

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ТА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ФЕРМЕРСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА ВІД МІНІ-ТЕЦ

Виконав студент VI курсу, групи ЕТм-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Білоус П.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан В.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М.Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Габрусев Г.В.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2022

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 83 сторінок, 59 ілюстрацій, 5 таблиць та 14 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес електропостачання та тепlopостачання фермерського господарства від міні-ТЕЦ.

Предмет дослідження – міні-ТЕЦ з теплоакumuлюючим резервуаром та регулятором напруги.

Метою кваліфікаційної роботи є: інтегрування міні-ТЕЦ в електричну розподільну мережу для регулювання напруги фермерського господарства та розробка моделі теплоакumuлюючого резервуару.

У роботі розглянуто: принцип роботи, будова та типи міні-ТЕЦ; розробка моделі міні-ТЕЦ; розробка моделі теплоакumuлюючого резервуару; інтегрування міні-ТЕЦ в електричну мережу; проектування контролера для регулювання напруги; розглянуто результати моделювання і зроблені відповідні висновки.

Ключові слова: МІНІ-ТЕЦ, КОГЕРАЦІЙНА УСТАНОВКА, ТЕПЛО-АКУМУЛЮЮЧИЙ РЕЗЕРВУАР, КОНТРОЛЕР НАПРУГИ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Розподілені ресурси та розподілена генерація.....	8
1.2 Міні-ТЕЦ.....	9
1.3 Види міні-ТЕЦ.....	10
1.4 Паливо для ТЕЦ	14
1.5 Висновки до розділу	21
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	22
2.1 Моделювання системи.....	22
2.2 Основи системної динаміки та моделювання динамічних систем...23	23
2.3 Підхід до моделювання.....	28
2.4 Модель міні-ТЕЦ.....	29
2.5 Модель теплоакumuлюючого резервуару.....	38
2.6 Режим роботи теплового вводу.....	40
2.7 Інтеграція в електричну мережу.....	42
2.8 Висновки до розділу.....	47
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	49
3.1 Регулювання напруги.....	49
3.2 Вплив впровадження міні-ТЕЦ.....	49
3.3 Розглянута система регулювання напруги.....	51
3.4 Конструкція контролера.....	54
3.5 Результати моделювання.....	56
3.6 Режим роботи регулятора напруги.....	63
3.7 Оцінка результатів моделювання для режимів роботи.....	69
3.8 Висновки до розділу	72

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	73
4.1 Заходи, які зменшують небезпеку виникнення вибухів та пожеж.....	73
4.2 Фізичні основи електробезпеки.....	75
4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів електроенергетики в воєнний час.....	76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	80
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	81
ДОДАТКИ	83

ВСТУП

Актуальність теми. Необхідно думати про систему енергопостачання, незалежну від обмеженої доступності викопних енергоресурсів. Побудова такої системи не є одномоментною процедурою і має довгострокову перспективу. Тому, з метою продовження терміну експлуатації викопних енергоресурсів та зменшення негативного навантаження на навколишнє середовище, необхідно підвищувати коефіцієнт корисної дії існуючих технологій. Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії є одним із способів підвищення ефективності виробництва електроенергії. Розвиток цієї технології для використання в малих установках передбачає все більше впровадження міні-ТЕЦ в електричну мережу, що є викликом для проектування та експлуатації цих систем.

Впровадження міні-ТЕЦ дозволяє зробити енергосистему більш децентралізованою, що в умовах війни є надійнішим варіантом енергозабезпечення та теплозабезпечення. В такому випадку ворогу не вдасться завдавати ракетними обстрілами настільки багато шкоди енергетиці як це відбувається зараз.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: інтегрування міні-ТЕЦ в електричну розподільну мережу для регулювання напруги фермерського господарства та розробка моделі теплоакumuлюючого резервуару.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналіз літературних джерел за темою роботи.
2. Розробка моделі теплоакumuлюючого резервуару.
3. Розглянути тип режиму роботи теплового вводу, та створити логічний блок управління для імітації цього режиму роботи.
4. Розробити приклад розподільчої мережі з урахуванням майбутніх сценаріїв впровадження теплових насосів на міні-ТЕЦ.
5. Розробка контролера напруги .
6. Моделювання та оцінка досліджуваних режимів роботи.

Об’єкт дослідження – процес електропостачання та теплопостачання фермерського господарства від міні-ТЕЦ.

Предмет дослідження – міні-ТЕЦ з теплоакумлюючим резервуаром та регулятором напруги.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дістав подальший розвиток підхід до інтеграції міні-ТЕЦ в електричну розподільчу мережу для виконання активної ролі в регулюванні напруги фермерського господарства.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано варіант розподільчої мережі з урахуванням майбутніх сценаріїв впровадження теплових насосів та міні-ТЕЦ, а також представлено схему інтеграції обох систем.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 7-8 грудня 2022 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (14 найменувань) та додатку.

Загальний обсяг текстової частини – 83 сторінок, 5 таблиць, 59 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Розподілені ресурси та розподілена генерація

В даний час типові енергосистеми працюють як централізовані системи генерації, де лише кілька великих генераторів, що працюють на газі, вугіллі або ядерній енергії, забезпечують електроенергією багато мільйонів споживачів, які підключені до мережі. З розвитком нових джерел енергії виробництво електроенергії стає все більш децентралізованим.

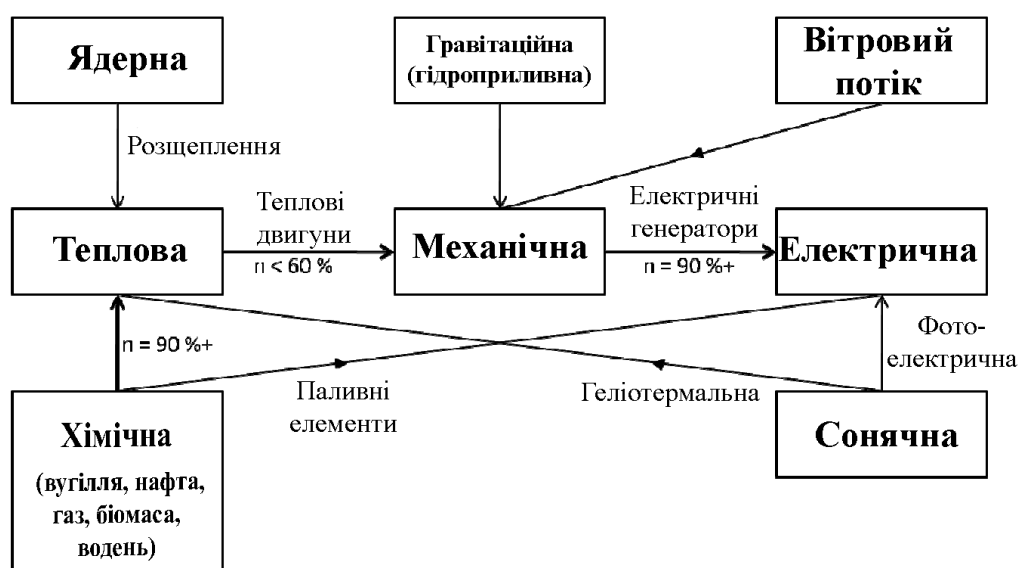


Рисунок 1.1 – Схема отримання електроенергії з різних джерел [2].

Різні способи перетворення різних джерел енергії в електроенергію проілюстровані на рис. 1.1. На сьогоднішній день більша частина електроенергії у світі виробляється за схемою, що описана жирними лініями. Тут відбувається перетворення енергії з хімічної в теплову, з теплової в механічну і, нарешті, в електричну. Одним з обмежень для цього способу перетворення є термодинамічний коефіцієнт корисної дії, позначений на схемі як η . Одним із шляхів підвищення ефективності є використання відпрацьованого тепла, що є принципом комбінованого виробництва теплової та електричної енергії (ТЕЦ). Ця технологія використовує відпрацьоване тепло, що утворюється при виробництві електроенергії, розподіляючи його через

теплові ланцюги для місцевої промисловості та/або житла. Зазвичай, для реалізації такої схеми потрібні значні зусилля в інфраструктурі, а тому вона є доцільною лише тоді, коли електростанція знаходиться близько до споживачів тепла. Розвиток міні-ТЕЦ передбачає можливість використання цієї технології там, де є потреба в теплі. Це дає значні переваги тому що не потрібно будувати складну теплову мережу [2].

Міні-ТЕЦ, малі генератори, що працюють на відновлюваних джерелах енергії, та резервні генератори, що працюють від мережі, позначаються як "Розподілені ресурси". Йдеться про малі генератори, які зазвичай підключаються до розподільчої мережі. При проектуванні існуючих електричних мереж враховується потік потужності від декількох великих електростанцій до споживача. Зростаюче впровадження розподілених ресурсів в цих електроенергетичних мережах передбачає нові питання в тому, як ці системи проектуються та експлуатуються [2].

1.2 Міні-ТЕЦ

При виробництві електроенергії виробляється також значна кількість теплової енергії. Використання цього тепла дозволяє максимально утилізувати первинну енергію. Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії є одним із способів досягнення цієї мети. Когенерація на великих електростанціях має такі недоліки, як втрати в ізоляції, високі вимоги до насосів та значна відстань від місця використання, тому існує необхідність використовувати цю технологію таким чином, щоб її можна було розмістити якнайближче до споживача тепла.

