

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Карабанов Сергій Григорович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз способів і засобів управління потоками реактивної потужності в
системах електропостачання
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Карабанов С. Г.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Рассадкіна Марина Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.ф-м.н., доцент кафедри вищої та

прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Карабанов С. Г. Аналіз способів і засобів управління потоками реактивної потужності в системах електропостачання

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Метою представлених у магістерській роботі досліджень є розробка системи управління потоками реактивної потужності з використанням активно-адаптивних елементів для підтримки на кордоні балансової приналежності підприємства необхідного значення коефіцієнта реактивної потужності та забезпечення визначеного ДСТУ рівня напруги в контрольних точках системи електропостачання підприємства.

Ключові слова: релейний захист, струмовий захист, адаптація.

ABSTRACT

Karabanov S. G. Analysis of methods and means of controlling reactive power flows in power supply systems

Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

The purpose of the research presented in the master's thesis is to develop a reactive power flow control system using active-adaptive elements to maintain the required value of the reactive power coefficient at the enterprise's balance sheet border and ensure the voltage level specified by DSTU at the control points of the enterprise's power supply system.

Keywords: relay protection, current protection, adaptation.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ І ЗАСОБІВ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСНАБЖЕННЯ	7
1.1 Аналіз способів компенсації реактивної потужності	7
1.2. Обґрунтування автоматизації управління потоками реактивною потужності	12
Висновки по розділу 1	15
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА КОРДОНІ БАЛАНСОВОЇ ПРИНАДЛЕЖНОСТІ	17
2.1 Структура системи адаптивного управління.	17
2.2. Особливості нейронних мереж для адаптивного управління по- струмами реактивною потужності	20
2.2. 1 Одношарові мережі прямого поширення.	21
2.2.2 Багатошарові мережі прямого поширення.	22
2.2.3 Рекурентні мережі.	23
Висновки по розділу 2	25
РОЗДІЛ 3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АКТИВНО-АДАПТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ	26
3.1. Моделі елементів системи електропостачання і системи управління	27
3.2 Оцінка адекватності і ефективності моделювання	39
Висновки по розділу 3	41
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44

ВСТУП

Для промислових підприємств ефективність споживання електричної енергії визначається своєчасним забезпеченням технологічного процесу необхідним кількістю електроенергії заданої якості при найменших втратах і при умови збереження надійної стійкої роботи електроприймачів. Найбільш значущою частиною заходів щодо підвищення ефективності електроспоживання досі є зниження втрат за рахунок регулювання напруги і компенсації реактивною потужності.

Компенсація реактивною потужності дозволяє підвищити ефективність використання електроенергії у трьох основних напрямках: збільшення пропускної спроможності ліній та трансформаторів, зниження втрат активної енергії, нормалізація напруги. Встановлення компенсуючих пристроїв дозволяє знизити активні втрати за рахунок зниження повного струму. Таким чином, компенсація реактивної потужності може бути в повній мірі названо однією з технологій енергозбереження. Навіть на підприємствах, де немає проблем із перевантаженням електромережевого обладнання, за рахунок зниження активних втрат заходи щодо компенсації реактивної потужності окупаються порівняно за короткий період часу.

За величиною коефіцієнта реактивної потужності можна судити про те, яка частина споживаної енергії корисно використовується для здійснення роботи. У можливому наближенні коефіцієнта потужності приймальних пристроїв до одиниці в основному і полягає техніко-економічна проблема компенсації реактивної потужності

Для регулювання потоків реактивної потужності (РП) при забезпеченні допустимих ДСТУ рівнів напруги в розподільчих мережах промислових підприємств та стійкості навантаження необхідна розробка централізованої і адаптивної системи управління параметрами засобів регулювання, здатної миттєво оцінювати параметри поточного режиму, знаходити актуальні причинно-наслідкові закони функціонування електричної системи, керувати

групою різноманітних елементів системи, з великим кількістю властивостей, які міняються з часом.

Метою представлених у магістерській роботі досліджень є розробка системи управління потоками реактивної потужності з використанням активно-адаптивних елементів для підтримки на кордоні балансової приналежності підприємства необхідного значення коефіцієнта реактивної потужності ($\text{tg}\varphi$) та забезпечення визначеного ДСТУ рівня напруги в контрольних точках системи електропостачання підприємства.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Провести аналіз досліджень в області управління потоками реактивної потужності в системах електропостачання.

2. Створити адаптивну систему керування потоками реактивної потужності в системі електропостачання промислового підприємства з використанням штучної нейронної мережі та активно-адаптивних елементів.

3. Розробити імітаційну модель, яка дозволить відтворити управління потоками реактивної потужності на межі балансової приналежності підприємства і енергосистеми, і оцінити її ефективність.

Методи дослідження. Для реалізації поставлених у дисертації задач використовуються: методи аналізу та синтезу, теорія систем автоматичного регулювання, методи оптимізації. В якості програмних інструментів для розробки моделей та алгоритмів застосовуються системи комп'ютерної математики MATLAB.

Об'єкт дослідження: система електропостачання (СЕП) промислового підприємства (ПП).

Предмет дослідження: потоки реактивної потужності на кордоні балансової приналежності промислового підприємства (ПП) і енергомережевої компанії; рівні напругив СЕП ПП; методи моделювання.

Практична значимість. Реалізація запропонованої моделі управління потоками реактивною потужності дозволяє підтримувати на кордоні

балансовій приналежності підприємства та енергосистеми необхідне значення коефіцієнта реактивної потужності, а також вирішити задачу постачання споживачів електроенергією необхідної якості.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Карабанов С. Г., Карпенко Г. В. АДАПТИВНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА В ПАКЕТІ MATLAB SINULINK.

Біоенергетичні системи: Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». 12-14 листопада 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. 31-33 с.

Карабанов С. Г., Карпенко Г. В. МОДЕЛІ ТРАНСФОРМАТИВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ПАКЕТІ MATLAB SINULINK

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 123-125.

Карабанов С.Г. ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА СТРУКТУРА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ.

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 105-107.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СПОСОБІВ І ЗАСОБІВ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСНАБЖЕННЯ

1.1 Аналіз способів компенсації реактивної потужності

На даний момент в нашій державі в якості маркера споживання реактивної енергії, як і раніше, використовується коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$), чисельно визначений відношенням активної потужності до повної потужності, але не коефіцієнт реактивної потужності ($\tan \varphi$), рівний відношенню величини реактивної потужності до активної потужності. Однак точність коефіцієнта потужності у визначенні реального споживання реактивної енергії значно нижча за точність коефіцієнта реактивної потужності, що використовується в якості маркера в країнах ЄС і США (табл. 1.1) [1].

Таблиця 1.1 - Значення реактивної потужності (РП) у відсотках від активної потужності при різних значеннях коефіцієнтів потужності та реактивної потужності

$\cos \varphi$	1.0	0.99	0.97	0.95	0.94	0.92	0.9	0.87	0.85	0.8	0.7	0.5	0.316
$\tan \varphi$	0.0	0.14	0.25	0.33	0.36	0.43	0.484	0.55	0.60	0.75	1.02	1.73	3.016
РП, %	0.0	14	25	33	36	43	48.4	55	60	75	102	173	301.6

Відповідно до цього стає завдання вироблення нових способів та методів компенсації реактивної потужності (КРП) шляхом розробки централізованої і адаптивної системи управління параметрами засобів регулювання потоками реактивної потужності.

Відмінності методик КРП укладаються в постановці і умовах розв'язуванні задачі, вигляді цільової функції, кількості критеріїв оптимізації, типу використовуваних вихідних даних, способи пошуку рішення.

Незважаючи на відмінності в підходах до проведення КРП, основні технічні обмеження, що використовуються при її вирішенні, завжди включали в себе наступні нерівності [16]:

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

де Q_{max} Q_{min} – межі вироблюваної (споживаної) реактивної потужності розглянутого пристрою;

Q – фактичне значення реактивної потужності, отримане при оптимізації.

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

де U_{max} , U_{min} - максимальне і мінімальне значення напруги;

U - фактичне значення напруги.

$$\operatorname{tg} \varphi \leq \operatorname{tg} \varphi_{max}, \quad (1.3)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ - фактичне значення коефіцієнта потужності в мережі;

$\operatorname{tg} \varphi_{max}$ - допустиме значення коефіцієнта потужності в мережі.

За наявності в мережі, що розглядається, кількох джерел реактивної потужності необхідне вирішення задачі оптимального розподілу реактивної потужності між ними для зниження сумарних витрат, то є спільне рішення балансової та економічної задач КРП.

У [15] запропоновано метод КРП для розподільчих мереж, заснований на мінімізації сумарних витрат на виробництво та передачу реактивної потужності в розглянутий вузол в режимі максимальних навантажень, в якому оптимальне значення цільової функції визначається методом невизначених множників Лагранжа з обмеженнями в вигляді балансу реактивної потужності в вузлі, що розглядається. Даний підхід має на увазі те, що потенційні джерела реактивної потужності можуть бути любими: «генератори електричних станцій, синхронні компенсатори, групи синхронних двигунів та конденсаторні установки» [15], які в сучасних умовах можуть належати різним власникам, що робить неможливим використання такого підходу без урахування фінансового інтереса кожного із власників. Крім того, даний підхід націлений на рішення завдання «доставки» реактивної потужності до конкретного вузла, а не на оптимальний розподіл реактивної потужності в мережі, а також не враховує втрати активною потужності в самих компенсуючих пристроях.

У [4, 12] як цільову функцію використовуються наведені витрати, які в загальному вигляді складаються з трьох складових: витрати на електростанції

системи, пов'язані з виробництвом реактивної потужності, витрати на електричні мережі, обумовлені передачею реактивної потужності, витрати на КУ. Завдання вирішується в детермінованій постановці, не враховує характер зміни навантаження, що може призвести до виходу рішення із оптимальної області. Оптимізацію цільової функції запропоновано виконувати градієнтним методом, використовуючи при цьому реактивні потужності режиму максимальних навантажень, а при виборі нерегульованих компенсуючих пристроїв – середні значення РП. Оптимізаційний алгоритм та оцінка ефективності КУ будується тільки на ефекті зниження втрат активною потужності (енергії). Крім того, орієнтуючись на один із режимів – режим максимальних навантажень, не можна оптимізувати всю гаму режимів в аналізованій схемі на різних тимчасових інтервалах. Однак з точки зору підготовки вихідних даних метод дуже підходить для умов експлуатації.

