

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Підвищення рівня енергетичної безпеки інтегрованої енергетичної системи
на основі використання концепції енергетичного хаба
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-1
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Єгор ГОЛОВКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Костянтин БРОВКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Олег КОНДРАТЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Єгор ГОЛОВКО

1. Тема «Підвищення рівня енергетичної безпеки інтегрованої енергетичної системи на основі використання концепції енергетичного хаба»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, періодичні видання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ СТАНУ ІНТЕГРОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ; РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ; ВИСНОВКИ; ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024р.

Керівник _____ Костянтин БРОВКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Єгор ГОЛОВКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 — 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 — 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 — 29.10.24	
4	Виконання другого розділу дипломної роботи	30.10.24 — 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 — 07.12.24	

Студент (ка) _____ Єгор ГОЛОВКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – _____ ; рисунків – _____; таблиць - _____;
літературних джерел – _____.

Енергетика є найважливішою галуззю, що охоплює видобуток енергоресурсів, виробництво, перетворення, транспортування та використання енергії споживачами. Енергопостачання споживачів забезпечується різними видами енергоресурсів, які мало взаємопов'язані між собою. Як об'єднуюча система виступає паливно-енергетичний комплекс (ПЕК) України. ПЕК включає основні три підсистеми: паливопостачальні системи; системи електро- та теплопостачання; система ядерної енергетики. На етапі планування розвитку ПЕК розглядаються всі галузі енергетики, але питанням комплексного використання різних видів енергії не приділяється належної уваги. Останнім часом розвивається комплексний підхід, що розглядає спільний розвиток та функціонування кількох окремих систем (електро- та теплопостачання, електро-, тепло- та газопостачання та ін.) у складі інтегрованих енергетичних систем (ІЕС). При цьому під інтегрованою енергетичною системою розуміється система, що включає сукупність індивідуальних систем енергетики, взаємозалежних за допомогою загальних взаємозалежних режимів функціонування під час виробництва, споживання та транспортування відповідних видів енергії, а також комплексного розвитку цих систем. Внаслідок комплексного використання різних видів енергії підвищується ефективність інтегрованої енергетичної системи.

Об'єктом дослідження є процес моделювання інтегрованої енергетичної системи.

Предметом дослідження є потоковий метод моделювання енергетичного хаба.

Мета роботи: підвищити рівень енергетичної безпеки інтегрованої енергетичної системи на основі використання концепції енергетичного хаба із застосуванням потокового методу.

ABSTRACT

Pages of text – ____; pictures – ____; tables – ____;
literary sources – ____.

Energy is the most important branch, covering the extraction of energy resources, production, transformation, transportation and use of energy by consumers. Consumers' energy supply is provided by various types of energy resources that are not very interconnected. The fuel and energy complex (PEK) of Ukraine acts as a unifying system. PEK includes the main three subsystems: fuel supply systems; electricity and heat supply systems; nuclear power system. At the stage of planning the development of the PEC, all fields of energy are considered, but the issues of integrated use of various types of energy are not given due attention. Recently, a comprehensive approach has been developed that considers the joint development and operation of several separate systems (electricity and heat supply, electricity, heat and gas supply, etc.) as part of integrated energy systems (IES). At the same time, the integrated energy system means a system that includes a set of individual energy systems, interdependent with the help of general interdependent modes of operation during the production, consumption and transportation of the relevant types of energy, as well as the complex development of these systems. As a result of the complex use of various types of energy, the efficiency of the integrated energy system increases.

The object of research is the process of modeling the integrated energy system.

The subject of the study is the flow method of modeling the energy hub.

The purpose of the work: to increase the level of energy security of the integrated energy system based on the use of the energy hub concept using the flow method.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ СТАНУ ІНТЕГРОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	
1.1 Імітаційне моделювання при дослідженні складних проблем та систем	
1.2 Аналіз концепції інтегрованих енергетичних систем.....	
1.3 Аналіз моделей для вирішення різних завдань розвитку та функціонування інтегрованих енергетичних систем	
1.4 Моделювання енергетичного хаба.....	
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	
2.1 Методичні засади побудови імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи	
2.2 Імітаційне моделювання енергетичного хаба інтегрованої енергетичної системи	
2.3 Використання методу шляхів та перерізів для дослідження мережевих проблем інтегрованих енергетичних систем	
2.4 Топологічний метод аналізу шляхів енергопостачання з метою оцінки структурної надійності радіальної енергетичної мережі за критерієм $n-i$	
2.5 Алгоритм конструювання імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи	
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	
ВИСНОВКИ.....	
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	

ВСТУП

Актуальність. Енергетика є найважливішою галуззю, що охоплює видобуток енергоресурсів, виробництво, перетворення, транспортування та використання енергії споживачами. Енергопостачання споживачів забезпечується різними видами енергоресурсів, які мало взаємопов'язані між собою. Як об'єднуюча система виступає паливно-енергетичний комплекс (ПЕК) України. ПЕК включає основні три підсистеми: паливopостачальні системи; системи електро- та теплопостачання; система ядерної енергетики. На етапі планування розвитку ПЕК розглядаються всі галузі енергетики, але питанням комплексного використання різних видів енергії не приділяється належної уваги. Останнім часом розвивається комплексний підхід, що розглядає спільний розвиток та функціонування кількох окремих систем (електро- та теплопостачання, електро-, тепло- та газопостачання та ін.) у складі інтегрованих енергетичних систем (ІЕС). При цьому під інтегрованою енергетичною системою розуміється система, що включає сукупність індивідуальних систем енергетики, взаємозалежних за допомогою загальних взаємозалежних режимів функціонування під час виробництва, споживання та транспортування відповідних видів енергії, а також комплексного розвитку цих систем. Внаслідок комплексного використання різних видів енергії підвищується ефективність інтегрованої енергетичної системи.

Під впливом інтересу до інтегрованих енергетичних систем виникло поняття енергетичного хаба. Енергетичний хаб представляє об'єкт із кількома входами і кількома виходами з енергії, у якому відбувається, перетворення, накопичення різних видів енергії. Прикладом енергетичного хаба може бути ТЕЦ на газі, вхідним видом енергії якої є газ, всередині він перетворюється на електроенергію та тепло, які є вихідними видами енергії.

Концепція енергетичного хаба виявилася привабливою через його наочність і просту інтерпретацію фізичних взаємозв'язків складових інтегрованої енергетичної системи. Цей підхід активно розвивається поряд із

традиційним математичним моделюванням інтегрованих енергетичних систем. Однак існуючі версії цього підходу мають суттєвий недолік, пов'язаний із проблемами опису взаємозв'язків між входами та виходами енергетичного хаба. Тому потрібна розробка альтернативного підходу до моделювання інтегрованих енергетичних систем, що органічно поєднує елементи концепції енергетичного хаба та інші засоби аналізу. При цьому привабливою є технологія імітаційного моделювання як методологічна база для дослідження проблем інтегрованих енергетичних систем. Враховуючи мережеву структуру інтегрованих енергетичних систем, виникає необхідність використання відповідних методів математичного аналізу.

Об'єктом дослідження є процес моделювання інтегрованої енергетичної системи.

Предметом дослідження є потоковий метод моделювання енергетичного хаба.

Мета роботи: підвищити рівень енергетичної безпеки інтегрованої енергетичної системи на основі використання концепції енергетичного хаба із застосуванням поточкового методу.

Завдання дослідження:

1. Здійснити аналіз стану досліджень інтегрованих енергетичних систем.
2. Виконати аналіз існуючих підходів, моделей та методів для вирішення різних завдань розвитку та функціонування інтегрованих енергетичних систем.
3. Розробити методичні засади імітаційного моделювання та конструювання імітаційної моделі інтегрованих енергетичних систем з використанням концепції енергетичного хаба та поточкових методів.
4. Розробити алгоритми моделювання електричних мереж у складі інтегрованих енергетичних систем з використанням методів потоків у мережах.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ СТАНУ ІНТЕГРОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Імітаційне моделювання при дослідженні складних проблем та систем

Імітаційне моделювання є широким і недостатньо чітко визначеним поняттям. Це визначення має велике значення для осіб, які відповідають за проектування та функціонування систем. Під імітаційним моделюванням розуміється процес конструювання моделі реальної системи та постановки експериментів на цій моделі з метою зрозуміння поведінки системи, або оцінки (в рамках обмежень, що накладаються деяким критерієм або сукупністю критеріїв) різних стратегій, що забезпечують функціонування або розвиток системи [1, 18] .

Процес імітаційного моделювання представляє процес, що включає конструювання моделі та застосування отриманої моделі для аналітичного вивчення певної проблеми.

Імітаційне моделювання як експериментальна та прикладна методологія, має цілі:

- описати поведінку системи;
- будувати теорії та гіпотези, які можуть пояснити поведінку, що спостерігається;
- використовувати отримані теорії для передбачення поведінки системи у майбутньому, тобто тих її реакцій, які можуть бути викликані змінами системи або змінами способів її функціонування.

Головним засобом вирішення різноманітних завдань розвитку та функціонування енергетичних систем як складних систем є моделі, а як одна з базових методологій аналізу та синтезу енергетичних систем служить імітаційне моделювання.

За допомогою процесу імітаційного моделювання можна виконати ряд завдань. Можна аналізувати, коригувати проблему, вибирати та вносити зміни до основної моделі, до отримання корисних для практики результатів.

В узагальненому вигляді етапи імітаційної методології дослідження систем та проблем можна подати такими пунктами:

1. Формулювання проблеми
2. Формування моделі
3. Імітаційні експерименти із моделлю
4. Вирішення проблеми

Інакше кажучи, використовуючи поняття «імітаційне моделювання», мають на увазі імітаційну методологію дослідження складних систем чи складних проблем, що з цими системами. Феномен складності визначає нетривіальність процесу конструювання моделі, причому модель системи може бути необов'язково аналітичною або взагалі математичною, а наприклад, фізичною і т.д. Необхідність постановки експериментів на конструйованій моделі системи (або проблеми) суттєво розширює поняття «імітаційне моделювання» порівняно з поняттям «моделювання», хоча чітку межу між ними встановити важко та існують думки про ідентичність даних понять (у цьому випадку термін «моделювання» трактується ширше).

Варто зазначити, що багато авторів використовують термін «імітаційне моделювання» у вузькому значенні, ніж той, який визначено вище. Цей смисл обмежується завданнями стохастичного моделювання та використання методу Монте-Карло. Прийнятий ширший зміст поняття «імітаційне моделювання» охоплює, звичайно, і ці моделі. Інакше висловлюючись, входи і виходи моделі можуть містити чи не містити елемент випадковості, підпорядкований імовірнісним законам.

Ще один аспект широкого розуміння імітаційного моделювання пов'язаний із можливістю імітаційних експериментів із використанням оптимізаційної моделі. Ця можливість з'являється, якщо з об'єктивних причин не вдається у оптимізаційній моделі формалізувати всі задані невизначені

чинники, а логічно враховувати їх у вигляді набору сценаріїв. У цьому випадку ми маємо справу з імітаційними експериментами з оптимізаційною моделлю відповідно до ідеології імітаційного моделювання.

На рис. 1.1 умовно показано взаємозв'язок етапів імітаційного моделювання.

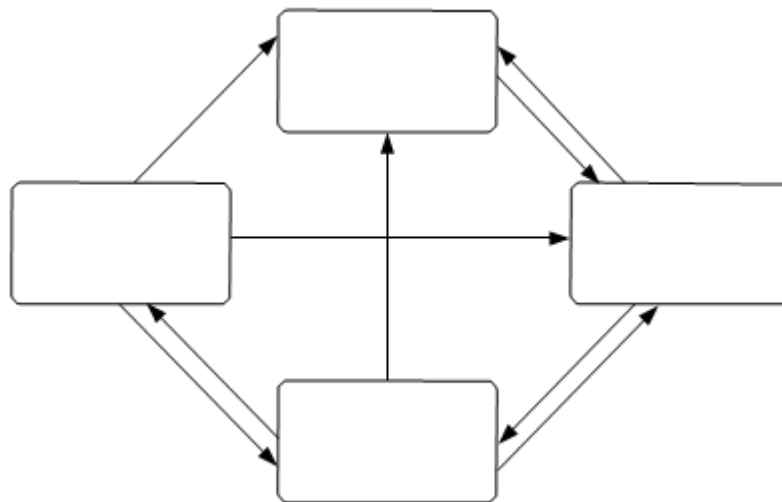


Рисунок 1.1 – Етапи імітаційного моделювання

Для уточнення деяких цілей, критеріїв тощо, можна повернутися до будь-якого з попередніх етапів. Наприклад, у процесі імітаційного моделювання може з'ясуватися, деякі цілі неявні, чи можна знехтувати деякими критеріями, оскільки де вони впливають на кінцевий результат. У результаті модель може бути точніше скоригована, доповнена, а у деяких етапах спрощена. На етапі вирішення проблеми можна зрозуміти, чи досягнуто результату, чи необхідно повернутися для уточнення моделі.

Методологія імітаційного моделювання дозволяє на будь-якому його етапі повертатися до моделі та уточнювати її за необхідності. Прийняття рішення при імітаційному моделюванні полягає у поєднанні здатності людини вирішувати неформалізовані завдання з можливостями формальних методів та комп'ютерного моделювання.

1.2 Аналіз концепції інтегрованих енергетичних систем

Збільшення використання розподіленої генерації та різних типів енергопостачання, вплине як на технічну, так і на економічну експлуатацію енергетичних систем. Перетворення різних енергоносіїв (наприклад, природного газу на електроенергію та тепло) встановлює зв'язок між відповідними потоками енергії, що призводить до системних взаємодій. Тому дослідження щодо спільного використання повинні охоплювати всі задіяні енергоносії, наприклад електроенергію, природний газ та централізоване теплопостачання. У зв'язку з цифровізацією та комп'ютеризацією технологічних процесів вимоги споживачів постійно зростають. Основними вимогами є безперебійність та підвищення якості енергопостачання.

У 1999 році було розпочато дослідницький проект [3], присвячений системам транспорту енергії від енергетичних ресурсів до споживчих ринків, що включає елементи як в галузі електротехніки, так і в галузі теплотехніки. У проекті розглядалися різні енергоносії, такі як електроенергія, газ, нафта та вугілля, конверсія між різними енергоносіями (газо- або гідроелектростанції, ТЕЦ, теплові насоси, заводи з виробництва скрапленого природного газу (ЗПГ) тощо), а також можливості зберігання енергії, такі як гідроакумулювання, сховище ЗПГ в одній і тій же моделі. Цей проект послужив початком розробки гнучкої та надійної методології комплексного аналізу складних енерготранспортних систем із кількома енергоносіями, що включає технологічні, економічні та екологічні аспекти. Передбачалося, що ця методологія дозволить інтегрованим енергетичним компаніям проводити всебічний аналіз своїх інвестицій, а також загальну оптимізацію систем енергопостачання.

У [6, 11] представлений проект Vision of Future Energy Networks (VFEN), ініційований групою авторів і підтриманий промисловістю. Цей проект націлений на екологічний підхід та розгляд термінів від 30 до 50 років. Економічні, екологічні та технологічні аспекти визначають умови для

дослідження. Загальний гібридний підхід включає різні енергоносії, що фокусуються на синергії між електричною, хімічною та тепловою енергією (і, можливо, іншими енергоносіями). Розподілена генерація, накопичення енергії та комбінована передача різних енергоносіїв є важливими аспектами цього підходу.

У [4] розглядається перехід до активних розподільчих мереж в Україні. порушується питання про активне управління гнучкими, великомасштабними системами електропостачання. Розгляд сучасних міст та промислових центрів, що мають розвинену енергетичну інфраструктуру, що включає паливну, електричну, опалювальну та охолоджувальну системи є актуальним завданням.

Інтеграція різних систем енергопостачання призводить до зростання технологічного процесу. В результаті вдосконалюються технології експлуатації, функціональні можливості, що призводить до створення інтелектуальних інтегрованих енергетичних систем (ІЕС). Такі системи мають багатовимірну структуру функціональних ознак та властивостей розвитку. Вони враховують велику кількість факторів: ефективність, надійність, керованість, гнучке використання технологій перетворення енергії, транспортування та зберігання, активний попит [6, 7, 8]. Передбачається, що системам захисту та управління необхідно реагувати на несправності та незвичайну поведінку та забезпечувати відновлення ІЕС після таких подій. Для моделювання ІЕС та аналізу ефективності в реальному часі буде потрібна підтримка прийняття рішень для системних операторів та внесок в управління та розподіл енергії в системі. Наявна сильна взаємозалежність систем тепло- та електропостачання, особливо в аварійних ситуаціях, через яку проявляються інтеграційні фактори для цих систем.

Авторами [12, 13] розглянуто проблеми інтегрованих інтелектуальних енергетичних систем в Україні. Подано процеси інтеграції систем у метасистему. Розглянуто процес взаємозв'язків та взаємодій між окремими елементами системи енергопостачання. Цілковитими установками ІЕС є:

забезпечення комфорту та якості енергопостачання у побуті, на транспорті та на виробництві, включаючи кількісне та якісне зростання комплексу енергетичних послуг за доступної їх вартості; забезпечення керованості, надійності, безпеки та економічності; зниження негативного впливу на довкілля, зокрема викидів парникових газів. Передбачається створення взаємозалежних енергетичних систем із використанням різних видів енергії. Дані ПЕС зможуть забезпечити якісні послуги для споживачів у галузі енергопостачання.

У роботі [13] розглядається електроенергетична система США з нової точки зору, що інтегрує електричну, вугільну, газову та водну підсистеми в єдину модель, що відповідає структурі потоків у мережах (рис. 1.2).

Ідея вивчення потоків енергії через відповідні мережі дає можливість відкрити нові перспективи щодо аналізу, експлуатації та планування ПЕС.