Під терміном "міні-ТЕЦ" розуміють конфігурацію елементів у блоці, де виробляється тепла та електрична енергія. Зазвичай цей блок складається з двигуна внутрішнього згоряння, який подає механічну енергію на генератор, що перетворює її в електричну. Відпрацьоване тепло двигунів об'єднується в тепловий контур і використовується для обігріву прилеглих будівель. Крім

двигунів внутрішнього згоряння, в міні-ТЕЦ можуть бути реалізовані й інші технології перетворення енергії. Перевагою для операторів міні-ТЕЦ є те, що вони можуть використовувати вироблену електроенергію для власного споживання або ж віддавати її безпосередньо в електричну мережу. Міні-ТЕЦ встановлюються в будівлях так само, як і котельня [3].

1.3 Види міні-ТЕЦ

Міні-ТЕЦ складається з основного двигуна, генератора, системи рекуперації тепла та електричного з'єднання між іншими елементами. Основний рушій, як правило, визначає тип технології міні-ТЕЦ. Основними двигунами для міні-ТЕЦ є поршневі двигуни, циліндричні двигуни, парові двигуни, мікротурбіни та паливні елементи. Короткий опис кожної технології наведено нижче.

Міні ТЕЦ з поршневим двигуном

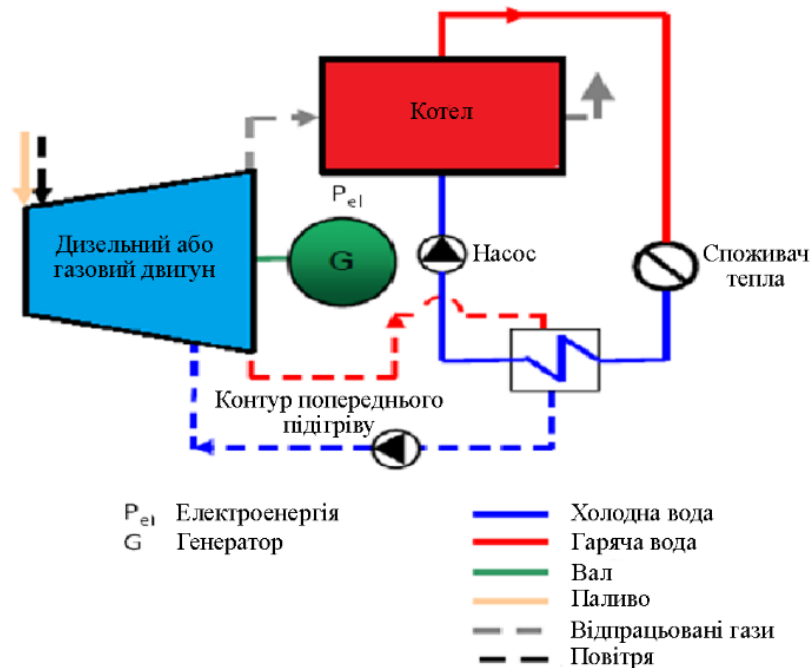


Рисунок 1.2 – Принцип роботи міні-ТЕЦ з поршневим двигуном [4].

Генератор перетворює механічну енергію, яка передається через вал, в електричну. Тепло, що утворюється при згорянні, використовується для підготовки процесу опалення. Відпрацьовані продукти згорання використовуються як джерело тепла для котла, який подає тепло в теплову мережу, як показано на рис. 1.2.

Міні ТЕЦ з двигуном Стірлінга

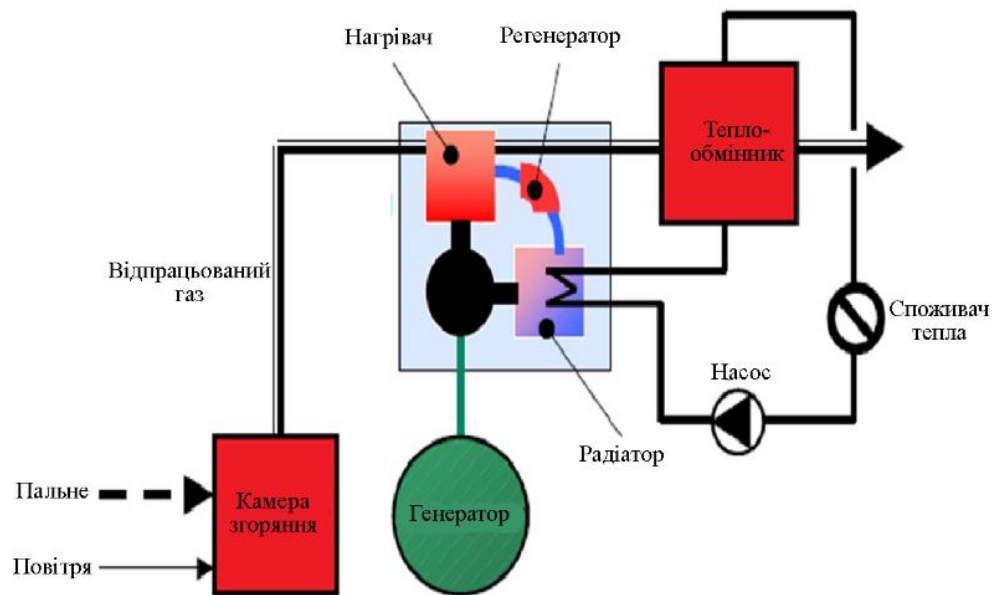


Рисунок 1.3 – Принцип роботи міні-ТЕЦ з двигуном Стірлінга [4]

На рис. 1.3 зображено принцип роботи міні-ТЕЦ зі двигуном Стірлінга. Вихлопні газі, що утворюються при згорянні, проходять через підігрівач, який віддає тепло робочому газу двигуна Стірлінга. Залишкова теплота відпрацьованих газів використовується для забезпечення теплом за допомогою додаткового теплообмінника. Охолодження в радіаторі двигуна здійснюється зворотною водою тепломережі. Тепло, яке розсіюється в двигуні, можна додатково використовувати для опалення.

Міні ТЕЦ з паровим двигуном

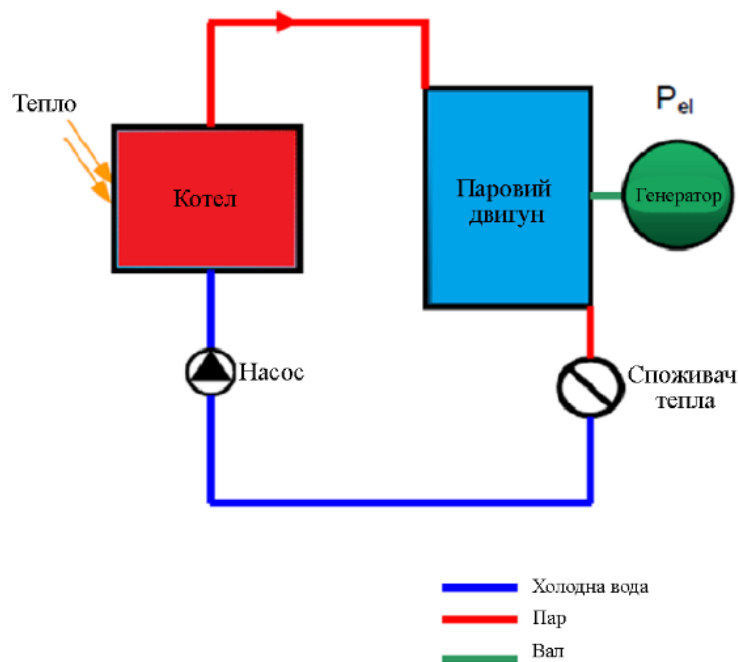


Рисунок 1.4 – Принцип роботи міні-ТЕЦ з паровим двигуном [4].

Коли схема міні-ТЕЦ має паровий двигун в якості основного рушія, як показано на рис. 1.4, котел забезпечується теплом, що надходить з відпрацьованих газів. У котлі виробляється пар, який надходить до парової машини, де виконує механічну роботу, що перетворюється в електричну енергію в генераторі. Пара проходить через конденсатор, а тепло, що утворюється в результаті конденсації, може бути використане для процесу опалення. Вода повертається до робочого стану за допомогою насоса і подається в котел, замикаючи контур.

Міні ТЕЦ з мікротурбіною

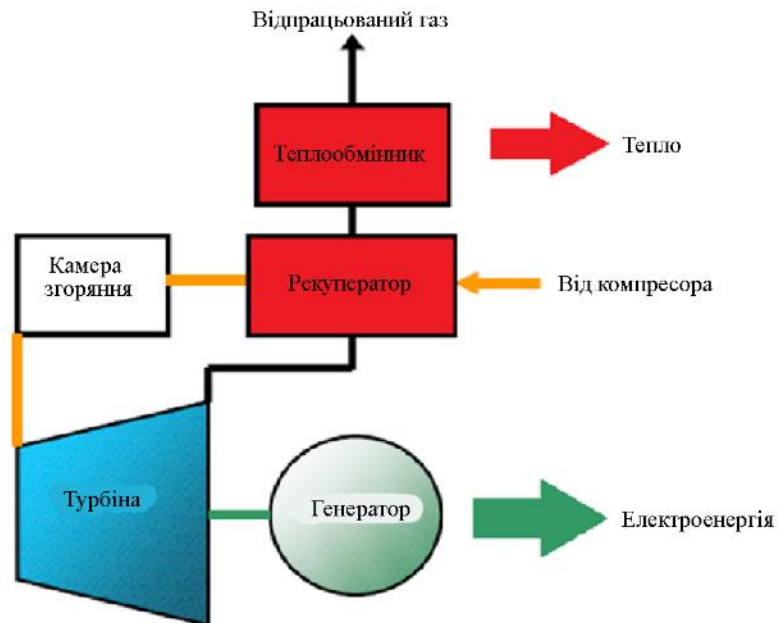


Рисунок 1.5 – Принцип роботи міні-ТЕЦ з мікротурбіною [4].

