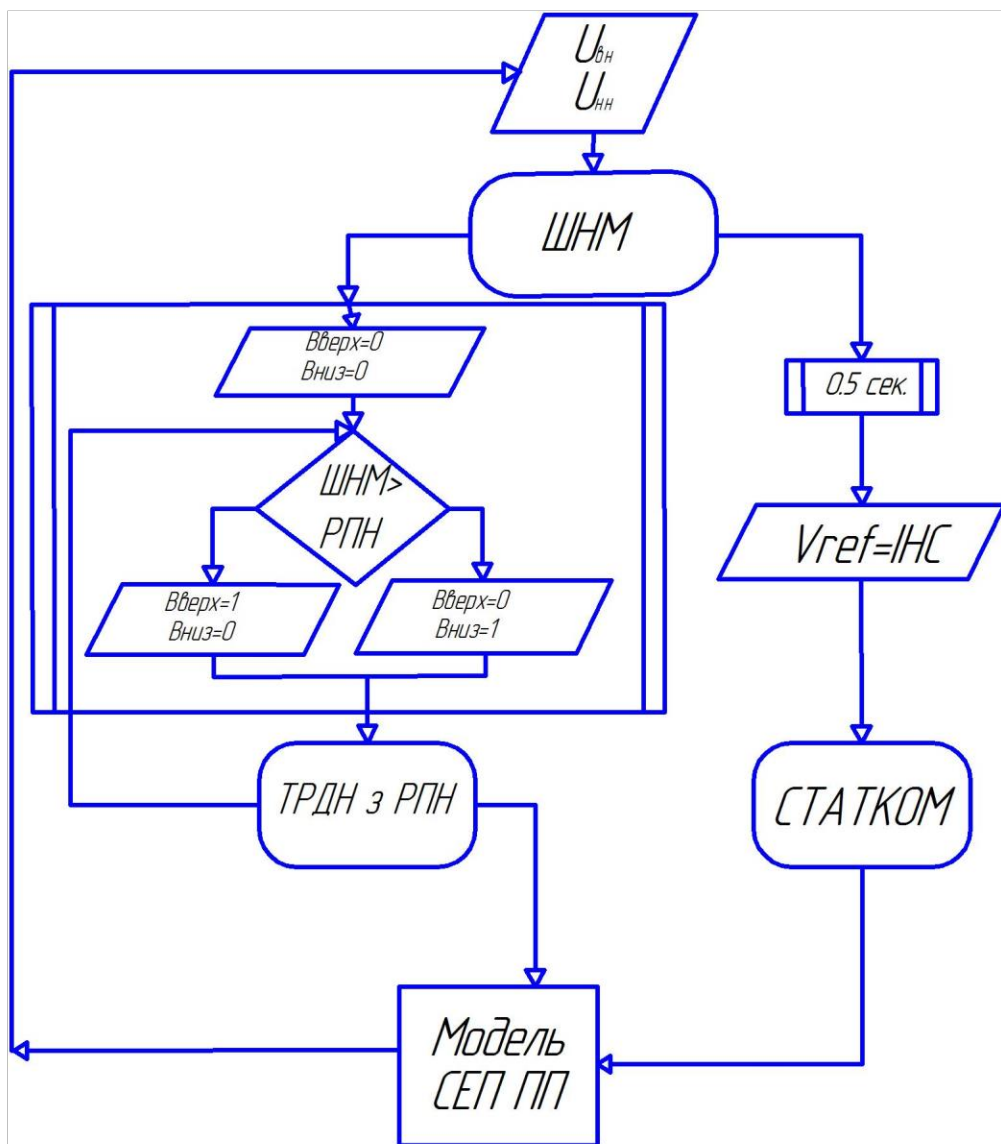


Рисунок 2.1 – Структура алгоритму системи керування

Недолік зовнішньої логіки, яка керує РПН полягає в тому, що за наявності двох вхідних сигналів *Вгору* та *Вниз*, відпайка змінюється тільки

тоді, коли значення вхідного сигналу змінюється з 0 на 1 (з урахуванням фізичного обмеження в 3 с, задане у параметрах блоку). Тому в додатковому контурі знаходиться блок обробки сигналів, який порівнює поточний стан РПН і той, який потрібно прийняти по команді ШНМ, а потім подає сигнал на вхід керування РПН для перемикавання на відпаювання вище або нижче. Процес повторюється до тих пір, поки РПН не прийме значення необхідне для ШНМ.

Після затримки у 0,5 с задається еталонна напруга (V_{ref}), яка потрібна ШНМ для нормального керування СТАТКОМом. Крім схеми керування представленої на рис. 2.1, СТАТКОМ ще має свою власну логіку.

На рисунку 2.2 представлено однолінійну схему СТАТКОМ та її спрощену схему керування [18].

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 2.2 – Схема керування СТАТКОМом

Елементами схеми управління СТАТКОМом є:

- фазне автопідлаштування частоти (PLL), яка синхронізується за прямою послідовністю вхідної напруги V_1 . Вихідне значення (кут $\Theta = \omega t$) використовується для обчислень поздовжньої та поперечної складової змінного струму та напруги (позначені на рисунку як V_d , V_q та I_d , I_q);
- вимірювальні системи, здійснюють вимірювання поздовжньої та поперечної складових змінного контура прямої послідовності, якою схема керує, а також і напруга контура постійного струму V_{dc} .
- зовнішній контур регулювання, який складається із регуляторів постійної та змінної напруги. Вихід із регулятора змінної напруги – це

еталонний струм I_{qref} для регулятора струму (I_q – струм поперечний напрузі, який регулює потік реактивної потужності). Вихід регулятора постійно напруги – це еталонний струм I_{dref} для регулятора струму (I_d – струм, який збігається по фазі з напругою, який регулює потік активної потужності).

○ внутрішній контур складається із регулятора струму. Він керує амплітудою та фазою напруги (V_{2d}, V_{2q}), що генерується перетворювачем з ши-ротно-імпульсною модуляцією (ШІМ) з I_{dref} та I_{qref} еталонних струмів створених за допомогою регуляторів постійної та змінної напруги, відповідно.

Відтак, проаналізована структура системи керування дає змогу ШІМ оперативно реагувати на зміни на межі балансової належності і підлаштовувати під них активно-адаптивні елементи з урахуванням усіх вищеописаних обмежень.

2.2 Штучні нейронні мережі для керування реактивними потоками потужності

Існуючі методи прогнозування електричного навантаження та надійності елементів електричних мереж не можуть працювати із «зашумленими» чи неповними даними, тоді як у реальному житті найчастіше доводиться мати справу саме із такою інформацією. Тому необхідні нові підходи та методи для прогнозування електричної надійності електрообладнання та електричного навантаження, які б могли враховувати дані різного роду, працювати з неточними, неповними вхідними даними. Одним з таких нових підходів, що розвиваються, є метод, заснований на нечіткій логіці та штучних нейронних мережах.

Особливість застосування нейронних мереж пов'язана із тим, що вони використовують механізм навчання. Користувач нейронної мережі підбирає дані, а потім запускає алгоритм навчання, який автоматично налаштовує параметри мережі. При цьому від користувача, звичайно, потрібно якийсь

набір евристичних знань про те, як слід відбирати і готувати дані, вибирати потрібну архітектуру мережі та інтерпретувати результати [19].

Структура нейронних мереж тісно пов'язана із використовуваними алгоритмів навчання. У загальному випадку можна виділити три фундаментальні класи нейромережових архітектур, які широко застосовуються для надійного та ефективного управління.

2.2.1 Одношарові штучні нейронні мережі прямого поширення. В одношаровій штучній нейронній мережі, нейрони розташовуються за шарами. У найпростішому випадку у такій мережі існує вхідний шар джерела, інформація від якого передається на вихідний шар нейронів, але не навпаки. Така мережа називається мережею прямого розповсюдження або ациклічною мережею.

На рисунку 2.3 представлено структуру штучної нейронної мережі прямого поширення для випадку чотирьох вузлів у кожному із шарів (вхідному та вихідному). Така нейронна мережа називається одношаровою, при цьому під єдиним шаром мається на увазі шар обчислювальних елементів (нейронів) [20].

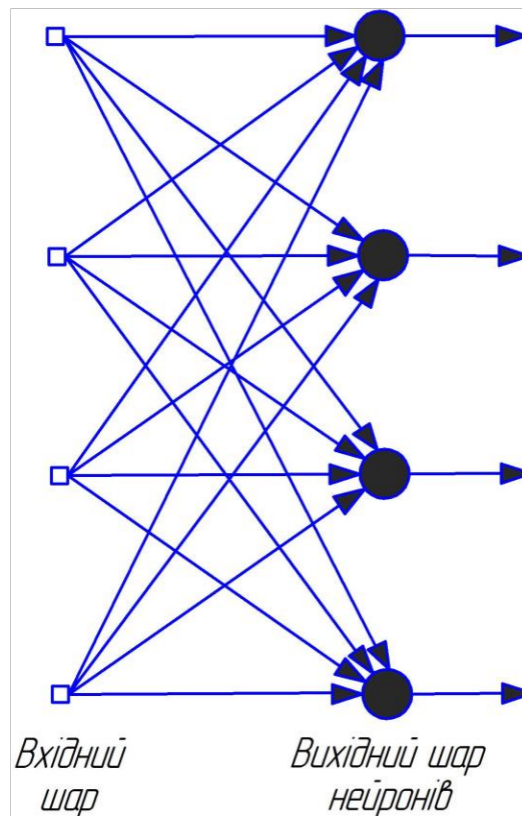


Рисунок 2.3 – ШНМ прямого поширення з одним шаром

При обчисленні кількості шарів не беруться до уваги вузли джерела, оскільки вони не виконують обчислень. Для кожного нейрона мережі крім синаптичних зв'язків з елементами вхідного вектора налаштовується зв'язок з фіктивним одиничним входом (коефіцієнт зміщення).

Оскільки вихідні змінні можуть приймати як бінарні, так і аналогові значення, вибір виду активаційних функцій обмежений лише областю допустимих значень вихідних сигналів.

2.2.2 Багатозарові штучні нейронні мережі прямого поширення.