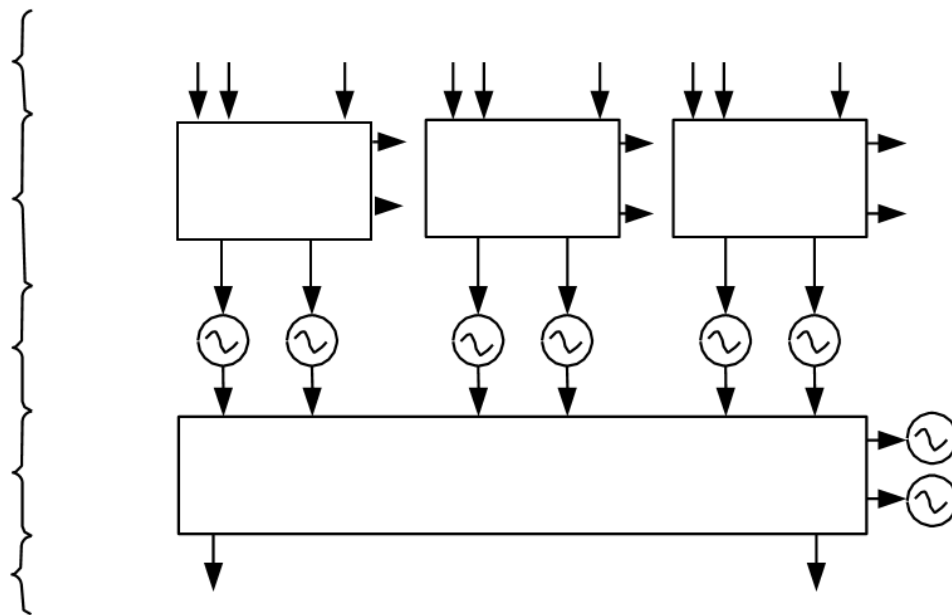


Рисунок 1.2 – Національна енергетична система США

Важливим результатом є мотивація власників генеруючих потужностей та постачальників палива використовувати виявлені схеми потоків шляхом подолання інформаційних, організаційних бар'єрів, збільшення виробничих потужностей чи будівництва нових виробничих потужностей. Крім того,

робота служить хорошим керівництвом для найбільш ефективного використання ресурсів у зміцненні інфраструктури ПЕС для отримання економічних вигод та підвищення її стійкості до непередбачених обставин, спричинених навмисними діями чи природними причинами.

Необхідність диверсифікації інвестицій у гідроенергетику та дорогу нафту змушує багато країн просувати використання природного газу, особливо для виробництва електроенергії. Латинська Америка стала одним з регіонів, що найбільш динамічно розвиваються, з видобутку природного газу та виробництва електроенергії. Континент має багаті запаси природного газу та швидкозростаючі енергетичні ринки [4]. Економічні реформи, що відкрили для приватних інвестицій ряд секторів, раніше зарезервованих за державою, привели регіон до розвитку інфраструктури електроенергетики та трубопроводів природного газу як у кожній країні окремо, так і транскордонні енергетичні зв'язки.

У роботах українських авторів [9, 10] представлено загальну структуру інтегрованих енергетичних систем. Запропоновано елементи концепції інтегрованих енергетичних систем. Дано пояснення елементів концепції як тришарової структури інтегрованих енергетичних систем у трьох вимірах (рис. 1.3).

Ці групи шарів можна визначити так:

- Системні шари: системи електропостачання, теплопостачання/холодопостачання та газопостачання;
- Шари масштабу: суперсистеми, мінісистеми та мікросистеми;
- Функціональні верстви: енергетичні функції, комунікації та управління, а також ухвалення рішень.

Системний рівень не потребує додаткових коментарів та специфікацій. Це є первинні енергоінфраструктурні системи. Тут необхідно лише зазначити, що між цими енергетичними системами різних рівней існують технологічні взаємодії.

Такий підхід авторів робить наочним взаємозв'язок різних систем енергопостачання на різних рівнях управління енергосистемами, що дозволяє визначити рівні зв'язку «система-рівень-функція».

У статті [19] розглядається взаємозалежність систем тепло- та електропостачання міського району (рівень міні-систем) в аварійній ситуації. Результати дослідження продемонстровані на прикладі типового міського району, що має районні електричні та теплові системи (рис. 1.4).

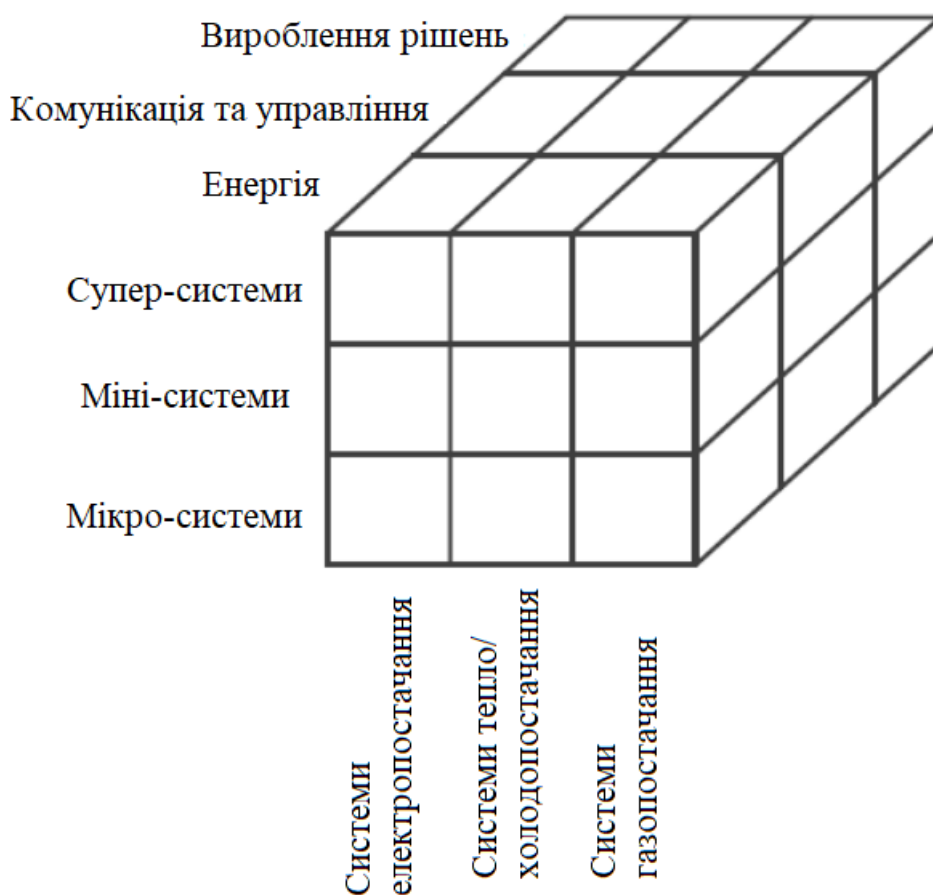


Рисунок 1.3 – Тришарова структура інтегрованих енергетичних систем у трьох вимірах



Рисунок 1.4 – Схема інтегрованої енергетичної системи на прикладі району міста

Отримані результати підкреслюють проблеми, пов'язані з окремим розглядом розвитку та експлуатації енергетичних систем, а також проблеми зносу обладнання та потреба покращити технологічний та технічний рівень цих систем, використання їх як основи для інтелектуальної інтегрованої енергетичної системи.

У дослідженнях енергетичних систем, енергетична система представлена моделлю великої системи, де ресурси вводяться з одного боку, а кінцеве використання витягується з іншого. Усередині системи моделюються різні технології з викидами та втратами енергії. Такого підходу зазвичай достатньо для системних досліджень на національному чи міжнародному рівні. Однак у вдосконаленій аналітичній системі для місцевих енергетичних систем необхідно ідентифікувати різні технології усередині системи.

В енергетичній системі існує в основному три види технології [14]:

- конверсійні технології, що перетворюють один вид енергії на інший;
- транспортні технології, що передають енергію на певну відстань;
- технології накопичення, які зберігають енергію протягом певного часу у певному географічному місці.

Деякі з енергетичних ресурсів повинні бути перетворені на інші форми енергії, такі як електроенергія, перш ніж вони можуть бути транспортовані кінцевим споживачам (гідро, вітер), в той час як інші також є енергоносіями, які можуть бути транспортовані через енергетичну систему до кінцевих споживачів (газ, вугілля, біомаса).

Географія та топологія є ключовими елементами у вдосконаленому підході до оптимізації. Таким чином, йдеться не лише про те, які ресурси та які обсяги використовувати, а й про те, в якій системі мають відбуватися необхідні перетворення.

Таким чином, аналіз наведених досліджень показує взаємодію та взаємозалежність різних систем енергопостачання, особливо в аварійних умовах [9]. Розвиток технології інтегрованої системи енергопостачання при використанні елементної бази, яка дозволяє накопичувати та перетворювати один в одного різні види енергії, стає актуальним. Спільний розвиток та функціонування окремих систем енергопостачання у складі інтегрованих систем дозволяє забезпечити більш високі рівні ефективності та надійності енергопостачання порівняно з окремим розглядом цих систем.

1.3 Аналіз моделей для вирішення різних завдань розвитку та функціонування інтегрованих енергетичних систем

1.3.1 Вихідні положення

Розвиток енергетичних систем в Україні та розвинених країнах спрямовано на ефективне задоволення попиту при скороченні загального споживання енергоресурсів. Основні тренди розвитку спрямовані на

підвищення енергоефективності. Вони включають концепцію розподіленої енергетики, управління попитом за рахунок розвитку «розумних мереж», а також когенерацію. Когенерація представляє технологію спільного виробництва теплової та електричної енергії в єдиному циклі.

Існуючі тенденції розвитку енергетики мають на увазі створення енергосистем інтегрованого енергетичного (з кількома енергоносіями) характеру, які плануються, проектується та експлуатуються з обов'язковою координацією підсистем, що входять до них. При управлінні розвитком та функціонуванням таких систем мають вирішуватись оптимізаційні завдання, що зводяться загалом (у класичній постановці) до мінімізації вартості виробництва/передачі/розподілу енергоресурсів. Традиційно засобами такої мінімізації є перерозподіл навантаження джерел, споживачів та накопичувачів енергоносія та, як наслідок, між елементами мережі його передачі та розподілу. Топологія інтегрованої енергетичної системи різна для різних енергоносіїв [10].

У минулому, перетворення енергії розглядалося як одновимірна система тому, що одна форма енергії перетворювалася на іншу форму. Побічні продукти перетворень, такі як тепло, не враховувалися та/або розглядалися як відходи. Наприклад, центральні електростанції мали і переважно все ще мають – одне джерело енергії, таке як вугілля чи природний газ, яке перетворюється на електроенергію. Втрата ефективності проявляється у вигляді відпрацьованого тепла, яке розсіюється у навколишнє середовище (наприклад, через воду, що охолоджує). Когенерація є першим кроком на шляху до вдосконалення системи, оскільки «відпрацьоване тепло» рекуперується та використовується як цінний продукт.

Класичне розуміння когенерації полягає у створенні ТЕЦ. В результаті когенерації водяна пара може бути використана для забезпечення споживачів тепловою енергією та для генерації електроенергії. З розвитком інтегрованих енергетичних систем розподіленої енергетики з'явилася можливість застосовувати технологію когенерації з іншими джерелами енергії.

Когенерація є основним трендом розвитку енергетики. Вона покликана оптимізувати використання енергоресурсів і має наступні переваги [8]:

1. Високий ККД використання та перетворення первинної енергії в тепло- та електроенергію.
2. Збільшення економічної ефективності.
3. Створення умов зростання конкуренції на ринках тепло- і електроенергії у вигляді розширення виробничих можливостей.
4. Зниження обсягів викидів парникових газів шляхом економії палива.
5. Підвищення енергобезпеки з допомогою скорочення споживання енергоресурсів.

Таким чином, є всі необхідні концептуальні, економічні та технічні передумови для створення конкурентоспроможних інтегрованих енергетичних систем, що відповідають таким вимогам [10]:

1. Економічна ефективність та спільне виробництво та споживання різних енергоресурсів;
2. Велика гнучкість інтегрованих енергетичних систем за рахунок можливості використання ширшого маневрування енергоресурсів;
3. Вища надійність і безперебійність енергопостачання;
4. Підвищення комфорту життєвих умов населення з допомогою взаєморезервування видів енергії;
5. Підвищення екологічної безпеки з допомогою маневрування енергоресурсами.

Застосування інтегрованої енергетичної системи дозволяє вирішувати завдання енергопостачання на різних (державному, регіональному, виробничому) рівнях. Внаслідок створення ІЕС вирішуються такі завдання: енергозабезпечення віддалених територій; одержання додаткових потужностей з використанням кількох видів енергії; підвищення економічної ефективності районів за допомогою створення підприємств у віддалених районах; за рахунок використання диференційованих тарифів скорочення витрат за оплату енергоспоживання та ін.

Можна стверджувати, що всі енергосистеми дійсно є «інтегрованими» з фізичної точки зору, у тому сенсі, що безліч видів енергії та секторів взаємодіють на різних рівнях: від попиту до споживання, що забезпечуються мережами. Отже, для цілей цієї роботи поняття «інтегрована енергетична система» скоріше відноситься до розгляду цілісної системи, підходу до оптимізації та оцінці конкретного (наприклад, будівлі або країни). Це дозволяє уявити нову перспективу в системі енергетичного аналізу, особливо у світлі скорочення часу надання енергетичних послуг, що також залежить від економічних обмежень, як і обмежень рівня комфорту. Підвищення ефективності перетворення та використання первинних джерел енергії, наприклад, через розподілену генерацію сприяє оптимальному розгортанню як централізованих, так і децентралізованих ресурсів на системному рівні [11].

Багатопаливна перспектива, в якій наголошується, як різні види палива від «класичного» природного газу до біомаси та ВДЕ (відновлювані джерела енергії), так і до теплової енергії можуть бути об'єднані разом для забезпечення оптимального сервісного попиту. Це необхідно з погляду сприяння розвитку енергетичних технологій та їхньої взаємодії, щоб мінімізувати вартість системи.

З просторового погляду поняття інтегрованих енергетичних систем можна побачити на різних рівнях, які в ідеалі можуть перейти від індивідуальних житлових приміщень до регіонів чи країн [11].

Наприклад, на рівні будівель – природний газ та електроенергія можуть бути вхідними даними для різних частин обладнання, таких як котли, теплові насоси, кондиціонери, мікро-ТЕЦ і т.д., для виробництва електроенергії, тепла та охолодження, і таке обладнання може оптимально координуватися для різних цілей. Будівлі можуть також взаємодіяти на районному рівні, наприклад, у типових районних енергосистемах, де мережі використовуються для взаємодії локального потокорозподілу, наприклад, від ТЕЦ або теплових насосів, та розподіляти потоки енергії, такі як тепло в електроенергію. Райони можна агрегувати та оптимізувати як наступний крок до міста, а потім на

регіональному рівні, в цей момент інші вектори енергії та послуги також можуть підключитися, наприклад, для доставки енергоресурсів. У будь-якому випадку, крім складнощів систематичного аналізу можливих варіантів, ключовим моментом є те, що інтегровану енергетичну систему можна побачити. Дані варіанти можна змодельовати на різних географічних рівнях залежно від цілей дослідження. Хоча багато методів можуть застосовуватися на всіх рівнях (наприклад, оптимізаційні підходи, засновані лише на економічній оцінці), інші вимагають конкретного врахування географічних перспектив (наприклад, взяти до уваги наявність мережного обмеження).

Однією з головних проблем сталого розвитку міста є забезпечення чистого, надійного та доступного енергопостачання. Одним із варіантів є інтеграція електроенергії, що виробляється з різних джерел із використанням концепцій інтелектуальних мереж. Проте енергетичні потреби міста лише частково задовольняються за рахунок електроенергії. Отже, розширюючи концепцію інтегрованої енергетичної системи враховуються всі відповідні джерела енергії та послуги. Отже, це створює більше можливостей для свободи під час оптимізації енергетичних рішень. Таким чином, це могло б підвищити ефективність усієї системи. Інтегровані енергетичні системи можуть мати кращі технічні, економічні та екологічні характеристики порівняно з «традиційними», незалежними або окремими енергетичними системами як на етапі експлуатації, так і на етапі планування [11, 12, 14]. На сьогоднішній день в Україні можна виділити три категорії генеруючих потужностей, які підпадають під широке визначення розподіленої генерації [14]:

1. Блок-станція – джерело електричної (іноді й теплової) енергії, що розташоване на території або в безпосередній близькості від промислового підприємства і належить власникам цього підприємства на правах власності або іншій законній підставі, наприклад, праві оренди.

2. Теплоелектроцентралі (ТЕЦ). ТЕЦ та централізоване теплопостачання населених пунктів. Комбіноване виробництво електроенергії та тепла підвищує коефіцієнт використання палива (КВТ) у середньому на 30%.

3. Об'єкти малої та середньої генерації, серед яких газотурбінні та газопоршневі станції, а також електростанції на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ).

У роботі [12] пропонується модель гнучкого потоку "енергія-вода" (FlexPWF) для спільної оптимізації роботи гнучких енергоємних компонентів у водних системах з роботою як енергетичних, так і водорозподільних систем. Модель FlexPWF використовує енергетичну гнучкість, що забезпечується очисними та опріснювальними установками у поєднанні з насосами зі змінною швидкістю обертання та резервуари для зберігання води, що дозволяє мінімізувати експлуатаційні витрати взаємозалежних систем розподілу електроенергії та води. Пропонована модель враховує експлуатаційні обмеження як енергосистем, так і водорозподільних систем, тим самим координуючи їх роботу без загрози надійного постачання споживачів електроенергією та водою. Модель FlexPWF ефективно координує роботу, знижує експлуатаційні витрати та покращує експлуатаційні характеристики як енергетичних, так і водних систем.

У роботі [18] представлено комбіноване завдання оптимальної витрати природного газу та електроенергії. Показано моделювання мережі природного газу та описано обмеження-рівності, що описують перетворення енергії між газовими та електричними мережами у комбінованих вузлах (наприклад, генераторах).

Тенденції посилення технологічної інтеграції систем енергопостачання стимулювали роботу в галузі досліджень з моделювання інтегрованих енергетичних систем. При цьому розвиваються два принципово різні напрямки моделювання інтегрованих енергетичних систем: з використанням традиційних спільних взаємопов'язаних математичних моделей [9, 15] та на основі концепції енергетичного хаба [2, 10].

1.3.2 Поняття енергетичного хаба

У статтях [6, 7, 10, 11, 12, 20] автори аналізують можливість розгляду кількох видів енергії. Представлено модель поточкорозподілу, що включає перетворення та передачу довільного числа енергоносіїв. Порівнюються два підходи: традиційний метод та інтегрований метод вироблення енергії. У 2005 році було [18] вперше введено поняття та сформульовано концепцію енергетичного хаба. Під енергетичним хабом розуміється інтегрований об'єкт з безліччю входів і виходів, які представляють різні види енергії, та з реалізацією внутрішніх функцій цього об'єкта щодо передачі, накопичення та перетворення різних видів енергії.