На рис. 1.5 показано принцип роботи міні-ТЕЦ, обладнаної мікротурбіною. Повітря з навколишнього середовища всмоктується і стискається компресором. Стиснене повітря подається в камеру згоряння і при додаванні палива відбувається реакція горіння. Отримані вихлопні гази потрапляють в мікротурбіну, яка приводить в дію електричний генератор. Вихлопні гази виходять з високою температурою і за допомогою теплообмінника вироблене тепло можна використовувати для опалення.

Міні ТЕЦ з паливним елементом

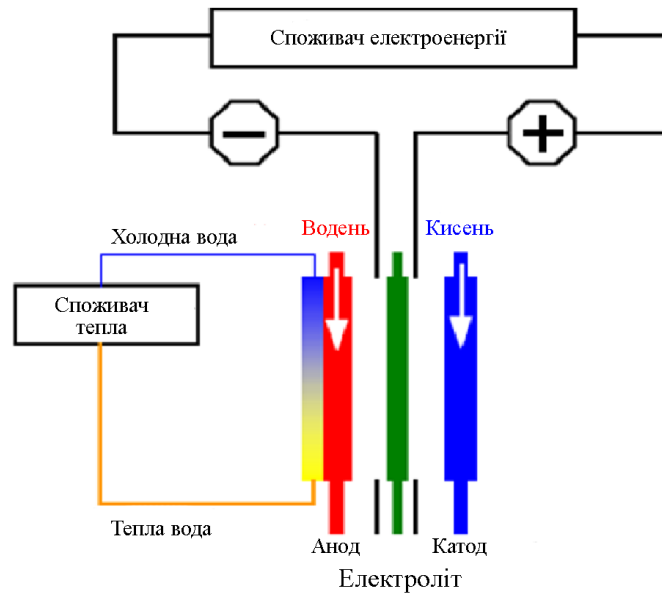


Рисунок 1.6 – Принцип роботи міні-ТЕЦ з паливним елементом [4].

Основна ідея когенерації з використанням паливного елемента представлена на рис. 1.6. Принцип роботи паливного елемента відповідає зворотному процесу електролізу води. У цьому процесі напруга подається за допомогою двох електродів, які поміщаються у воду, і вода розщеплюється на водень і кисень. І навпаки, якщо електроди контактують з воднем (або газом, багатим на водень) і киснем (або повітрям), то за рахунок високоекзотермічної воднево-кисневої реакції (з'єднання водню і кисню у воду) виробляється постійна напруга і виділяється тепло. Потрібен стабілізатор, який перетворює електричну енергію постійного струму в змінний.

1.4 Паливо для ТЕЦ

Основним джерелом енергії для ТЕЦ є теплова енергія палива. Ця енергія (теплота згорання) виділяється при спалюванні палива з повітрям з утворенням високотемпературних продуктів згорання. При спалюванні в замкнутому просторі частина вивільненої енергії створює тиск на вихлопні гази, забезпечуючи потужність для приводу газової турбіни або двигуна і

вироблення електроенергії. Вихлопні гази згодом випускаються при більш низькому тиску і температурі, якщо їх потім пропустити через теплообмінник-утилізатор, вони можуть стати основним джерелом тепла для використання на місці

Слід зазначити, що деякі види палива не можуть спалюватися в газових турбінах або двигунах. До таких видів палива відносяться тверде паливо, таке як вугілля та відходи, а також забруднене рідке або газоподібне паливо, яке може пошкодити основний двигун. У цих випадках паливо спалюється в котлі, і тепло, що виділяється з палива, піднімає пару під тиском. Потім пара використовується для приведення в дію турбіни і вироблення електроенергії. Після вироблення електроенергії пара виводиться з турбіни при зниженій температурі і тиску, проте її енергії все ще достатньо для того, щоб потік слугував джерелом тепла.

Загалом, на вартість палива впливає гнучкість його постачання, зберігання та використання. Комерційні види палива, такі як природний газ та легкі нафтопродукти, високо цінуються і вважаються паливом преміум-класу, внаслідок чого їх відносно дорого купувати, але вони не потребують дорогого обладнання для переробки. Природний газ та нафтопродукти широко доступні у виробників та розподільчих компаній.

Непреміальні види палива, такі як вугілля, важкі нафтопродукти та альтернативні паливні матеріали, є дешевшими у придбанні, але вимагають значних витрат на транспортування, спалювання та дотримання екологічних стандартів. Ці види палива іноді виробляються або залишаються після промислових процесів або побутової діяльності і є економічно життєздатними лише тоді, коли вони доступні для використання на місцевому рівні через високі транспортні витрати.

Когенераційні установки можуть бути спроектовані таким чином, щоб приймати більше одного виду палива. Це забезпечує гнучкість при закупівлі та підвищує надійність постачання, але, як правило, це пов'язано з додатковими витратами на встановлення такої установки. Крім того, на практиці вибір палива може бути обмежений вимогами екологічного дозволу на викиди.

Найбільш поширеним прикладом роботи з використанням більш ніж одного виду палива є спалювання двох видів палива - газу та нафти. Природний газ закуповується за вигідним переривчастим тарифом і використовується як основне паливо. Дистилятна нафта використовується, коли постачання газу переривається в періоди пікового попиту на газ або є недоступною з інших причин.

Резервне паливо - природний газ або нафта - також може знадобитися для систем, що спалюють тверді або відпрацьовані продукти, або для подолання дефіциту постачання, або для ініціювання горіння. Справжнє багатопаливне спалювання, коли одночасно використовуються два або більше видів палива, є можливим, але рідко необхідним, і тому воно рідко зустрічається. Муніципальні сміттєспалювальні заводи є самокупними, але деякі сміттєспалювальні заводи можуть бути багатопаливними, що вимагає постійного додавання високоякісного палива для забезпечення належного спалювання відходів.

Комерційне паливо

Існує чотири основні види товарного палива: природний газ, дистилятні нафтопродукти, важкі мазути та вугілля. Вугілля та нафтопродукти постачаються навалом і мають просту тарифну структуру, що базується на кількості, доставленій на об'єкт автомобільним або залізничним транспортом. У наступних розділах надається додаткова інформація по кожному з основних видів товарного палива: природному газу, дистилятам, мазуту та вугіллю.

Природний газ

Природний газ складається з вуглеводневих газів - переважно метану - і, як правило, не містить сірки або домішок. Хоча розподільчий трубопровід необхідний на місці, разом з корпусом для обладнання для вимірювання та регулювання тиску, немає ніяких витрат на обробку або зберігання. Однак, у багатьох випадках на ТЕЦ необхідно буде встановити спеціальне обладнання для підвищення тиску газу, а це може споживати значні обсяги електроенергії.

Природний газ підходить для дуже широкого спектру спалювального обладнання, включаючи котли, газові турбіни, газові двигуни та двигуни із запалюванням від стиснення, що працюють в режимі подвійного палива. Газ також вважається "найчистішим" паливом, оскільки його вихлопні гази містять нижчі рівні потенційно шкідливих газів. Хоча складові природного газу в цілому залишаються незмінними, існують відмінності в залежності від практики експлуатації системи постачання та джерел газу, і ці відмінності можуть впливати на продуктивність і потужність деяких газових турбін і двигунів.

Дистилятні нафтопродукти

Газойль є основним видом дистилятних нафт. Він є продуктом переробки нафти і відноситься до класів A2 та D стандарту BS 2869. Газойль широко використовується в промисловості на всій території України, а також є основою дизельного палива для дорожніх транспортних засобів. Більш легкий дистилятний газойль, який часто називають гасом, відноситься до класу A1 стандарту BS 2869.

Властивості та склад газойлю більш стабільні, ніж у важкого мазуту. Газойль є набагато легшим паливом, залишається рідким при нормальних температурах навколишнього середовища і, отже, його легше зберігати і обробляти: він також може використовуватися при температурі до -10°C . Крім того, за винятком невеликої кількості сірки, газойль практично не містить забруднюючих речовин, хоча погане згоряння може призвести до утворення брудних вихлопів, що містять вуглеводневі частинки та окис вуглецю. Газойль є придатним паливом для котлів, двигунів і газових турбін, але через його відносно високу вартість він зазвичай не є економічно вигідним варіантом для ТЕЦ, за винятком як вторинне або резервне паливо, або як пілотне паливо для газових двигунів із запалюванням від стиснення.

Важкі мазути

Важкі мазути - це суміші залишків від переробки нафти. Ці мазути є високов'язкими рідинами, які майже тверді при нормальній температурі

навколишнього середовища і потребують нагрівання для полегшення зберігання та перекачування перед спалюванням.

Це одна з низки витрат, які також включають в себе встановлення та експлуатацію спеціальних сховищ та об'єктів для зберігання та обробки. Важкі мазути придатні для використання в котлах, а також можуть використовуватися у великих дизельних двигунах за умови правильного підігріву та фільтрації мазуту.

Властивості та склад важких паливних мазутів є більш стабільними, ніж у вугілля, і були встановлені стандарти, які визначають основні властивості комерційних важких паливних мазутів та встановлюють обмеження на вміст забруднюючих речовин, в'язкість тощо. Комерційно доступні важкі мазути відносяться до класів G та H за стандартом BS 2869 і містять сірку та інші органічні сполуки, а також невелику кількість води, осаду та золи. Екологічне законодавство встановлює обмеження на вміст сірки в цих видах палива, якщо вони повинні широко використовуватися.