Інший клас нейронних мереж прямого поширення характеризується наявністю одного або декількох прихованих шарів, вузли яких називаються прихованими нейронами або прихованими елементами. Функція останніх полягає у посередництві між зовнішнім вхідним сигналом та виходом нейронної мережі. Додаючи один або кілька прихованих шарів, ми можемо виділити статистики високого порядку. Така мережа дає змогу виділяти глобальні властивості даних за допомогою локальних сполук за допомогою додаткових синаптичних зв'язків та підвищення рівня взаємодії нейронів. Здатність прихованих нейронів виділяти статистичні залежності високого порядку особливо істотна, коли розмір вхідного шару досить великий.

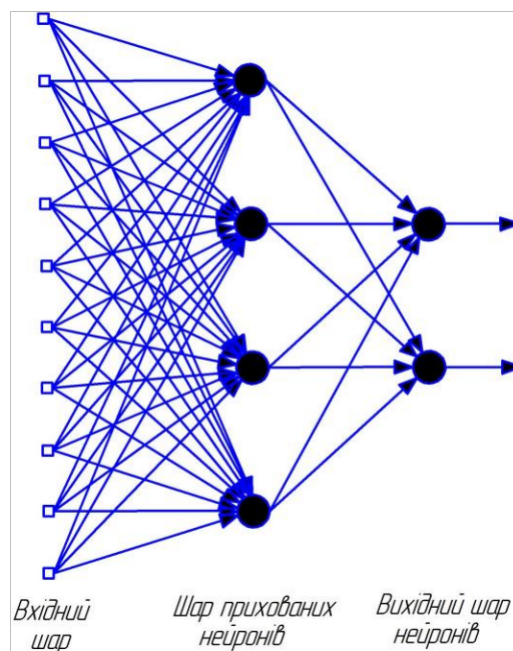


Рисунок 2.4 – Багатошарова ШНМ прямого поширення

Мережа, показана на рисунку 2.4 має назву «10-4-2», оскільки вона має 10 вхідних, 4 прихованих та 2 вихідних нейрона. У загальному випадку мережа прямого поширення з m входами, h_1 нейронами першого прихованого шару, h_2 нейронами другого прихованого шару та q нейронами вихідного шару називається мережею $m-h_1-h_2-q$. Нейронна мережа, показана на рисунку 2.4, вважається повнозв'язковою у тому сенсі, що усі вузли кожного конкретного шару з'єднані з усіма вузлами суміжних шарів. Якщо деякі із синаптичних зв'язків відсутні, то така мережа називається неповнозв'язковою.

2.2.3 Рекурентні мережі. Рекурентна нейронна мережа відрізняється від мережі прямого поширення наявністю, принаймні, одного зворотного зв'язку. Наприклад, рекурентна мережа може складатися з єдиного шару нейронів, кожен з яких направляє свій вихідний сигнал на входи всіх інших нейронів шару. Архітектуру такої нейронної мережі представлено на рис. 2.5. У наведеній структурі відсутні зворотні зв'язки нейронів із самими собою та немає прихованих нейронів [21].

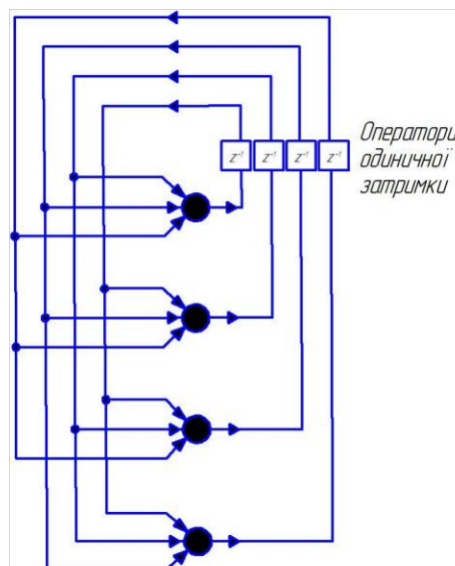


Рисунок 2.5 – Рекурентна ШНМ прямого поширення з одним прихованим та одним вихідним шаром

На рис. 2.6 представлено інший клас рекурентних мереж із прихованими нейронами. Тут зворотні зв'язки виходять як із прихованих, так і вихідних нейронів.

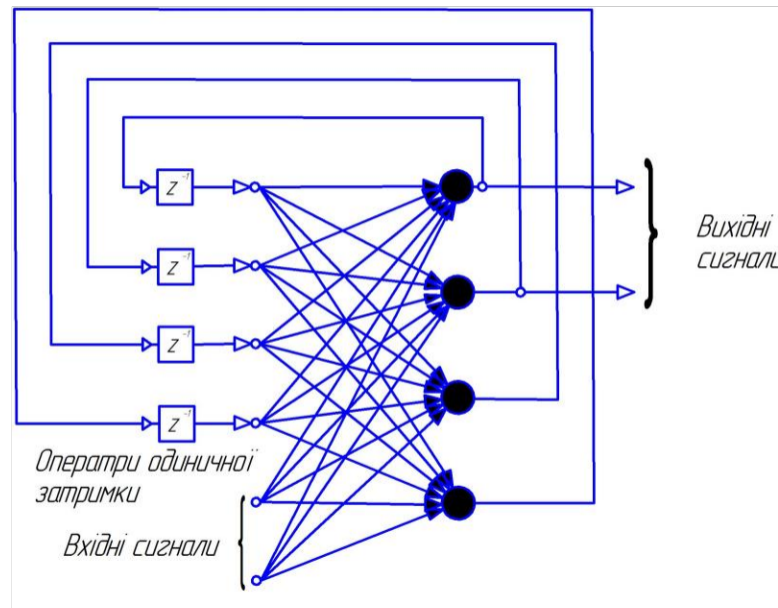


Рисунок 2.6 – Рекурентна нейронна мережа без прихованих нейронів та зворотних зв'язків нейронів із самими собою

Наявність зворотних зв'язків у мережах, представлених на рисунках 2.5 та 2.6, надає безпосередній вплив на здатність таких мереж до навчання і на їх продуктивність. Більш того, зворотний зв'язок має на увазі використання елементів одиничної затримки (вони позначені як z^{-1}), що призводить до нелінійної динамічної поведінки, якщо, звичайно, у мережі містяться нелінійні нейрони [22].

2.3 Математична модель на основі ШНМ для адаптивного керування потоками реактивної потужності

Нейронна мережа прямого поширення (НМПП) – нейромережева архітектура, яка складається із наступних один за одним шарів нейронів; у якості входів кожен наступний шар використовує виходи попереднього шару (зазвичай званого прихованим шаром) за винятком вхідного шару, який безпосередньо приймає вхідні сигнали. Основна функція прихованих шарів – виділення статистики високого порядку. Навчання нейронних мереж прямого

поширення – це процес визначення значень ваги мережі на основі прикладів, що утворюють навчальну множину для мережі з n входами та m виходами, складається з N вхід-вихідних значень – навчальних прикладів. Структура навчальної множини має вигляд [23]:

$$\langle \tilde{X}, \tilde{Y} \rangle = \{(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)\}_{i=1, N}, \quad (2.1)$$

де $x_i \in R^n$ – вхідний вектор з i -го прикладу; $y_i \in R^m$ – вектор очікуваних значень.

Ступінь близькості вектора-відповіді мережі y_i на i -му прикладі та відповідного вектора вказівок вчителя \tilde{y}_i при поточному векторі ваг нейронної мережі $w_i \in R^W$, де W – кількість вагових коефіцієнтів НМПП, характеризується миттєвим функціоналом якості:

$$Q_i = Q(\varepsilon_i(w)) = \varepsilon_i^T(w) \cdot V \cdot \varepsilon_i(w), \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_i(w) = y_i(w) - \tilde{y}_i \in R^m$ – вектор відхилень виходів мережі від вказівок вчителя; $V \in R^{m \times m}$ – позитивно детермінована матриця, яка задає зважену норму вектора $\varepsilon_i(w)$. Зазвичай V – одинична матриця, яка зводить функціонал до евклідової норми вектора відхилень

$$Q(\varepsilon_i(w)) = \varepsilon_i^T(w) \cdot \varepsilon_i(w) = (y_i(w) - \tilde{y}_i)^T (y_i(w) - \tilde{y}_i) = \sum_{j=1}^m (y_i(w) - \tilde{y}_i)^2. \quad (2.3)$$

Ступінь відповідності мережі даним із навчальної множини задається інтегральним функціоналом якості навчання

$$E(w) = \sum_{i=1}^N Q_i(w) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_i(w) - \tilde{y}_i)^2. \quad (2.4)$$

Для випадку з одним виходом ($m=1$) та з урахуванням його позначення як $F(x, w)$ функціонал набуває наступного вигляду:

$$E(w) = \sum_{i=1}^N Q_i(w) = \sum_{i=1}^N (y_i(w) - \tilde{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N (F(x_i, w) - \tilde{y}_i)^2. \quad (2.5)$$

Метою навчання НМПП є визначення такого вектора ваг w^* , щоб функціонал (2.5) приймав мінімальне значення, яке перетворює процес навчання мережі на вирішення задачі безумовної оптимізації

$$w^* = \arg \min_{w \in R^W} E(w). \quad (2.6)$$

Багатовихідна нейронна мережа з m виходами може бути замінена сукупністю m одновихідних мереж, що дає змогу без обмеження спільності розглянути методи навчання лише для випадку мереж з $m = 1$.

Для розв'язання (2.6) існує багато методів. Одним із популярних методів можна виділити метод зворотного поширення помилки. Незважаючи на широке застосування, він має недоліки, а саме: повільна східність і негативний вплив локальних мінімумів поверхні $E(w)$.