Метод потенціалів витрат [17] має на увазі пошук оптимального місця та потужності КУ шляхом мінімізації витрат, що складаються з трьох складових: витрати на втрати електроенергії, витрати на генерацію існуючими джерелами реактивною потужності і витрати па додаткові КУ. Диференціал розглянутої частини витрат з реактивної потужності вузла та названий потенціалом витрат. Умова мінімуму функції наведених витрат визначається за допомогою приватних похідних за основними змінними. Додаткова установка КУ вважається доцільною при умові, якщо економічний ефект від встановлення КЗ перевищує їх вартість. При моделюванні використовуються реактивні навантаження вузлів та активні опори гілок. Порівняння складових потенціалів витрат для вузла дозволяє визначити найбільш прийнятне джерело реактивної потужності. Даний підхід достатньо ефективний при детермінованій постановці і зарекомендував себе для мереж одного власника - Держави.

Стохастичний характер електричних навантажень обмежує область його застосування. Основним недоліком даного методу є використання часу витрат, що наводить до збільшення методичної похибки в розрахунках витрат

потужності [17].

У [16] завдання оптимізації потужності, місць розміщення засобів компенсації реактивних навантажень і регулювання напруги в загальному вигляді представлена функцією наведених витрат, яка включає:

- витрати на додаткові компенсуючі пристрої в кожному вузлі,
- витрати на додаткові пристрої, які виконують тільки функції регулювання напруги в кожному вузлі,
- витрати, пов'язані відповідно з експлуатацією додаткових компенсуючих та регулюючих пристроїв,
- витрати, пов'язані з втратами потужності та енергії в існуючих джерел,
- збитки, які виникає у споживачів через неоптимальну напругу в кожному вузлі.

У цьому підкреслюється не виправдана трудомісткість рішення, здолати яку можна зневагою деяких найменш значущих складових, тому в розрахунках економічного ефекту враховується ефект від зниження втрат активної і реактивної потужностей, від нормалізації якості напруги у вузлах і від збільшення пропускної здатності елементів мережі. Усі складники ефекту визначаються через градієнт відповідної функції. Наявність трьох останніх складових ефекту залежить від ступеня впливу додаткових КУ на мережу, а основним являється ефект від зниження втрат активної потужності. Додаткове КУ доцільно встановлювати в першу чергу у вузлах, де функція « ефектів » максимальна.

Згідно [14] напруги у віддаленого і найближчого споживача мають бути в межах $\pm 5\%$. Після встановлення КУ у всіх вузлах для забезпечення умов мінімізації цільової функції витрат, методично нарощується потужність КУ в вузлах, де напруги у віддаленого і найближчого споживачів не входять в межі $\pm 5\%$. Далі формується новий комплексний критерій, який характеризує відносний приріст витрат з обліком режиму напруги.

При рішенні оптимізаційних завдань КРП значне увага уділяється багатоцільової оптимізації. Це обґрунтовується багатокритеріальністю та

багатогранністю впливу КУ па ЕЕС.

Описані вище методи КРМ можна віднести до детермінованих, так як вони використовують як оптимізований один або невелика кількість характерних режимів роботи ділянки мережі, що розглядається, і не враховують усі безліч режимів. До таких же відносяться: метод динамічного програмування та покоординатного спуску [16], метод нелінійного квадратичного програмування, матрично-обчислювальний метод, яких розглядаються лише основні режими роботи енергосистеми, що не дозволяє отримати найкраще рішення в умовах невизначеності. Крім того, багато з них орієнтовані на використання часу втрат, що вносить додаткову методичну похибка.

Стохастичний характер електричних навантажень та їх невизначеність призводить до неможливості прийняття рішення тільки по одному з режимів і потребує використання принципово іншого підходу. Тому для отримання найбільш прийняттого варіанта рішення в [10] використовують серії розрахунків режимів. У [15] для рішення завдань оптимізації режимів в цілому запропоновано проведення серії розрахунків по параметрам режиму, напівченим «з допомогою міркувань о допустимому обсязі розрахунків». У [17] аналогічний підхід використовується вже у безпосередньому завданні проведення КРП. У [10] облік невизначеності під час вирішення завдання КРП полягає в розгляді безлічі вихідних режимів у період максимальних та мінімальних навантажень.

Механізм прийняття оптимізаційного рішення в умовах невизначеності в [11] заснований на складанні платіжної матриці, відбиваючою зміни цільовий функції від величини при різних значеннях невизначеного параметра. У такий постановці можна отримати результат, підходящий для розглянутого поєднання режимів з певної похибкою, але не виявляється оптимальним ні для одного з них.

Використання в якості методу оптимізації генетичного алгоритму та його модифікацій при вирішенні оптимізаційної задачі КРП показано в роботах як зарубіжних авторів [19, 20], так та вітчизняних [7].

В [17] для вирішення оптимізаційних завдань з управління потоками

реактивної потужності на промисловому підприємстві запропоновано використання нейронних мереж у поєднанні з нечіткою логікою та генетичним алгоритмом. Але при цьому використовується лише критерій максимального зниження втрат, а управління потоками реактивної потужності здійснюється при поточному розпізнаному стану, що в умовах невизначеної інформації в СЕП ПП не дасть можливість одержати дійсно оптимальний керуючий вплив.

Таким чином, все розглянуті методи і методики КРП використовують в якості цільової функції наведені витрати, які в залежності від запропонованого методу і галузі застосування включають різне поєднання таких параметрів як вартість компенсуючих пристроїв, втрати активної та реактивної потужності (або енергії) в мережі, відхилення напруги, пропускну спроможність елементів мережі, штрафні надбавки за понад нормативне споживання РП, вартість генерації реактивної потужності на електричні станції і т.д. Використання наведених витрат як цільової функції абсолютно обґрунтовано, та при розробці методики КРП повинні використовуватися саме вони, проте складові мають відповідати сучасним умовам функціонування електроенергетики.

Комплексне управління режимами СЕП за своєю суттю важко здійснено, оскільки це пов'язано з таким об'єктом управління, як СЕП підприємства, умови функціонування якого недостатньо вивчені, а модель об'єкта і мета управління слабо формалізовані. Застосування штучної нейронної мережі задля досягнення достатньої швидкості прийняття рішень управління, у своїй схожості евристичного алгоритму ШНМ з мисленням людини (при достатньої ефективності навчання), дає необхідне рішення завдання у більшості практично значимих випадків.

1.2. Обґрунтування автоматизації управління потоками реактивною потужності

Управління режимами функціонування СЕП ділиться на автоматичне та оперативне. Обидва часові розрізи управління характеризуються недостатньою інформаційною забезпеченістю, недосконалістю методів обробки

інформації та вироблення рішень, обмеженим часом для формування керуючих впливів. Розвиток математичних методів і засобів обчислювальної техніки, використання мікропроцесорів і їх вдосконалення дозволяють в значній ступені зняти обмеження на якість управління режимами СЕП. У практиці управління СЕП можливий якісно новий підхід до ухвалення рішення – від умов найгіршого, самого важкого випадку до формування оптимальних керуючих впливів, відповідних характером обурення в темпі процесу, до адаптації системи управління до поточного режиму.

Вирішенню цих завдань сприяє інтеграція систем управління, як об'єктна, так і функціональна на єдиній технічній і значній мірі інформаційній і модельно-програмній основі [9]. Можна говорити про взаємозв'язки, у тому числі інформаційних, автоматизованих систем диспетчерського управління (АСДУ), автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) об'єктів, автоматизованих систем комерційного та технічного обліку електроенергії (АСКОЕ), систем захисту, управління та контролю, засобів управління в нормальних та аварійних режимах і т.д. По суті, можна говорити про накладення на електричну мережу СЕП інформаційної мережі з інтелектуальними вузлами, в яких здійснюється обробка інформації та прийняття локальних рішень. Основу інформаційну мережу в задачах оперативного управління режимами СЕП у реальному часі становлять телеметричні виміри перетікань потужності, рівнів напруги в вузлах і телесигнали про стан основного обладнання СЕП. Саме цикл їх оновлення визначає темп обробки інформації.

У зв'язку з цим одним з ефективних шляхів економії електроенергії є впровадження на промислових підприємствах сучасних автоматизованих систем контролю, обліку та управління електроспоживанням (АСКОЕ). На багатьох підприємствах вже встановлено такі системи. Слід звернути увагу, що АСКОЕ цих підприємств працює далеко не на межі своїх технічних та інформаційних можливостей. Насамперед, це пов'язано з тим, що АСКОЕ використовуються в основному для комерційних розрахунків з

енергопостачальною організацією, а також для дотримання заявленого максимуму активною потужності, ліміт якої, навіть при наявності АСКОЕ, може необґрунтовано перевищуватись. Крім того, утруднений доступ до баз даних АСКОЕ в силу суб'єктивних та об'єктивних причин, які безпосередньо пов'язані або з «комерційної таємницею» підприємства, або лічильники електроенергії здатні вимірювати тільки активну та реактивну енергію. Показники якості електроенергії, як правило, не фіксуються у споживача. Такі

АСКОЕ прийнято називати АСКОЕ пасивного типу [15]. Тут явно виражений пріоритет збору інформації про події в СЕП, що відбулися, і відсутній механізм впливу на них. Для того щоб АСКОЕ грала активну роль у процесі електропостачання, алгоритм її роботи, крім збору інформації, повинен або включати управляючі впливи на цей процес для споживача, або інформувати споживача і постачальника електроенергії про прийняте рішення із зазначенням причин [17]. Така реалізація активної АСКОЕ є інтегральним варіантом, за якого технологічний комплекс вирішує економічні завдання та виконує функції АСУ ТП.

Таким чином, АСКОЕ використовується як інструмент управління електроспоживанням, а не як засіб для управління режимами СЕП. Необхідно мати з огляду цю невраховану особливість, на підставі чого можна виявити слідуючі властивості АСКОЕ [15,16], характерні для застосування даної системи виключно в області управління режимами СЕП:

1) ідентифікаційні властивості – однозначне визначення режимів та параметрів режимів роботи об'єкта та елементів системи у будь-який момент часу; іншими словами - це наочне подання картини електроспоживання кожного підрозділу підприємства та миттєвих значень параметрів режиму в контрольних точках, максимально наближених до реального часу (бажано з великою частотою зняття показань з лічильників, т. б. як 30-хвилинних максимумів навантаження, так і на менших інтервалах часу);

2) керуючі властивості – прийняття рішень та формування управляючих впливів на елементи системи в різних режимах по заданим алгоритмам при

поєднанні централізованого та місцевого управління виконуючими пристроями електроустановок (трансформаторів з РПН на ДПП, компенсуючих пристроїв) і наявності вибіркості.