Енергетичні хаби включають введення і виведення енергії, перетворення енергії в інші форми та її накопичення. Також до цих установок підключається місцева генерація (наприклад вітрова, сонячна, гідро). Типовими елементами енергетичного хаба є силові електронні перетворювачі (мікро) газові турбіни, паливні елементи, теплообмінники, батареї, газові балони і т.д. Хаби обмінюються енергією через гібридну мережу, що транспортує різні енергоносії. На рис. 1.5 представлена узагальнена модель енергетичного хаба.

Робота [18] спрямована на створення простої схеми енергетичного хаба. Автори продемонстрували відповідну структуру для моделювання та оптимізації таких систем. До цього часу було розроблено інструменти для аналізу стаціонарних станів, що дозволяють проводити загальні дослідження поведінки системи. Автори бачать потенційні вигоди подальших досліджень, такі як підвищена гнучкість та надійніша робота, які можна отримати з розгляду майбутніх енергетичних систем.

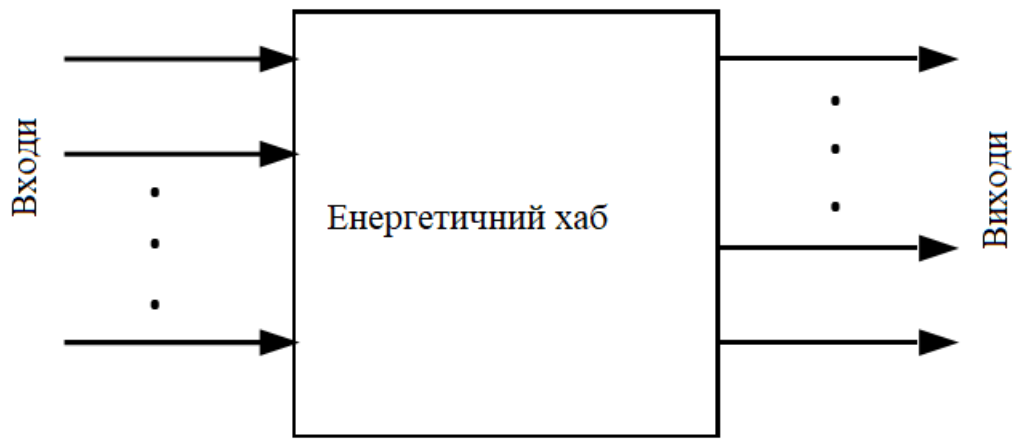


Рисунок 1.5 – Узагальнена модель енергетичного хаба

Енергетичний хаб генерує енергію через зв'язок підключення. Наприклад, інфраструктура передачі електроенергії та природного газу забезпечує необхідні енергетичні послуги на виході, такі як електроенергія, опалення, охолодження тощо. На рис. 1.6 наведено приклад енергетичного хаба [11].

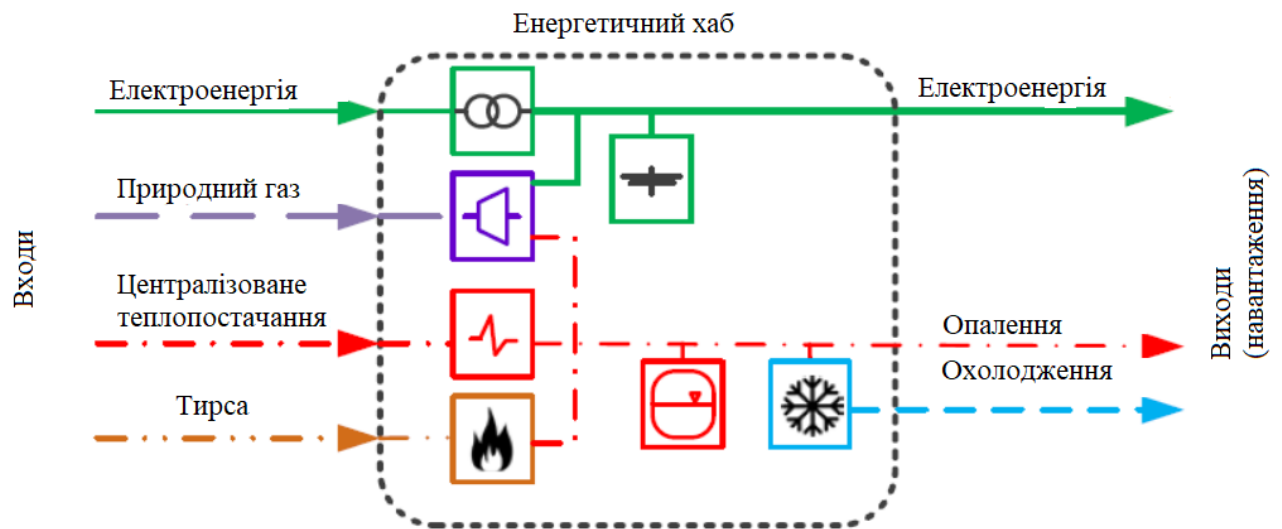


Рисунок 1.6 – Приклад конкретного енергетичного хаба, що містить трансформатор, мікротурбіну, теплообмінний апарат, піч, охолоджувач, батарею та накопичувач гарячої води

Наведена модель енергетичного хаба є загальним і простим способом моделювання перетворення енергії між різними енергоносіями. Модель

енергетичного хаба може бути використана для формулювання та вирішення різних завдань.

Споживач для реалізації тих самих функцій при використанні різних енергоресурсів може використовувати різні технології. Наприклад, отримувати електроенергію з накопичувача або централізованої системи електропостачання. Таких споживачів можна розглядати в якості енергетичного хаба [9, 15]. У [17] розглянуто систему енергетичних хабів, у якій входами одного хаба є виходи іншого хаба. Прикладом енергетичного хаба є також когенераційна установка [18].

У роботах [19, 20] автори продовжують дослідження енергетичного хабу. В [14] як приклад енергетичного хаба розглядається приватний будинок (рис. 1.7). На рис. 1.7 показано, що миттєве оптимальне енергетичне рішення для окремої будівлі залежатиме від вироблення, зберігання енергії на місці та складу генеруючих потужностей енергосистеми. Це також залежатиме від ефективності постачання електроенергії та газу, всього використання енергії при подачі води та переробки відходів. Оскільки це конкретне розташування, важливі географічні координати – x , y , z будівлі.

Групою авторів у статті [16] представлений енергетичний хаб із трьома видами енергії на входах: електрична, тепла та природний газ. Енергетичний хаб є розширенням єдиної мережі енергоносіїв. Модель енергетичного хаба може розглядатися різних рівней напруги, оскільки великомасштабне планування ресурсів зазвичай застосовується лише на рівні передачі, тоді як ТЕЦ і газові опалювальні навантаження зазвичай розташовані на стороні кінцевого споживача і розподільних систем. Таким чином, залежно від його розміру, енергетичний хаб може охоплювати рівні напруги як у системі передачі, так і в системі розподілу енергії.

В [19] представлено введення у концепцію енергетичного хаба. Основна частина статті присвячена вивченню запропонованих раніше моделей хаба та були виявлені чотири основні функціональні можливості концепції

енергетичного хаба, включаючи введення, перетворення, зберігання та виведення енергії.

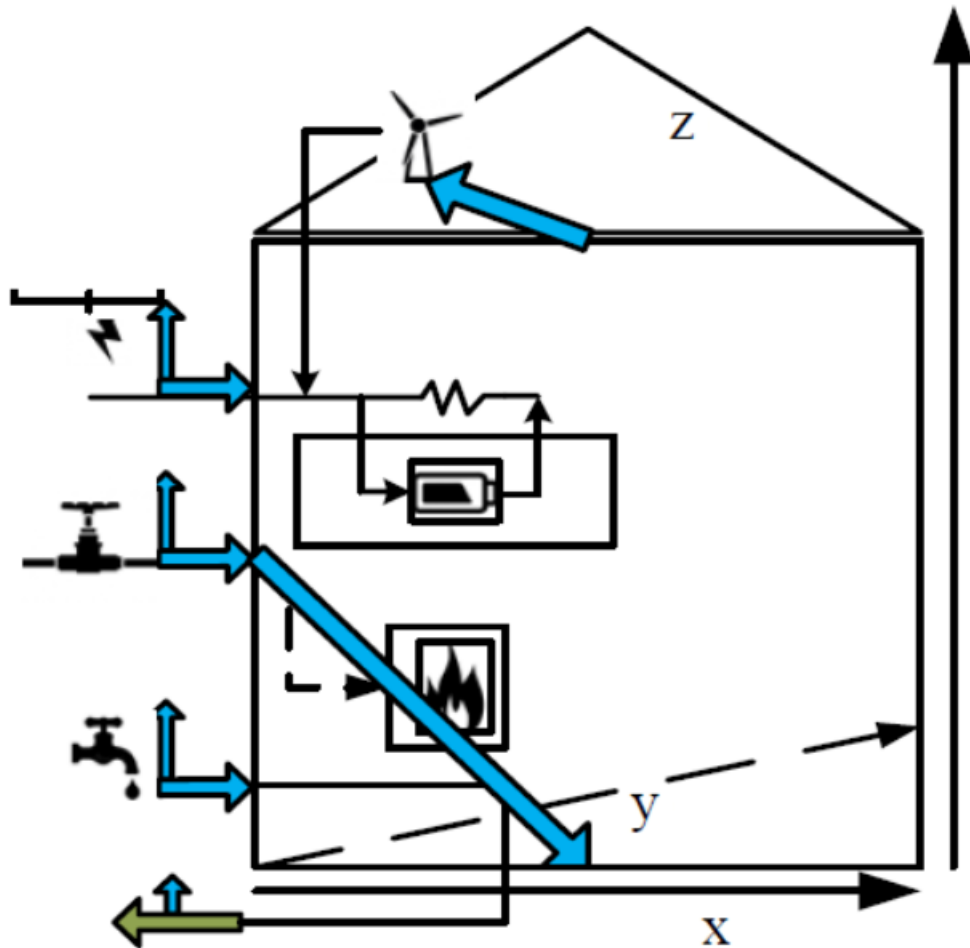


Рисунок 1.7 – Модель будинку при використанні кількох видів енергії

У вхідному порті шляхом вивчення проведених робіт на енерговузлах стало ясно, що основними вхідними джерелами для енергетичного хаба є електричні та газові мережі. Насправді, незважаючи на важливість різних енергоносіїв, більшість моделей використовують електричні та газові мережі як основні вхідні дані. У більшості досліджень приділяється увага багатогенераційним системам. У майбутніх моделях енергетичного хаба необхідно приділяти більше уваги використанню багатогенераційних систем, особливо відновлюваних та перспективних технологій, таких як паливні елементи, для задоволення потреб.

Також авторами робіт [6, 11, 12, 16, 16, 18, 20] було розроблено модель оцінки інвестицій. Метод оцінки порівнює два сценарії – звичайний системний та хабовий підходи. Передбачається, що стандартна система забезпечує задані навантаження. Розрахунки оптимальної витрати енергії виконуються протягом ряду періодів часу, наприклад, десяти років, і експлуатаційні витрати (включаючи витрати на електроенергію, податки на викиди тощо) збільшуються. На другому етапі та сама процедура виконується з використанням енергетичних хабів для покриття тих же навантажень. Експлуатаційні витрати можна порівняти в кожному періоді часу, і може бути розрахована різниця. З результуючого потоку грошей може бути отримана наведена вартість, яка відображає економію витрат, що виникають внаслідок використання енергетичних хабів. Різниця показує вартість потенційних інвестицій та дає уявлення про обґрунтовані інвестиційні витрати на нову технологію.

В епоху реструктуризації електроенергетики в США набуває більшого значення концепція «Енергія – навколишнє середовище – економіка» [12], оскільки національна економіка все більше спирається на складну та взаємозалежну енергетичну інфраструктуру. Розукрупнення електроенергетичного сектора та стимулювання конкуренції також призвели до появи нових технологій виробництва та доставки електроенергії, які дають меншу кількість забруднюючих речовин, більш високу ефективність та менш дорогі засоби забезпечення навантаження. Використання концепції енергетичного хаба дозволяє вирішувати ці завдання.

Поданий аналіз показує конструктивність та гнучкість концепції енергетичного хаба, яка є гарною базою для дослідження інтегрованих енергетичних систем. З огляду на це необхідно детально зіставити особливості моделювання ПЕС традиційними засобами та з використанням концепції енергетичного хаба.

1.3.3 Традиційні моделі

Як приклад традиційних моделей поточкорозподілу інтегрованих енергетичних систем наведемо модель, представлену в [15]. Ця модель управління режимами інтелектуальної інтегрованої енергетичної системи (ПЕС) може бути застосована до будь-якого періоду часу, поділеного на t інтервалів (рис. 1.8).

Пропонований підхід до управління режимами ПЕС полягає у забезпеченні того, щоб ця система працювала з мінімальними витратами на часовому інтервалі, тобто витрати на експлуатацію та технічне обслуговування енергосистеми мають бути зведені до мінімуму.

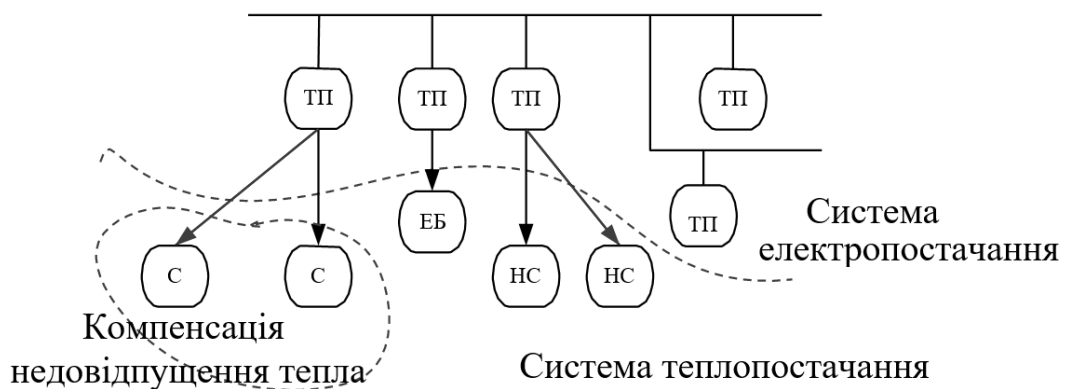


Рисунок 1.8 – Ілюстрація інтерфейсу між електричною мережею та тепловою мережею (ТП – трансформаторна підстанція, ЕБ – електричний бойлер, НС – насосна станція, С – споживач)

Експлуатація електричних і теплових систем за умови їх інтеграції включає наступні етапи [15]:

1. Фізичне розташування джерел у плані місцевості та завдання їх параметрів.
2. Генерація схем теплових та електричних мереж.
3. Визначення періоду часу та інтервалів для виконання розрахунків.
4. Розрахунок розподілу витрати у системі опалення для певного часового кроку.

5. Оцінка техніко-економічного стану системи опалення.
6. Оцінка показників надійності системи опалення.
7. Визначення споживачів електроенергії та об'єктів управління тепловою мережею, потреба в електроенергії.
8. Визначення споживачів з тепловим навантаженням, що не обслуговується, та обсягу недоотриманого тепла.
9. Визначення трансформаторних підстанцій, що подають електричну енергію на силові та керуючі об'єкти теплової мережі.
10. Визначення трансформаторних підстанцій, які постачають електроенергію споживачам із недостатнім запасом тепла.
11. Зміна потужності трансформаторів визначається кроками (9) та (10).
12. Розрахунок умов роботи електричної системи.
13. Оцінка техніко-економічного обґрунтування стану електричної системи.
14. Оцінка показників надійності електричної системи.
15. Якщо здійснене рішення існує, то розрахунок витрат на експлуатацію енергосистеми і перехід до етапу 3), інакше – розробка організаційно-технічних заходів щодо усунення причин ситуації, що склалася.

У [14] представлено середовище інтегрованих енергетичних систем моделювання, розроблене для моделювання та оптимізації міських енергетичних проблем з акцентом на планування міської енергетичної інфраструктури. Це доповнюється моделюванням попиту енергії з урахуванням витрат і наслідків заходів, які пов'язані з цим попитом. Ця модель також пов'язана з набором методів оптимізації для того, щоб дати відповіді на планування міської енергетичної інфраструктури. Аналіз впливу дій з управління попитом зазвичай спрямований на те, щоб вплинути на попит на енергію для взаємної вигоди комунального підприємства (або розподільчої компанії) та його споживачів. Ці ініціативи дозволяють комунальному підприємству вносити зміни до структури споживання електроенергії у часі та попиті, а також підвищувати ефективність використання ресурсів

комунального підприємства з погляду витрат, а споживачам – отримувати вигоду за рахунок зниження енерговитрат. Зміна форми графіка навантаження з меншими піками та загальною тенденцією до вирівнювання дає важливі переваги структурі енергосистеми в цілому (покращення використання виробництва енергії та розподільчої мережі), споживачам (зниження витрат на енергію) та суспільству (зниження шкоди навколишньому середовищу внаслідок меншого забруднення повітря та менше кількості активних генераторів).

У статті [18] подано підхід для комбінованої оптимізації енергетичних систем, що включають кілька енергоносіїв: електроенергія, природний газ та централізоване тепlopостачання. Описано зв'язок між різними енергетичними інфраструктурами, з'єднання вхідного сигналу та сигналу виходу. У роботі [10] також подано підхід до комбінованої оптимізації пов'язаних енергетичних потоків різних енергоносіїв. Аналогічно стандартному підходу для електроенергетичних систем, виведено загальне правило диспетчеризації для лінійних енергетичних вузлів, яке пов'язане із граничною вартістю енергоносіїв. Потім на прикладах демонструються особливості представленого підходу. В цілому, всі додатки оптимального потоку електроенергії в системному плануванні та експлуатації також є потенційними додатками підходу з кількома входами, наприклад:

- комплексне системне планування;
- планування генерації для кількох входів;
- аналіз надійності пов'язаних енергетичних систем.

У завданнях комплексного управління електричними та тепловими мережами розглядаються питання комбінованого розрахунку режимів роботи електричних та теплових мереж, інтегрованих до інтелектуальної системи енергопостачання. Подано математичний опис завдань.