Для усунення зазначених недоліків зазвичай використовується інформація високого порядку про $E(w)$. В рамках квадратичної апроксимації помилки в околиці точки w має вигляд

$$E(w + \Delta w) \approx E(w) + \nabla E(w) \Delta w + \frac{1}{2} \Delta w^T \nabla^2 E(w) \Delta w. \quad (2.7)$$

На основі квадратичної апроксимації, відомим методом Гауса-Ньютона зводимо завдання (2.6) для (2.7) до рівняння

$$\nabla E(w) + \nabla^2 E(w) \Delta w = 0. \quad (2.8)$$

При цьому

$$\nabla E(w) = \frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} \cdot \varepsilon(w) = \frac{\partial (y(w) - \tilde{y})}{\partial w} \cdot \varepsilon(w) = \frac{dF(x, w)}{\partial w} \cdot \varepsilon(w); \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 E(w) = \left(\frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} \right)^2 \cdot \frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} + \sum_{i=1}^N \varepsilon(w) \nabla^2 \varepsilon(w). \quad (2.9)$$

Штучні нейронні мережі в *MatLab / Simulink* представляють новий напрям у практиці створення технічних систем. Можливості нейронних мереж виконувати операції порівняння за зразком і класифікації об'єктів, недоступні для традиційної математики, вони дають змогу створювати штучні системи для вирішення завдань розпізнавання образів, діагностики захворювань, автоматичного аналізу документів та багатьох інших нетрадиційних додатків.

До створення штучної нейронної мережі необхідно підготувати навчальну вибірку, при цьому вона повинна повно і різнобічно представляти описуваний феномен, включати різні можливі ситуації. Добре, коли даних багато, але це само по собі також не завжди допомагає. У Додатку А представлено текст програми мовою *MatLab* для навчання ШНМ [24].

3 СТРУКТУРНО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АКТИВНО-АДАПТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

До схеми заміщення, яка використовується для реалізації адаптивного керування потоками реактивної потужності та рівнями напруги у системі електропостачання було включено: трансформатори головної понижувальної та цехових підстанцій, асинхронні двигуни, кабельні лінії, СТАТКОМ.

Засоби керування потоками реактивної потужності (ШНМ та СТАТКОМ) враховано у схемі заміщення разом із мережею нижчої напруги сторони 10 кВ ГПП, що має низькі трансформатори, які обладнано автоматично керованими РПН.

У вузлах 10 кВ та вище, які мають низькі трансформатори, без автоматично-керованого РПН (цехові підстанції), рівні напруги і втрати потужності у мережі, підключеної до сторін НН цих трансформаторів і не включеної до схеми заміщення відповідного рівня, практично не залежить від рівнів напруги зі сторони ВН. Тому, у таких вузлах, для реалізації адаптивного керування потоками реактивної потужності, задано постійне навантаження, приведене до сторони ВН підстанції [25].

Для більш точного врахування впливу змін напруги в мережі 10 кВ та вище на втрати в мережі 0,4 кВ, яка підключена до сторін НН трансформатора без автоматично-керованого РПН мережа 0,4 кВ вводиться у схему заміщення еквівалентною схемою навантаження, яка представлена на рис. 3.1.

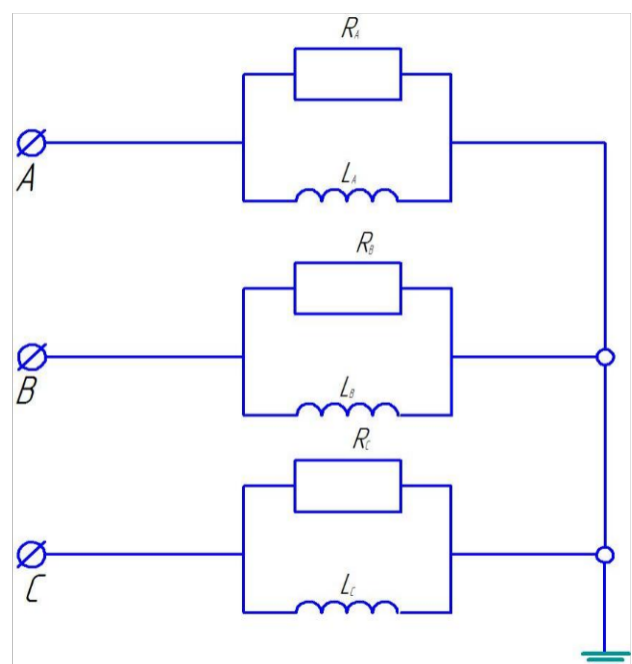


Рисунок 3.1 – Еквівалентована схема

заміщення мережі 0,4 кВ

Еквівалентована схема заміщення мережі 0,4 кВ отримується наступним чином:

1. Укладається схема заміщення розподільчої мережі;
2. Визначаються межі зміни реактивної потужності, яка генерується або споживається обладнанням;
3. Навантаження розподіляється рівномірно між трансформаторами на ТП та перемішана випадковим чином між активною та індуктивною складовою, а також між фазами контрольних точок системи електропостачання підприємства.

У кваліфікаційній роботі імітаційна модель побудована на основі розрахунків навантаження по цехам; визначених центрів електричних навантажень для визначення оптимального розташування ГПП; визначених розташувань цехових ТП та спроектованої схеми внутрішнього електропостачання; розрахованих струмів короткого замикання, на основі яких вже було вибрано основне електричне обладнання.

У кваліфікаційній роботі для моделювання використовуються:

- 2 трансформатори на ГПП – ТРДН63000/110;
- 7 трансформаторів на ТП – ТМ2500/10;
- 2 СТАТКОМ – *Siemens SVC PLUS L*;
- 2 АД – АОД–1250;
- кабельні лінії із зшитого поліетилену марки АПВП різних перерізів;
- несиметричне активно-індуктивне навантаження.

3.1 Структурно-математичні моделі активно-адаптивної системи електрозабезпечення підприємства

Модель трансформатора. Модель трансформатора враховує електричні та магнітні особливості фізичного об'єкта. Схема заміщення, яка використовується у якості моделі трансформатора представлена на рис. 3.2.

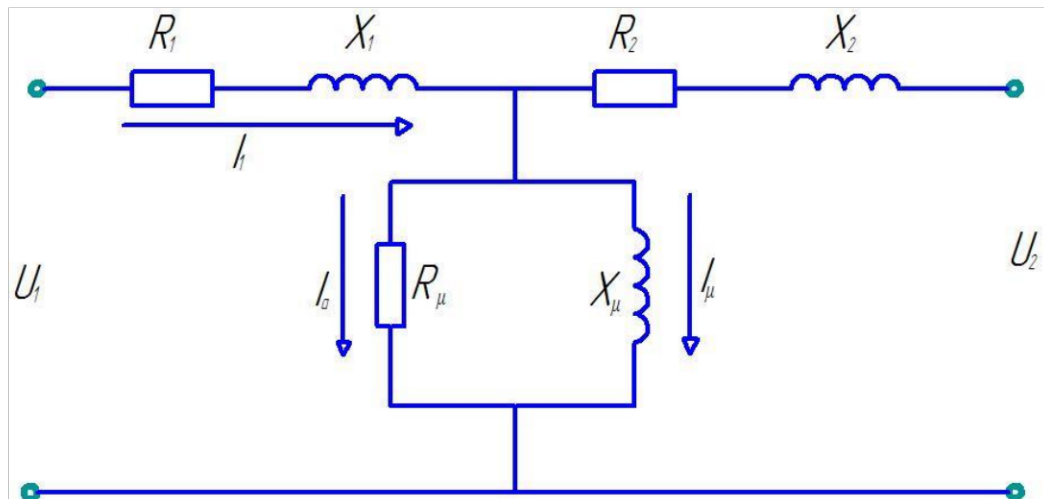


Рисунок 3.2 – Схема заміщення трансформатора

Математична модель трансформатора описується за формулами [26]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1^* = R_2^* = \frac{\Delta P_{K3}}{2 \cdot S_{НОМ}}; \\ Z_1^* = Z_2^* = \frac{U_{K\%}}{200}; \\ X_1^* = X_2^* = \sqrt{Z_1^{*2} - R_1^{*2}}; \\ L_1^* = L_2^* = X_1^*; \\ \Delta S_{HX}^* = \frac{I_{HX\%}}{100}; \\ \Delta P_{HX}^* = \frac{\Delta P_{HX}}{100}; \\ Q_{HX}^* = \sqrt{\Delta S_{HX}^{*2} - \Delta P_{HX}^{*2}}; \\ R_\mu^* = \frac{S_{НОМ}}{\Delta P_{HX}^*}; \\ L_\mu^* = \frac{1}{\Delta Q_{HX}^*}, \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де $I_{HX}, U_K, S_{НОМ}, \Delta P_{HX}, \Delta P_{K3}$ – паспортні дані трансформатора;
 $R_1^*, R_2^*, L_1^*, L_2^*, R_m^*, L_m^*$ – параметри, які потрібні для блоку трансформатора в моделі *MatLab / Simulink*.

Розрахунок параметрів для блоку трифазного трансформатора в *MatLab / Simulink* за паспортними даними трансформатора був автоматизований за допомогою *MatLab* -функції, яка визначає змінні

параметри блоку трансформатора за паспортними даними. За замовчуванням у блоках *MatLab / Simulink* реалізовано вказівку параметрів у буквених виразах (окрім цифр), які вказують на змінні у робочому просторі основного вікна *MatLab* у якому зберігаються всі змінні. Крім параметрів, розрахованих автоматично (активний та індуктивний опір первинної та вторинної обмоток, опір та індуктивність ланцюга намагнічування), необхідно вказати схеми з'єднання, лінійні напругу первинної та вторинної обмоток, номінальну потужність та частоту трансформатора (рис. 3.3).