Як елементи АСКОЕ зараз виступають різні мікропроцесорні засоби (електронні лічильники – фундамент АСКОЕ) з достатньо великим обсягом функцій. Наприклад, у лічильників ЄвроАльфа [10] є такі основні можливості, які можна використовувати при управлінні режимами СЕП:

- а) вимір активної і реактивної енергії і потужності в двох напрямках;
- б) вимірювання (обчислення) та відображення напруги та струму пофазно, частоти мережі, коефіцієнта потужності, фазних кутів струму і напруги.

Проблема управління режимами СЕП з допомогою АСКОЕ на сьогоднішній день не нова. Раніше, ще в 70-ті - 80-ті роки ХХ століття, існували

«предки» АСКОЕ – різні реєстратори та прилади для вимірювання параметрів режиму СЕП, проте їх свідчення не були узгоджені між собою та рішення приймалися на локальному рівні. Трансформатори струму і напруги також використовувалися при цьому, вони застосовуються і зараз для підключення електронних лічильників і служать в якості датчиків на нижчому рівні АСКОЕ.

Отже, АСКУЕ повинна працювати як людино-машинна система, поєднуюча використання ефективних сучасних коштів обчислювальної техніки з діяльністю людини-інженера, роль якого полягає у прийнятті остаточного рішення по завдання економічного режиму роботи СЕП підприємства у масштабі реального часу як у ручному, так і в діалоговому режимах.

У зв'язку з проблемами по вилучення інформації про режими СЕП підприємств, у цьому підрозділі виявлено лише можливість використання АСКОЕ як інформаційної бази для управління режимами СЕП, але не більше.

Висновки по першому розділу

Управління потоками реактивною потужності (УПРП) можливо шляхом

компенсації реактивною потужності (КРП). Рішенню завдання КРП присвячені роботи багатьох вчених, у своїх працях вони розкрили підходи, засновані як на детермінованому завданні вихідної інформації, так і на віронісним, позначили проблему КРП як багатокритеріальну, яку можна вирішити, оптимізуючи цільову функцію або за одним параметром, або кількома. У роботах останніх років при приватних розв'язках задачі КРП активно застосовуються еволюційні методи: генетичні алгоритми і штучні нейронні мережі, теорія нечітких множин та нечітка логіка в сукупності з ситуаційним управлінням.

РОЗДІЛ 2

СТВОРЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА КОРДОНІ БАЛАНСОВОЇ ПРИНАДЛЕЖНОСТІ

2.1 Структура системи адаптивного управління.

Для моделювання адаптивного управління потоками реактивної потужності і рівнями напруги в електричній мережі потрібні наступні входні дані [14]:

а) схема заміщення електричної мережі системи електропостачання промислового підприємства із зазначенням значень активних та реактивних опорів ліній, асинхронних двигунів, трансформаторів, СТАТКОМ;

б) діапазони регулювання реактивної СТАТКОМ; діапазони регулювання коефіцієнтів трансформації трансформаторів РПН

в) межі допустимих змін напруги у всіх вузлах електричної мережі.

Створити модель адаптивного управління з фізичними параметрами елементів схеми заміщення електричної мережі промислового підприємства адекватними реальним об'єктам, дозволить програмний комплекс Matlab. Крім того, у Simulink Matlab досить просто поєднати інформаційну мережу з електротехнічною при цьому надавши управління штучній нейронній мережі(ШНМ), але в силу обліку особливостей блоків моделей FACTS, реалізованих в програмному комплексі Simulink Matlab, необхідна обробка вихідних значень нейронної мережі для коректної інтерпретації блоками сигналів управління ШНМ.

На рисунку 1 представлена структура системи управління для якої входними параметрами є значення трьох фаз напруги на кордоні балансової власності ($U_{вн}$). Крім того, для створення адаптивної моделі поведінки ШНМ необхідно мати зворотний зв'язок з об'єктом управління, а саме з трьома фазами напруг в кожній контрольній точці електропостачання підприємства ($U_{нн}$).

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

- задати затримку в часі приблизно в 0,5 сек для запобігання виникнення резонансів та посилення перехідних процесів у контурі середньої напруги і успішного управління СТАТКОМ;

- блок ТРДН з РПН має обмеження в логіці при використанні управління ним із зовні, крім того у РПН існує фізична затримка, обґрунтована швидкістю перемикавання між відпаюваннями приблизно рівною 3 сек. Недолік зовнішньої логіки, що управляє, в РПН в тому, що при наявності двох вхідних сигналів «Вгору» і «Вниз», відпаювання змінюється тільки тоді коли значення вхідного сигналу змінюється з 0 на 1 (з урахуванням фізичного обмеження в 3 сек, задане в параметрах блоку). Тому в додатковому контурі перед ТРДН знаходиться блок обробки сигналів, який порівнює поточний стан РПН і той, який необхідно прийняти по команді ШНМ, потім подає сигнал на вхід управління РПН для перемикавання на відпаювання вище або нижче. Процес повторюється до тих пір, поки РПН не prime значення необхідне ШНМ.

Після затримки в 0,5 сек задається еталонна напруга (V_{ref}) необхідна ШНМ для успішного управління СТАТКОМ. Окрім схеми управління представленою на рисунку 2.1. СТАТКОМ має свою власну логіку.

На рисунку 2. показано однолінійна схема СТАТКОМ і його спрощена схема управління.

Елементами схеми управління СТАТКОМ є [13]:

- фазове автопідстроювання частоти (PLL) яка синхронізується за прямою послідовністю вхідної напруги V_1 . Вихідне значення (градус $\Theta = \omega t$) використовується для обчислень поздовжньої і поперечної складової змінного струму і напруги (позначено на рис V_d , V_q і I_d , I_q)

вимірювальні системи вимірюють поздовжню і поперечну складову змінного ланцюга за прямою послідовністю, якою схема і керує, а також і напруга ланцюга постійного струму V_{dc} .

- зовнішній контур регулювання що складається з регуляторів постійного та змінної напруги. Вихід регулятора змінної напруги - це еталонний струм I_{qref}

для регулятора струму (I_q – поперечний напрузі струм, що регулює потік реактивної потужності). Вихід регулятора постійної напруги - це еталонний струм I_{dref} для регулятора струму (I_d - збігаючий по фазі з напругою струм, регулюючий потік активною потужності).

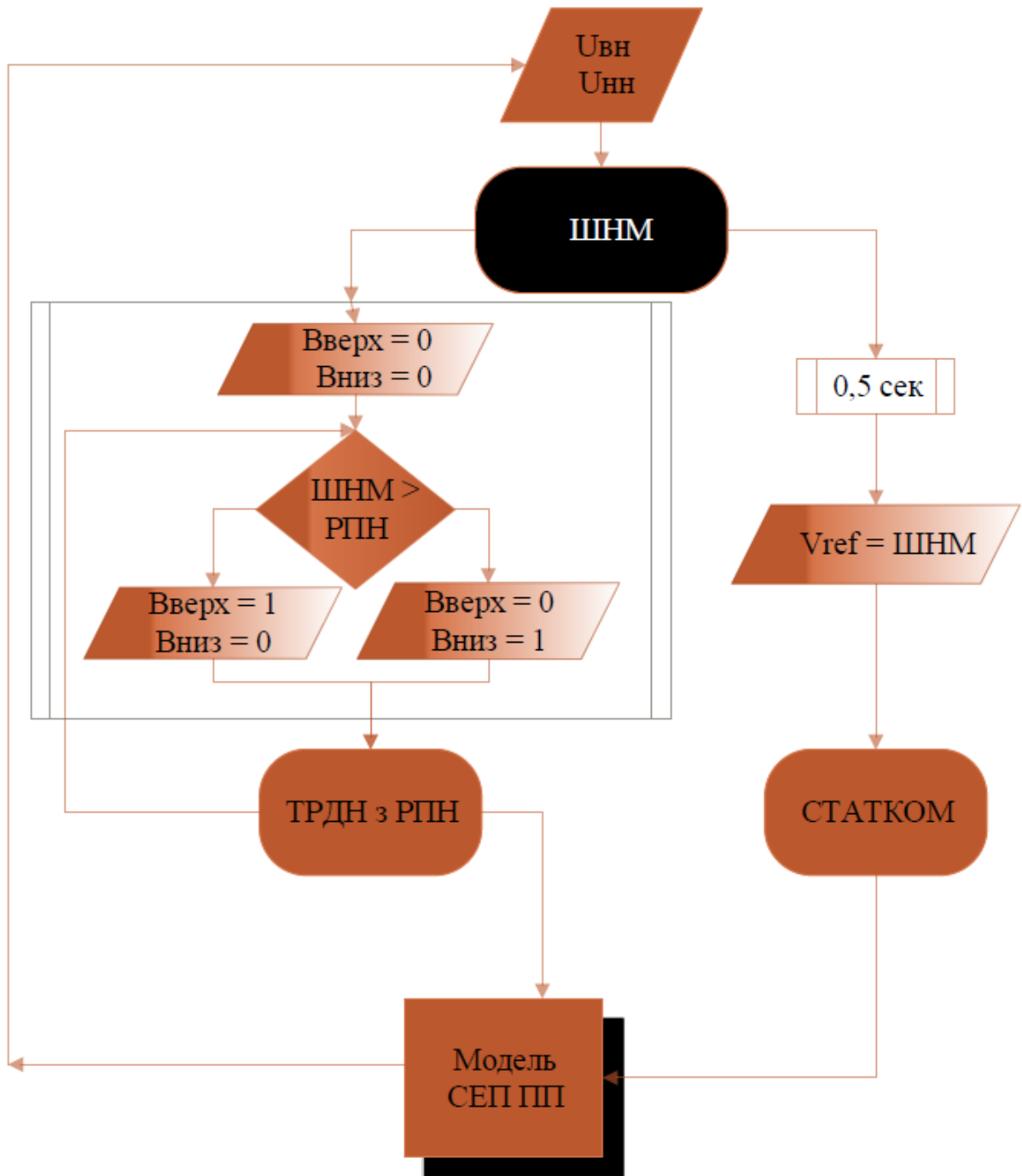


Рисунок 1 - Структура системи управління

- внутрішній контур складається з регулятора струму. Він управляє

амплітудою і фазою напруги (V_{2d} V_{2q}), що генерується перетворювачем з широтно-імпульсною модуляцією (PWM) з I_{dref} та I_{qref} еталонних струмів створених з допомогою регуляторів постійної і змінної напруги відповідно. Регулятор струму при сприянні з регулятором з прямим зв'язком, котрий пророкує вихідну напругу V_2 (V_{2d} V_{2q}) з вимірювань V_1 (V_{1d} V_{1q}) і реактивного опору витoku трансформатора.