Вугілля

На теплоелектроцентралях вугілля, як правило, використовується як паливо для парових котлів, а для цього потрібне вугілля з відповідними фізичними властивостями. Значні науково-дослідні роботи були спрямовані на застосування спеціалізованих систем спалювання, таких як псевдозріджений шар. Газифікатори псевдозрідженого шару можуть також використовуватися для виробництва синтез-палива з вугілля для безпосереднього використання в газовій турбіні. Однак ці технології не набули широкого розповсюдження.

Вугілля зазвичай закуповується на контрактній основі, при цьому ціна на певну поставку протягом визначеного періоду фіксується відповідно до узгоджених умов поставки.

Відпрацьоване паливо

Використання відходів як палива має дві видатні переваги:

- 1) низька або нульова вартість самого палива;

2) потенціал для зменшення або усунення витрат на утилізацію відходів.

Потенційні недоліки включають витрати на зберігання та обробку, підготовку перед спалюванням, спеціалізоване обладнання для спалювання, очисні споруди для димових газів тощо. Слід зазначити, що вартість спеціалізованого обладнання може бути компенсована низькою вартістю палива.

Паливо з твердих відходів

Прикладами палива з твердих відходів є обрізки деревини від виробників меблів, біомаса з лісового та сільського господарства, відпрацьовані шини та побутові відходи.

Успішне спалювання цих відходів, як правило, вимагає спеціальної технології, а отримане тепло використовується в основному для виробництва пари для виробництва електроенергії та ТЕЦ.

Муніципальні системи збору та централізованого теплопостачання реалізували всі переваги ТЕЦ, що працюють на відходах, виробляючи електроенергію та забезпечуючи теплом, наприклад, комунальні системи опалення.

Газоподібні відходи палива

До джерел альтернативного газоподібного палива відносяться:

- Побічні гази, продукти промислових процесів, такі як доменний газ, коксовий газ і паливний газ нафтопереробних заводів,
- Біогаз: газ, що утворюється в результаті анаеробного зброджування біологічних матеріалів (таких як стічні води, звалищний газ, відходи харчової промисловості, фармацевтичні відходи та муніципальні відходи),
- Відпрацьований газ/тепло: відпрацьовані гази, такі як оксид вуглецю або леткі органічні сполуки, або відпрацьоване тепло, таке як відпрацьований

газ від високотемпературних процесів, або як продукт екзотермічних хімічних реакцій.

Слід зазначити, що деякі види газового палива можуть використовуватися в двигунах або газових турбінах, використовуючи переваги більш високого електричного ККД цих конструкцій у порівнянні з паровими циклами.

Рідкі біопалива

Рідке біопаливо, включаючи наступні продукти:

- "біоетанол" - етанол, вироблений з біомаси та/або біологічно розкладної фракції відходів,
- "біодизель" - метиловий ефір, вироблений з рослинної або тваринної олії, що має якість дизельного палива,
- "біометанол" - метанол, вироблений з біомаси,
- "біодиметилетер": диметилетер, вироблений з біомаси,
- "біо-ЕТБЕ (етил-трет-бутиловий ефір)": ЕТБЕ, вироблений на основі біоетанолу. Відсоток за об'ємом біо-ЕТБЕ, який розраховується як біопаливо, становить 47%;
- "біо-МТБЕ (метил-трет-бутиловий ефір)" - паливо, вироблене на основі біометанолу. Відсоток об'ємної частки біо-МТБЕ, що розраховується як біопаливо, становить 36%;
- "синтетичне біопаливо" - синтетичні вуглеводні або суміші синтетичних вуглеводнів, які були вироблені з біомаси;
- "чиста рослинна олія": олія, вироблена з олійних рослин шляхом пресування, екстракції або аналогічних процедур, сира або рафінована, але хімічно не модифікована, якщо вона сумісна з типом відповідних двигунів і відповідними вимогами до викидів.

Рідке паливо з відходів

Рідкі відходи визначаються СНРQA як відходи біологічного або небіологічного походження від побутової та промислової діяльності (такі як сало, жири та біологічні олії, відпрацьовані розчинники, відмивки резервуарів, перероблене відпрацьоване мастило та асфальтове мастило нафтопереробних заводів).

1.5 Висновки до розділу

Проведений аналіз перспектив енергозабезпечення з використанням міні-ТЕЦ дозволив встановити наступне:

1. Впровадження великої кількості міні-ТЕЦ дозволить зробити виробництво електроенергії більш децентралізованим, що в реаліях війни робить нашу енергосистему більш стійкішою до ворожих обстрілів.

2. Оскільки такі когенераційні установки знаходяться значно ближче до споживача, це дає можливість використання відпрацьованого тепла, розподіляючи його через теплові ланцюги для місцевої промисловості та/або житла.

3. При використанні міні-ТЕЦ немає необхідності використання потужних високовольтних ліній, які використовуються для транспортування на великі відстані в централізованих системах електропостачання, що є більш економічно доцільно.

4. Перевагою для операторів міні-ТЕЦ є те, що вони можуть використовувати вироблену електроенергію для власного споживання або ж віддавати її безпосередньо в електричну мережу.

5. Висока варіативність вибору палива для міні-ТЕЦ безсумнівно є великим плюсом, враховуючи що такі установки можуть бути спроектовані для прийому кількох видів палива.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Моделювання системи

Система, здатна зберігати стабільну роботу в сталих і збурених умовах, може бути визначена як надійна система. Дослідження динамічної поведінки системи до і після раптових змін навантаження або генерації повинні бути включені в аналіз стійкості енергосистеми. Енергосистема повинна бути спроектована та експлуатуватися таким чином, щоб можна було уникнути втрати навантаження або втрати синхронізму через перехідні явища [5]. Впровадження в електричні мережі ресурсів розподіленої генерації та елементів енергоефективності (теплових насосів) може створювати проблеми, пов'язані з порушенням верхньої або нижньої межі напруги. Можливе рішення полягає в активній участі різних елементів у регулюванні напруги, що передбачає таку стратегію управління, при якій генеруючий ресурс робить свій внесок у регулювання напруги.

Для того, щоб представити проблематику, провести відповідний аналіз та розробити стратегію регулювання, необхідне моделююче середовище. Воно повинне дозволяти моделювання перехідних процесів та аналіз перехідних процесів для вивчення поведінки та подій поза стаціонарними умовами. Для проведення імітаційного моделювання перехідних процесів і, відповідно, аналізу перехідних процесів повинні існувати динамічні моделі взаємодіючих систем. Для цілей проектування управління також необхідна динамічна модель розподіленого ресурсу та електричної мережі.

У поточній роботі використовується два види програмного забезпечення для моделювання. Для моделювання роботи міні-ТЕЦ, а також блоку контролера використовується програма Matlab/Simulink. Для моделювання енергосистеми використовується DigSilent PowerFactory2. Моделювання всієї системи виконується в DIgSilent з використанням властивості інтеграції, доступної для моделей Matlab.

2.2 Основи системної динаміки та моделювання динамічних систем

Динамічна система може бути визначена як сукупність елементів (входів, внутрішніх змінних, виходів і збурень), які взаємодіють між собою і які можна виділити з навколишнього середовища. Поточні значення входів у динамічну систему не повністю визначають її поточну поведінку; вона залежить також від минулих значень входів і від внутрішніх змінних (змінних стану). Тому кажуть, що динамічна система має певну пам'ять, в якій зберігається історія системи. Модель являє собою лише спрощення реальної системи, де до уваги беруться лише ті елементи, які є важливими для мети моделі, тому в моделі завжди присутня абстракція [6].

Умовно можна виділити два типи моделей динамічних систем: перша базується на природних законах і будується за допомогою диференціальних рівнянь, які можуть описувати основні закони збереження, а друга - на основі даних, де виміряні дані відтворюються шляхом підбору параметрів з використанням передбачуваної структури системи [6].

Динамічна характеристика і передавальні функції

Вхідні впливи на систему представляють її поведінку при передачі. В теорії управління взаємозв'язок між системами "вхід-вихід" описується передавальними функціями.

Означення 1: *"Передавальна функція $G(s)$ системи визначається як частка від ділення перетворення Лапласа вихідної функції $y(t)$, що позначається як $Y(s)$, на перетворення Лапласа вхідної функції $u(t)$, що позначається як $U(s)$, в припущенні, що всі початкові умови дорівнюють нулю"* [7]. Див. рівняння (2.1).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.1)$$

Передавальна функція - це властивість системи, яка не залежить від величини і характеру вхідного впливу. Інформація про фізичну структуру

системи не входить до передавальної функції, тому передавальні функції багатьох систем можуть бути ідентичні. Для розуміння природи системи аналіз поведінки відгуку на різні вхідні впливи може бути виконаний, коли відома передавальна функція системи. Якщо передавальна функція системи невідома, то для встановлення передавальної функції можуть бути використані експериментальні методи, що полягають у збудженні системи відомим входом і дослідженні виходу. Повний опис динамічних характеристик системи надається після визначення передавальної функції [7].

При аналізі та проектуванні систем управління кожен пристрій представляється блоком, а кожен блок описується своєю передавальною функцією $G(s)$. Завдяки питанням взаємодії, використання передавальних функцій може спростити аналіз і проектування систем управління.

Характеристики передавальної функції

Розглянемо відповідну раціональну передавальну функцію $G(s)$:

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.2)$$

де $N(s)$ та $D(s)$ - поліноми з дійсними коефіцієнтами та степенями $\deg N(s) \leq \deg D(s)$.

Коріння $D(s)$ після скасування спільних множників $N(s)$ і $D(s)$ є полюсами $G(s)$. Кажуть, що система повністю описується своєю передавальною функцією, якщо $D(s)$ і $N(s)$ не мають спільних факторів. Основна форма відгуку передавальної функції визначається її полюсами [8].