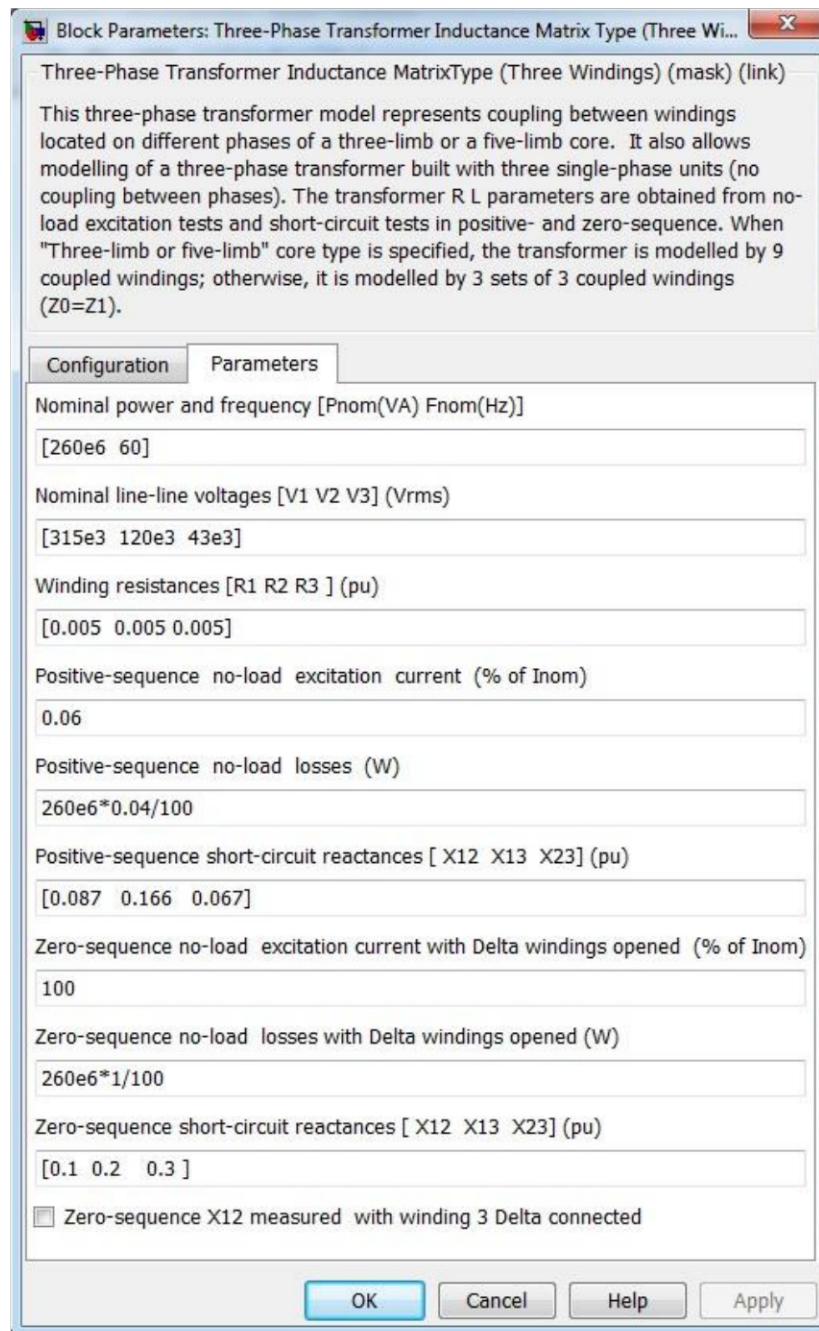


Рисунок 3.3 – Вікно налаштувань параметрів трансформаторів у *MatLab / Simulink*

У кваліфікаційній роботі використовується сім трансформаторів ТМ2500/10, які встановлені у цехових ТП підприємства. Трансформатори з РПН мають аналогічну математичну модель із урахуванням підключеної обмотки РПН і відрізняються тільки врахуванням відпайок [27]:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{(1 + N \cdot \Delta U)} \frac{U_{2НОМ}}{U_{1НОМ}}, \quad (3.2)$$

де N – кількість відпайок, підключених до основної обмотки через РПН; ΔU – напруга однієї відпайки РПН.

На рисунку 3.4 представлено схему під'єднання РПН як до вищої та нижчої сторін напруги трансформатора, а на рисунку 3.5 блок трансформатора з РПН в *MatLab / Simulink*.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.4 – Схеми підключення РПН

При використанні блоку трансформатора з РПН крім основних параметрів трансформатора необхідно вказати параметри РПН: обмотку, на якій встановлений РПН, активний опір обмотки, індуктивність обмотки при включеному вищому ступені РПН, напруга одного ступеня регулювання, мінімальний та максимальний ступінь регулювання РПН, початковий ступінь регулювання, механічна затримка у секундах перемикання між відпаюваннями РПН (рис. 3.5).

У кваліфікаційній роботі використовуються два трансформатори ТРДН63000/110, які обладнані автоматично керованими РПН на стороні вищої напруги, встановлені на ГПП.

Transformer	OLTC and Voltage Regulator
OLTC on:	Winding 1
Tapped regulation winding [Rt(pu), Xt(pu)]	[0.09 0.09]
Voltage step, per tap (pu)	0.015
Minimum and maximum tap positions [Min, Max]	[-9 +9]
Initial tap position	Tap
Tap selection time (s)	3
<input checked="" type="checkbox"/> External control of OLTC	

Рисунок 3.5 – Блок параметрів трансформаторів з РПН

Модель АД. Модель асинхронної машини включає в себе модель електричної частини, представленої моделлю простору станів четвертого порядку та модель механічної частини у вигляді системи другого порядку. Всі електричні змінні та параметри машини приведені до статора. Вихідні рівняння електричної частини машини записані для двофазної системи координат (d та q -осі). На рис. 3.6 представлено схему заміщення асинхронної машини та її рівняння [28].

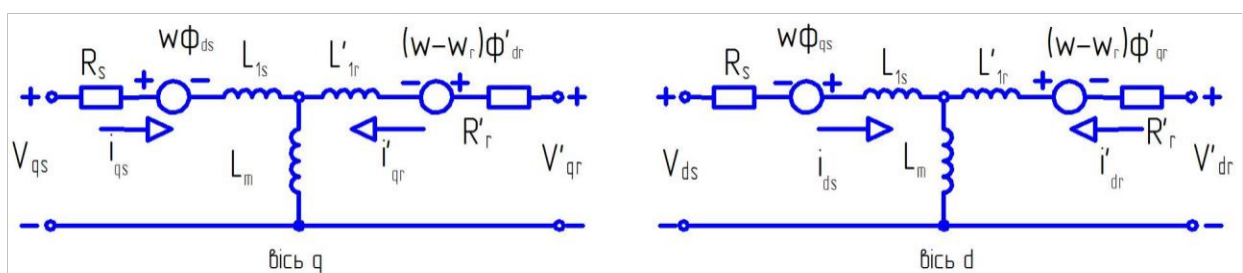


Рисунок 3.6 – Схема заміщення асинхронної машини

Рівняння електричної та механічної частини для асинхронного двигуна мають вигляд:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_S i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + \omega \varphi_{qs}; \\ V_{qs} = R_S i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds}; \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}; \\ V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}; \\ T_e = 1,5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}); \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m); \\ \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m, \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\varphi_{qs} = L_S i_{qs} + L_m i'_{qr}, \quad \varphi_{ds} = L_S i_{ds} + L_m i'_{dr}, \quad \varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}, \quad \varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}, \quad (3.6)$$

$$L_S = L_{ls} + L_m, \quad L'_r = L'_{lr} + L_m, \quad (3.7)$$

де індекс d – проекція змінної на вісь d ; індекс q – проекція змінної на вісь q ; індекс r – змінна або параметр ротора; індекс s – змінна або параметр статора; індекс l – індуктивність розсіювання; індекс m – індуктивність розсіювання; R_S, L_{ls} – опір та індуктивність розсіювання статора; R'_r, L'_{lr} – опір та індуктивність розсіювання ротора; L_m – індуктивність контуру намагнічування; L_S, L'_r – повні індуктивності статора і ротора; V_{qs}, i_{qs} – проекції напруги та струму статора на вісь q ; V'_{qr}, i'_{qr} – проекції напруги та струму ротора на вісь q ; V_{ds}, i_{ds} – проекції напруги та струму статора на вісь d ; V'_{dr}, i'_{dr} – проекції напруги та струму ротора на вісь d ; $\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$ – проекції потокощеплення статора на осі d та q ; $\varphi'_{dr}, \varphi'_{qr}$ – проекції потокощеплення ротора на осі d та q ; ω_m – кутова частота ротора; θ_m – кутова частота ротора; p – кількість пар полюсів.

Для обчислення параметрів машин необхідних для моделі *Simulink*, в *MatLab* є вбудований графічний інтерфейс, який дає змогу розрахувати параметри з паспортних даних асинхронних двигунів.

Модель СТАТКОМ. Зміна реактивної потужності здійснюється за допомогою перетворювача напруги (*VSC*) приєднаного до вторинної обмотки сполучного трансформатора. У *VSC* використовуються транзисторні перетворювачі електричної енергії для вироблення вторинної напруги із ланцюга постійного струму. На рисунку 3.7 показано розподіл потоків активної та реактивної потужності між джерелами $V1$ та $V2$. Де $V1$ представляє контрольовану напругу системи, а $V2$ напругу, яка генерується *VSC*.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.7 – Однолінійна схема заміщення СТАТКОМ

В загальному вигляді математична модель СТАТКОМ має вигляд:

$$\begin{cases} P = (V1 \cdot V2) \cdot \sin(\delta / X); \\ Q = V1 \cdot (V1 - V2 \cdot \cos(\delta)) / X, \end{cases} \quad (3.8)$$

де $V1$ – лінійна напруга джерела 1; $V2$ – лінійна напруга джерела 2; X – загальний реактивний опір трансформатора і фільтрів; δ – кут зсуву фаз між напругами $V1$ та $V2$.

У усталеному режимі напруга $V2$, яка генерується *VSC*, збігається за фазою з $V1$ ($\delta = 0$), тому змінюється лише реактивна потужність ($P = 0$). Якщо $V2$ менша за $V1$, то реактивна потужність (Q) передається з $V1$ до $V2$ (СТАТКОМ поглинає реактивну потужність). При $V2$ більша за $V1$, то Q передається від $V2$ до $V1$ (СТАТКОМ генерує реактивну потужність). При цьому, кількість переданої реактивної потужності дорівнює:

$$Q = \frac{V_1(V_1 - V_2)}{X}. \quad (3.9)$$

Ємність, яка приєднана до VSC контура постійного струму, виступає джерелом постійного струму. В усталеному режимі, напруга V_2 дещо відстає по фазі від V_1 , це зроблено для компенсації втрат у трансформаторі та VSC , що дає змогу підтримувати конденсатор зарядженим.

У моделі СТАТКОМ *MatLab / Simulink* використовує інвертори з широтно-імпульсною модуляцією (PWM) засновані на біполярних транзисторах з ізольованим затвором ($IGBT$). Цей тип інверторів використовує PWM техніку для генерації синусоїдальної форми сигналу з контура постійної напруги із переривчастою частотою у кілька кГц. Гармоніки напруги нівелюються фільтрами, які підключені до VSC змінної напруги. Цей тип VSC використовує фіксовану величину напруги контура постійного струму V_{dc} . Напруга V_2 змінюється з допомогою індексу розмірності PWM -генератора.