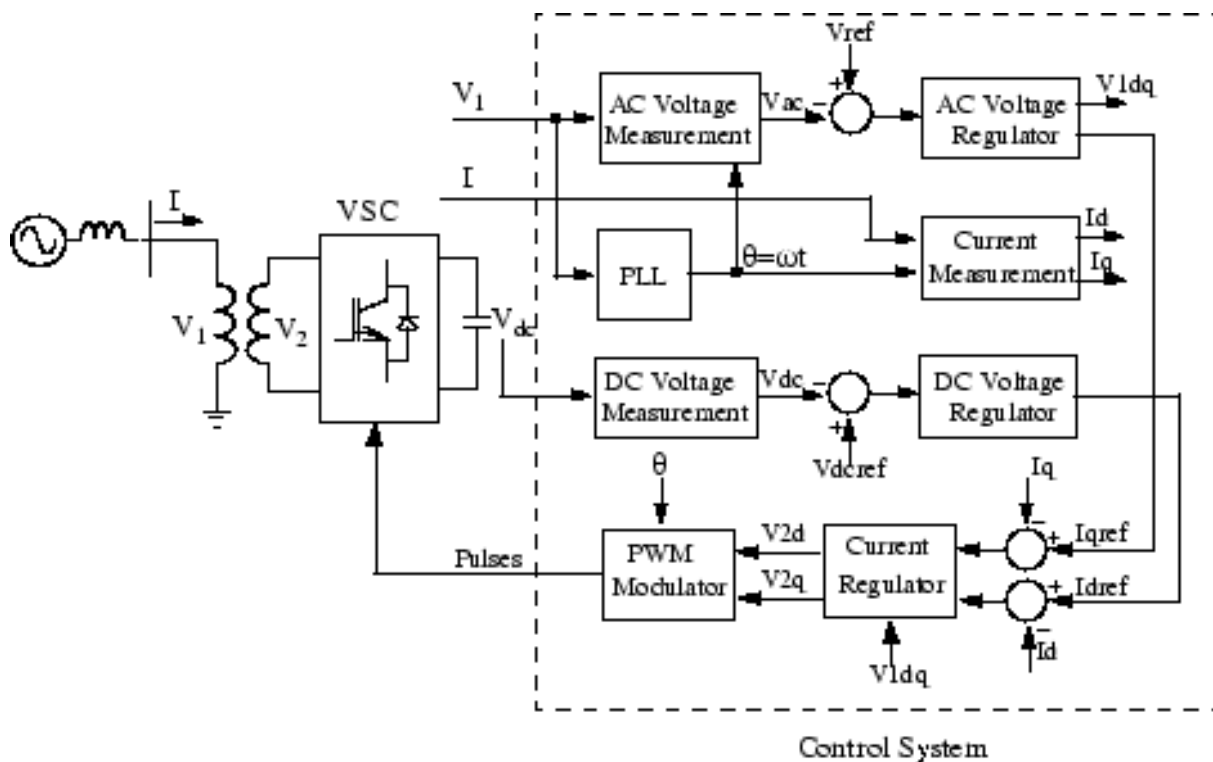


Рисунок 2.2 - Схема управління СТАТКОМ

2.2. Особливості нейронних мереж для адаптивного управління по- струмами реактивною потужністю

Існуючі методи прогнозування електричної навантаження і надійності елементів електроенергетичної системи не можуть працювати з «зашумленими» чи неповними даними, тоді як у реальному житті часто доводиться мати справу саме з такою інформацією. Тому необхідні нові підходи і методи для прогнозування електричної надійності електрообладнання і електричної навантаження, які б могли вчитувати дані різного роду, працювати з неточними, неповними вхідними даними. Одним з таких нових підходів, що розвиваються, є метод, заснований на нечіткою

логіці та штучних нейронних мереж.

Особливість застосування нейронних мереж пов'язана з тим, що вони використовуються механізмом навчання. Користувач нейронної мережі підбирає перед-дані, а потім запускає алгоритм навчання, який автоматично точно налаштовує параметри мережі. При цьому від користувача, звичайно, треба бути якийсь набір евристичних знань о тому, як слід відбирати і готувати дані, вибирати потрібну архітектуру мережі та інтерпретувати результати [6,7].

Структура нейронних мереж тісно пов'язана з алгоритмами навчання. У загальному випадку можна виділити три фундаментальних класу нейромережевих архітектур, широко застосовуваних для надійного та ефективного управління.

2.2.1 Одношарові мережі прямого поширення.

У одношаровій нейронній мережі нейрони розташовуються по верствам. У найпростішому випадку в такій мережі існує вхідний шар джерела, інформація від якого передається на вихідний шар нейронів, але не навпаки. Така мережа називається мережею прямого поширення або ациклічною мережею[9].

На рисунку 2.3 показано структуру такої мережі 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 розрахункових елементів (Нейронів).

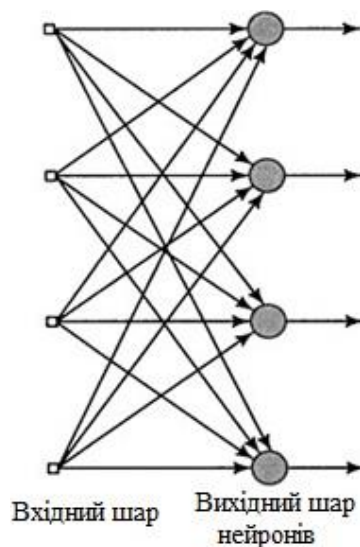


Рисунок 2.3 - ШНМ прямого поширення з одним шаром

При підрахунку числа шарів не приймаються во увага вузли джерела, так як 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 тільки областю допустимих значень вихідних сигналів, прийнятої для нормалізації.

2.2.2 Багат шарові мережі прямого поширення.

Інший клас нейронних мереж прямого поширення характеризується наявністю одного або декількох прихованих шарів, вузли яких називаються прихованими нейронами або прихованими елементами [9]. Функція останніх заключається в посередництві між зовнішнім вхідним сигналом та виходом нейронної мережі. Додаючи один або кілька прихованих шарів, ми можемо виділити статистику високого порядку. Така мережа дозволяє виділяти глобальні властивості даних за допомогою локальних з'єднань за рахунок наявності додаткових синаптичних зв'язків та підвищення рівня взаємодії нейронів [9]. Здатність прихованих нейронів виділяти статистичні залежності мости високого порядку особливо суттєва, коли розмір вхідного шару досить великий.

Вузли джерела вхідного шару мережі формують відповідні елементи шаблону активації (вхідний вектор), які складають вхідний сигнал, що надходить на нейрони (обчислювальні елементи) другого шару (тобто. першого прихованого шару). Вихідні сигнали другого шару використовуються в якості вхідних для третього шару і т.д. Зазвичай вихідні сигнали нейронів попереднього шару використовують в якості вхідних сигналів. Набір вихідних сигналів нейронів вихідного (останнього) шару мережі визначає загальний відклик мережі на даний вхідний образ, сформований вузлами джерела вхідного (першого) шару [6].

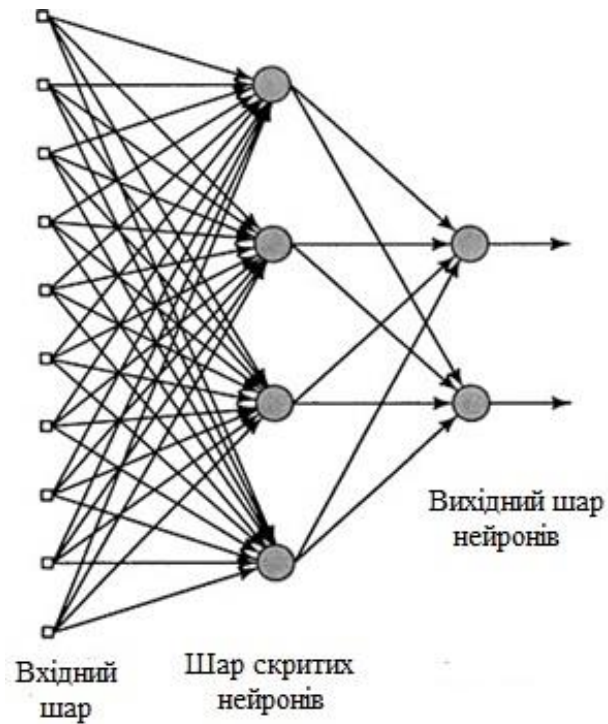


Рисунок 2.4 – Повнозв'язкова нейронна мережа прямого розповсюдження з однією прихованою та одним вихідним шаром

Мережа, показана на рисунку 2.4, називається мережею 10-4-2, оскільки вона має 10 вхідних, 4 прихованих та 2 вихідних нейронів. У загальному випадку мережа прямого поширення з входами m , h_1 нейронами першого прихованого шару, h_2 нейронами другого прихованого шару і q нейронами вихідного шару називаються мережею mh_1-h_2-q . Нейронна мережа, показана на рисунку 2.4, вважається повнозв'язковою в тому сенсі, що всі вузли кожного конкретного шару з'єднані з усіма вузлами суміжних шарів. Якщо деякі з синаптичних зв'язків відсутні, така мережа називається неповнозв'язковою.

2.2.3 Рекурентні мережі.

Рекурентна нейронна мережа відрізняється від мережі прямого поширення наявністю, принаймні, одного зворотного зв'язку [9]. Наприклад, рекурентна мережа може складатися з єдиного шару нейронів, кожен з яких спрямовує свій вихідний сигнал на входи решти нейронів шару.