Основною метою [15] є представлення вдосконаленого методу вирішення задачі поточкорозподілу в збалансованих радіальних розподільчих системах. Цей метод ефективний і простий у реалізації. Заснований на законах

електричних ланцюгів, цей метод є ітераційним і дозволяє оцінювати значення модулів напруги (середньоквадратичні значення), так і фазові кути. Він застосовується, наприклад, для схеми, наведеної на рис. 9. Щоб розрахувати потік навантаження в лініях з бічними гілками, дана проста методика визначення вузлів за кожною гілкою. Використовується проста схема нумерації. Починаючи з вихідного вузла шини номер 0 нумеруються вузли основного фідера. Вузол безпосередньо перед вихідним вузлом позначається як вузол 1 і так далі до кінцевого вузла основного фідера (вузол 4). Після цього вузли головного фідера досліджуються для бічних відгалужень.

Вибирається бічна гілка, що відходить від шини, найближчої до вихідної шини, та її шини нумеруються відповідно до кінцевого вузла основного фідера (від 5 до 6). Аналогічно номери шин наступних бічних гілок нумеруються після кінцевого вузла попередніх бічних (7, 8) і так далі, поки не будуть пронумеровані всі бічні вузли. Кожній гілці надається номер, рівний номеру приймаючого вузла. Приклад зв'язності мережі наведено на рис. 1.9.

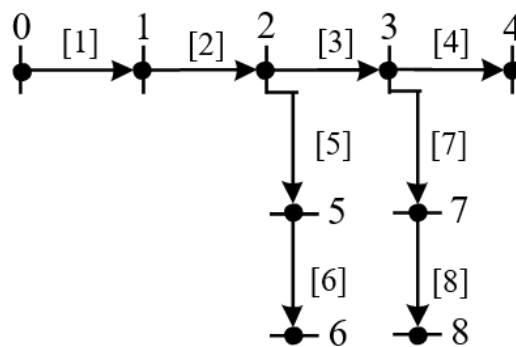


Рисунок 1.9 – Схема нумерації вузлів та гілок

Метод, використовуваний для визначення вузлів після кожної гілки, заснований на ітераційному методі, але представлений простим і зрозумілим способом. Спочатку будується матриця інцидентності гілок до вузлів IM , де номери рядків ідентифікують гілки, а номери стовпців – вузли. Передбачається, що загальні елементи $IM(i, j)$ мають значення, наведені нижче:

$$IM(i, j) = \begin{cases} -1, \text{ якщо } j \in \text{приємним кінцем } i \\ +1, \text{ } j \in \text{передавальним кінцем } i \\ 0, \text{ гілка не має зв'язку з вузлом} \end{cases}$$

де i – гілка; j – вузол.

Для фідера (рис. 1.9), матрицею інцидентності «гілки до вузла» є:

$$IM = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} [1] \\ [2] \\ [3] \\ [4] \\ [5] \\ [6] \\ [7] \\ [8] \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Потік навантаження радіальної розподільної мережі може бути вирішений з двох наборів рекурсивних рівнянь. Перший набір стосується визначення струму гілок шляхом переміщення вгору лінії (зворотна розгортка). Другий дозволяє визначати напругу вузлів, спускаючись лінією (пряма розгортка). Метод може бути застосований до радіальних ліній із шунтуючими елементами.

У статті [11] розглядається модель управління режимами інтелектуальної інтегрованої енергетичної системи. Наведено алгоритм, призначений для розрахунку режимів спільної роботи електричних та теплових систем при їх інтеграції. Результати дослідження спільної роботи електричних та опалювальних систем показано на прикладі типового міського району з житловими будинками, що має районні електричні та опалювальні системи. Отримані результати показують проблеми, пов'язані з роздільним розглядом розширення та експлуатації енергосистем, а також зносу

обладнання та необхідністю підвищення технологічного та технічного рівнів цих систем та використання їх як основи для створення інтелектуальної інтегрованої енергосистеми.

Сучасні тенденції до посилення технологічної інтеграції систем енергопостачання послужили стимулом для досліджень з моделювання інтегрованих енергетичних систем з кількома несучими, для дослідження та контролю умов їх експлуатації та планування розширення. Цей факт призвів до розвитку принципово різних напрямів моделювання інтегрованих енергетичних систем: по-перше, з використанням традиційних взаємопов'язаних математичних моделей, по-друге, з концепцією енергетичного хаба.

1.4 Моделювання енергетичного хаба

У дослідженнях багато уваги приділяється моделюванню енергетичного хаба.

У роботах [9, 10, 15] у загальному вигляді представлена система лінійних рівнянь алгебри. Матриця коефіцієнтів системи пов'язує вхідні змінні енергетичного хаба, які репрезентують різні види енергії, з його вихідними змінними. Також відображає перетворення одних видів енергії на інші. Розглянуто загальний енергетичний хаб із різними енергоносіями $\alpha, \beta, \dots, \gamma$. Енергія перетворюється на різні форми задоволення попиту навантаження на вихідному порту хаба. Передача енергії від вхідних портів хаба до вихідних портів виражається як:

$$\begin{pmatrix} L_{\alpha} \\ L_{\beta} \\ \vdots \\ L_{\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{\alpha\alpha} & C_{\beta\alpha} & \dots & C_{\gamma\alpha} \\ C_{\alpha\beta} & C_{\beta\beta} & \dots & C_{\gamma\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\gamma} & C_{\beta\gamma} & \dots & C_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\alpha} \\ E_{\beta} \\ \vdots \\ E_{\gamma} \end{pmatrix} \quad (1)$$

або

$$L = C \cdot E \quad (2)$$

де $\alpha, \beta, \dots, \gamma$ – енергоносії, $E = [E_\alpha, E_\beta, \dots, E_\gamma]$ – вектор-стовпець енергії на вхідному порті, $L = [L_\alpha, L_\beta, \dots, L_\gamma]$ – вектор-стовпець енергії на вихідному порті; C – матриця прямих зв'язків, що визначає перетворення енергії від входу до виходу. Елементами сполучення є коефіцієнти перетворення. Математично ця матриця визначає відображення потужностей від входу до виходу перетворювального пристрою. Кожен член матриці пов'язує один конкретний вхід із певним виходом.

У разі вирішення зворотного завдання вводиться матриця зворотних перетворень:

$$\begin{pmatrix} E_\alpha \\ \vdots \\ E_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{\alpha\alpha} & \dots & d_{\gamma\alpha} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{\alpha\gamma} & \dots & d_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_\alpha \\ \vdots \\ L_\gamma \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де d – матриця зворотних зв'язків, яка описує перетворення енергії від виходу до входу. Зв'язок між коефіцієнтами зворотних та прямих перетворень має однозначний вигляд:

$$d_{\beta\alpha} = \begin{cases} c_{\alpha\beta}^{-1}, & \text{якщо } c_{\alpha\beta} \neq 0 \\ 0 & \text{інакше} \end{cases} \quad (4)$$

У разі N -вихідних портів при одному вході енергія кожного з вихідних каналів розподіляється відповідно до виразу:

$$E_{in} = \sum_{n=1}^N D_{in} L_{in} \quad (5)$$

Оскільки сумарний вхід одного енергоносія може бути розділений на кілька перетворювачів (у вузлах введення), передбачається ввести так звані коефіцієнти розподілу, що визначають розподіл сумарного входу пристрою перетворення цього енергоносія.

У статтях [16, 17] представлено розрахунок поточкорозподілу міста та змодельовано енергетичний хаб інтегрованої енергетичної системи. Енергетичний хаб представляє складну систему взаємозалежних інфраструктур, що надають кінцевим споживачам базові послуги електроенергії, тепла, газу тощо. Фізичні зв'язки між системами можуть бути представлені у математичних термінах за допомогою концепції енергетичного хабу. Цей підхід передбачає гнучкість виявлення чинників перетворення енергії у різних просторових масштабах. Зокрема, математична модель, пов'язана з енергетичним хабом, може запропонувати подання взаємозалежностей між транспортуванням енергії на побутовому, комерційному та енергетичному рівнях, а також полегшити розробку та вирішення схем керування/оптимізації для керування генерацією у розподільчих установках на рівні передачі. Даний підхід може бути масштабованим та модульним.

У статтях [10, 11, 14] запропоновано записати модель енергетичного хаба як матричної системи рівнянь. Представлені та обговорені методи для розрахунку очікуваної надійності постачання енергії. Загальний підхід може бути використаний для аналізу різних аспектів надійності постачання, що дозволить скоротити економічні втрати, спричинені аварійним відключенням на одному з каналів енергопостачання. Застосування концепції інтегрованої системи вирішить низку проблем при повному або частковому обмеженні по одному з каналів енергопостачання. Також застосування енергетичного хаба дасть можливість резервування енергії, дозволить оптимізувати графіки навантаження генеруючих станцій та мережевої інфраструктури.

У статті [11] авторами пропонується розглянути енергетичний хаб із боку розрахунку очікуваної надійності енергопостачання. Розглянуто метод, призначений для використання у матричному поданні імітації перетворення енергії. У цій роботі було розроблено методологію для розрахунку та визначення характеристик надійності систем з кількома потоками енергії. Реалізація методики та її належне функціонування показано на двох прикладах, вибраних для демонстрації методології. Методологія може бути застосована переважно для структурної оптимізації нових систем. Щоб знайти загальне оптимальне рішення, необхідно виконати багатокритеріальну оптимізацію, де критеріями надійності є кілька аспектів, які необхідно враховувати.

Кілька досліджень були присвячені взаємозалежності між мережами природного газу та електроенергії [16, 19]. У електроенергетичній мережі енергоблоки виробництва електроенергії на природному газі – це енергоблоки швидкого реагування, які компенсують дефіцит генерації, спричинений раптовими змінами у розподілі відновлюваної генерації чи попиту на електроенергію. Деякі дослідження ігнорували мережеву модель для електричної або газової систем і розглядали економічні та екологічні показники, обмеження, просто балансує попит та пропозицію з використанням одновузлового підходу. У роботі [12] досліджено кілька сценаріїв координації між мережами електропостачання та природного газу для підвищення ефективності економічних заходів та заходів безпеки. Важливим поняттям, яке було проігноровано в більш ранніх дослідженнях, є те, що електроенергетичні та газові системи зазвичай експлуатуються різними суб'єктами з цілями, що не збігаються. Тому короткострокове та довгострокове оперативне планування для цих взаємозалежних інфраструктурних систем має враховувати обмеження на обмін інформацією між їхніми відповідними системними операторами. Узгоджена оперативна структура сприяє скоординованому функціонуванню мереж енергопостачання.

У [13] була сформульована загальна модель енергетичного хаба з кількома варіантами енергопотоків, а також обмеження, перетворення енергії та мережі передачі. Модель планування енергетичного хаба графік планування з найменшими витратами для потенційних генеруючих блоків, ліній електропередачі, котелень на природному газі та ТЕЦ, які задовольнятимуть електричне та теплове навантаження.

У [10] описаний новий підхід до моделювання мереж з декількома енергоносіями. У передбачуваній моделі поточкорозподілу типовими енергоносіями є: електроенергія, природний газ та централізоване тепло, які можуть враховуватися як із втратами, так і без втрат. Представлена модель ґрунтується на концепції енергетичного хаба. У тематичному дослідженні було використано одинадцять вузлів.

Така система могла б забезпечити значну економію як при генерації, так і при повсякденній експлуатації такої системи. Пропонований метод надалі автори планували розширювати при використанні математичної моделі за допомогою вузлової матриці, що описує мережні втрати, з доданою можливістю виконання моделювання з втрат або без втрат.

Варто зазначити, що коефіцієнти перетворення одних видів енергії на інші мають складну внутрішню структуру, що суттєво ускладнює вирішення завдань перетворення на основі концепції енергетичного хаба.

Як найпростіший приклад, що ілюструє складність визначення коефіцієнтів зв'язку (2), розглянемо представлену просту схему у вигляді хаба (рис. 1.10).

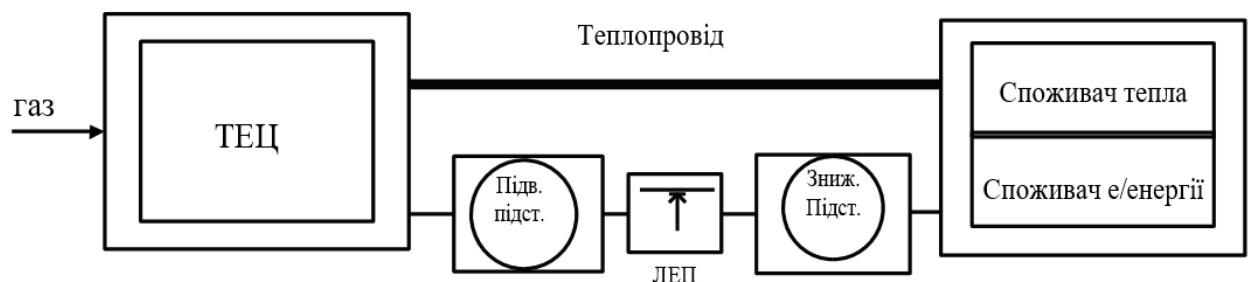


Рисунок 1.10 – Приклад схеми інтегрованої енергетичної системи

На цій схемі видно, що кожен блок системи має вхід та вихід, виконується перетворення енергії, а також можна передбачити накопичення енергії, що дозволяє дійти невтішного висновку, що блоки схеми є енергетичними хабами, а цілому складають модель інтегрованої енергетичної системи.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Численні дослідження були зосереджені на інтегрованих енергетичних системах, таких як скоординовані електричні та газові системи, скоординовані електричні та централізовані теплові системи, скоординовані електричні, газові та централізовані теплові системи, а також скоординовані хімічні, вугільні, нафтові, електричні та теплові мережі.

Дослідження показали, що гнучке поєднання різних енергоносіїв з використанням технологій перетворення та накопичення енергії має потенціал для різних покращень системи: загальна вартість енергії та викиди системи можуть бути знижені, надійність та доступність поставок можуть бути збільшені, перевантаження може бути знижене, втрати при передачі енергії зменшені. Розроблені структури моделювання та аналізу забезпечують підходящу основу для досліджень, необхідних для планування мережі, таких як аналіз потоків потужності та надійності, а також оптимізація системи.

Інтеграція різних форм енергії стане основою підвищення ефективності використання енергоресурсів із застосуванням концепції енергетичного хаба. Інтеграція нових технологій є запорукою розвитку майбутньої енергосистеми.

Проведений аналіз моделей для вирішення різних завдань розвитку та функціонування інтегрованих енергетичних систем показує актуальність та перспективність цього напрямку. Розглянуто традиційні моделі, а також особливості та умови їх застосування для дослідження інтегрованих енергетичних систем. Розглянуто підходи до управління режимами ПЕС для роботи системи з мінімальними витратами на заданому часовому інтервалі.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Методичні засади побудови імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи

Концепція енергетичного хаба є конструктивним підходом до імітаційного моделювання комплексних інтегрованих енергетичних систем. Підхід імітаційного моделювання може бути використаний як базова технологія для побудови інтегрованої моделі енергосистеми з декількома видами енергії. Пропонується використовувати можливості програмного забезпечення MATLAB/Simulink для розробки розглянутої технології. В основу конструювання імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи закладено такі базові засади:

- Імітаційна модель інтегрованої енергетичної системи конструюється з моделей елементів відповідно до топології схем з'єднань (схем заміщення) та параметрів різних видів елементів (об'єктів) окремих енергетичних систем, з урахуванням їх взаємозв'язків в інтегрованій системі. Необхідно відзначити початковий елемент у кожній окремій енергетичній системі, який стане відправною точкою для створення топологічної моделі кожної окремої енергетичної системи.

- Поточні версії програмного забезпечення MATLAB/Simulink включають різні моделі елементів технологічних систем – електричних, газових, гідравлічних та інших. Ці моделі елементів представлені з використанням передавальних функцій та можуть бути реалізовані для дослідження динамічних процесів у різних технологічних системах. Ми маємо справу з станами, тому необхідно перетворити вихідні динамічні моделі в статичну форму.

В якості базової моделі електричних мереж прийнято уявлення мережевих елементів їх пропускними здібностями. Така модель дозволяє

використовувати ідентичне уявлення електричних мереж, що дозволяє скористатися досить розвиненим математичним апаратом потоків у мережах. Необхідно зауважити, що поточкові моделі ефективно використовуються при вирішенні цілого ряду структурних завдань електроенергетичних систем. Обґрунтування використання цих моделей базується на цілком очевидних та прийнятних припущеннях.

– Вищезгадана бібліотека програмного забезпечення MATLAB/Simulink не містить складних елементів із структурою з кількома входами та кількома виходами. Такі елементи є енергетичними хабами. ТЕЦ може бути прикладом такого складного елемента (об'єкта) з одним входом (газ) та двома виходами (електроенергія та тепло). На рівні споживання такі елементи інтегрованої енергосистеми з кількома входами включають функцію перетворення одного виду енергії на інший. Такі моделі енергетичних хабів формують спеціальну додаткову бібліотеку. Ці моделі також реалізують такі функції, як накопичення енергії та підсумовування різних видів енергії.

– Види елементів перетворення енергії: 1) змінюють характеристики енергетичного каналу без перетворення форми енергії на іншу (наприклад, електричний трансформатор, теплообмінник тощо); 2) змінюють як характеристики енергетичного каналу, а й перетворюють один вид енергії на інший.

– Різні види енергії в інтегрованій енергетичній системі мають різні одиниці виміру (кВт·ч, Гкал тощо), у зв'язку з цим Джоуль (Дж, Вт·с) розглядається як основна одиниця виміру. Блоки перетворення різних одиниць виміру до базової одиниці реалізовані засобами програмного середовища MATLAB/Simulink.

– Після створення топологічних моделей різних окремих мереж енергетичних систем з використанням вищезгаданих процедур необхідно з'єднати їх один з одним. Роль таких з'єднувачів відіграють моделі енергетичних хабів підприємств з виробництва енергії (когенераційні

установки, теплові станції тощо) та комплексних споживачів з кількома видами споживаної енергії (електроенергія, тепло тощо).

– Побудована імітаційна модель інтегрованої енергетичної системи є базовою частиною для вирішення різноманітних завдань. Постановка конкретної задачі вимагає додаткових процедур для формалізації задачі та інтерпретації результатів. Наприклад, розв'язання задачі мінімізації втрат в електричній мережі вимагає розрахунку поточкорозподілу як основної процедури та формалізації алгоритму оптимізації для вирішення всієї необхідної задачі. Після вищезгаданих процедур імітаційна модель інтегрованої енергосистеми з кількома каналами енергії готова до використання для вирішення різних завдань.