Означення 2: "Скінченне дійсне або комплексне число λ називається полюсом $G(s)$, якщо $|G(\lambda)| = \infty$, де $|\cdot|$ позначає абсолютну величину. Вона дорівнює нулю $G(s)$, якщо $G(\lambda) = 0$ " [8].

Динамічна поведінка і стійкість системи визначаються розташуванням полюсів і нулів. Практичним відображенням розташування полюса і нуля є карта полюса/нуля. Маючи розташування полюсів, можна визначити стійкість системи за допомогою наступної теореми:

Теорема. "Система з відповідною раціональною передавальною функцією $G(s)$ стійка тоді і тільки тоді, коли кожен полюс $G(s)$ має від'ємну дійсну частину або, що еквівалентно, лежить всередині відкритої лівої напівплощини s " [8].

Іншою важливою характеристикою динамічної системи є ступінчаста реакція. Визначається як реакція системи на вхідний вплив, що змінюється від нульового значення його амплітуди до значення 1 в певний момент часу. Хоча ступінчаста характеристика не є єдиною характеристикою динамічної системи, вона дозволяє оцінити її домінуючу динаміку, таку як повільні ділянки, погано затухаючі ділянки, часові затримки і т.д.. Карта полюсів/нулів та важливість нулів і полюсів для ступінчастої реакції проілюстрована на рис. 2.1. Звідси видно, що у випадку розташування полюсів у лівій півплощині (ЛП) вони є більш важливими, коли вони знаходяться близько до уявної осі. Якщо вони знаходяться в правій півплощині (ППП), то чим далі від уявної осі вони знаходяться, тим більшого значення набувають. Нулі стають більш важливими при наближенні до уявної осі [9].

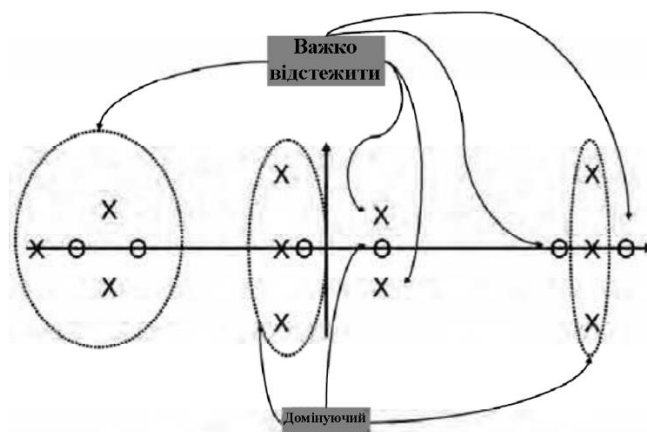


Рисунок 2.1 – Значення полюсів (x) та нулів (o) для ступінчастої характеристики [9].

Системи першого порядку

Структура передавальної функції для системи G_{PT1} першого порядку має вигляд:

$$G_{PT1} = \frac{K_p}{1 + T \cdot s} \quad (2.3)$$

де K_p - коефіцієнт підсилення

T - постійна часу.

Видно, що полюс такої системи знаходиться при $s = -1/T$. На рис. 2.2 зображено характеристичну криву або сходинку реагування системи першого порядку. Видно, що значення вихідної характеристики системи $c(t)$ становить 0,632 для $t = T$, тобто відгук $c(t)$ досягає 63,2% від її загальної зміни. Експоненціальна крива проходить шлях від 0 до 63,2% свого кінцевого значення за одну постійну часу T . Відповідь досягає 86,5% свого кінцевого значення за дві постійні часу. 95%, 98,2% і 99,3% кінцевого значення відповіді досягаються при $t = 3T$, $t = 4T$ і $t = 5T$ відповідно. Таким чином, для $t \geq 4T$ відгук залишається в межах 2% від його кінцевого значення. Кількість часу, необхідного для досягнення лінії 2% від кінцевого значення, або чотири постійні часу, на практиці є розумною оцінкою часу відгуку [7].

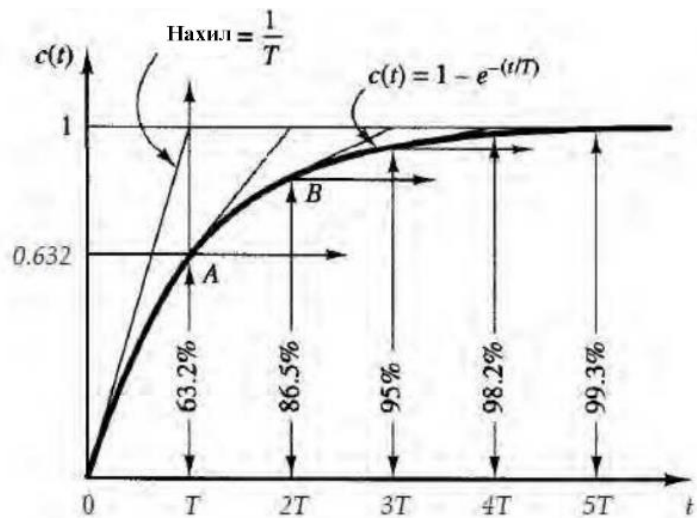


Рисунок 2.2 – Ступінчаста характеристика системи першого порядку [7].

Ідентифікація системи

Основна ідея ідентифікації системи полягає в побудові моделі, яка представляє залежність між вхідним сигналом $u(t)$ і вихідною змінною $y(t)$ за певний проміжок часу на основі вимірних даних [9]. Для цього реальна система збуджується відомими вхідними сигналами і вимірюються вихідні змінні, як показано на рис. 2.3.

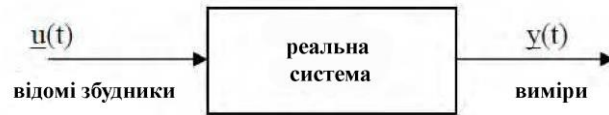


Рисунок 2.3 – Схема зв'язку вхід/вихід [9].

Існує декілька методів системної ідентифікації динамічної системи ; в даній роботі, через характер експериментальних даних, які представлені в наступних розділах, апроксимація ступінчастим відгуком є більш придатним методом для отримання бажаної моделі. Графічне зображення методу апроксимації ступінчастої характеристики наведено на рис. 2.4. Цей метод полягає у виборі структури передавальної функції системи та знаходженні параметрів для підгонки ступінчастої характеристики моделі до ступінчастої характеристики реальної системи [9].

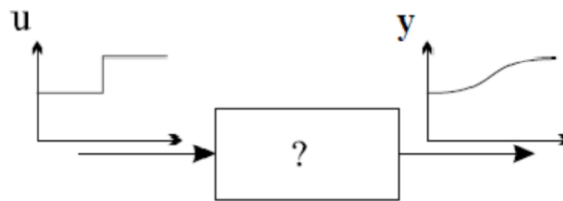


Рисунок 2.4 – Апроксимація ступінчастої характеристики [9].

Для даного дослідження обрана наступна структура для $G(s)$:

$$G(s) = K \cdot \frac{\prod_{i=1}^m (s - n_i)}{\prod_{j=1}^l (s - p_j)} \cdot e^{-T_D s} \quad (2.4)$$

де p_j - полюси

m - порядок чисельника

n_i - нулі системи

l - порядок знаменника

T_D - часова затримка

K - коефіцієнт підсилення.

Якщо система має кінцеве значення, тобто якщо система стійка, то коефіцієнт підсилення визначає кінцеве значення ступінчастої характеристики;

полюси визначають експоненціальні функції ступінчастої характеристики, а нулі визначають вагові коефіцієнти експоненціальних функцій [9]. Ці параметри мають бути оцінені за допомогою чисельного наближення.

Для виконання такої апроксимації використовується інструментарій ідентифікації системи Matlab [10]. Вона полегшує управління даними та надає графічний інтерфейс користувача для оціночних завдань. У наступних розділах детально пояснюється процедура ідентифікації.

2.3 Підхід до моделювання

Реалізований підхід до моделювання системи складається з вхідного/вихідного представлення системи. Система взаємодіє з навколишнім середовищем за допомогою входів, які не залежать від внутрішніх змінних системи, та виходів, які не залежать від навколишнього середовища. Середовищем може бути інша система [6]. Кожен елемент представлений рамкою, і в кожній рамці міститься передавальна функція, що описує динамічну поведінку відповідного елемента. З'єднання між елементами здійснюється через відповідні вхідні та вихідні сигнали. Огляд підходу до моделювання наведено на рис. 2.5.

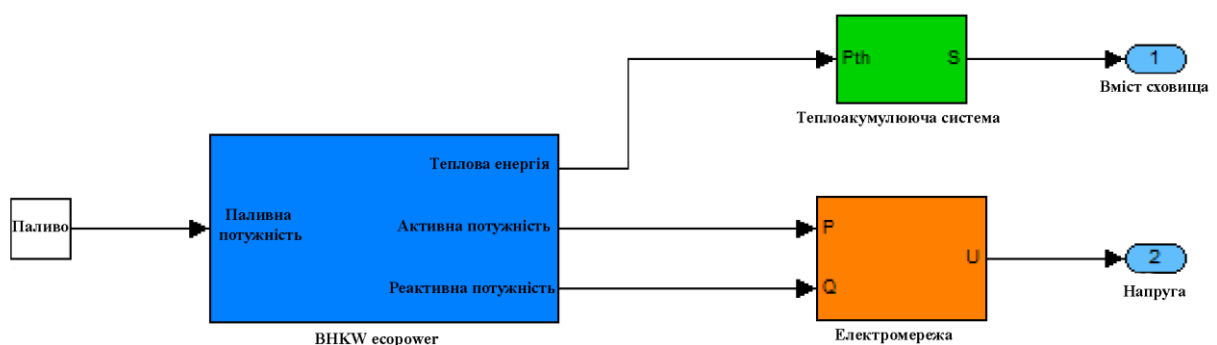


Рисунок 2.5 – Огляд підходу до моделювання

Необхідно визначити вхідні та вихідні дані моделі. Паливна потужність є входом в модель міні-ТЕЦ, а тепла та електрична енергія - виходом. На вхід системи акумулювання теплової енергії надходить тепла енергія від моделі

міні-ТЕЦ, а на виході - вміст накопиченої теплової енергії. Система електричних мереж забезпечується активною та реактивною потужністю від міні-ТЕЦ. Реактивна потужність може бути розрахована з активної потужності з постійним коефіцієнтом потужності $\cos(\varphi) = 0,98$. Напруга є вихідним параметром моделі електричної мережі.