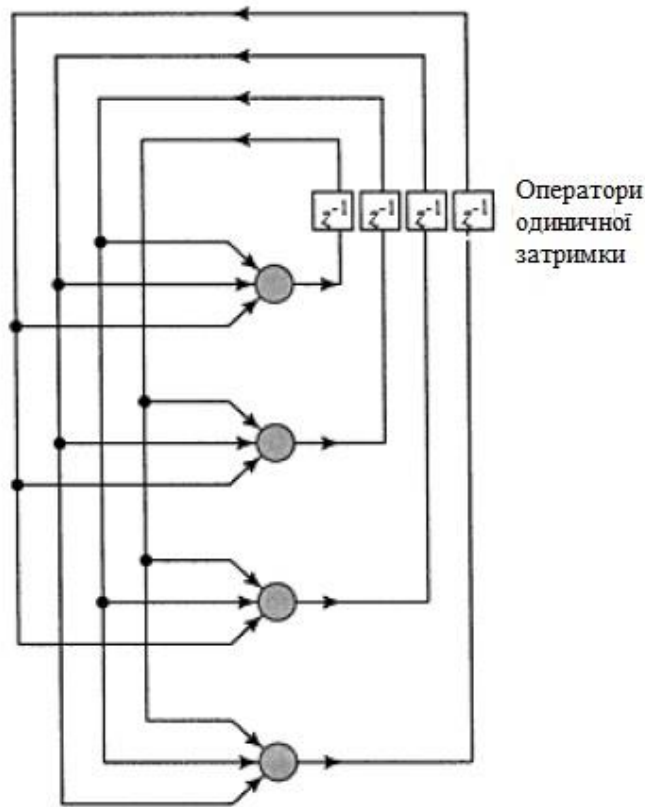


Рисунок 2.5 – Рекурентна ШНМ прямого поширення з одним прихованими одним вихідним шаром

Архітектура такої нейронної мережі показано на рисунку 2.5. У наведеної структурі відсутні зворотні зв'язки нейронів із самими собою [6]. Рекурентна мережа, показана на рисунку 2.5, не має прихованих нейронів.

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

Наявність зворотних зв'язків в мережах, показаних на рисунках 2.5 і 2.6, надає безпосередній вплив на здатність таких мереж до навчання і на їх продуктивність. Більше того, зворотній зв'язок має на увазі використання елементів одиничної затримки (вони позначені як z^{-1}), що призводить до нелінійній динамічній поведінці, якщо, звичайно, в мережі містяться нелінійні нейрони [6].

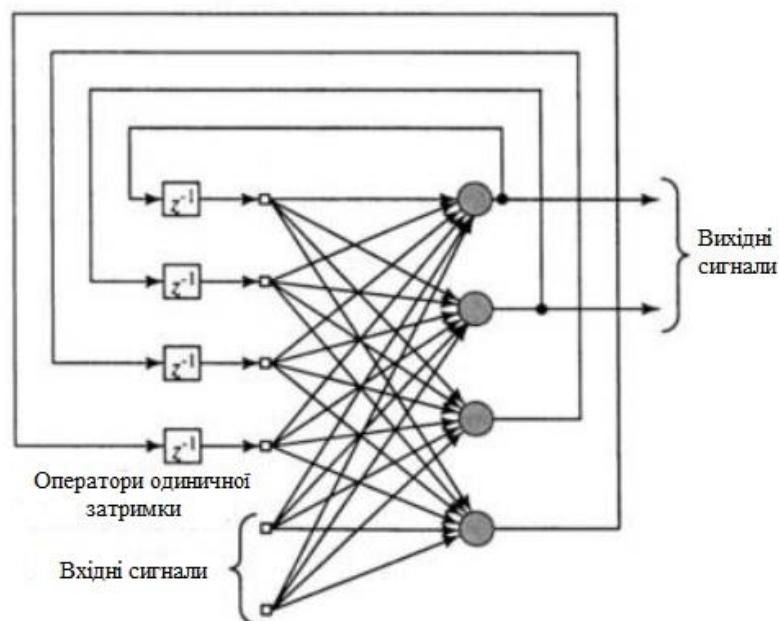


Рисунок 2.6 – Рекурентна нейронна мережа без прихованих нейронів зв'язків нейронів з самими собою

Висновок по другому розділу

Розроблено структура системи управління потоками реактивною потужності та регулювання рівнів напруги, на основі синтезу ШНМ та власної логіки СТАТКОМ, в якій ШНМ оперативно реагує на зміни рівня напруги на межі балансової приналежності пприймачів та енергосистеми, а активно-адаптивні елементи підлаштовуються під ці зміни з обліком усіх обмежень.

РОЗДІЛ 3

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АКТИВНО-АДАПТИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

У схему заміщення, що використовується для реалізації адаптивного управління потоками реактивної потужності та рівнями напруги в системах електропостачання були включені: трансформатори головної знижувальної і цехових підстанцій, асинхронні двигуни, кабельні лінії, СТАТКОМ.

Засоби управління потоками реактивної потужності (ШНМ та СТАТКОМ) включені в схему заміщення разом з мережею низької напруги сторони 10 кВ ГПП, що має низькі трансформатори, обладнані автоматично керованими РПН [5].

У вузлах 10 кВ і вище, що мають понижувальні трансформатори, без автоматично керованого РПН (цехові підстанції), рівні напруги і втрати потужності в мережі, підключеної до сторін низької напруги) НН цих трансформаторів і не включеною в схему заміщення відповідного рівня, практично не залежать від рівнів напруги на стороні високої напруги (ВН). Тому в таких вузлах для реалізації адаптивного керування потоками реактивної потужності задане постійне навантаження, яке приведене до сторони ВН підстанції.

Для більш точного обліку впливу зміни напруги в мережі 10 кВ та вище на втрати в мережі 0,4 кВ, підключеної до сторін НН трансформатора без автоматично керованого РПН, мережа 0,4 кВ вводиться в схему заміщення еквівалентною схемою, наведеною на рисунку 3.1.

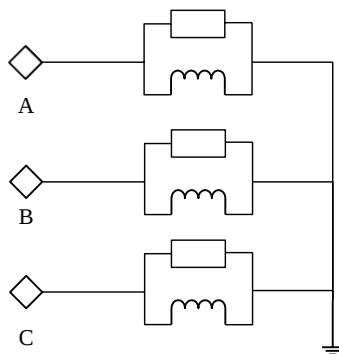


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема мережі 0,4 кВ

Еквівалентну схему мережі 0,4 кВ одержуємо наступним чином:

- а) складається схема заміщення розподільної мережі;
- б) визначаються межі зміни реактивної потужності, генерованої (споживаною) обладнанням;
- в) навантаження розподіляється рівномірно між трансформаторами на ТП і перемішане випадковим чином між активною і індуктивною складовою, а також між фазами контрольних точок системи електропостачання підприємства.

У роботі імітаційна модель побудована на основі розрахунків навантаження по цехам; визначення центру електричних навантажень для визначення оптимального розташування ГПП; визначення розташування цехових ТП і спроектованої схеми внутрішнього електропостачання; розрахованих струмів короткого замикання, по яким обрано основне електроустаткування.

У роботі використовуються:

- 2 трансформатора на ДПП - ТРДН 63000/110
- 7 трансформаторів на ТП - ТМ 2500/10
- 2 СТАТКОМ - Siemens SVC PLUS L
- 2 АТ - АОД -1250-4ДУ1
- кабелі з пошитого поліетилену марки АПвП різних перерізів
- нерівномірна активно-індуктивна навантаження

Моделювання реалізовано у Matlab Sinulink. Модель системи електропостачання підприємства представлена на рисунку 3.2.

3.1. Моделі елементів системи електропостачання і системи управління

Модель *трансформатора* враховує, як електричні, так і магнітні особливості фізичного об'єкта. Схема заміщення, що використовується в моделях трансформаторів зображена на рис. 3.3 [21]:

The diagram shows the equivalent circuit of a transformer with a load. The primary winding is represented by a resistor R_1 and a reactance X_1 in series. The secondary winding is represented by a resistor R_2 and a reactance X_2 in series. A load is connected between the primary and secondary terminals, consisting of a resistor R_μ and a reactance X_μ in parallel. The primary terminal voltage is U_1 and the secondary terminal voltage is U_2 . The primary current is I_1 and the secondary current is I_2 . The magnetizing current is I_μ .

Рисунок 3.3 Модель трансформатора для розрахунків

Математична модель трансформаторів, описується формулами [21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{1*} = R_{2*} = \frac{\Delta P_{K3}}{2 \cdot S_{НОМ}} \\ Z_{1*} = Z_{2*} = \frac{U_{K\%}}{200} \\ X_{1*} = X_{2*} = \sqrt{Z_{1*}^2 - R_{1*}^2} \\ L_{1*} = L_{2*} = X_{1*} \\ \Delta S_{XX*} = \frac{I_{XX\%}}{100} \\ \Delta P_{XX*} = \frac{\Delta P_{XX}}{S_{НОМ}} \\ \Delta Q_{XX*} = \sqrt{\Delta S_{XX*}^2 - \Delta P_{XX*}^2} \\ R_{\mu*} = \frac{S_{НОМ}}{\Delta P_{XX*}} \\ L_{\mu*} = X_{\mu*} = \frac{1}{\Delta Q_{XX*}} \end{array} \right.,$$

де I_{xx} , U_{K3} , $S_{НОМ}$, P_{xx} , P_{K3} - паспортні дані трансформаторів;

$R_{1*}, R_{2*}, L_{1*}, L_{2*}, R_{\mu*}, L_{\mu*}$ - параметри (у.о.) які необхідні для блоку трансформатора в моделі Simulink.

Розрахунок параметрів для блоку трифазного трансформатора Simulink по паспортним даними трансформатора був автоматизований з допомогою Matlab-функції, що повертає у зазначені змінні параметри блоку трансформатора по зазначеним користувачем паспортним даними:

```
function [R_1, L_1, R_2, L_2, Rm, Lm] = ParamTransPU(S_nom, P_xx,
    P_kz, u_k, i_xx)
R_1 = P_kz/(2*S_nom);
Z_1 = u_k/200;
X_1 = sqrt((Z_1^2)-(R_1^2)); L_1 = X_1;
S_x = i_xx/100;
Q_x = sqrt((S_x^2)-((P_xx/S_nom)^2)); Rm = S_nom/P_xx;
Xm = 1/Q_x; Lm = Rm; R_2=R_1; L_2=L_1;
end
```

По замовчуванню у блоках Simulink реалізовано вказівку параметрів у літерних виразах (крім цифр), що вказують на змінні у work-space – робочому просторі основного вікна Matlab у якому зберігаються всі змінні. Крім параметрів, розрахованих автоматично (активне індуктивний опір первинної та вторинної обмоток, у.о., опір і індуктивність ланцюги намагнічування, у.о.), необхідно вказати схеми з'єднання, лінійну напругу (В) первинної і вторинної обмоток, номінуальну потужність (ВА) та частоту (Гц) трансформатора (малюнок 3.2).