На рис. 2.1 показана узагальнена схема методичного підходу до імітаційного моделювання інтегрованих енергетичних систем.

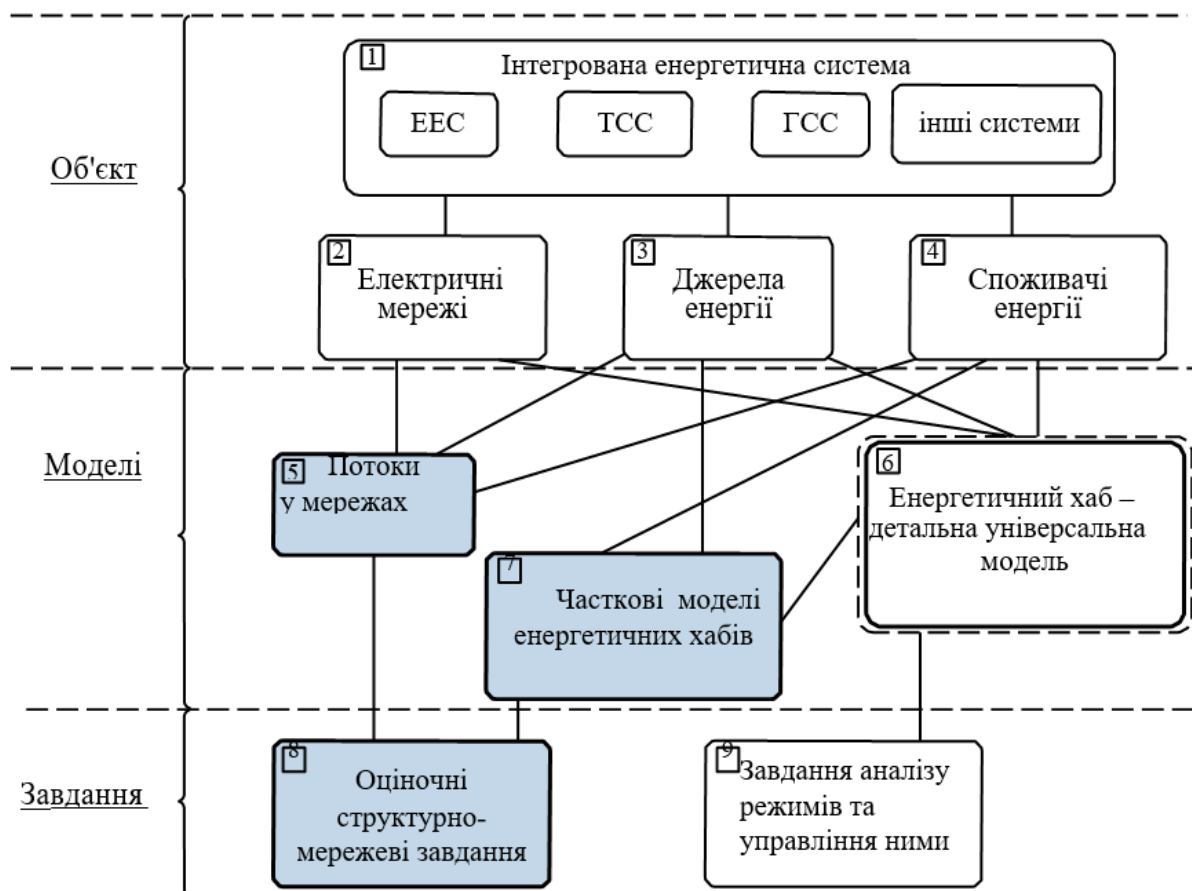


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема методичного підходу до імітаційного моделювання інтегрованих енергетичних систем

У позиціях 1 – 4 представлений об'єкт дослідження – інтегрована енергетична система, сформована з індивідуальних систем – електроенергетична система (ЕЕС), теплопостачальна система (ТСС), газопостачальна система (ГСС) та можливо інших. Кожна з індивідуальних систем включає джерела енергії, споживачів енергії та електричні або трубопровідні мережі (див. позиції 2 – 4).

Наступний рівень розгляду (позиції 5 – 7) представляє основні складові імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи за різного ступеня деталізації розгляду елементів. За необхідності розгляду детальної універсальної моделі використовується технологія моделювання енергетичного хаба засобами програмного середовища MATLAB/Simulink (позиція 6) і представляє детальні моделі джерел енергії, споживачів та мережевих елементів. Відповідна необхідна інформація для конструювання моделі енергетичного хаба надходить у позицію 6 з позицій 2 - 4. При цьому для реалізації розробленої методології з урахуванням необхідних припущень на підставі детальної універсальної моделі енергетичного хаба виходять часткові спрощені моделі енергетичних хабів окремо для джерел енергії та окремо для споживачів. У випадках спрощеного представлення моделювання інтегрованої енергетичної системи у позиції 7 формуються спрощені моделі енергетичних хабів для джерел та споживачів окремо базовою мовою програмного середовища MATLAB незалежно від універсальної моделі енергетичного хаба (див. зв'язки 3 – 7 та 4 – 7).

На додаток до викладеного подання джерел та споживачів базовою мовою програмного середовища MATLAB реалізуються спрощені моделі електричної мережі на рівні представлення їх елементів (електричних ліній) пропускними здібностями. Це уявлення мережевих елементів (позиція 5) дозволяє вирішувати оціночні структурно-мережові завдання з використанням методології потоків у мережах, зокрема методом колій та перерізів, а також за допомогою розробленого топологічного методу аналізу шляхів енергопостачання (позиція 8). Обґрунтування прийнятого представлення

мережевих елементів (рис. 2.2) представлено ядро імітаційної системи, що частково реалізує моделі енергетичних хабів, що становлять джерела енергії та споживачів енергії. Для вирішення конкретних завдань інтегрованих енергетичних систем (наприклад, оцінка структурної надійності ПЕС, та ін.) Потрібна розробка програмного інтерфейсу формує формалізоване уявлення вхідного опису задачі та вихідної інтеграції результатів її вирішення. Для цього потрібно використовувати часткові моделі енергетичних хабів, також необхідно враховувати потоки в мережах.

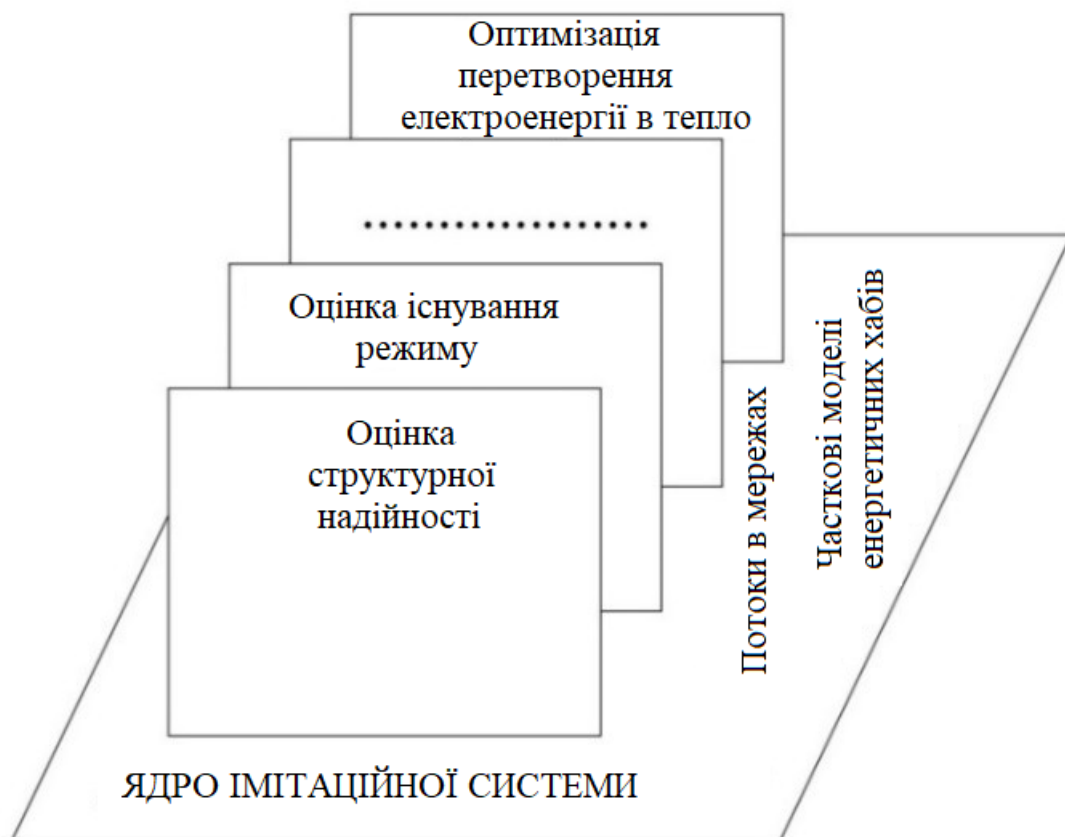


Рисунок 2.2 – Формалізація структурно-мережевих завдань

2.2 Імітаційне моделювання енергетичного хаба інтегрованої енергетичної системи

Нові можливості інтеграції систем енергопостачання з'явилися у зв'язку з розвитком ідеології розподіленої генерації, Smart Grid, Smart Metering, Інтернету «речей» та інших інтелектуальних технологій та обладнання.

На рис. 2.3 наведено узагальнену функціональну структуру імітаційної моделі енергетичного хаба для трьох каналів енергопостачання (електроенергії, тепла та газу) [6]. Ці канали пов'язують джерела електричної, теплової енергії та газу з електричними, тепловими та газовими навантаженнями. У середині інтегрованої енергосистеми реалізуються функції передачі, перетворення та зберігання різних видів енергії.

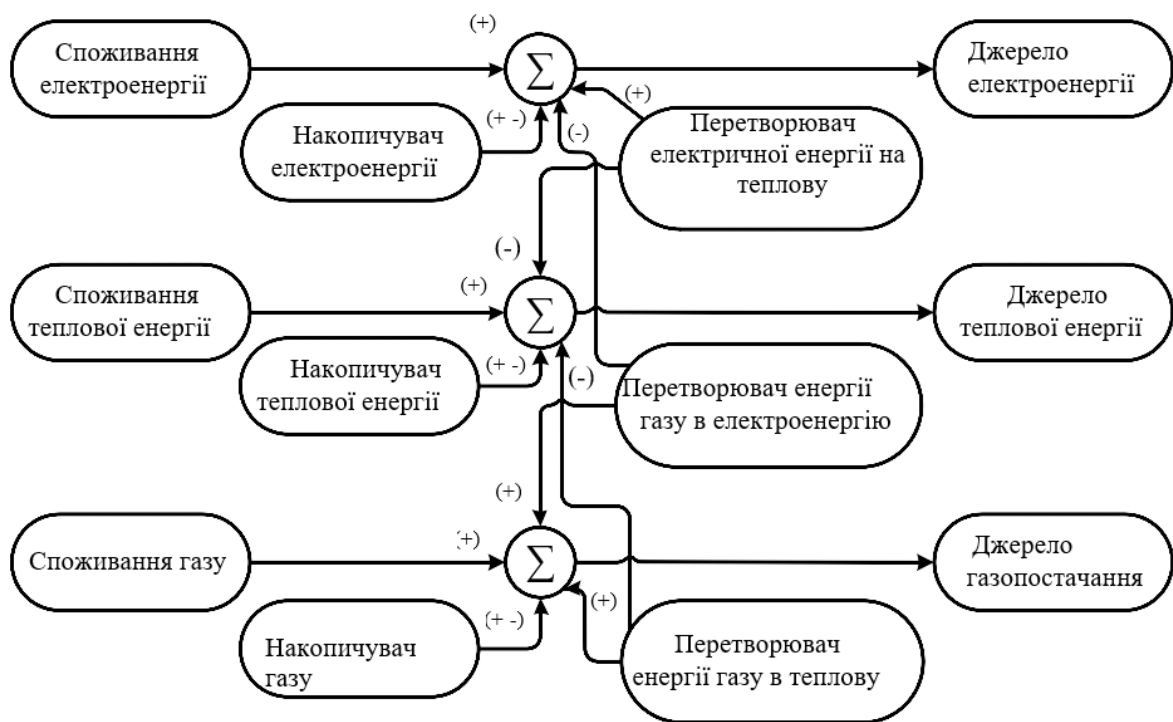


Рисунок 2.3 – Узагальнена функціональна структура імітаційної моделі енергетичного хаба (канали: 1 – електропостачання, 2 – теплопостачання та 3 – газопостачання)

Функціональна схема імітаційної моделі енергетичного хаба складається із структурних блоків. Кожен блок реалізує певну функцію. Блоки передачі – передача енергії від одного вузла до іншого з урахуванням втрат енергії, але без перетворення (на рис 2.3 позначена стрілками). Блоки перетворення здійснюють трансформацію енергетичних параметрів (рівень напруги трансформатора, рівень тиску газу насоса та ін.) без перетворення на інший вид енергії. Блоки накопичувачів пов'язані з накопиченням енергії у блоці пам'яті. Підсумовування – додаткова важлива функція, щоб перерозподілити енергію між різними каналами енергопостачання (Блок підсумовування на рис 2.3). Ця функціональна схема є основою реалізації алгоритмічної математичної моделі енергетичного хаба у системі MATLAB/Simulink.

Інтерактивне середовище Simulink дає користувачеві можливість створювати комп'ютерну модель, запускати виконання завдання, налагоджувати, аналізувати систему.

У пакеті Simulink є вбудований редактор блок-схем. Він заснований на графічному інтерфейсі користувача та є типовим засобом візуально-орієнтованого програмування. Замість програмної реалізації математичної моделі досліджуваної системи однією з універсальних мов програмування, в Simulink використовуються вже готові графічні модулі (блоки), у тому числі й складаються структурні схеми (блок-схеми) досліджуваної системи. За підсумками таких моделей можна здійснити аналіз результатів, дослідити імітаційні процеси.

У браузері бібліотеки блокових компонентів Simulink є вбудована пошукова система блоків за їх назвою. Знаючи призначення блоку англійською мовою, можна виконувати автоматичний пошук відповідних блоків. Прості елементи систем електропостачання, газопостачання та теплопостачання можуть бути представлені імітаційними моделями з бібліотеки MATLAB/Simulink. Якщо потрібний блок відсутній, можна створити додаткову бібліотеку блоків. Наприклад, для створення моделей

енергетичного хаба необхідно додатково створити бібліотеку, що містить блоки перетворення, накопичення і т.п.

Процес моделювання засобами Simulink можна розділити на кілька етапів. Першим етапом є складання розрахункової схеми мережі. Під розрахунковою схемою розуміється схема досліджуваної ділянки мережі з нанесеними на ній параметрами, які необхідно врахувати під час моделювання. Другим етапом є компонування моделі. В результаті з бібліотек Simulink або додатково створеної бібліотеки необхідно вибрати потрібні блоки, розмістити їх у спеціальному вікні та з'єднати між собою.

Як приклад на рис. 2.4 представлена розгорнута функціональна схема частини узагальненої структури імітаційної моделі енергетичного хаба, що відноситься до каналу електропостачання. Тут 1, 6 – блоки прямої та зворотної трансформації змінних стану; 2, 4 – блоки передачі електроенергії; 3 – блок, що моделює трансформаторну підстанцію; 5 – блок, що моделює накопичувач електроенергії.

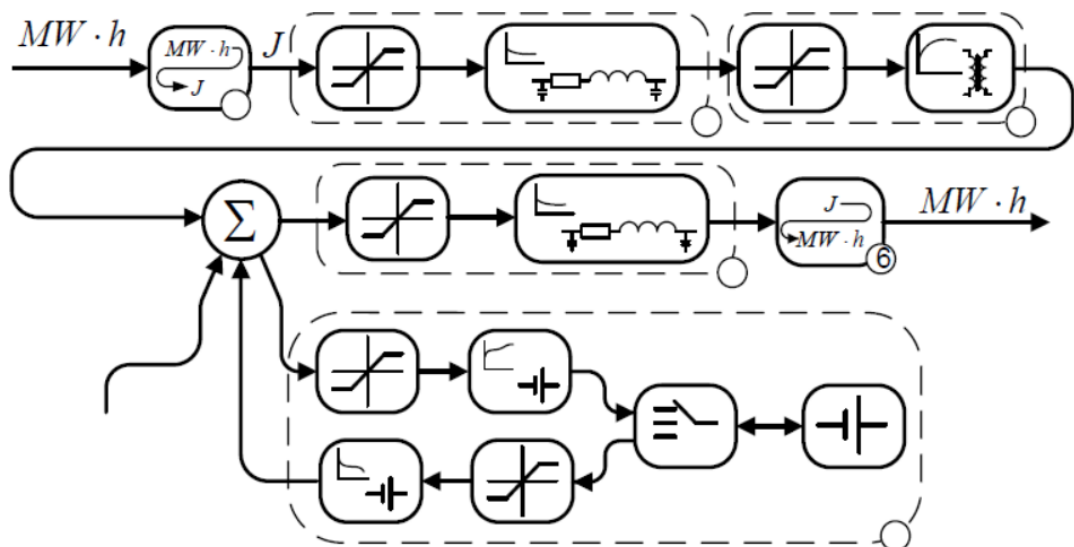


Рисунок 2.4 – Функціональна схема каналу електропостачання імітаційної моделі енергетичного хаба

Ця функціональна схема каналу електропостачання враховує особливості імітаційного моделювання системи MATLAB/Simulink. Зокрема,

правила поширення та перетворення сигналів у даній системі імітаційного моделювання.

Моделювання електричної системи та системи теплопостачання можна проводити типовими моделями із бібліотеки Simulink. Усередині енергетичного хаба, виходячи з вищезазначеної інформації, застосовуються спеціально розроблені блоки. На рис. 2.5 наведено суміщену схему систем енергопостачання та енергетичного хаба по двох каналах енергопостачання.