2.4 Модель міні-ТЕЦ

Як зазначалося раніше, в даній роботі міні-ТЕЦ розглядається і моделюється як компактний блок, де на вході є енергія палива, а на виході - електрична і тепла енергія; детальні моделі двигуна, регулятора, генератора, теплообмінника та інших елементів міні-ТЕЦ в даному документі не розглядаються.

Потужність палива відповідає об'ємній витраті палива, помноженій на теплоту згоряння палива H_i в $\text{кДж} / \text{м}^3$ [3], як показано в рівняннях (2.5).

$$P_{Fuel} = \dot{V}_{Fuel} \cdot H_i \quad (2.5)$$

Теплову енергію можна виразити наступним чином:

$$P_{Fuel} = \dot{V}_w \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (2.6)$$

де \dot{V}_w - об'ємна витрата циркуляційної води теплової системи, $\text{м}^3/\text{с}$

ρ - густина води, $\text{кг}/\text{м}^3$

c - питома теплоємність води, $\text{кДж}/\text{кгК}$

T_{in} і T_{out} - температура на вході і виході теплової системи, К .

Шляхом множення напруги лінії до лінійної напруги $\sqrt{3} \cdot U$ в В , струм I в А та коефіцієнту потужності $\cos(\varphi)$, активна потужність P_{el} в кВт може бути розрахована за формулами (2.7), а реактивна потужність Q в кВАр впливає з формули (2.8).

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (2.7)$$

$$Q = P_{el} \cdot \tan(\varphi) \quad (2.8)$$

Експериментальні дані

Для опису динамічної поведінки міні-ТЕЦ використані дані з книги "Mini-Blockheizkraftwerk Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten" [3]. Особливий інтерес для динамічного моделювання представляють дані, що відповідають експериментам стаціонарної поведінки установки еsorpower e4.7. Технічні дані для еsorpower e4.7 наведені в Додатку А. У цих таблицях представлені дані про температуру, теплову потужність, електричну потужність, витрату палива та інші виміряні величини. Час вибірки для вимірювань становить одну секунду. Для цього дослідження потрібні лише дані про паливну потужність, теплову та електричну енергію, а також час вибірки, що дає загальний розмір набору даних 4 x 50 000 точок. Результати експерименту показують динаміку вихідних змінних при вмиканні установки на максимальну потужність та вимиканні, тобто при зміні подачі палива від 0 до 100% від його максимального значення. Див. рис. 2.6

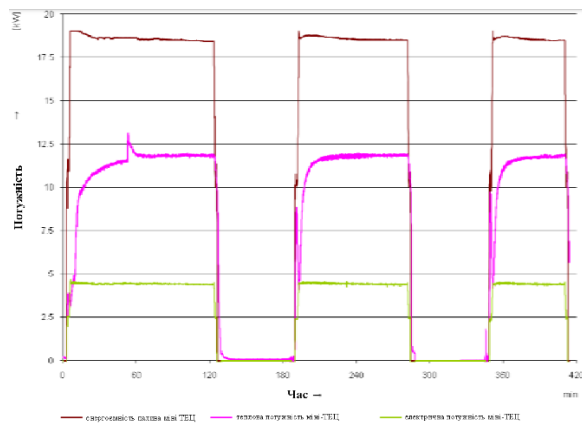


Рисунок 2.6 – Профілі продуктивності міні-ТЕЦ

Спостерігаються дві різні реакції. Перший відповідає холодному пуску з часом реакції на теплову потужність близько 60 хв. Теплий пуск відповідає другому типу реакції з часом реакції на теплову потужність близько 40 хв. Реакція установки на такий ступінчастий вхід, як було сказано раніше, показує динаміку роботи системи. Тому ці дані можуть бути використані для процедури ідентифікації системи. Побудовано дві моделі для різних типів стартових процедур.

Підбір робочих даних

Детальний вигляд процедури холодного пуску показаний на рис. 2.7. Ці дані вибираються для побудови моделі, що відповідає системі холодного пуску.

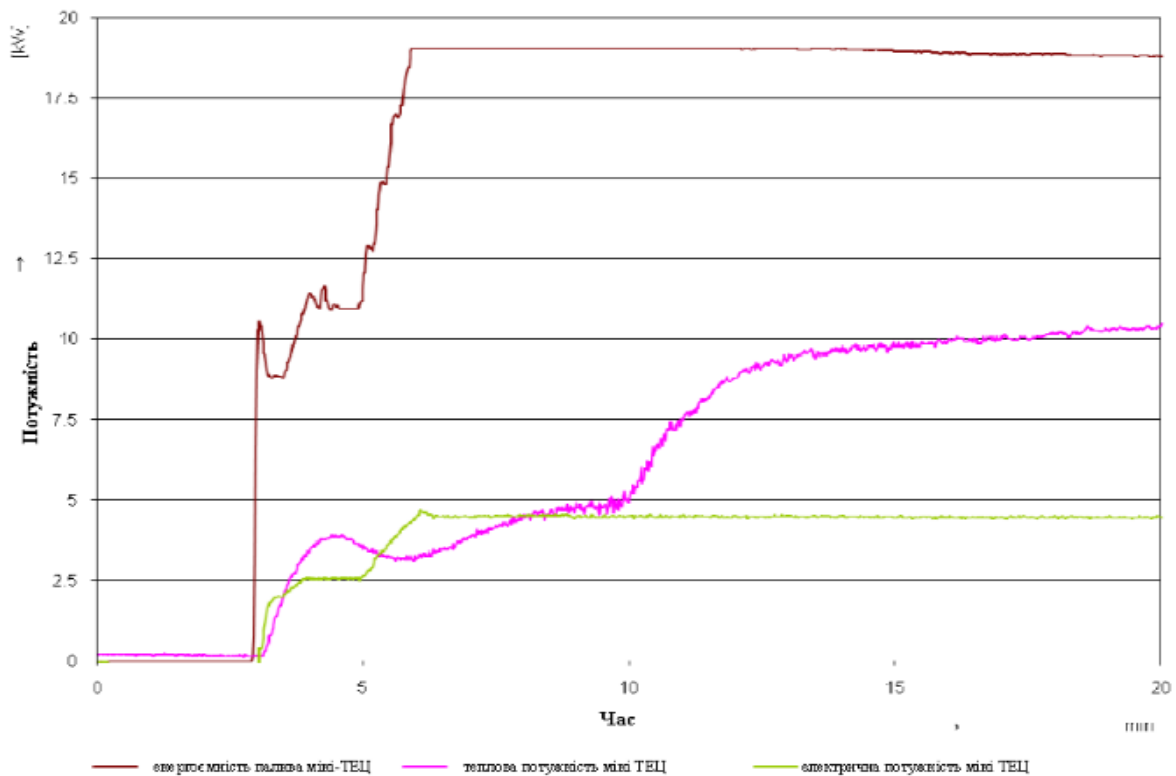


Рисунок 2.7 – Процедура холодного запуску

З рис. 2.6 видно, що процедура теплового пуску починається через 189 хвилин. Більш детальний її вигляд наведено на рис. 2.8. Для процедури теплового пуску є два сегменти даних, які надають інформацію, тому експериментальні дані розділені на два. Перша з них слугує оціночними даними, а друга - валідаційними.