Block Parameters: ГПП: ТРДН - 63000/110 - 1

Three-Phase OLTC Regulating Transformer (Phasor Type) (mask) (link)

Implement phasor model of three-phase OLTC regulating transformer. It consists of two fixed windings and a third tapped winding (regulation winding) connected in series with either winding 1 or winding 2. Voltage ratio and transformer impedance vary with tap position. A +30 degrees or -30 degrees phase shift is introduced when winding 1 or winding 2 are connected in Delta.

Transformer OLTC and Voltage Regulator

Winding 1 connection (ABC terminals):
Yg

Winding 2 connection (abc terminals):
Delta (D11)

Nominal power and frequency [Pn(VA), fn(Hz)]
[63e6 50]

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms), R1(pu), X1(pu)]
[115e3 R1_pu L1_pu]

Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms), R2(pu), X2(pu)]
[10.5e3 R2_pu L2_pu]

Initial pos. seq. output currents of winding 2 [Mag(pu), Phase(deg)]
[0 0]

Magnetization branch [Rm(pu) Xm(pu)]
[Rm_pu Lm_pu]

Рисунок 3.2 - Блок параметрів трансформатора Three-Phase Transformer

У даній роботі використовується сім трансформаторів ТМ 2500/10 встановлених у цехових ТП підприємства.

Трансформатори з РПН мають аналогічну математичну модель з обліком підключеної обмотки РПН

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{1*} = R_{2*} = \frac{\Delta P_{K3}}{2 \cdot S_{\text{НОМ}}} \\ Z_{1*} = Z_{2*} = \frac{U_{K\%}}{200} \\ X_{1*} = X_{2*} = \sqrt{Z_{1*}^2 - R_{1*}^2} \\ L_{1*} = L_{2*} = X_{1*} \\ \Delta S_{\text{XX}*} = \frac{I_{\text{XX}\%}}{100} \\ \Delta P_{\text{XX}*} = \frac{\Delta P_{\text{XX}}}{S_{\text{НОМ}}} \\ \Delta Q_{\text{XX}*} = \sqrt{\Delta S_{\text{XX}*}^2 - \Delta P_{\text{XX}*}^2} \\ R_{\mu*} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\Delta P_{\text{XX}*}} \\ L_{\mu*} = X_{\mu*} = \frac{1}{\Delta Q_{\text{XX}*}} \\ \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{(1+N \cdot \Delta U)} \times \frac{U_{2\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \end{array} \right. ,$$

де U_1, U_2 - номінальні напруги вищою і нижчою сторони трансформатора,
 N - кількість відпайок, підключених до основний обмотці через РПН,
 ΔU - напруга однієї відпаювання РНН.

На рисунку 3.4 представлена схема підключення РПН як по вищій стороні напруги трансформаторів, так і по нижчій.

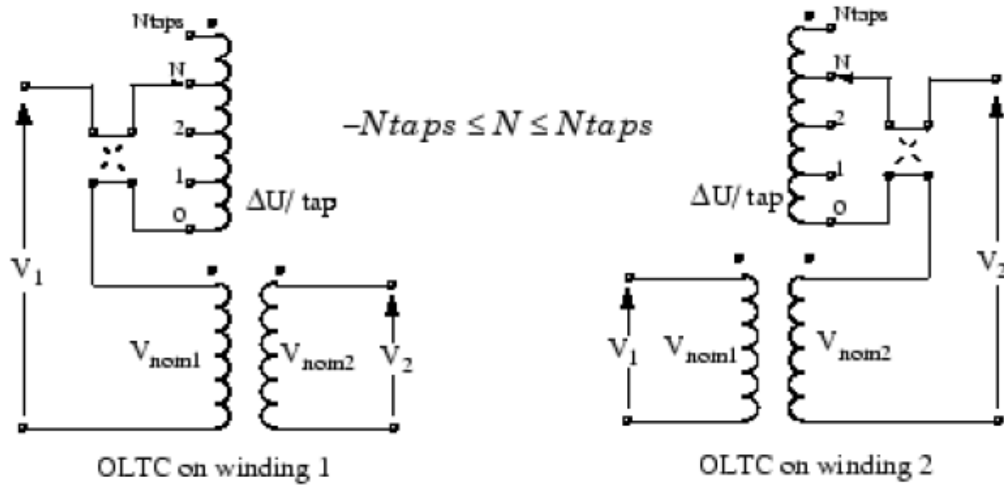


Рисунок 3.4 - Схеми підключення РПН

При використанні даного блоку Simulink крім основних параметрів трансформатора необхідно вказати параметри РПН: обмотку, на якій встановлений РПН, активний опір обмотки (у.о.), індуктивність обмотки (у.о.) при включеному вищому ступені РПН, напруга (у.о.) однієї щаблі

регулювання, мінімальний і максимальний ступінь регулювання РПН, початковий ступінь регулювання, механічна затримка в секундах перемикання між відпаювання РПН (рисунок 3.5).

The image shows a software interface for configuring a transformer's OLTC and voltage regulator. It features two tabs: 'Transformer' and 'OLTC and Voltage Regulator'. The 'OLTC and Voltage Regulator' tab is active, displaying several input fields and a checkbox. The fields are: 'OLTC on:' with a dropdown menu set to 'Winding 1'; 'Tapped regulation winding [Rt(pu), Xt(pu)]' with a text input containing '[0.09 0.09]'; 'Voltage step, per tap (pu)' with a text input containing '0.015'; 'Minimum and maximum tap positions [Min, Max]' with a text input containing '[-9 +9]'; 'Initial tap position' with a dropdown menu set to 'Tap'; 'Tap selection time (s)' with a text input containing '3'; and a checked checkbox labeled 'External control of OLTC'.

Рисунок 3.5 – Блок параметрів трансформатора Three-Phase OLTC regulatingTransformer

В роботі використовуються два трансформатори ТРДН 63000/110, обладнані автоматично керованими РПН на стороні вищої напруги, які встановлені на ГПП.

Модель *асинхронної машини* включає в себе модель електричної частини, представленої моделлю простору станів четвертого порядку та модель механічної частини як системи другого порядку. Всі електричні змінні та параметри машини приведені до статора. Вихідні рівняння електричної частини машини записані в двофазній (dq -осі) системі координат. На рисунку 3.6 приведена схема заміщення машини і її рівняння.

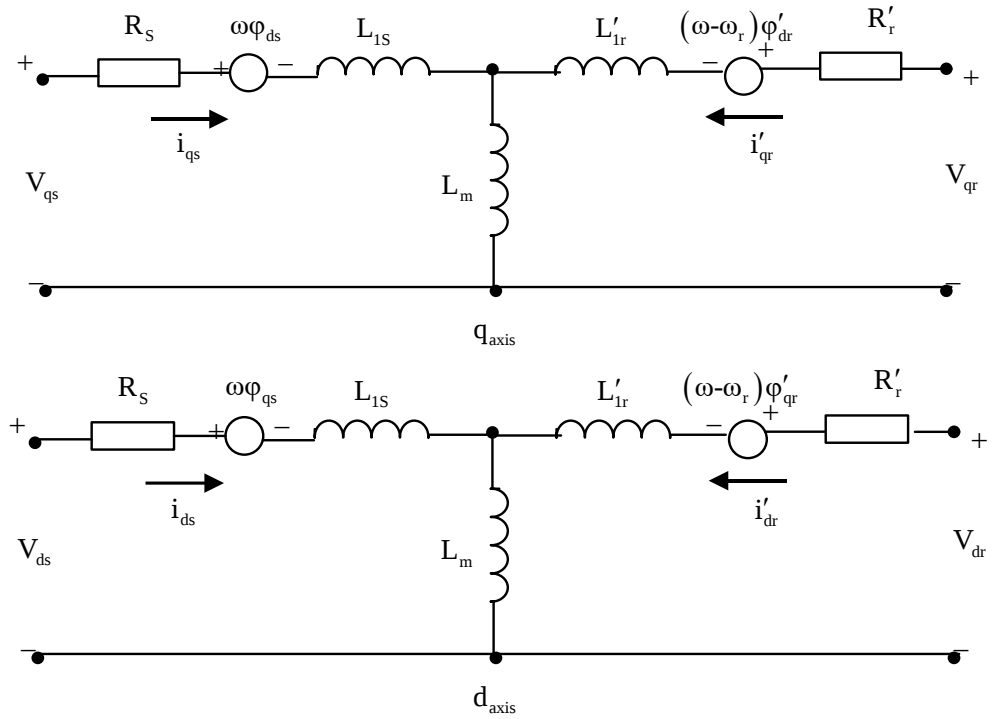


Рисунок 3.6 - Схема заміщення асинхронної
машини

Рівняння електричної частини машини мають вигляд [21] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + \omega\varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega\varphi_{ds} \\ V'_{qr} = R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r)\varphi'_{dr} \\ V'_{dr} = R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r)\varphi'_{qr} \\ T_e = 1,5p(\varphi_{ds}i_{ds} - \varphi_{qs}i'_{ds}) \end{array} \right. \quad (3.3)$$

де

$$\begin{aligned} \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}, \\ \varphi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}, \\ \varphi'_{qr} &= L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}, \\ \varphi'_{dr} &= L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}, \\ L_s &= L_{ls} + L_m, \\ L'_r &= L'_{lr} + L_m \end{aligned}$$

Індекси в системі рівнянь машини мають наступні значення:

d - проекція змінної на вісь d ,
 q - проекція змінної на вісь q ,
 r - змінна або параметр ротора,
 s - змінна або параметр статора,
 l - індуктивність розсіювання,
 m - індуктивність ланцюги намагнічування.

Механічна частина машини описується двома рівняннями [21]:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m) \\
 \frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m,
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

де R_s, L_{ls} - опір та індуктивність розсіювання статора,
 $R'r, L_{lr}$ - опір та індуктивність розсіювання ротора,
 L_m - індуктивність ланцюга намагнічування,
 L_s, L'_r - повні індуктивності статора та 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 потокозчеплення статора на осі d і q ,
 $\varphi'_{dr}, \varphi'_{qr}$ - проекції потокозчеплення ротора на осі d і q ,
 ω_m - кутова швидкість ротора,
 θ_m - кутове становище ротора,
 p - число пар полюсів.