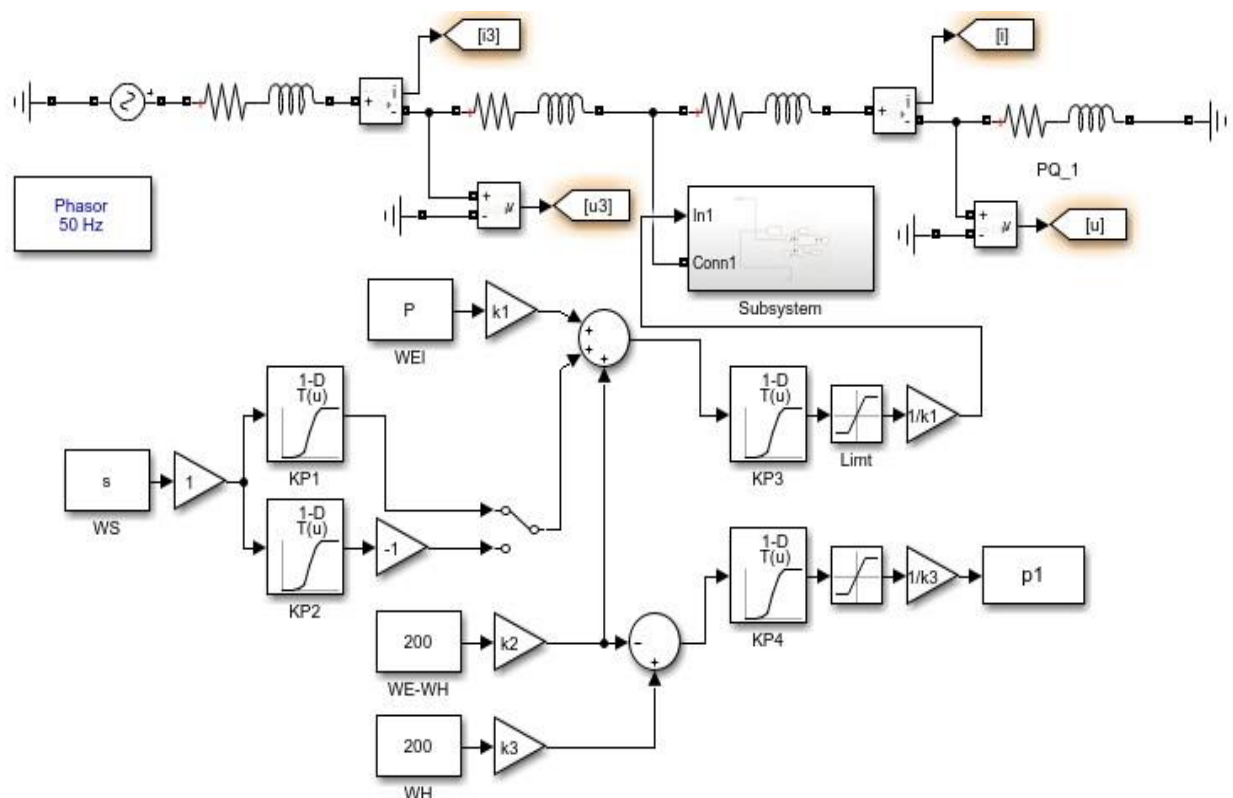


Рисунок 2.5 – Реалізація сумісної схеми двома каналами енергопостачання в MATLAB/Simulink

Система енергопостачання моделюється типовими блоками, що використовуються з базової бібліотеки SimPowerSystems і нестандартними блоками, самостійно змодельованими в додатковій бібліотеці, наприклад, блоки перетворення, накопичення, підсистеми вузлів і т.п.

Блоки *WEI*, *WS* – споживання, накопичення енергії на каналі електропостачання та *WH* – споживання енергії на каналі теплопостачання.

$KP1 - KP4$ – блоки, що враховують коефіцієнт корисної дії перетворювача енергії. $WE-WH$ – електрична енергія, що перетворюється на теплову.

Система MATLAB/Simulink має у своєму складі об'єктно-орієнтовану мову програмування, що дозволяє автоматизувати створення складних імітаційних моделей енергетичних систем різними каналами енергопостачання з урахуванням основних положень концепції енергетичного хаба.

У найпростіших випадках елементи інтегрованої енергетичної системи моделюються в основному тексті алгоритму структурування імітаційної моделі, що реалізується базовою мовою системи MATLAB/Simulink.

2.3 Використання методу шляхів та перерізів для дослідження мережових проблем інтегрованих енергетичних систем

У існуючій практиці для аналізу та управління енергосистем в основному використовуються детерміністські підходи, які реалізуються у вигляді відомих методів та моделей розрахунку встановлених та перехідних режимів. В інтегрованій системі електро- та теплопостачання пропонується використовувати метод шляхів та перерізів для ілюстрації методики оцінки потокорозподілу. В інтегрованій енергетичній системі базою є мережа, що включає джерела енергії, лінії передачі, споживачів (навантаження). Також до мережі можна підключити установки додаткового резервування енергії (накопичувачі) та перетворення енергії (електронагрівачі).

Підхід для вирішення мережових проблем ПЕС пропонується реалізувати з використанням методології потоків у мережах [15 – 17]. Цим методом вирішується завдання визначення максимального потоку, що встановився, від однієї точки до іншої в мережі з обмеженнями пропускної здатності на дугах (зв'язках). У 1955 р. це завдання було поставлено Т.Є. Харрісом, який разом із Ф.С. Россом запропонували спрощену модель залізничного транспортного потоку та розглянули саме це спеціальне завдання

як центральне завдання, що підказується цією моделлю. Ця теорема дозволяє знайти пропускні здібності (потоки) у мережах за допомогою визначення шляхів та перерізів.

За підсумками викладеної методології [15, 17] Ю. А. Фокін розробив методичний підхід для визначення шляхів та перерізів у схемі при аналізі структурної надійності ЕЕС [16]. Метод пошуку шляхів та перерізів у поданій роботі був адаптований для вирішення задачі визначення пропускних здібностей перерізів схеми та оцінки на їх основі допустимості потокорозподілу у кожній із схем індивідуальних систем енергопостачання інтегрованої енергетичної системи.

Моделі електричної та теплової мереж представляють відповідні схеми, зв'язки між вузлами в яких задані їх пропускними здібностями. При цьому в нормальному режимі потокорозподіл у схемах індивідуальних систем енергопостачання може розглядатися незалежно для кожної системи, крім випадків недостатньої пропускної здатності зв'язків у будь-якій із схем. У разі виникнення таких ситуацій доцільно розглянути можливості резервування за рахунок інших систем, що входять до інтегрованої системи енергопостачання.

Для схем довільної зміни у сенсі надійності виникає завдання визначення станів працездатності та станів відмови щодо вузла. Елементи, що входять до таких станів, утворюють шляхи та перерізи схеми. Показники структурної надійності насамперед визначаються в окремих вузлах (груп вузлів) і зв'язків системи.

Необхідним етапом розрахунку показників структурної надійності складних систем є визначення шляхів та перерізів схеми щодо вузлів (вузла) навантаження. Застосування принципу вимушеного перетину максимально незалежних шляхів створює як можливість визначення перерізів обмеженого порядку, а й дозволяє здійснювати декомпозицію складних структур щодо надійності, щодо вузлів навантаження.

Для ілюстрації методу оцінки допустимості потокорозподілу розглядається електрична схема з 7 вузлами (рис. 2.6).

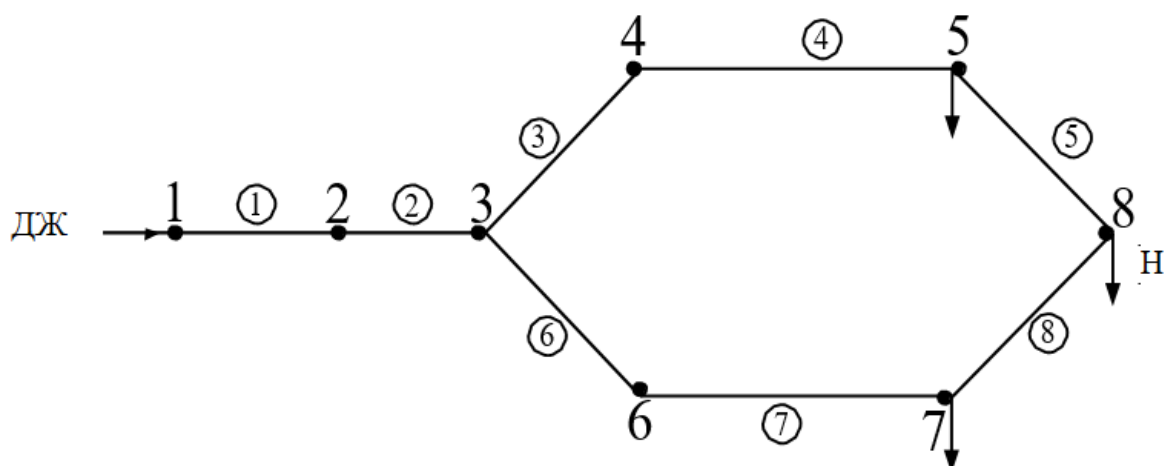


Рисунок 2.6 – Тестова електрична схема

Є одне джерело живлення (ДЖ). Вузол 8, що поєднує всі навантаження (Н), введений додатково. Лінії до додаткового вузла навантаження на рис. 2.6 позначені пунктиром. Їхня пропускна здатність дорівнює величині перенесеної в додатковий вузол навантаження. Зв'язки між вузлами задаються їх пропускними здібностями. Відповідність нумерації зв'язків (гілок) та вузлів представлена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Відповідність номерів зв'язків та вузлів

Номер зв'язків	Номери вузлів
①	1, 2
②	2, 3
③	3, 4
④	4, 5
⑤	5, 8
⑥	3, 6
⑦	6, 7
⑧	7, 8

Для розрахунку станів відмови та безвідмовної роботи схеми використано метод визначення мінімальних перерізів [13, 16]. Визначаються

можливі перерізи по матриці шляхів між джерелом живлення та вузлом сумарного навантаження.

Шляхами схеми щодо вузла (вузлів) навантаження називаються мінімальні сукупності елементів, безвідмовні стани яких (у будь-якій із сукупностей) забезпечують безвідмовний стан схеми (передачу електроенергії, газу та ін.) щодо вузла.

Мінімальними перерізами схеми називаються сукупності мінімального набору елементів, відмови яких у будь-якій із сукупностей призводять до стану відмови схеми (припинення передачі електроенергії або інших видів енергії) щодо вузла. Іншими словами, шлях від джерела живлення до вузла – це мінімальний набір елементів схеми, який забезпечує один із можливих самостійних варіантів виконання завдання – передачі електроенергії у вузол навантаження. Мінімальні перерізи щодо вузла навантаження – це той мінімальний набір елементів схеми, відмова яких призводить до відмови системи щодо вузла, тобто до припинення передачі електроенергії, або тепла, або газу та ін.

Між шляхами схеми та перерізами є взаємно однозначна відповідність. Знаючи склад шляхів, можна визначити склад перерізів схеми.

Всі шляхи та перерізи схеми необхідно подати у вигляді відповідних матриць. Стовпці матриці відповідають елементам, рядки відповідають коліям. Якщо елемент i входить у переріз j , то ставиться 1, інакше – 0.

Матриця шляхів виходить безпосередньо з розгляду схеми. Шляхи на рис. 2.7 на схемі позначені зеленим кольором.

З аналізу матриці можна зробити два важливі висновки:

1. Якщо елемент входить до складу всіх шляхів, він утворює одноелементний перетин (будь-який i -й елемент входить до складу шляху, отже, він утворює i -й перетин).

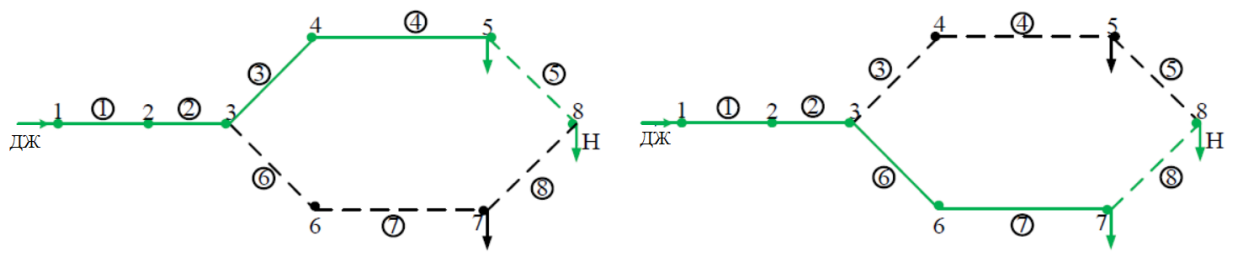


Рисунок 2.7 – Шляхи схеми

Матриця шляхів

Номери зв'язків	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Номери шляхів	1-2	2-3	3-4	4-5	5-8	3-6	6-7	7-8
$P1$	1	1	1	1	1	0	0	0
$P2$	1	1	0	0	0	1	1	1

$$P = \begin{bmatrix} P1 \\ P2 \end{bmatrix}$$

2. Якщо елемент входить до складу всіх перерізів, він утворює шлях.

На основі цих висновків можна отримати правило взаємного переходу від шляхів до перерізів та навпаки. Для виявлення одноелементних перерізів по матриці шляхів достатньо виявити її стовпець, що складається з одних одиниць (перетин усіх шляхів в одному елементі). Двохелементні перерізи виходять в результаті логічного складання двох будь-яких стовпців матриці шляхів (перетин усіх шляхів у двох елементах). Якщо в результаті виходить стовпець, що складається з одних одиниць, ці два елементи утворюють двоелементний переріз. Триелементні перерізи виходять в результаті логічного додавання трьох стовпців (перетин усіх шляхів у трьох елементах) і т.д.

Для розрахунку застосовуємо правила логічного додавання:

$$\left. \begin{aligned} 0 \vee 0 &= 0; \\ 0 \vee 1 &= 1; \\ 1 \vee 0 &= 1; \\ 1 \vee 1 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

З матриці видно, що зв'язки ① та ② утворюють одноелементні перерізи. Складаючи поелементно стовпці, що містять 1, отримаємо двоелементні перерізи. Отримані перерізи представлені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Перерізи

Умова	Номер зв'язку
Не утворюють перерізу	③ та ④; ③ та ⑤; ④ та ⑤; ⑥ та ⑦; ⑦ та ⑧
Утворюють перерізи	①; ②; ③ та ⑥; ③ та ⑦; ③ та ⑧; ④ та ⑥; ④ та ⑦; ④ та ⑧; ⑤ та ⑥; ⑤ та ⑦; ⑤ та ⑧

З розрахунку випливає: у схемі є 2 шляхи. Усього вийшло 11 перерізів. Визначилося 2 одноелементних перерізів (1–2, 2–3) та 9 двоелементних перерізів. Схема з ілюстрацією перерізів набуде наступного вигляду (рис. 2.8):

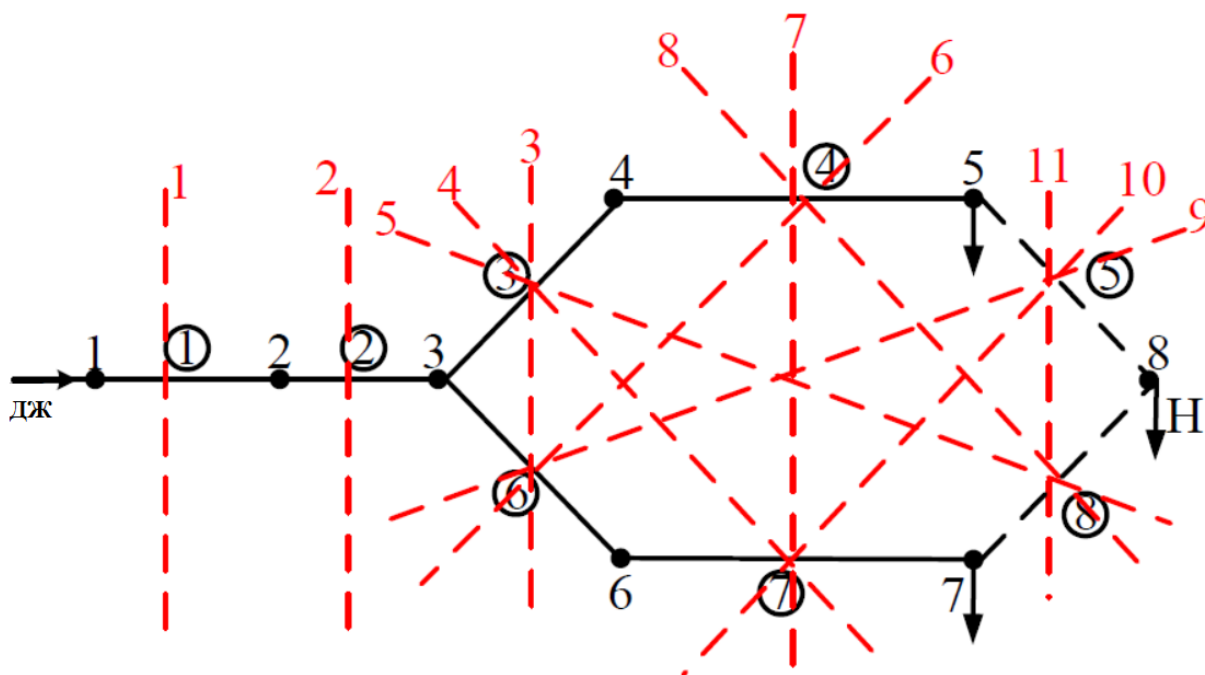


Рисунок 2.8 – Отримані перерізи електричної схеми

Далі складаємо матрицю перерізів:

Номери зв'язків	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Номери вузлів	1-2	2-3	3-4	4-5	5-8	3-6	6-7	7-8
C1	1	0	0	0	0	0	0	0
C2	0	1	0	0	0	0	0	0
C3	0	0	1	0	0	1	0	0
C4	0	0	1	0	0	0	1	0
C5	0	0	1	0	0	0	0	1
C6	0	0	0	1	0	1	0	0
C7	0	0	0	1	0	0	1	0
C8	0	0	0	1	0	0	0	1
C9	0	0	0	0	1	1	0	0
C10	0	0	0	0	1	0	1	0
C11	0	0	0	0	1	0	0	1

Далі проводиться оцінка надійності мережі за перерізами. Дані пропускнуї здатності зв'язків представлені в матриці, (кВт):

Номери зв'язків	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Номери вузлів	1-2	2-3	3-4	4-5	5-8	3-6	6-7	7-8
C1	25	0	0	0	0	0	0	0
C2	0	21	0	0	0	0	0	0
C3	0	0	15	0	0	12	0	0
C4	0	0	15	0	0	0	13	0
C5	0	0	15	0	0	0	0	10
C6	0	0	0	10	0	12	0	0
C7	0	0	0	10	0	0	13	0
C8	0	0	0	10	0	0	0	10
C9	0	0	0	0	10	12	0	0
C10	0	0	0	0	10	0	13	0
C11	0	0	0	0	10	0	0	10

Для оцінки достатності пропускнуї спроможності від джерела живлення (ДЖ) до навантаження (Н) необхідно перевірити умову:

$$\forall Ck : k \in K \left| \sum_{i,j \in I} P_{ij}^k \geq P_H, \right. \quad (2.2)$$

де K – число перерізів; k – номер перерізу, C_k – переріз; i, j – номери вузлів, P_{ij} – пропускна спроможність зв'язку; P_H – сумарне навантаження мережі, I – кількість вузлів.