При використанні СТАТКОМ для керування напругою, використовують вольт-амперні характеристики (ВАХ):

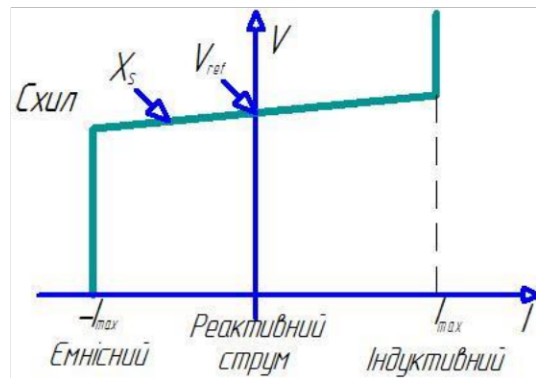


Рисунок 3.8 – Вольт-амперна характеристика СТАТКОМ

Поки реактивний струм залишається у межах максимальних та мінімальних значень ($-I_{max}, I_{max}$) зумовлених номінальною потужністю перетворювача, напруга регулюється у межах еталонної напруги V_{ref} . Однак, зазвичай використовують статичну напругу (найчастіше від 1 % до 4% максимальної реактивної потужності), а ВАХ має нахил, представлений на рисунку та описується рівнянням:

$$V = V_{ref} + X_S \cdot I, \quad (3.10)$$

де V – напруга прямої послідовності; I – реактивний струм; X_S – крутизна регулятора.

У кваліфікаційній роботі розглядається два СТАТКОМи, які представлені одним блоком, оскільки фізично вони об'єднані в одну систему і працюють у паралельному режимі.

Кабельні лінії. Кабельні лінії представлені блоком *Distributed Parameter Line* який враховує зосереджені втрати в лініях електропередач за допомогою хвильового опору та швидкості поширення хвилі (рис. 3.9).

Джерело живлення. Джерело напруги представлений блоком «Трифазне програмоване джерело напруги» (рис. 3.9), що дає змогу моделювати будь-який стан напруги на межі розділу балансової приналежності підприємства з електропостачальною організацією.

Навантаження. Імітація реального навантаження на стороні 0,4 кВ системи електропостачання підприємства реалізована так: спожив-

вана підприємством потужність розділена порівну між трансформаторами на ТП і змішана випадковим чином між активною та індуктивною складовою (рис. 3.9), а також між фазами контрольних точок системи електропостачання підприємства.

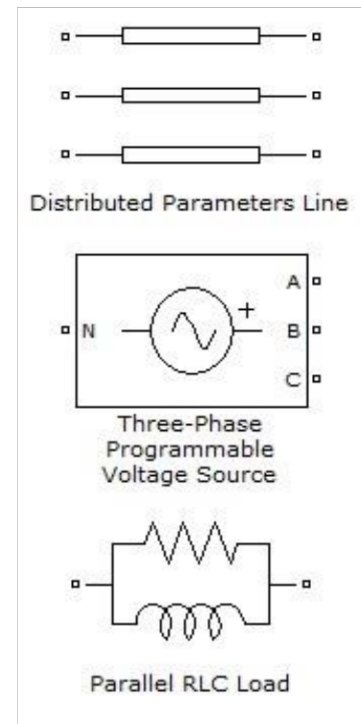


Рисунок 3.9 – Вигля моделей КЛ, джерел живлення та навантаження в *MatLab*

3.2 Аналіз результатів числового експерименту

На рисунку 3.10 представлено розроблену логіко-імітаційну модель системи електропостачання підприємства у програмному середовищі *MatLab/Simulink*.

Розроблену структурно-математичну модель можна розділити на три основних блоки. Перший блок, це блок штучної нейронної мережі створений у *Matlab*. Він підключений через обробник вихідного сигналу до активно-адаптивних елементів мережі та приладів вимірювання. До другого блоку належать модель мережі живлення разом із ГПП, кабельними лініями та СТАТКОМОМ. Третій блок, це модель цех підприємства, яка складається з моделей асинхронних двигунів, трансформаторів, еквівалентованого активно-

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.10 – Структурно-математична модель системи електропостачання підприємства з керування КРП ШНМ

індуктивного навантаження. Також, у моделі присутній вимикача, для забезпечення резервного живлення, у разі пошкоджень на одній із ГПП.

Після створення структурно-математичної моделі підприємства та підготовки навчальної вибірки, було проведено навчання ШНМ, а вже після цього проведено ряд числових експериментів, зокрема експерименти проводилися для трьох режимів роботи системи на межі балансової приналежності:

- нормального номінального;
- 85 % номінальної напруги;
- 115 % номінальної напруги.

Проаналізуємо результати експериментів.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.11 – Часовий розподіл ВН при 100 % номінальної напруги на границі балансової приналежності

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.12 – Часовий розподіл ВН при 85 % номінальної напруги на границі балансової приналежності

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.13 – Часовий розподіл ВН при 115 % номінальної напруги на границі балансової приналежності

На рисунках 3.11 – 3.13 представлено часові розподіли ВН ГПП на межі балансової приналежності. Фактично представлено напруги енергопостачальної компанії, які заживляють ГПП підприємства.

Тепер проаналізуємо роботу ШНМ при режимах, які наведені вище. Тобто проаналізуємо напруги на інших сторонах ГПП.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.14 – Часовий розподіл СН при 100 % номінальної напруги на стороні ВН

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.15 – Часовий розподіл СН при 85 % номінальної напруги на стороні ВН

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.16 – Часовий розподіл СН при 115 % номінальної напруги на стороні ВН

З рисунків 3.14 – 3.16 бачимо, що навіть при номінальному значенні напруги ШНМ подає сигнали активно-адаптивним елементам на підвищення напруги, але із цих графіків не зрозуміла причина такої поведінки ШНМ. Тому, для аналізу цієї поведінки ШНМ варто проаналізувати сторону напруги 0,4 кВ де встановлено зворотний зв'язок із моделлю системи електропостачання.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.17 – Часовий розподіл НН при 100 % номінальної напруги на стороні ВН

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.18 – Часовий розподіл НН при 85 % номінальної напруги на стороні ВН

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 3.19 – Часовий розподіл НН при 115 % номінальної напруги на стороні ВН

Представлені графіки репрезентують напругу 3-х фаз у кожній контрольній точці системи. Бачимо, що навіть при номінальній потужності в системі надто великі втрати і на стороні НН маємо середнє значення напруги 325 В, що є неприпустимим. Проте ШНМ визначає це та дає сигнал на СТАТКОМ для зміни напруги, після чого регулює відпаювання РПН для більш плавного налаштування напруг до допустимого ДСТУ значення.

Бачимо, що у всіх трьох режимах ШНМ справляється із поставленою задачею підтримки якості напруги в контрольних точках системи, проте при великому зниженні напруги на ГПП (15 %) при комутації однієї із відпайок

відбувається резонанс напруг (рис. 3.18). Незважаючи на всі заходи, резонанс триває приблизно 1,5 с. Час резонансу міг бути і меншим, але комутація 1 відпаювання триває 3 с, що змінити неможливо.



4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Дія струму на живі клітини

Існує чотири особливості дії електричного струму:

- *перша* особливість – відсутність зовнішніх ознак загрозованої небезпеки ураження електричним струмом. Людина не може побачити, почути, відчувати чи якимось іншим чином завчасно виявити можливість ураження;
- *друга* особливість – тяжкість електротравм. Втрата працездатності в результаті електротравм, як правило, буває довгою, можливий смертельний наслідок;
- *третья* особливість полягає в тому, що струми промислової частоти величиною 10 – 25 мА можуть викликати інтенсивні судоми м'язів, внаслідок чого відбувається так зване «приковування» до струмовідних частин. Людина в цьому випадку не може самостійно звільнитися від дії електричного струму;
- *четверта* особливість визначається можливістю подальшого механічного травмування. Наприклад, людина працювала на висоті, була уражена електрострумом, знепритомніла і впала.

Дія електричного струму на живу тканину, на відміну від дії інших матеріальних факторів (пари, хімічних речовин, випромінювання тощо), має своєрідний і різнобічний характер. Проходячи через організм людини, електричний струм здійснює термічну, електролітичну й механічну (динамічну) дію, що є звичайними фізико-хімічними процесами, властивими як живій, так і неживій матерії; одночасно електричний струм здійснює і біологічну дію, що є специфічним процесом, властивим лише живій тканині.

Термічна дія струму проявляється в опіках окремих ділянок тіла, нагріванні до високої температури кровоносних судин, нервів, серця, мозку й інших органів, що розташовані на шляху струму, що викликає в них серйозні функціональні розлади [29].

Електролітична дія струму виражається в розкладанні органічної рідини, у тому числі й крові, що супроводжується значними порушеннями їхнього фізико-хімічного складу.

Механічна (динамічна) дія струму виражається в розшаруванні, розриві й інших подібних ушкодженнях як наслідок електродинамічного ефекту різних тканин організму, у тому числі м'язової тканини, стінок кровоносних судин, судин легеневої тканини тощо, а також миттєвого вибухоподібного утворення пари від перегрітої струмом тканинної рідини й крові.

Біологічна дія струму проявляється в роздратуванні й збудженні живих тканин організму, а також у порушенні внутрішніх біоелектричних процесів, що протікають в організмі, що нормально діє, й найтіснішим чином пов'язаних з його життєвими функціями. Електричний струм, проходячи через організм, подразнює живі тканини, викликаючи в них відповідну реакцію – збудження.

Зазначене різноманіття дій електричного струму на організм нерідко призводить до різних електротравм. *Електротравма* – це травма, викликана впливом електричного струму або електричної дуги. Всі електротравми умовно можна звести до двох видів: місцевих електротравм, коли виникає місцеве ушкодження організму, і загальних електротравм, так званих електричних ударів, коли уражається весь організм (або створюється загроза його ураження) через порушення нормальної діяльності життєво важливих органів і систем.