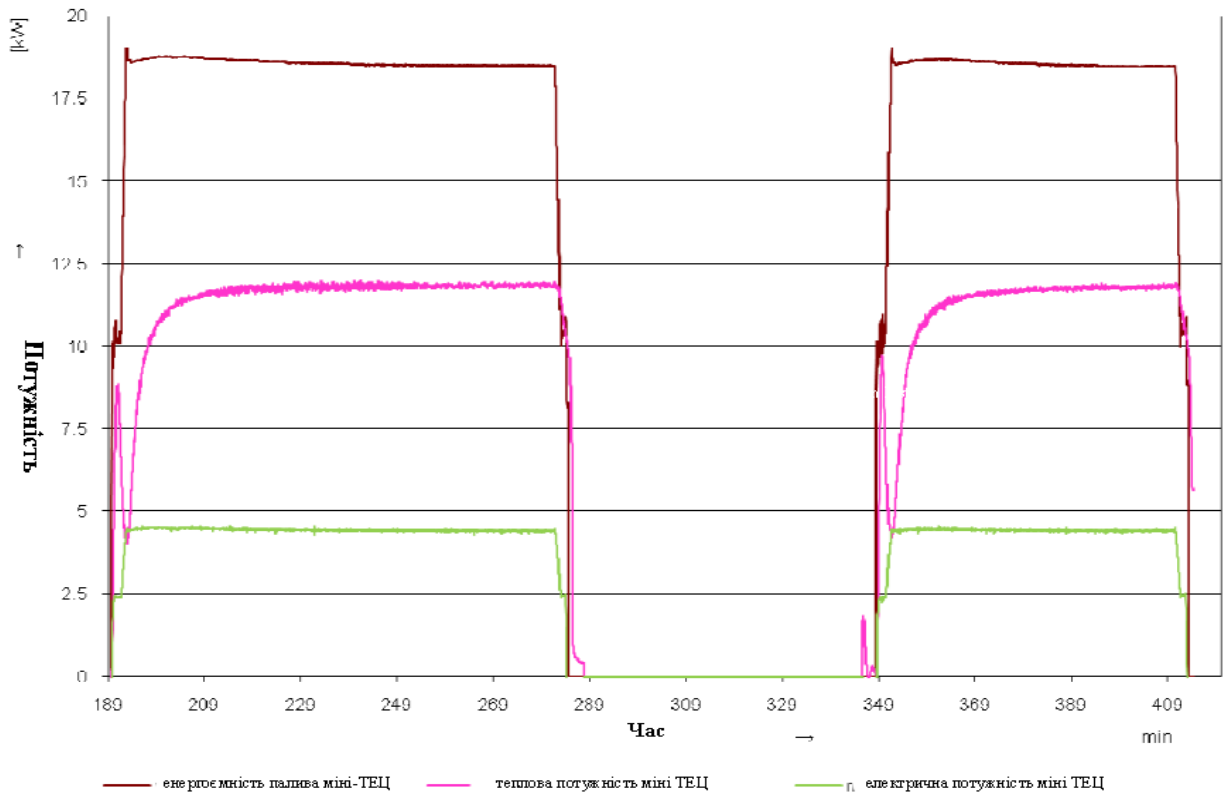


Рисунок 2.8 – Процедура теплового запуску

Розрахункові дані для процедури теплового пуску

Діапазон даних для оцінювання - від 189 до 279 хвилини відповідно до рис. 2.8. Фрагмент діаграми оцінювання для процедури теплового пуску наведено на рис. 2.9.

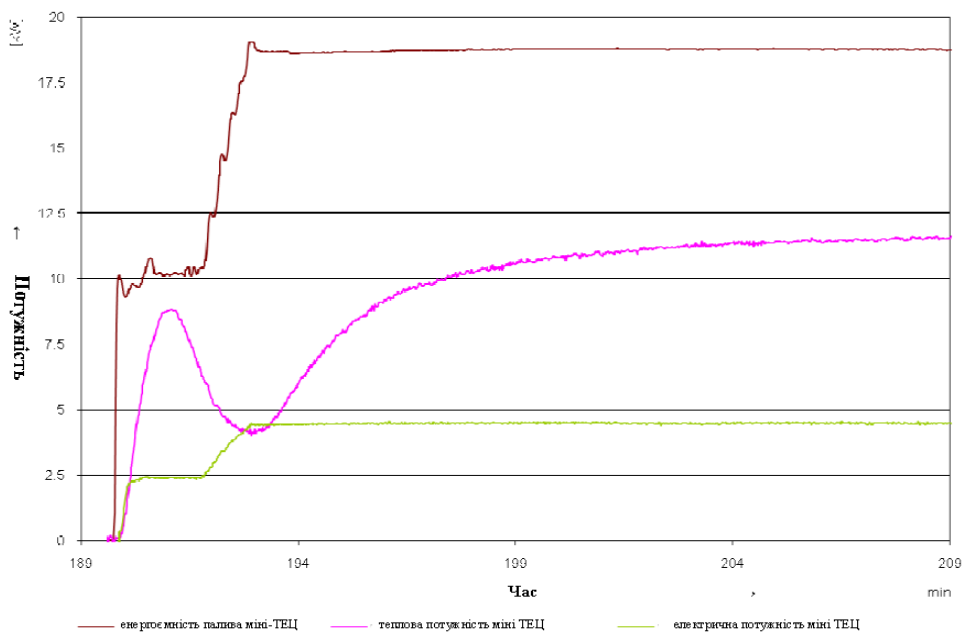


Рисунок 2.9 – Розрахункові дані для "теплого" запуску

Валідаційні дані для процедури теплового пуску

Інтервал часу для валідаційних даних - з 348 хвилини до 410 хвилини. Детальний вигляд початкової ділянки валідаційних даних можна спостерігати на рис. 2.10.

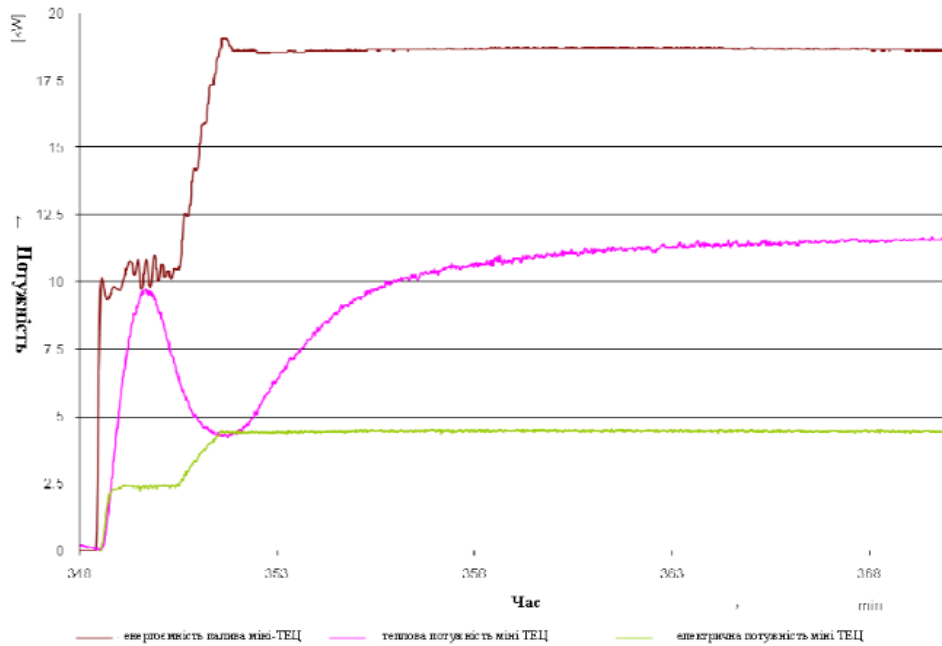


Рисунок 2.10 – Дані валідації для теплового запуску

Ідентифікація системи

Значення обраних змінних імпортується з Matlab, а для проведення ідентифікації системи використовується інструмент Matlab "System Identification toolbox" [10]. На рис. 2.11 представлено графічний інтерфейс користувача інструментарію.

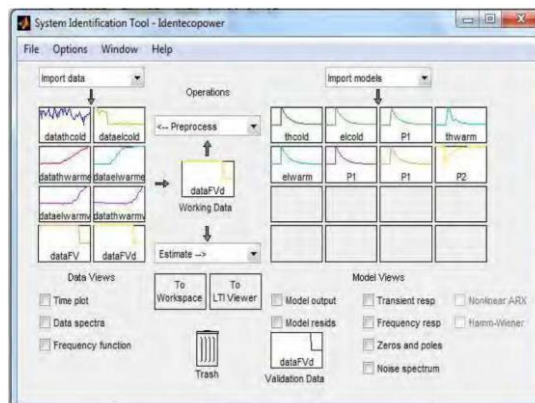


Рисунок 2.11 – Графічний інтерфейс користувача System Identification Tool

Для кожної процедури ідентифікації імпортуються попередньо відібрані дані, обирається структура моделі процесу та оцінюється відповідна кількість полюсів, кількість нулів та часових затримок, як показано на рис. 2.12 як приклад. У наступних розділах представлені результати ідентифікації для кожної системи. Спочатку розкривається ідентифікована передавальна функція і показуються графіки, що відображають порівняння між вимірними даними і результатами імітаційної моделі для кожної системи. Результуюче представлення моделі в Simulink наведено в кінці.

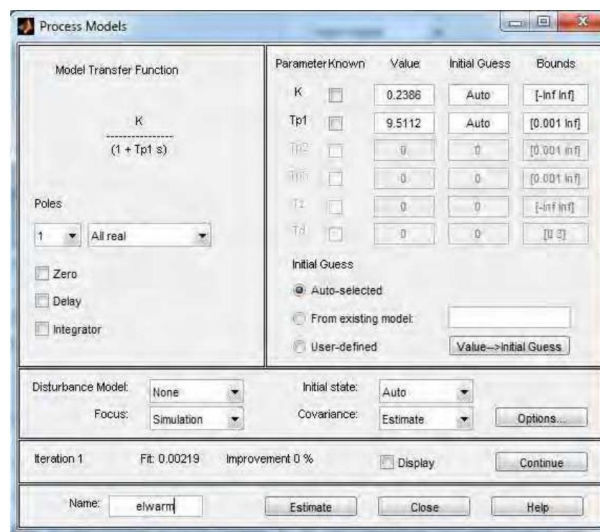


Рисунок 2.12 – Приклад ідентифікації параметрів

Системи холодного пуску

Теплоенергетична система. Ідентифікована передавальна функція G_{th_cold} має вигляд:

$$G_{th_cold} = \frac{0.63359}{1 + 474.88 \cdot s} \quad (2.9)$$

На рис. 2.13 наведено порівняння між вимірними даними та результатами моделювання теплової потужності при холодному пуску.