Якщо умова виконується, мережа працездатна.

$$P_H = 10 + 10 = 20 \text{ кВт.}$$

Розрахунок пропускних здібностей перерізів:

$$P_1 = 25 \text{ кВт};$$

$$P_2 = 21 \text{ кВт};$$

$$P_{3,6} = 15 + 12 = 27 \text{ кВт};$$

$$P_{3,7} = 15 + 13 = 28 \text{ кВт};$$

$$P_{3,8} = 15 + 10 = 25 \text{ кВт};$$

$$P_{4,6} = 10 + 12 = 22 \text{ кВт};$$

$$P_{4,7} = 10 + 13 = 23 \text{ кВт};$$

$$P_{4,8} = 10 + 10 = 20 \text{ кВт};$$

$$P_{5,6} = 10 + 12 = 22 \text{ кВт};$$

$$P_{5,7} = 10 + 13 = 23 \text{ кВт};$$

$$P_{5,8} = 10 + 10 = 20 \text{ кВт.}$$

Для пропускних здібностей всіх перерізів виконується умова (7). Отже, потокорозподіл у схемі існує, тобто не досягаються обмеження щодо пропускної спроможності зв'язків.

У загальному вигляді алгоритм методу шляхів та перерізів представлений блок-схемою на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 – Алгоритм методу шляхів та перерізів при оцінці структурної надійності схеми енергопостачання

Далі для радіальної схеми провадиться розрахунок дефіцитів потужності. Відмова введених додатково зв'язків із вузлом сумарного навантаження не враховується, оскільки вони штучні.

Оцінка структурної надійності схеми за критерієм $n-1$ методом шляхів та перерізів:

$$P_d^n = P_H - \left\{ \forall C_k^n : k^n \in K^n \left| \sum_{i,j \in I} P_{ij}^{kn} \right. \right\}, n = \overline{1, N}, \quad (2.3)$$

де P_d^n – дефіцит потужності при відмові зв'язку n , K – число перерізів, N – число зв'язків, I – кількість вузлів.

Сумарний показник структурної надійності за критерієм $n-1$:

$$P_d^n = \sum_{n=1}^N P_d^n. \quad (2.4)$$

Середня частота відмов системи, що складається з n послідовно з'єднаних у сенсі надійності незалежних елементів, дорівнює сумі частот відмов її елементів [5]:

$$\omega = \sum_{n=1}^N \omega_i \quad (2.5)$$

де ω – частота стійких відмов, n – елементи системи.

Ризик відмови зв'язків системи розраховується за такою формулою:

$$R = \sum_{n=1}^N \omega_i \cdot \sum_{n=1}^N P_d^n \quad (2.6)$$

R – ризик відмови зв'язків системи.

Крім методу, запропонованого Ю. А. Фокіним та адаптованого для визначення шляхів та перерізів у схемі при аналізі структурної надійності ЕЕС [16] пропонується використовувати розроблений топологічний метод аналізу шляхів енергопостачання для оцінки структурної надійності радіальної енергетичної мережі за критерієм $n-i$.

2.4 Топологічний метод аналізу шляхів енергопостачання з метою оцінки структурної надійності радіальної енергетичної мережі за критерієм $n-i$

Топологічний метод аналізу шляхів енергопостачання для оцінки надійності радіальної енергетичної мережі за критерієм $n-i$ полягає у визначенні топології зв'язків схеми для подальшого визначення місця де утворюється дефіцит потужності в системі при відмові лінії.

Для визначення топології зв'язків у мережі та визначення дефіцитів потужності мережі при відмові лінії реалізовано алгоритм, представлений на рис. 2.10.

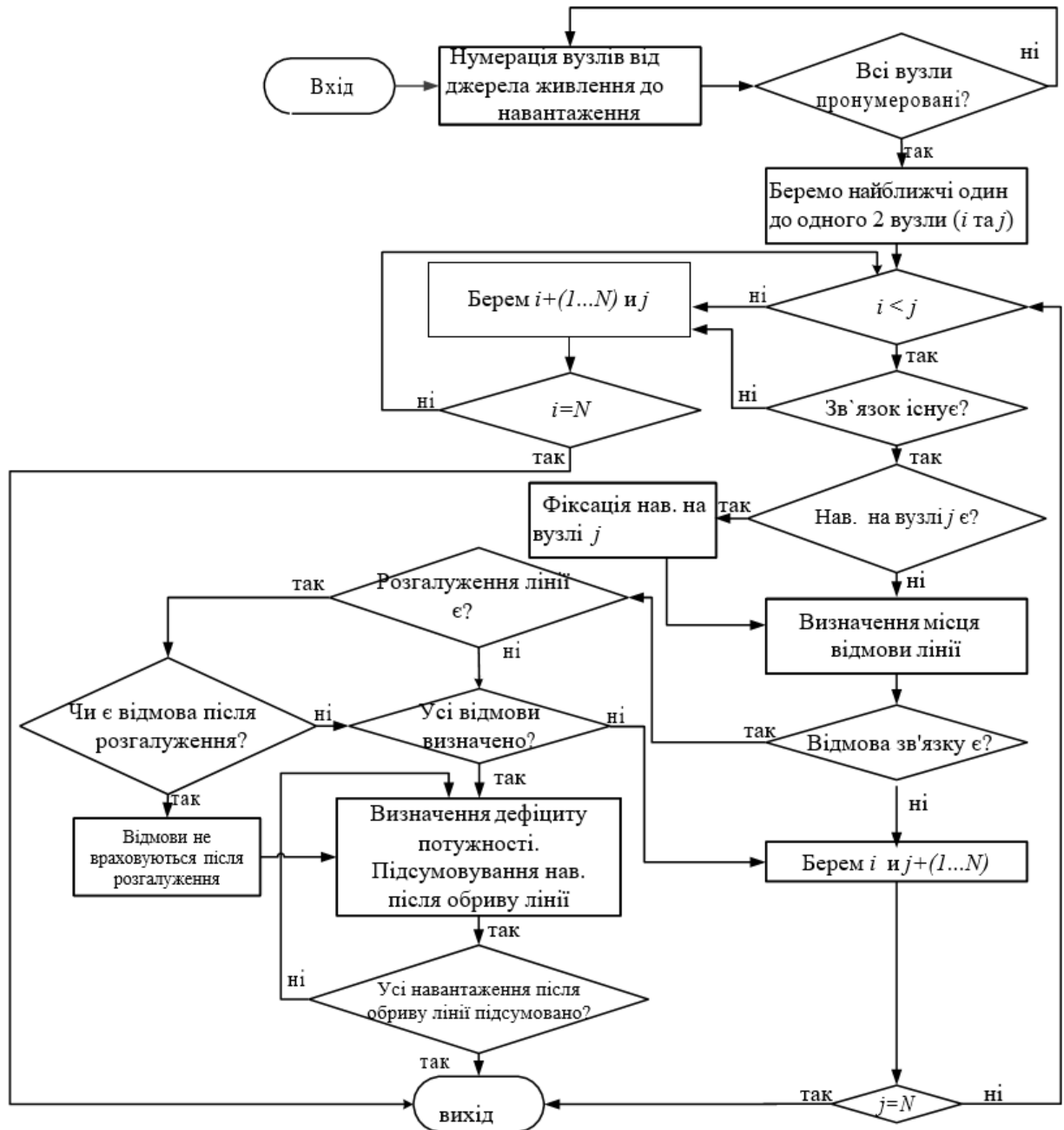


Рисунок 2.10 – Топологічний метод аналізу шляхів енергопостачання

Необхідно врахувати таке:

1. Нумерація зв'язків джерела живлення до навантажень від 1 до n .

2. Якщо є два і більше номери, що повторюються у зв'язку, то прийняти це місце за розгалуження схеми.

3. Проводити аналіз у бік збільшення нумерації вузлів.

Необхідно пронумерувати вузли від джерела живлення до навантаження ($n = \overline{1, N}$), де n – число елементів мережі. Коли всі вузли пронумеровані, необхідно скласти топологію зв'язків мережі. Для цього необхідно взяти найближчі два номери вузлів зв'язку, де перший номер прийняти за i , другий за j . Перевірити умову існування зв'язку; якщо зв'язок існує, перевірити наявність навантаження та зафіксувати його. Далі визначити, чи відключено цю лінію. Якщо відключення немає, перебором виконується пошук усіх можливих зв'язків при додаванні кожної наступної ітерації $i+1$ і $j+1$. Робота алгоритму вважається закінченою, коли i, j дорівнюють останньому елементу системи N . Якщо виявляється відключення лінії, то тоді підсумовуються всі зафіксовані навантаження після цього зв'язку.

Також необхідно врахувати, що є два випадки визначення дефіцитів навантаження у радіальній схемі:

1. Якщо відключення ліній визначено до розгалуження лінії, то дефіцит потужності визначається сумою навантажень після розгалуження.

2. Якщо відключення ліній визначено після розгалуження лінії, то дефіцит потужності визначається сумою навантаження після кожного елемента, що відмовив.

Розглянемо цей алгоритм на простій радіальній схемі, представлений на рис. 2.11.

Нумеруємо вузли джерела живлення до навантажень від 1 до n . Розглянемо два випадки:

Вимкнення лінії до розгалуження та відключення ліній після розгалуження (рис. 2.12).

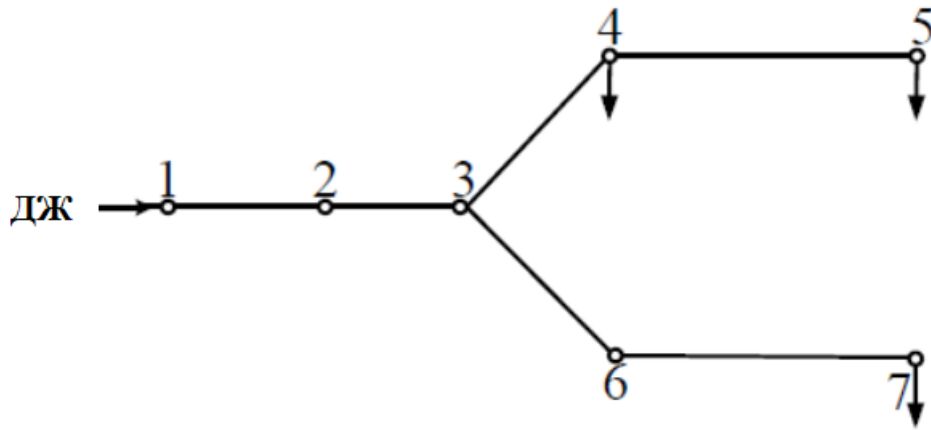


Рисунок 2.11 – Схема електропостачання

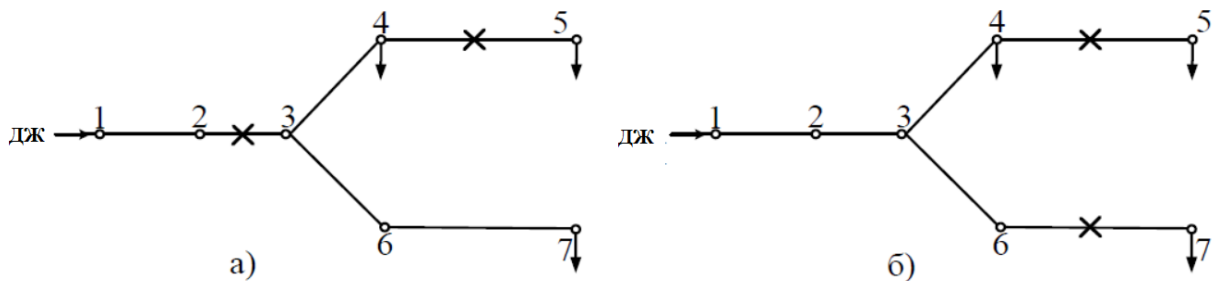


Рисунок 2.12 – Випадки відмов у мережі: а – відмови до розгалуження лінії та після; б – відмови після розгалуження лінії

Приймемо навантаження (P) у кожному вузлі 10 кВт. Відповідно до алгоритму, визначаємо місця відключень, фіксацію навантаження та місця розгалуження ліній.

Визначаємо дефіцити потужності мережі. Дефіцит потужності у першому випадку (а):

$$P_d = 10 + 10 + 10 = 30 \text{ кВт}$$

Дефіцит потужності у другому випадку (б):

$$P_d = 10 + 10 = 20 \text{ кВт}$$

Таким чином, топологічний метод аналізу шляхів енергопостачання визначає топологію мережі та дефіцити потужності мережі у радіальній схемі та може бути альтернативним підходом визначення місць дефіцитів методу шляхів та перерізів для радіальної схеми.

2.5 Алгоритм конструювання імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи

Загальний підхід до конструювання імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи та вирішення різних завдань з її допомогою може бути представлений наступним чином [6]:

а) Вихідна інформація про досліджувану інтегровану енергетичну систему задається у вигляді матриць параметрів зв'язків електричної мережі (їх електричних опорів або пропускних здібностей цих зв'язків) з прив'язкою цих зв'язків до конкретних номерів вузлів, а також векторів параметрів вузлів (навантаження, генерація енергії, накопичувачі енергії та ін.).

б) Для формування імітаційної моделі інтегрованої системи використовуються дві бібліотеки моделей елементів: бібліотека стандартних моделей ЛЕП та ін., що міститься у складі програмного середовища MATLAB/Simulink, та бібліотека спеціально розроблених на основі концепції енергетичного хабу додаткових моделей елементів.

в) Алгоритм конструювання імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи послідовно на основі аналізу топології кожної з енергетичних систем, що становлять інтегровану систему, вибирає, залежно від типу елемента, з бібліотеки стандартних моделей або з бібліотеки додаткових моделей необхідну модель цього елемента та пристиковує її до потрібного вузла формуємої системи.

г) Розроблені додаткові моделі, що містять декілька входів і кілька виходів, представляють вузли, що генерують (живлять) (ТЕЦ) або навантажувальні вузли, що включають взаємопов'язане споживання декількох альтернативних видів енергії. Ці вузли пов'язують окремі енергетичні системи на єдину інтегровану систему.

д) При вирішенні деяких завдань потрібна додаткова до наведеної в пункті а) інформація. Для таких завдань потрібна відповідна модифікація сформованої імітаційної моделі.

Моделювання електричної мережі можна проводити типовими моделями із бібліотеки Simulink. Усередині енергетичного хаба, виходячи з вищенаведеної інформації, застосовуються спеціально розроблені блоки.

Система MATLAB має у своєму складі об'єктно-орієнтовану мову програмування, що дозволяє автоматизувати створення складних імітаційних моделей енергетичних систем різними каналами енергопостачання з урахуванням основних положень концепції енергетичного хаба. Основні складові алгоритму конструювання імітаційних моделей під час використання мови системи MATLAB представлені на рис. 2.13.

На вході аналізується, чи моделі систем сформовані. Якщо моделі всіх систем сформовано, аналіз завершується. Якщо моделі систем не сформовані, переходимо до наступного кроку «Налаштування алгоритму для формування моделі системи». Моделі систем формуються з існуючих баз даних енергетичних систем, таких як електро-, тепло-, газопостачання та інші енергосистеми. Після налаштування алгоритму проводиться пошук першого та наступних елементів системи. Наступним кроком є визначення типу системи. Якщо модель елемента стандартна, блоки елементів систем моделюються з бібліотеки стандартних елементів моделей MATLAB/Simulink. У разі нестандартної моделі елемента системи стикування хабівської моделі елементів виконується з додаткової бібліотеки елементів MATLAB/Simulink, створеної на основі концепції енергетичного хабу. Здійснюється фіксація розташування елементів моделі. Далі відбувається перевірка сформованості всіх елементів систем. Якщо не всі елементи знайдені, відбувається повернення до кроку «Пошук чергового елемента системи». Коли моделі всіх систем сформовані, то імітаційна модель побудована.