Приблизний розподіл нещасних випадків від електричного струму за зазначеними видами травм: 20 % – місцеві електротравми; 25 % – електричні удари; 55 % – змішані травми, тобто одночасно місцеві електротравми й удари [29].

4.2 Місцеві електротравми

Місцева електротравма – це інтенсивно виражене місцеве порушення цілісності тканин тіла, у тому числі кісткових тканин, викликане впливом

електричного струму або електричної дуги. Найчастіше це поверхневі ушкодження, тобто ураження шкіри, а іноді інших м'яких тканин, а також зв'язок і кісток.

Характерні місцеві електротравми – електричні опіки, електричні знаки, металізація шкіри, механічні ушкодження й електроофтальмія. У таблиці 4.1 представлено розподіл характерних місцевих електротравм у відсотках.

Таблиця 4.1 – Розподіл характерних місцевих електротравм [29]

Травма	Значення, %
Електричні опіки	40
Електричні знаки	7
Металізація шкіри	3
Механічні ушкодження	0,5
Електроофтальмія	1,5
Змішані травми, тобто опіки з іншими місцевими травмами	23
Всього	75

Електричний опік – найпоширеніша електротравма: опіки виникають у більшій частині (63 %) потерпілих від електричного струму, причому третина їх (23 %) супроводжується іншими травмами – знаками, металізацією шкіри й офтальмією. Близько 85 % усіх електричних опіків припадає на електромонтерів, що обслуговують діючі електроустановки. Залежно від умов виникнення розрізняють два основних види опіку: струмовий (або контактний), що виникає при проходженні струму безпосередньо через тіло людини в результаті його контакту зі струмовідною частиною, і дуговий, обумовлений впливом на тіло людини електричної дуги.

Струмовий (контактний) опік виникає в електроустановках відносно невеликої напруги – не вище 2 кВ. При більш високих напругах, як правило, утворюється електрична дуга або іскра, які обумовлюють виникнення опіку іншого виду – дугового. Контактний опік ділянки тіла є наслідком перетворення енергії електричного струму, що проходить через нього, у теплову. Тому такий опік тим небезпечніший, чим більшим є струм, час його проходження й електричний опір ділянки тіла, що підпадає під вплив струму.

Максимальна кількість теплоти виділяється в місці контакту провідника зі шкірою, а точніше, у тій ділянці шкіри, що перебуває в контакті зі струмовідною частиною. Тому струмовий опік є, як правило, опіком шкіри.

На рисунку 4.1 представлено важкий струмовий опік пальців та долоні правої руки людини, що взялась за оголений дрот проводки 220 В. При цьому потерпілий торкнувся обох проводів шнура: одного – пальцями, а іншого – ділянкою долоні поблизу великого пальця.

Дуговий опік (рис. 4.2) спостерігається в електроустановках різних напруг. При цьому в установках до 6 кВ опіки є наслідком випадкових коротких замикань, наприклад при роботах під напругою на щитах до 1000 В, вимірюваннях переносними приладами (електровимірювальними кліщами) в установках вище 1000 В (до 6 кВ) тощо.

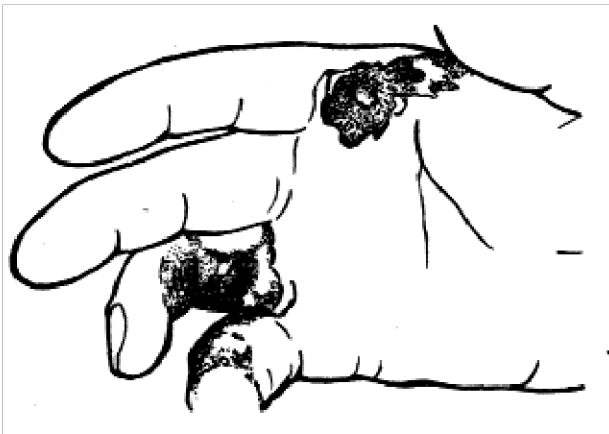


Рисунок 4.1 – Контактний опік IV ступеня змінним струмом 220 В



Рисунок 4.2 – Дуговий опік обличчя, шиї та руки I і II ступенів у результаті короткого замикання між ножами рубильника

Електрична дуга може викликати великі опіки тіла, вигорання тканин на велику глибину, обвуглювання й навіть безслідне згорання великих ділянок тіла або кінцівок.

Електричні знаки, іменовані також знаками струму або електричними мітками, являють собою різко окреслені плями сірого або блідо-жовтого кольору на поверхні тіла людини, що підпала під дію струму. Звичайно знаки мають круглу або овальну форму й розміри 1 – 5 мм із заглибленням у центрі. Трапляються знаки й у вигляді подряпин, невеликих ран, бородавок,

крововиливів у шкіру, мозолів і дрібнокрапкового татуювання. Іноді форма знака відповідає формі ділянки струмовідної частини, якої торкнувся потерпілий, а при впливі грозового розряду – нагадує фігуру блискавки. Звичайно електричні знаки безболісні, й лікування їх закінчується благополучно: із часом верхній шар шкіри сходить, і уражене місце набуває первісного кольору, еластичності і чутливості. Ці знаки залишаються приблизно в 11 % потерпілих від струму.

Металізація шкіри – проникнення у верхні шари шкіри дрібних частинок металу, що розплавився під дією електричної дуги. Таке явище трапляється при коротких замиканнях, вимиканнях роз'єднувачів і рубильників під навантаженням тощо. При цьому дрібні бризки розплавленого металу під впливом виниклих динамічних сил і теплового потоку розлітаються в усі боки з великою швидкістю. Кожна із цих частинок має високу температуру, але малий запас теплоти й, як правило, не здатна пропалити одяг. Тому уражаються звичайно відкриті частини тіла – руки й обличчя. Уражена ділянка шкіри має шорсткувату поверхню. Потерпілий відчуває на ураженій ділянці біль від опіків під дією теплоти занесеного в шкіру металу. Звичайно із часом хвора шкіра сходить, уражена ділянка набуває нормального вигляду і еластичності, зникають і всі болісні відчуття, пов'язані із цією травмою. Лише при ураженні очей лікування може виявитися тривалим і складним, а в деяких випадках і безрезультатним, тобто потерпілий може втратити зір. Тому роботи, при яких можливе виникнення електричної дуги (наприклад, роботи під напругою на щитах, при знятті й установці запобіжників тощо), мають виконуватися в захисних окулярах. Крім того, одяг працюючого повинний бути застебнутий на всі гудзики, комір закритий, а рукави опущені й застебнуті біля зап'ясть рук. Металізація шкіри спостерігається у 10 % потерпілих від електричного струму. У більшості випадків одночасно з металізацією виникає дуговий опік, що майже завжди викликає більш важкі ураження, ніж металізація.

Механічні ушкодження є в більшості випадків наслідком різких мимовільних судорожних скорочень м'язів під дією струму, що проходить через тіло людини. У результаті можуть відбутися розриви сухожилів, шкіри, кровоносних судин і нервової тканини; можуть бути вивихи суглобів і навіть переломи кісток. Механічні ушкодження відбуваються при роботі в основному в установках до 1000 В при відносно тривалому перебуванні людини під напругою. Це, як правило, серйозні травми, що потребують тривалого лікування. На щастя, механічні ушкодження виникають досить рідко – приблизно в 1,0 % осіб, що постраждали від струму. Такі ушкодження завжди супроводжують електричні удари, оскільки їх викликає струм, що проходить через тіло людини. Деякі з них супроводжуються, крім того, контактними опіками тіла.

Електроофтальмія (від грецького *ofthalmos* – око) – запалення зовнішніх оболонок очей – роговиці й кон'юнктиви (слизової оболонки, що покриває очне яблуко), що виникає в результаті дії потужного потоку ультрафіолетових променів, які енергійно поглинаються клітинами організму й викликають у них хімічні зміни. Таке опромінення можливе за наявності електричної дуги, що є джерелом інтенсивного випромінювання не тільки видимого світла, але й ультрафіолетових і інфрачервоних променів. Електроофтальмія спостерігається приблизно в 3 % потерпілих від струму. Електроофтальмія розвивається через 4 – 8 годин після ультрафіолетового опромінення. При цьому можуть бути почервоніння й запалення шкіри та слизових оболонок вік, слезотеча, гнійні виділення з очей, спазми вік і часткова втрата зору. Потерпілий зазнає головного болю і різкого болю в очах, що посилюється на світлі, тобто в нього виникає так звана світлобоязнь. У важких випадках порушується прозорість рогової оболонки, звужується зіниця. Звичайно хвороба триває кілька днів. У випадку ураження рогової оболонки лікування виявляється більш складним і тривалим.

4.3 Модель процесу виникнення та формування виробничих небезпек

при обслуговуванні обладнання на підприємстві

Методикою оцінки рівня небезпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію рівня небезпеки для конкретного об'єкта [30]. Таким показником вибрано імовірність виникнення аварії, травми залежно від явища, яке досліджується.

Для побудови логіко-імітаційної моделі процесу, формування і виникнення аварії та травми у процесі обслуговування обладнання підприємства оцінюють відповідні небезпечні події. Кожній із них присвоємо імовірність виникнення. Імовірності виникнення представлено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Імовірності виникнення подій

Шифр	Назва події	Імовірність
P_1	Відсутність захисного заземлення	0,02
P_2	Пошкодження захисного заземлення	0,04
P_3	Спрацювання складових захисту	0,1
P_4	Неправильна експлуатація захисту	0,02
P_5	Відсутність профілактичних заходів	0,2
P_6	Відсутність захисного щита	0,12
P_7	Недотримання правил вибору взуття	0,15
P_8	Незнання правил техніки безпеки	0,1
P_9	Відсутність засобів індивідуального захисту	0,2
P_{10}	Легковажність	0,08

На основі представлений у таблиці подій будуюмо матрицю логічних взаємозв'язків між окремими пунктами, графічна інтерпретація якої представлена на рисунку 4.3.

Розрахуємо ймовірності виникнення подій, які формують логіко-імітаційну модель процесів створення мікрокліматичних умов. Розглянемо травмонебезпечну ситуацію, яка виникає за умови роботи працівників із електронебезпекою.