Для підрахунку параметрів необхідних для моделі Simulink у Matlab вбудований графічний інтерфейс (GUI), що дозволяє розрахувати параметри з паспортних даних АТ (АОД -1250-4ДУ1) та вивести графіки даної моделі (рисунки 3.7 та 3.8)

Specifications		
Preset:		
Nominal line-to-line rms voltage	V_n (V)	10000
Nominal frequency	f_n (Hz)	50
Nominal (full load) line current	I_n (A)	18.1443
Nominal (full load) mechanical torque	T_n (N.m)	1591.6
Synchronous speed	N_s (rpm)	1500
Nominal (full load) mechanical speed	N_n (rpm)	1450
Starting current to nominal current ratio	I_{st}/I_n	7.5
Starting torque to full load torque ratio	T_{st}/T_n	1.1
Breakdown torque to full load torque ratio	T_{br}/T_n	2.9
Nominal power factor	pf (%)	92.5
Compute block parameters		

Рисунок 3.7 – Графічний інтерфейс розрахунку параметрів асинхронних машин

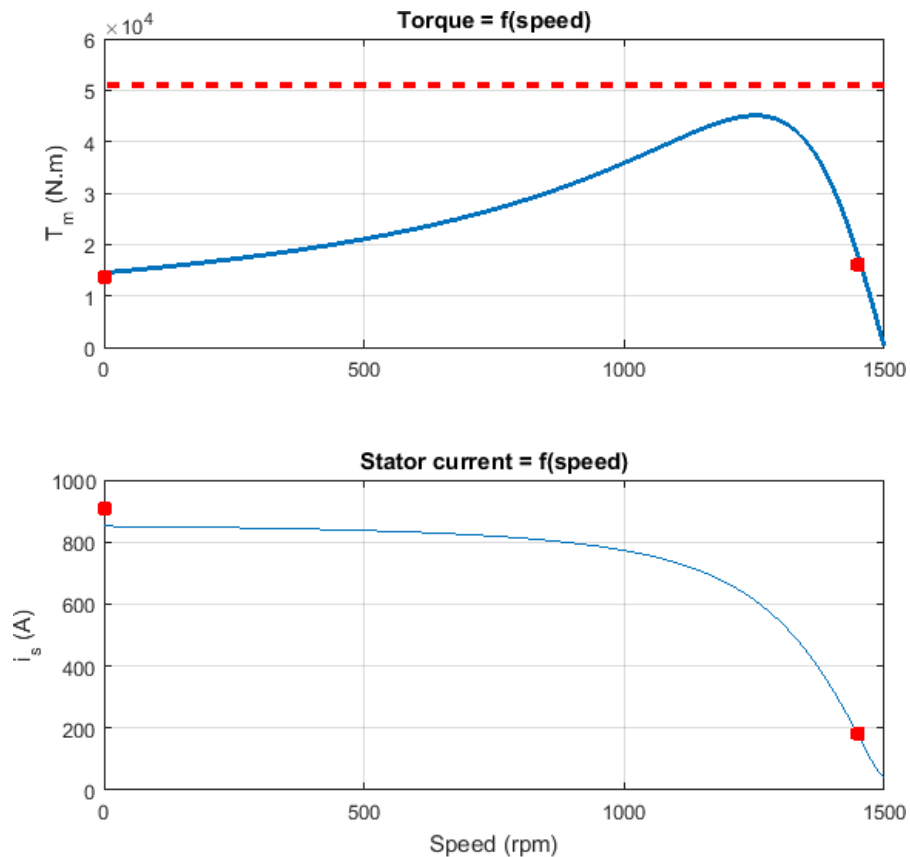


Рисунок 3.8 – Графіки залежності крутного моменту та струму

статора відшвидкості обертання ротора

Пристрій і модель СТАТКОМ. Зміна реактивною потужності здійснюється з допомогою перетворювача напруги (VSC) приєднаного до вторинної обмотки зв'язуючого трансформатора. У VSC використовуються транзисторні перетворювачі електроенергії для вироблення вторинної напруги з ланцюга постійного струму. Принцип роботи СТАТКОМ, на рисунку 3.9 показано розподіл потоків активної та реактивної потужності між джерелами V_1 і V_2 . Де V_1 представляє контрольовану напругу системи, а V_2 напруга, яка генерується VSC [4]

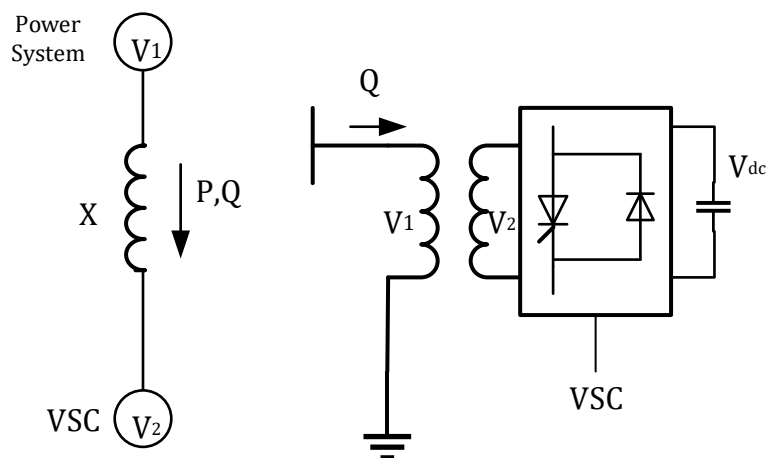


Рисунок 3.9 - Однолінійна схема заміщення СТАТКОМ

Математична модель СТАТКОМ в загальному вигляді [4]:

$$\begin{cases} P = (V_1 \cdot V_2) \sin \delta / X \\ Q = V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta) X \end{cases} \quad (3.5)$$

де V_1 - лінійна напруга джерела 1,

V_2 - лінійна напруга джерела 2

X - загальний реактивний опір трансформатора і фільтрів

δ - кут зсуву фаз між напругами V_1 та V_2 .

В усталеному режимі, напруга V_2 , що генерується VSC, співпадає по фазі з V_1 $\delta=0$, тому змінюється тільки реактивна потужність ($P = 0$). Якщо V_2 менше V_1 , реактивна потужність (Q) передається з V_1 в V_2 (СТАТКОМ поглинає реактивну потужність). Інакше, при V_2 більше V_1 , Q передається з V_2 в V_1 (СТАТКОМ генерує реактивну потужність), кількість передаваної

реактивною потужності буде дорівнювати:

$$Q = \frac{V_1(V_1 - V_2)}{X}, \quad (3.6)$$

Ємність, приєднана до VSC в ланцюг постійного струму, виступає в якості джерела постійного струму. У режимі напруга V_2 трохи з відставанням зрушено по фазі від V_1 , це зроблено для компенсації втрат в трансформаторі і VSC, що дозволяє підтримувати конденсатор зарядженим.

VSC у моделі STATKOM у 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 постійного ланцюга напруги з переривчастої частотою в кілька кГц. Гармоніки напруги нівелюються фільтрами, підключеними до VSC з боку змінного напруги. Цей тип VSC використовує фіксовану величину напруги в ланцюзі постійного струму V_{dc} . Напруга V_2 змінюється за допомогою індексу розмірності PWM-генератора

При використанні STATKOM для управління напругою, використовується дана вольт-амперна характеристика (ВАХ):

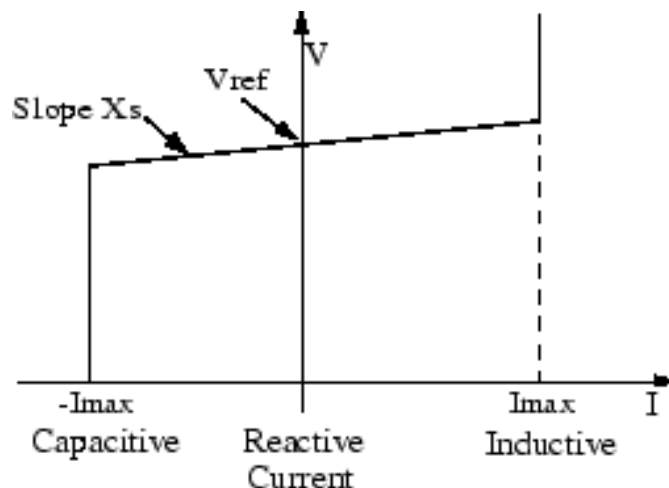


Рисунок 3.10 - Вольт-амперна характеристика STATKOM

До тих пір, поки реактивний струм залишається в межах максимальних і мінімальних значень ($-I_{max}$, I_{max}) обумовлених номінальною потужністю перетворювача, напруга регулюється в межах еталонного напруги V_{ref} . Однак, зазвичай використовується статична напруга (найчастіше між 1% і 4% від

максимальною реактивною потужністю), і ВАХ має нахил, відображений на рисунку та описується рівнянням [4]:

$$V = V_{ref} + X_s \cdot I, \quad (3.7)$$

де V - напруга прямої послідовності в в.о.,

I - реактивний струм (в.о./ P_{nom}), де $I > 0$ вказує на індуктивний струм,

X_s - крутість або статизм регулятора (в.о./ P_{nom}),

P_{nom} - трифазна номінальна потужність перетворювача вказана в діалоговому вікні блоку.

У роботі використовуються два СТАТКИ компанії Siemens SVC PLUS L, представлених одним блоком, так як фізично вони об'єднані в одну систему та працюють в повністю паралельному режимі.

Кабельні лінії представлені блоком Distributed Parameter Line котрий враховує зосереджені втрати в лініях електропередач за допомогою хвильового опору і швидкості поширення хвилі, з необмеженою кількістю фаз.

Джерело напруги представлений блоком «Трифазний програму-джерело напруги», що дозволяє моделювати будь-який стан напруги на межі поділу балансової приналежності підприємства з електропостачальною організацією

Імітація реального *навантаження* на стороні 0.4кВ СЕП підприємства реалізована наступним чином: споживана підприємством потужність розділена порівну між трансформаторами на ТП та перемішана випадковим чином між активною та індуктивною складовою, а також між фазами контрольних точок системи електропостачання підприємства.