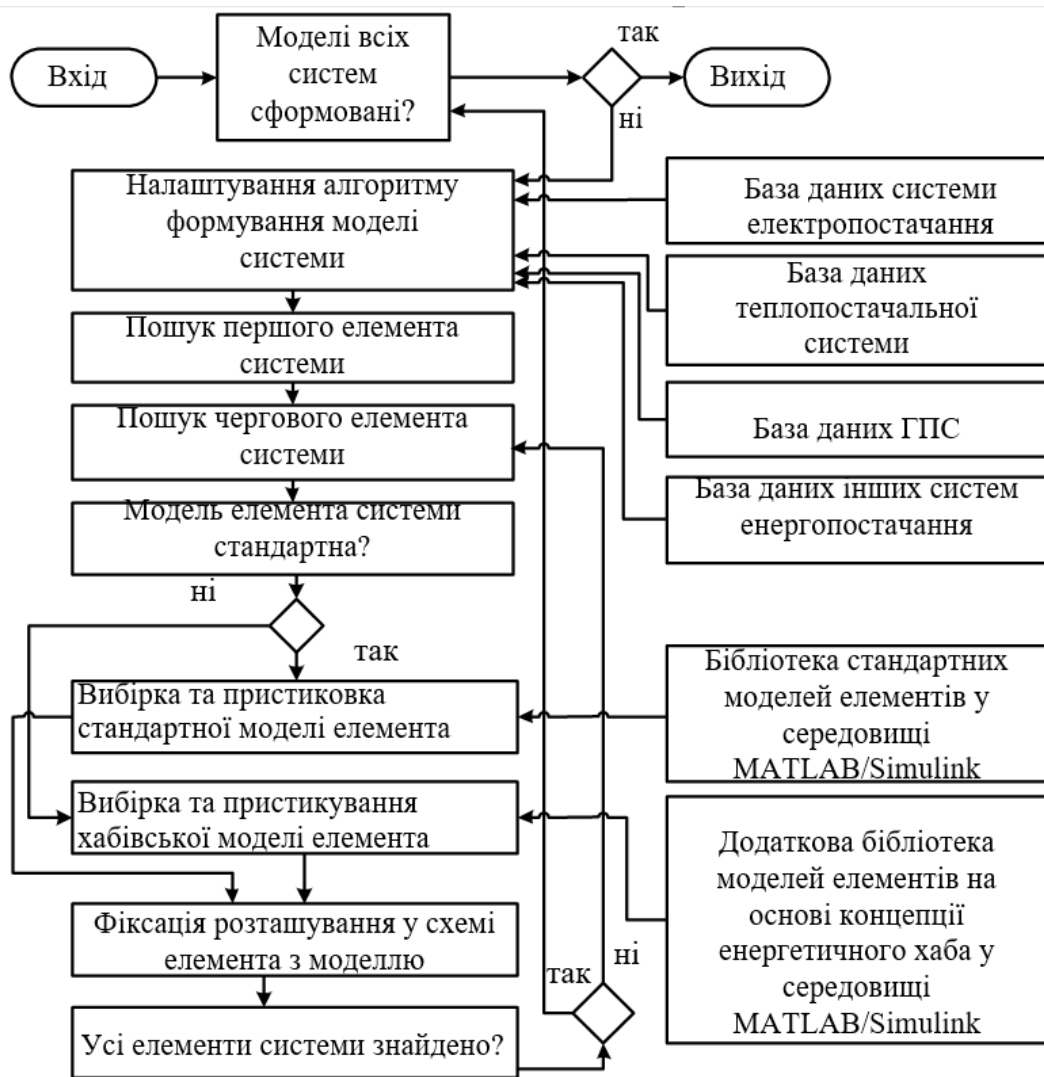


Рисунок 2.13 – Алгоритм конструювання імітаційних моделей у середовищі MATLAB/Simulink

На рис. 2.14 представлений приклад поєднаної схеми двома каналами енергопостачання [6]. Тут чорною лінією позначений канал теплової мережі, сірий – канал електричної мережі. Квадрат означає місце хаба.

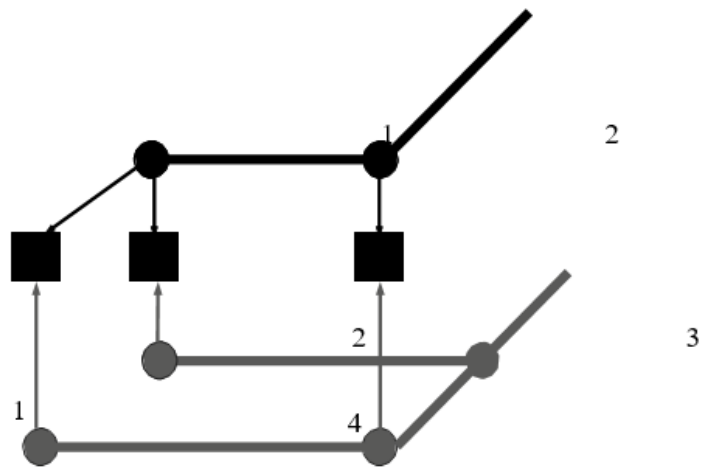


Рисунок 2.14 – Поєднана схема з двох каналів енергопостачання

Як видно з рис. 2.14, до одного споживача надходить відразу два канали енергії. При використанні систем накопичення та систем перетворення електричної енергії на теплову в даних вузлах суміщеної схеми для розрахунку режимів енергопостачання доцільно застосувати концепцію енергетичного хаба.

Для побудови імітаційної моделі скористаємося компонентами пакету «Sim Power Systems» середовища MATLAB. Імітацію зв'язків «джерело – лінія – навантаження» здійснюємо блоками зі стандартної бібліотеки «Simscape» та блоками із створеної додаткової бібліотеки «Multienergy». Для наочності вузли представлені блоками Subsystem (рис. 2.15).

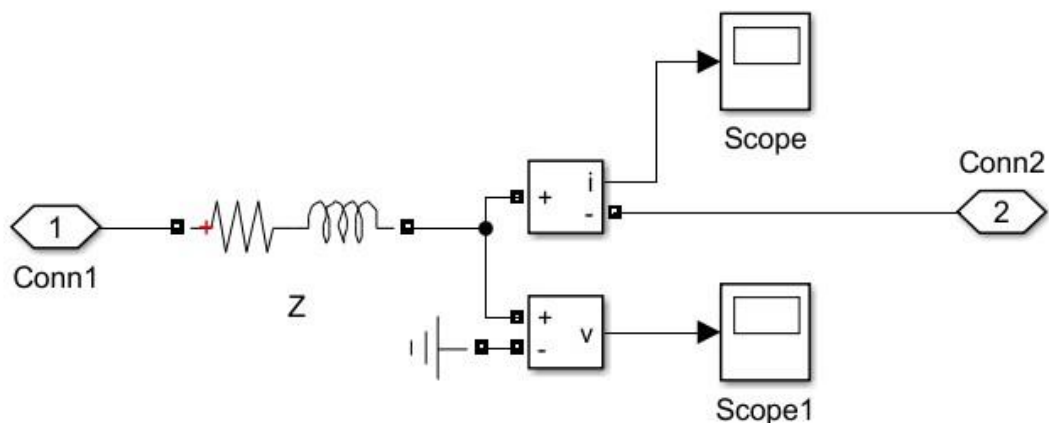


Рисунок 2.15 – Блок вузла Subsystem

Для побудови схеми Matlab, за допомогою стандартних блоків конструюються основні елементи схеми (рис. 2.16). Встановлюються необхідні вихідні параметри. Прописується розташування блоків через функцію «position».

```
%Добавка основных блоков:
add_block('Multienergy/Ground','sys_ktn/Ground_1'); %блок "земля"
set_param('sys_ktn/Ground_1','position',[50,190,80,230]);

add_block('Multienergy/AC_V','sys_ktn/AC_V_1'); %блок "Источник"
set_param('sys_ktn/AC_V_1','position',[150,195,180,235]);
set_param('sys_ktn/AC_V_1','Amplitude',strcat(num2str(Ampl),'*sqrt(2)'));
set_param('sys_ktn/AC_V_1','frequency','50');
Ground_1Handles = get_param('sys_ktn/SeriesGround_1','PortHandles')
AC_V_1PortHandles = get_param('sys_ktn/AC_V_1','PortHandles')
add_line('sys_ktn',Ground_1PortHandles.RConn(1), AC_V_1PortHandles.LConn(1));
```

Рисунок 2.16 – Додавання основних блоків схеми

Використовуючи топологічний метод аналізу шляхів енергопостачання, було запрограмовано цикл побудови вузлів (рис. 2.17).

```
for k = 1:length(i)
    if Pij(k)~=0 % не равно нулю
        %Блок последующего узла
        %add_block('Multienergy/Subsystem',['sys_ktn/Subsystem_',num2str(j(k))]);
        %Считываем позицию текущего блока:
        pos = get_param(['sys_ktn/Subsystem_',num2str(i(k))],'position');
        pos([2,4]) = pos([2,4]) + 100; % поднимаем на 100 пикселей
        set_param(['sys_ktn/Subsystem_',num2str(i(k))],'position',pos);
        Subsystem_iPortHandles = get_param(['sys_ktn/Subsystem_',num2str(i(k))],'PortHandles');
        Subsystem_jPortHandles = get_param(['sys_ktn/Subsystem_',num2str(j(k))],'PortHandles');
        add_line('sys_ktn',Subsystem_iPortHandles.RConn(1), Subsystem_jPortHandles.LConn(1));
    end
    if Pij(k)==0 % равно нулю
    end
    if j(k) <= i(k)
    end
end
```

Рисунок 2.17 – Цикл побудови вузлів у MATLAB

З'єднання вузлів було додано через функцію add_line. Розташування вузла прописано через функцію «position», де кожен блок було зсунуто на 100 пікселів. Після побудови мережі позиції були скориговані вручну для кращого відображення. Джерело електроенергії представлено блоком AC_V,

навантаження у вузлах представлено блоком Load. Для додавання навантаження було окремо прописано код кожного вузла (рис. 2.18).

```
%Нагрузка на 5 узле
add_block('Multienergy/Series RLC Load','sys_ktn/SeriesRLCLoad_1');
set_param('sys_ktn/SeriesRLCLoad_1','position',pos);
SeriesRLCLoad_1PortHandles = get_param('sys_ktn/SeriesRLCLoad_1','PortHandles')
Subsystem_5PortHandles = get_param('sys_ktn/Subsystem_5','PortHandles')
add_line('sys_ktn',Subsystem_5PortHandles.RConn(1), SeriesRLCLoad_1PortHandles.LConn(1));
```

Рисунок 2.18 – Додавання блоку навантаження

На рис. 2.19 представлена імітаційна модель тестової електричної схеми, отримана при побудові в середовищі MATLAB/Simulink.

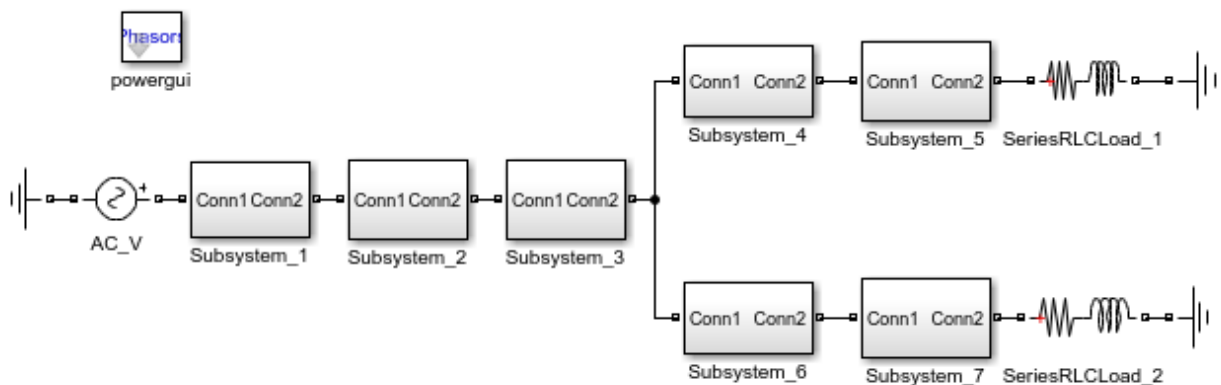


Рисунок 2.19 – Імітаційна модель тестової електричної схеми

З результатів моделювання випливає, що алгоритм конструювання імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink може бути використаний для програмування імітаційних моделей серед MATLAB/Simulink.

В результаті моделювання в середовищі MATLAB/Simulink можна побудувати моделі різних систем енергопостачання та за допомогою блоків перетворення та накопичення енергії застосувати концепцію енергетичного хаба.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Моделювання інтегрованих енергетичних систем є прогресивною тенденцією у розвитку систем енергопостачання. Спільний розгляд окремих енергетичних систем призводить до підвищення економічної ефективності та надійності енергопостачання споживачів. Концепція енергетичного хаба є способом моделювання інтегрованих енергетичних систем.

У другому розділі представлено узагальнену схему методичного підходу до імітаційного моделювання інтегрованих енергетичних систем з використанням концепції енергетичного хаба. Розглянуто методичні засади побудови імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи.

Новий методичний підхід ґрунтується на можливостях програмного забезпечення MATLAB/Simulink з урахуванням елементів концепції енергетичного хаба. Основна ідея пропонованого підходу полягає у побудові імітаційної моделі інтегрованої енергосистеми з урахуванням моделей простих типових елементів із бібліотеки MATLAB/Simulink та складних моделей енергетичного хабу з додаткової бібліотеки. Наведено приклад реалізації поєднаної схеми двома каналами енергопостачання, враховується особливості імітаційного моделювання в системі MATLAB/Simulink.

Використано метод пошуку шляхів та перерізів для вирішення задачі визначення пропускних здібностей перерізів схеми та оцінки на їх основі допустимості потокорозподілу у кожній із схем індивідуальних систем енергопостачання інтегрованої енергетичної системи. Аналіз надійності системи електропостачання щодо вузла навантаження для тестової схеми показав, що система є надійною. Розроблено алгоритм конструювання імітаційної моделі під час використання мови системи MATLAB.

З урахуванням різноманіття засобів для реалізації завдання імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи зроблено висновок про доцільність використання імітаційного підходу під час функціонування та вирішення завдань із застосуванням розроблених комп'ютерних засобів.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської роботи досягнуто поставленої мети: розроблено методичні основи та методи імітаційного моделювання інтегрованих енергетичних систем на основі концепції енергетичного хаба та потокових методів, продемонстровано на прикладах різних завдань технологію імітаційного моделювання цих систем з використанням програмного середовища MATLAB/Simulink.

Виконано поставлені завдання досліджень:

Виконано аналіз стану досліджень інтегрованих енергетичних систем та аналіз існуючих моделей для вирішення різних завдань розвитку та функціонування інтегрованих енергетичних систем. Виконано обґрунтування необхідності розробки методу моделювання інтегрованих енергетичних систем.

Розроблено методичні засади імітаційного моделювання та розроблено метод конструювання імітаційної моделі інтегрованих енергетичних систем з використанням концепції енергетичного хаба та потокових методів. Розглянуто методичні засади імітаційного моделювання енергетичного хаба у середовищі MATLAB/Simulink та на основі цих принципів розроблено алгоритм конструювання імітаційної моделі енергетичного хаба.

Основна ідея пропонованого підходу полягає у побудові імітаційної моделі інтегрованої енергосистеми з урахуванням моделей простих типових елементів із бібліотеки MATLAB/Simulink та складних моделей енергетичного хаба з додаткової бібліотеки, а також потокових методів у мережах. Алгоритм конструювання імітаційної моделі інтегрованої енергетичної системи показує можливість побудови імітаційних моделей у MATLAB/Simulink.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Beccuti G. Energy hub modelling and optimisation: an analytical case-study / G. Beccuti, T. Demiray, M. Batic N. Tomasevic, S. Vranes //2015 IEEE Eindhoven PowerTech. – IEEE, 2015. – pp. 1-6.
2. Carvalho M. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints / M. Carvalho, L.M. Serra, M.A. Lozano //Energy. – 2011. – vol. 36. – № 6. – pp. 3779-3790.
3. Dababneh F. Integrated Electricity and Natural Gas Demand Response for Manufacturers in the Smart Grid / F. Dababneh, L. Li //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – vol. 10. – № 4. – pp. 4164-4174.
4. Demetriou P. System splitting strategy considering power system restoration / P. Demetriou, A. Kyriacou, E. Kyriakides, C. Panayiotou //2017 IEEE Manchester PowerTech. – IEEE, 2017. – pp. 1-6.
5. Hashimov A. M. Voltage Stability Problem for GRID with Distribution Generation and Renewable Sources / A. M. Hashimov, N.R. Rahmanov S.T. Ahmedova, A.A. Mustafayev // Proceedings of the 11th International Conference on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering, ICTPE-2015 (Bucharest, Romania). – 2015. – pp. 159-165.
6. Jayasuriya L. Energy hub modelling for multi-scale and multi-energy supply systems / L. Jayasuriya, M. Chaudry, M. Qadrdan, J. Wu, N. Jenkins //2019 IEEE Milan PowerTech. – IEEE, 2019. – pp. 1-6.
7. Katsavounis K. Comparative study of integrated energy system modelling / K. Katsavounis, P. Hou, W. Hu, Z. Chen //2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). – IEEE, 2017. – pp. 1-6.
8. Li G. Researches on the reliability evaluation of integrated energy system based on Energy Hub / G. Li, Y. Kou, J. Jiang, Y. Lin, Z. Bie //2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). – IEEE, 2016. – pp. 1-9.

9. Li P. A Lyapunov Optimization-based energy management strategy for energy hub with energy router / P. Li, W. Sheng, Q. Duan, Z. Li, C. Zhu, X. Zhang //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – vol. 11. – № 6. – pp. 4860-4870.

9. Lu S. Hydraulic-thermal cooperative optimization of integrated energy systems: a convex optimization approach / S. Lu, W. Gu, C. Zhang, K. Meng, Z. Dong //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – vol. 11. – № 6. – pp. 4818-4832.

10. Lu S. Thermal inertial aggregation model for integrated energy systems / S. Lu, W. Gu, K. Meng, S. Yao, B. Liu, Z.Y. Dong //IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. – vol. 35. – № 3. – pp. 2374-2387.

11. Ma T. Energy flow modeling and optimal operation analysis of the micro energy grid based on energy hub / T. Ma, J. Wu, L. Hao //Energy conversion and management. – 2017. – vol. 133. – pp. 292-306.

12. Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models / P. Mancarella //Invited Paper, Energy, under Review. - February 2014. – vol.65 - pp. 1–17.

13. Manshadi S. D. Coordinated operation of electricity and natural gas systems: A convex relaxation approach / S.D. Manshadi, M.E. Khodayar //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – vol. 10. – № 3. – pp. 3342-3354.

14. Maroufmashat A. Design and operation of a multicarrier energy system based on multi objective optimization approach / A. Maroufmashat, S. S. Khavas, H. Bakhteeyar //matrix. – 2014. – vol. 100. – P. 21.

15. Mayorov G. Application of the multiagent approach to the research of integrated energy supply systems / G. Mayorov, V. Stennikov, E. Barakhtenko //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – vol. 114. – P. 1006.

16. Mohammadi F. Multidimensional scenario selection for power systems with stochastic failures / F. Mohammadi, M. Sahraei-Ardakani //IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. – vol. 35. – № 6. – pp. 4528-4538.

17. Oikonomou K. Optimal coordinated operation of interdependent power

and water distribution systems / K. Oikonomou, M. Parvania //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – vol. 11. – № 6. – pp. 4784-4794.

18. Romero R. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems / R. Romero, J.F. Franco, F.B. Leão, M.J. Rider, E.S. De Souza //IEEE Transactions on Power Systems. – 2015. – vol. 31. – № 2. – pp. 1259-1268.

19. Violante W. An energy management system for isolated microgrids with thermal energy resources / W. Violante, C.A. Cañizares, M.A. Trovato, G. Forte //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – vol. 11. – № 4. – pp. 2880-2891.

20. Xiang Y. An Explicit Formula Based Estimation Method for Distribution Network Reliability / Y. Xiang, Y. Su, Y. Wang, J. Liu, X. Zhang //IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019. – vol. 35. – № 4. – pp. 2109-2112.