Для прикладу, підставивши дані ймовірностей базових подій у формулу, отримаємо ймовірність події 13:

$$P_{13} = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2 = 0,2 + 0,4 - 0,2 \cdot 0,4 = 0,0592 .$$

Аналогічним чином визначаємо імовірності інших подій:

$$P_{11} = P_4 + P_5 - P_4 \cdot P_5 = 0,3 + 0,4 - 0,3 \cdot 0,4 = 0,118;$$

$$P_{12} = P_6 + P_7 - P_6 \cdot P_7 = 0,3 + 0,5 - 0,3 \cdot 0,5 = 0,252;$$

$$P_{16} = P_9 + P_{10} - P_9 \cdot P_{10} = 0,2 + 0,15 - 0,2 \cdot 0,15 = 0,264;$$

$$P_{14} = P_{11} \cdot P_5 = 0,118 \cdot 0,2 = 0,0236;$$

$$P_{15} = P_{12} \cdot P_8 = 0,252 \cdot 0,1 = 0,0252;$$

$$P_{17} = P_{13} + P_{14} - P_{13} \cdot P_{14} = 0,592 + 0,0236 - 0,592 \cdot 0,0236 = 0,0814;$$

$$P_{18} = P_{15} \cdot P_{16} = 0,264 \cdot 0,0252 = 0,0065;$$

$$P_{19} = P_{17} + P_{18} - P_{17} \cdot P_{18} = 0,0065 + 0,0814 - 0,0065 \cdot 0,0814 = 0,0873;$$

Відтак, бачимо, що імовірність ураження електричним струмом працівника є досить малою і становить $P_{19} = 0,0873$.

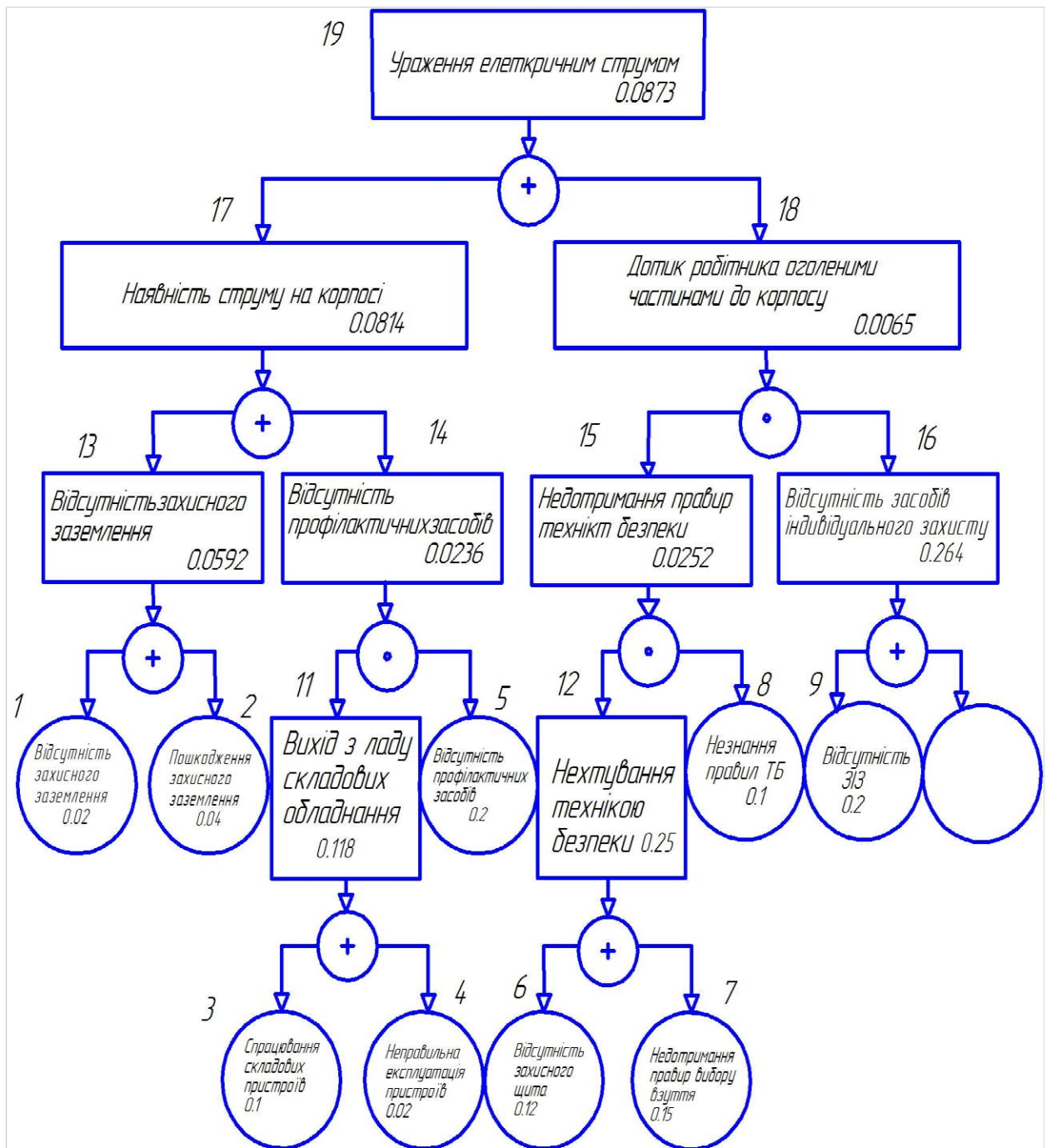


Рисунок 4.3 – Логіко-імітаційна модель процесу виникнення травми при обслуговуванні обладнання на підприємстві

4.4 Розробка заходів із питань безпеки в надзвичайних ситуаціях

Для отримання достовірної інформації про стан довкілля, необхідно проводити постійний моніторинг навколишнього середовища. Це питання особливо гостро стоїть у період виникнення надзвичайних ситуацій (НС), коли треба надати необхідну інформацію населенню та органам влади для адекватних дій. Оцінка становища проводиться з метою своєчасного

визначення необхідних заходів захисту та обґрунтованих рішень на проведення рятувальних та інших невідкладних робіт (РНР), а в разі потреби і евакуації населення з районів надзвичайних ситуацій [31].

Радіаційне становище – це сукупність наслідків радіоактивного забруднення (зараження) місцевості, які впливають на виробничу діяльність об'єктів господарської діяльності, дії сил (формувань) цивільної оборони при проведенні рятувальних та інших невідкладних робіт та життєдіяльність населення. Тобто основним уражаючим фактором при радіаційних аваріях є підвищені рівні радіації, що негативно можуть вплинути на здоров'я населення. Радіаційне становище характеризується масштабами (розмірами зон) і характером радіоактивного забруднення місцевості (рівнем радіації). Розміри зон радіоактивного забруднення та рівні радіації є основними показниками ступеня радіаційної небезпеки. Інтенсивність іонізуючого випромінювання на забруднених територіях залежить від кількості радіоактивної речовини, що осіла на місцевості в результаті аварії на АЕС та її ізотопного складу. Хімічне становище — це сукупність умов, які виникають на території міста, району або ОGD внаслідок аварії на хімічно-небезпечному об'єкті (ХНО) з викидом небезпечних хімічних речовин (НХР), які негативно впливають на довкілля і потребують проведення відповідних заходів для захисту населення. Характер становища при аваріях на ХНО з витіканням небезпечних хімічних речовин (НХР) і можливі наслідки залежать від масштабів і виду аварії, кількості викинутої речовини, її фізико-хімічних і токсичних властивостей, метеорологічних умов, умов зберігання та рельєфу місцевості. Основним уражаючим фактором при хімічних аваріях є токсичний вплив небезпечних речовин. Методика прогнозування наслідків впливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті призначена для довгострокового (оперативного) і аварійного прогнозування масштабів зараження місцевості і приземного шару атмосфери небезпечними хімічними речовинами (НХР) при аваріях на хімічно-небезпечних об'єктах (ХНО) і транспорті, а також для визначення

ступеня хімічної небезпеки ХНО і адміністративно-територіальних одиниць (АТО). Довгострокове (оперативне) прогнозування здійснюється заздалегідь для визначення можливих масштабів зараження, сил і засобів, які залучатимуться для ліквідації наслідків аварії, складання планів роботи та інших (довідкових) матеріалів. Прогнозування наслідків аварій на ХНО і транспорті здійснюється розрахунковим методом з нанесенням прогнозованих зон хімічного зараження на топографічну карту відповідного масштабу. Аварійне прогнозування здійснюється під час виникнення аварії за даними розвідки для визначення можливих наслідків аварії і порядку дій в зоні можливого зараження. Інженерне становище характеризується ступенем руйнування будівель, споруд, комунально-енергетичних мереж, обладнання на об'єкті або території внаслідок дії таких вражаючих факторів надзвичайних ситуацій, як ударна хвиля при вибухах, сейсмічні хвилі при землетрусах, гідравлічна хвиля при повені, швидкісний натиск при ураганах, тепловий вплив при пожежі і т. п. Ударна хвиля – зона стиснутого повітря, яка поширюється у всі сторони від центру вибуху з великою швидкістю, вище швидкості звуку.

Надлишковий тиск у будь-якій точці залежить від відстані до центра вибуху і маси продуктів вибуху. Ударна хвиля руйнує інженерні споруди, комунікації, дерева, завдає людям травм різного ступеня важкості. Пожежа – це неконтрольований процес горіння, наслідками якого можуть бути загибель людей і знищення матеріальних цінностей [31].

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

5.1 Аналіз рівня компенсації реактивної потужності

При розробці основ роботи ШНМ у її логіку також закладалося аналіз коефіцієнта реактивної потужності. Під час проведення числових експериментів система проаналізувала зміну згаданого коефіцієнта реактивної потужності. Отримані результати представлено на рисунках 5.1 – 5.3 для режимів роботи, які аналізувалися у третьому розділі.