У імітаційній моделі, навантаження представлені однофазними блоками паралельно з'єднаних активного і індуктивного опору, які підключені пофазно на боці низького напруги трансформаторів.

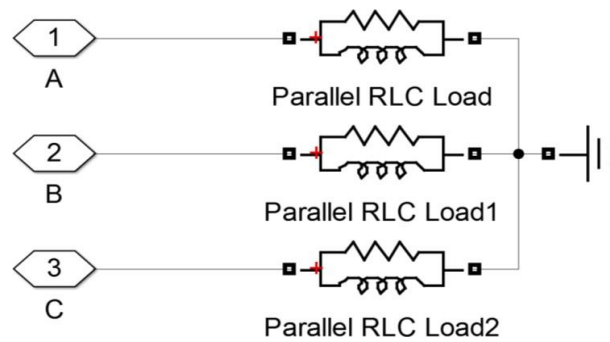


Рисунок 3.11 - Модель навантаження

3.2 Оцінка адекватності і ефективності моделювання

Після створення імітаційної моделі підприємства та підготовки навчальної вибірки, проходить навчання ШНМ, як видно з графіка на рисунку, навчання закінчується при досягненні мінімального значення середньоквадратичною помилки на Validation-вибірці, що і каже про кращу ефективність ШНМ.

Отримана нейронна мережа має структуру:

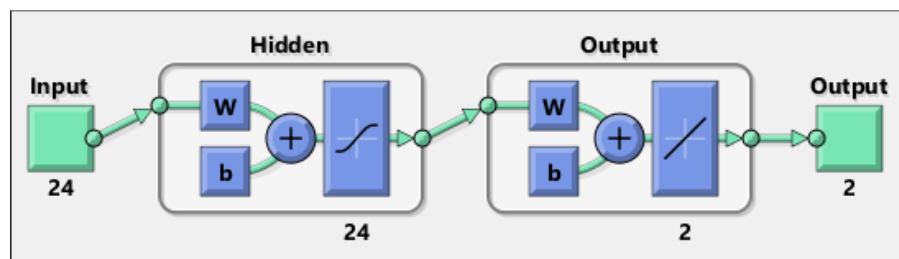
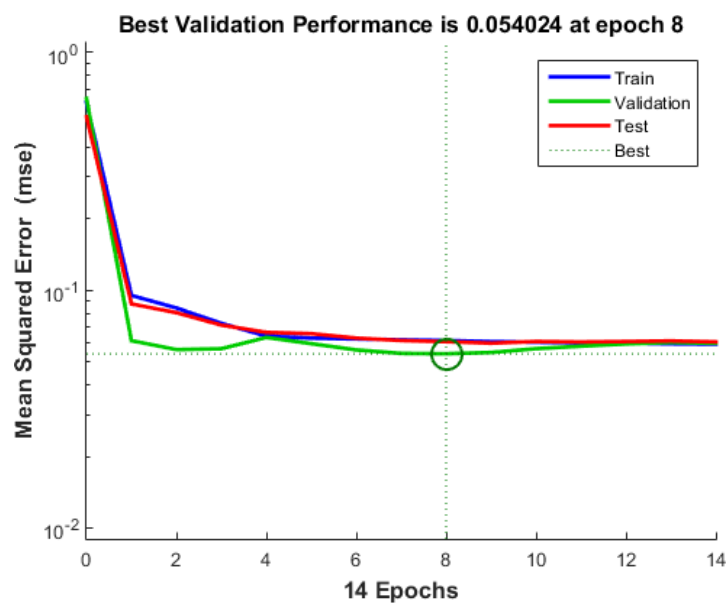
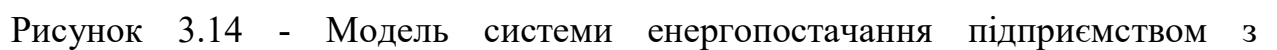


Рисунок 3.12 - Структура штучною нейронної мережі



Для використання ШНМ у Simulink створений у Matlab-скрипті



управлінням ШНМ

Висновки по третьому розділу

1. Створено імітаційну модель системи електропостачання промиш-ного підприємства, що складається з моделей окремих елементів схеми заміщення і що включає інструмент адаптивного управління потоками реактивною потужності та рівнем напруги в вигляді ШНМ.

2. Розроблено та програмно реалізовано алгоритм розрахунку параметрів трансформаторів для їх автоматичного введення в блок three-phase transformer Simulink

ВИСНОВКИ

Основні результати роботи укладаються в наступних положеннях:

1. Показано, що згідно з нормативно-правовими документами споживач зобов'язаний забезпечити функціонування засобів регулювання напруги і компенсації реактивною потужності, встановлених в кордонах його балансової належності, для підтримки значень показників якості електричної енергії, зумовлені роботою його енергоприймальних пристроїв, а такж дотримуватися значення співвідношення споживання активної та реактивної потужності для окремих енергоприймальних пристроїв (груп енергоприймаючих пристроїв).

2. Проведений аналіз показав, що досліджень в галузі управління потоками реактивної потужності в системах електропостачання підприємств з використанням активно-адаптивних елементів досить мало, переважно регулювання здійснюється в розподільчих мережах шляхом створення керованих ліній електропередачі (SmartGrid) і обладнання для них.

3. Виходячи із зарубіжного досвіду виявлено, що високоадаптивним рішенням стає встановлення СТАТКОМ в СЕП ПП, яка в сукупності з управлінням РПН трансформаторів на ГПП, дозволить автоматизувати управління потоками реактивної потужності в СЕП підприємства.

4. Доведено, що застосування штучною нейронної мережі для оперативності прийняття рішень управління, дає необхідне рішення задачі управління потоками реактивної потужності в більшості практично значущих випадків.

5. Розроблено структуру системи управління потоками реактивної потужності та регулювання рівнів напруги, на основі синтезу ШНМ та соб- ственною логіки СТАТКОМ, в якій ШНМ оперативно реагує на зміни рівня напруги на кордоні балансовий приладдя підприємства і енер-госистеми, а активно-адаптивні елементи підлаштовуються під ці зміни з обліком усіх

обмежень.

6. Створено імітаційну модель системи електропостачання промислового підприємства, що складається з моделей окремих елементів схеми заміщення та включає активно-адаптивні елементи та інструмент адаптивного управління потоками реактивною потужності і рівнем напруги в вигляді ШНМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Концепція впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року// РОЗПОРЯДЖЕННЯ від 14 жовтня 2022 р. № 908-р м.Київ
2. Стогній Б. С. Світовий досвід та перспективи побудови інтелектуальних енергетичних систем в Україні / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – Київ, 2013. – С. 5–17.
3. Денисюк С. П. Особливості формування активного споживача в сучасних електромережах / С. П. Денисюк, Т. М. Базюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 3. – С. 75–79.
4. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы: Под общ. ред. акад. НАН Украины А. В. Кириленко / Институт электродинамики НАН Украины. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2014. – 408 с.
5. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О. В. Кириленко / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
6. Шуклін Д. Є. Моделі семантичних нейронних мереж та їх застосування в системах штучного інтелекту: 05.13.23.. Дис. ...канд. техн. наук. Харків, 2003. 196 с.
7. Терейковський І. Нейронні мережі в засобах захисту комп'ютерної інформації: монографія. К. : ПоліграфКонсалтинг. 2007. 209 с.
8. Півняк Г. Г. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання : навч. посібник / Г. Г. Півняк, Г. А. Кігель, Н. С. Волотковська; за ред. Г. Г. Півняка. – 4-те вид, доопрац. і доп. – Дніпро: Національний гірничий університет, 2011. – 223 с.
9. І.А. Терейковський, Д.А. Бушуєв, Л.О. Терейковська ШТУЧНІ НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ: БАЗОВІ ПОЛОЖЕННЯ / Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022 – 123 с.
10. Кирик В.В. Електричні мережі та системи: підручник /В. В. Кирик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с. ISBN

978-966-990-031-9

11. Корченко А., Терейковский И., Карпинский Н., Тынымбаев С. Нейросетевые модели, методы и средства оценки параметров безопасности интернет-ориентированных информационных систем : монография. Київ :Наш Формат, 2016. 273 с

12.В.А. МАТВІЙЧУК, О.О. РУБАНЕНКО Н.В. СОБЧУК
ВИКОРИСТАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ
ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ЕЕС // Вінницький національний аграрний
університет

13. О. С. Биконя, ШЛЯХИ ВПРОВАДЖЕННЯ SMART GRID В КРАЇНАХ
СВІТУ//Інститут економіки та прогнозування НАН України”, м. Київ

14. Рогальський Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи
розрахунку, способи та технічні засоби управління. І частина. Навчальний
посібник. — Вінниця: 2002. — 119 с.

15. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ В
РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ А.О./ Омельчук, А.М., Б.П.
Савченко, //Національний університет біоресурсів і природокористування
України- Енергетика і автоматика", №4, 2013 р

16. Реактивна потужність в електричних мережах : монографія / І. В.
Жежеленко, Г. Г. Півняк, Г. Г. Трофімов, Ю. А. Папаїка ; М-во освіти і науки
України, Нац. техн. у-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020.
72 с.

17. Ю.А. Веремійчук В.П. Опришко І.В. Притискач О.С. Ярмолук .
ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СПІЛЬНОТИ/ Збірник "Праці
Інституту електродинаміки Національної академії наук України" є науковим
фаховим виданням відкритого доступу у галузі технічних наук. У збірнику
містяться статті з результатами досліджень за такими науковими
напрямами://Вип.68, 30.09.2024 127 с.

18. М.М. Свідницький, Ю.С. Приходько, Т.Т. Сердюк, О.М. Максимчук

АНАЛІЗ ТА ВИБІР МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ /Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна//Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 28-29 листопада 2018.

19. K. Ellithy Optimal shunt capacitors allocation in distribution networks using genetic algorithm- practical case study [Электронный ресурс] / K. Ellithy, A. Al-Hinai, A. Moosa - URL: <http://www.ijesp.com/Vol3No1/IJESP3-2Elithy.pdf>

20. Liu, Yutian Reactive power compensation and voltage control in jinan power distribution system [Электронный ресурс] / Yutian Liu, Jiachuan Shi, Xia Qian // 18th International Conference on Electricity Distribution, 6-9 june 2005. - Tu-rin, 2005. - URL : http://www.cired.be/CIRED05/papers/cired2005_0057.pdf.

21. Електричні машини [Текст] : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін / Київ : Знання, 2009 – 400 с.