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 5.1 – Часовий розподіл коефіцієнта реактивної потужності в системі електропостачання підприємства при 100 % напруги на стороні ВН

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 5.2 – Часовий розподіл коефіцієнта реактивної потужності в системі електропостачання підприємства при 85 % напруги на стороні ВН

Рисунок забрано з ціллю енергетичної безпеки України

Рисунок 5.3 – Часовий розподіл коефіцієнта реактивної потужності в системі електропостачання підприємства при 115 % напруги на стороні ВН

Аналізуючи отримані результати бачимо, що для нормалізації режимів роботи, ШНМ давала відповідні команди на генерацію реактивної потужності СТАТКОМом. Це чітко видно з усіх представлених часових

розподілів. Коефіцієнт реактивної потужності збільшився в середньому від 0,11 до 0,2 – 0,22. Представлений ефект є позитивним як для самого підприємства, так і для енергопостачальної компанії, оскільки підприємство заплатить менше коштів за спожиту реактивну потужність з мережі, а енергопостачальна компанія – буде мати менші втрати в лініях електропередач та трансформаторах.

Далі представимо обчислення можливого економічного ефекту від застосування розробленої *FACTS*-системи.

5.2 Обчислення можливого економічного ефекту

Позначимо початкове значення коефіцієнта реактивної потужності як $tg\varphi_1$, а його значення після активно-адаптивного керування компенсацією $tg\varphi_2$. Аналізуючи часові розподіли коефіцієнтів реактивної потужності бачимо, що $tg\varphi_1 = 0,11$, а $tg\varphi_2 = 0,22$. Проаналізувавши бачимо, що коефіцієнт реактивної потужності збільшився у два рази.

У нашому випадку для представлення можливого економічного ефекту від впровадження *FACTS*-підходів у компенсації реактивної потужності та регулювання напруги електричної мережі промислового підприємства достатньо відобразити величину зекономленої реактивної потужності (тобто згенерованої СТАТКОМОМ підприємства) та її грошовий еквівалент.

Максимальна можлива величини спожаваної потужності буде рівня сумі пропускних здатностей трансформаторів ГПП. У нашому випадку на ГПП встановлено два трансформатори потужністю 63000 кВА кожен. Звідси, загальна максимальна можлива потужність буде становити [32]:

$$S_{\max} = 2 \cdot S_{TR.HOM}, \quad S_{\max} = 2 \cdot 63000 = 126000 \text{ кВА}, \quad (5.1)$$

де $S_{TR.HOM}$ – номінальна потужність трансформатора.

З курсу тригонометрії відомо, що:

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}, \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}, \quad (5.2)$$

де в нашому випадку $\cos \varphi$ – коефіцієнт активної потужності; $\operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності.

Для нашого випадку коефіцієнти потужності будуть становити:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_1 &= \sqrt{\frac{1}{1 + 0,11^2}} = 0,994, & \sin \varphi_1 &= \sqrt{1 - 0,994^2} = 0,109; \\ \cos \varphi_2 &= \sqrt{\frac{1}{1 + 0,22^2}} = 0,976, & \sin \varphi_2 &= \sqrt{1 - 0,976^2} = 0,214. \end{aligned}$$

Визначимо величину споживаної активної та реактивної потужностей до компенсації та після неї за формулою:

$$P = S_{\max} \cdot \cos \varphi \quad Q = S_{\max} \cdot \sin \varphi, \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= 126000 \cdot 0,994 = 125244 \text{ кВт}, & P_2 &= 126000 \cdot 0,976 = 122976 \text{ кВт}; \\ Q_1 &= 126000 \cdot 0,109 = 13734 \text{ кВАр}, & Q_2 &= 126000 \cdot 0,214 = 26964 \text{ кВАр}. \end{aligned}$$

Визначимо різниці між споживаними потужностями до та після компенсації за формулою:

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad \Delta Q = Q_2 - Q_1; \quad (5.4)$$

$$\Delta P = 125244 - 122976 = 2268 \text{ кВт}, \quad \Delta Q = 26964 - 13734 = 13230 \text{ кВАр}.$$

Тепер визначимо грошовий еквівалент зекономленої активної та реактивної потужності за формулою [33]:

$$Ц = (\Delta P \cdot c_a + \Delta Q \cdot c_p) \cdot 8760, \quad (5.5)$$

де c_a – ціна активної енергії ($c_a = 5,6$ грн/кВт год); c_p – ціна реактивної енергії ($c_p = 0,22$ грн/кВАр год);

$$Ц = (2268 \cdot 5,6 + 13230 \cdot 0,22) \cdot 8760 = 136755,8 \text{ тис. грн/рік}.$$

Обчислення показали, що для типового промислового підприємства застосування *FACTS* – дає можливість економити приблизно 136 млн.грн на рік.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлено можливі варіанти керування потоками реактивної потужності у системах електропостачання підприємств з *FACTS* елементами на межі балансової приналежності. Отримані у роботі результати можна узагальнити такими висновками:

1. Аналіз методів та засобів керування потоками реактивної потужності в системах електропостачання підприємств показав, що при живленні типових промислових підприємств класами напруг 110 кВ та вище, для компенсації реактивної потужності доцільно використовувати СТАТКОМи. Це дає змогу підвищити напругу на шинах ГПП підприємства при мінімальній участі людського фактору.

2. На основі підходів штучних нейронних мереж, з використанням програмного комплексу *MatLab/Simulink*, було розроблено штучну нейронну мережу та алгоритм роботи СТАТКОМу. Розроблена математична модель на основі штучної нейронної мережі, дає змогу здійснювати активно-адаптивне керування потоками реактивної потужності.

3. Для аналізу роботи системи електропостачання типового підприємства, розроблено її структурно-математичну модель в програмному комплексі *MatLab/Simulink*. Розроблена модель ґрунтується на основі структурно-математичних моделей трансформаторів, ліній електропередач, асинхронних двигунів, навантаження, джерел живлення та СТАТКОМу. Представлено аналіз отриманих результатів комп'ютерної симуляції.

4. Також, у кваліфікаційній роботі розкрито питання охорони праці, які стосувалися ураження електричним струмом працівників підприємства. Розроблено логіко-імітаційну модель виникнення травми при обслуговуванні електрообладнання підприємства.

5. Представлено техніко-економічні обґрунтування застосування активно-адаптивних систем до компенсації реактивної потужності підприємства, які показали економію коштів 136 млн.грн/рік.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Мілих В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств: підручник для студентів електромеханічних спеціальностей. Харків: ФОП Панов А. М., 2016. 272 с.
2. Шкрабець Ф.П. Електропостачання: навч. посіб. Донецьк: НГУ, 2015. 540 с
3. Давиденко Л. В., Коменда Н. В., Давиденко В. А., Євсюк М. М. Електропостачання промислових об'єктів: практикум. Луцьк: ВІП ЛНТУ, 2022. 244 с.
4. Бурбело М. Й., Гадай А. В. Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2010. 104 с.
5. Жежеленко І. В., Півняк Г. Г., Трофімов Г. Г., Папаїка Ю. А. Реактивна потужність в електричних мережах: монографія. Дніпро: НТУ«ДП», 2020. 72 с.
6. Лежнюк П. Д., Бевз С. В. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод. Вінниця: ВДТУ, 2001. 177 с.
7. Кузьмичов А. І. Оптимізаційні методи і моделі: практикум в Excel. Київ: ВПЦ АМУ, 2013. 438 с.
8. Іноземцев Г. Б., Козирський В. В. Оптимізаційні задачі в енергетиці сільського господарства. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2014. 172 с.
9. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова книга, 2004. 656 с.
10. Базюк Т. М., Блінов І. В., Буткевич О. Ф., Денисюк С. П. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
11. <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/>
12. <https://www.directindustry.com.ua/prod/siemens-high-voltage-power-transmission/product-32878-2230929.html>

13. Кириленко О. В. Блінов І. В. Впровадження базових міжнародних стандартів Smart Grid в Україні: сучасний стан справ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 4. С. 44 – 54.

14. Оцінка стану та реалізації концепцій розвитку «інтелектуальних» електромереж у світовій практиці [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/3.-SmartGrid.pdf>

15. Кирик В. В. Методи організації гнучких електричних систем Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 47 с.

16. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. Моделювання електромеханічних систем: підручник. Кременчук, 2001. 410 с.

17. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab: електронний навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 421 с.

18. Журахівський А. В., Кінаш Б. М., Пастух О. Р. Надійність електричних систем і мереж: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 280 с.

19. Новотарський М. А., Нестеренко Б. Б. Штучні нейронні мережі: обчислення. Київ: Ін-т математики НАН України, 2004. 408 с.

20. Терейковський І. А., Бушуєв Д. А., Терейковська Л. О. Штучні нейронні мережі: базові положення. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 123 с.

21. Михайленко В. М., Терейковська Л. О., Терейковський І. А., Ахметов Б. Б. Нейромережеві моделі та методи розпізнавання фону в голосовому сигналі в системі дистанційного навчання: монографія. Київ: Компринт, 2017. 252 с.

22. Терейковський І. Нейронні мережі в засобах захисту комп'ютерної інформації: монографія. Київ: ПоліграфКонсалтинг, 2007. 209 с.

23. <https://termin.in.ua/neyromerezha/>

24. Ткаліченко С. В. Штучні нейронні мережі: навчальний посібник. Кривий Ріг, 2023. 150 с.

25. Шестерінко Е. В. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця. Видавництво «Нова книга», 2004. 655 с.
26. Аніськов О. В. Електропостачання промислових підприємств: конспект лекцій. Кривий Ріг: КТУ, 2010. 95 с.
27. Казанський С. В. Надійність електроенергетичних систем. Київ: КПІ, 2020. 67 с.
28. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Харків: Вид-во «Точка», 2012. 340 с.
29. Панченко С. В., Акімов О. І., Бабаєв М. М. Електробезпека: підручник. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 295 с.
30. Лехман С. Д. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві: навч. посібник. Київ: Урожай, 1993. 272 с.
31. Касьянов М. А., Ревенко Ю. П., Тищенко Ю. А. Захист населення в умовах надзвичайних. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля., 2003. 183 с.
32. Мірошник О. О., Черкашина В. В., Мороз О. М., Черемісін М. М. Економічні розрахунки в інженерній діяльності на прикладах задач електроенергетики. Харків: ФЛП Панов А. Н., 2018. 214 с.
33. ГКД 340.000.001-95. Визначення економічної ефективності капіталовкладень в енергетику. Методика. (Загальні методичні положення). Київ: Міненерго України, 1995. 34 с.