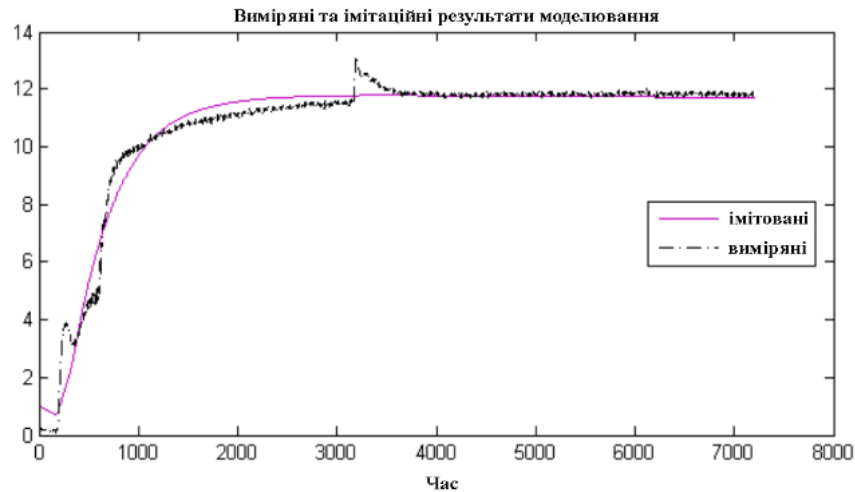


Рисунок 2.13 – Порівняння між вимірюванням та моделюванням для теплової потужності холодного пуску

Електроенергетична система. Ідентифікована передавальна функція G_{el_cold} має вигляд:

$$G_{el_cold} = \frac{0.23809}{1 + 10.59 \cdot s} \quad (2.10)$$

На рис. 2.14 наведено порівняння між вимірними даними та результатами імітаційного моделювання для електричної потужності при холодному пуску.

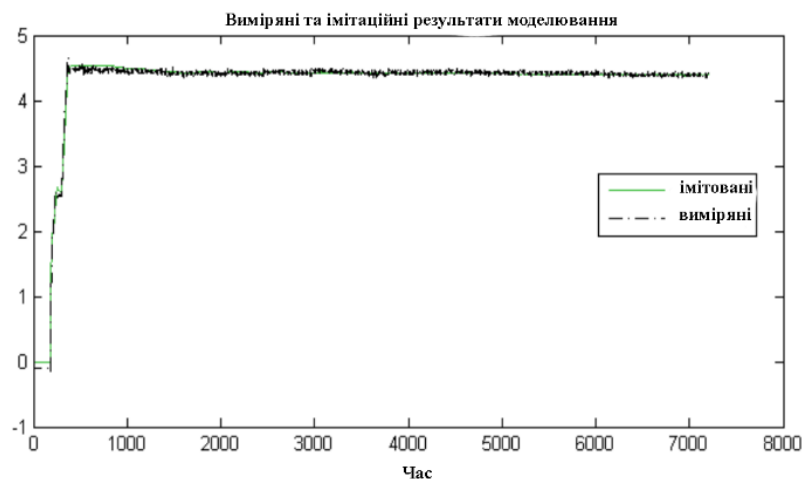


Рисунок 2.14 – Порівняння вимірних та змодельованих даних електричної системи холодного запуску

Системи теплового запуску

Теплоенергетична система. Ідентифікована передавальна функція G_{th_warm} має вигляд:

$$G_{th_warm} = \frac{0.63472}{(1 + 26.88 \cdot s + (39.653 \cdot s)^2)(1 + 246.98 \cdot s)} \quad (2.11)$$

На рис. 2.15 наведено порівняння між вимірними даними та результатами імітаційного моделювання для теплової потужності при теплому пуску.

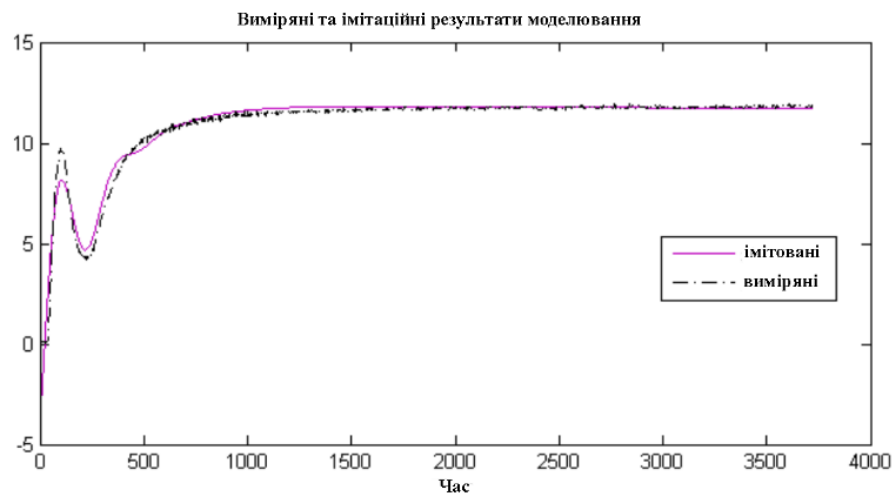


Рисунок 2.15 – Порівняння вимірних та змодельованих даних теплового пуску теплової системи

Електроенергетична система. Ідентифікована передавальна функція G_{el_warm} має вигляд:

$$G_{el_warm} = \frac{0.2386}{1 + 9.5112 \cdot s} \quad (2.12)$$

На рис. 2.16 наведено порівняння між вимірними даними та результатами моделювання для електричної потужності при теплому пуску.

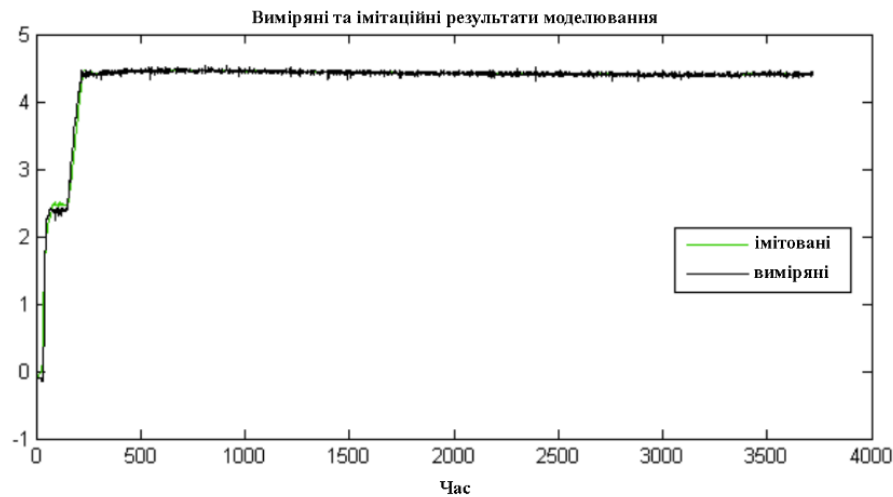


Рисунок 2.16 – Порівняння вимірних та змодельованих даних електричної системи теплового запуску

Отримані передатні функції та характеристики наведені в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результуючі передавальні функції та характеристики

Система	Передавальна функція	Приріст	Полоси
Термічна холодний	$G_{th_cold} = \frac{0.63359}{1+474.88 \cdot s}$	$K_p = 0.63359$	$p = -2.1e-3$
Електрична холодний	$G_{el_cold} = \frac{0.23809}{1+10.59 \cdot s}$	$K_p = 0.23809$	$p = -9.44e-3$
Термічна теплий	$G_{th_warm} = \frac{0.63472}{(1+26.88 \cdot s + (39.653 \cdot s)^2)(1+246.98 \cdot s)}$	$K_p = 0.63472$	$p_1 = -8.54e-3 + i \cdot 2.37e-3$ $p_2 = -8.54e-3 - i \cdot 2.37e-3$ $p_3 = -4.04e-3$
Електрична теплий	$G_{el_warm} = \frac{0.2386}{1+9.5112 \cdot s}$	$K_p = 0.2386$	$p = -1.051e-3$

Представлення моделі міні-ТЕЦ в Simulink.

На основі підходу, представленого на рис. 2.5, макет моделі міні-ТЕЦ в Simulink проілюстровано на рис. 2.17.

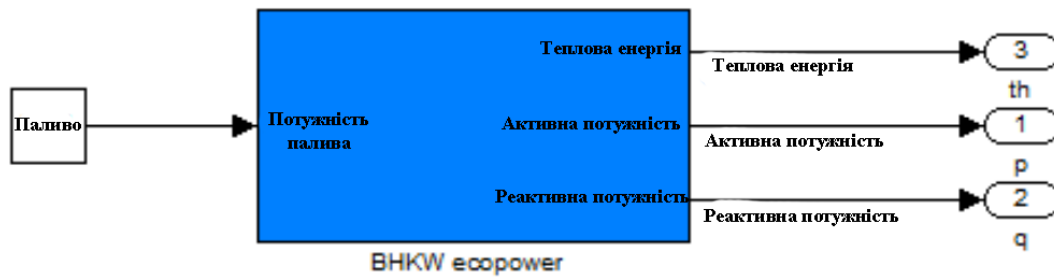


Рисунок 2.17 – Макет в Simulink моделі міні-ТЕЦ

Simulink дозволяє використовувати макет для моделювання систем, розташованих в робочому просторі Matlab. Таким чином, потрібну систему (теплий пуск або холодний пуск) необхідно спочатку завантажити в робочу область Matlab, а потім змоделювати в Simulink, використовуючи цей макет.

2.5 Модель теплоакumuлюючого резервуару

Тепловий акумулятор - це резервуар для гарячої води, функція якого полягає в накопиченні теплової енергії з метою забезпечення тепловою енергією в разі потреби. Використовується в поєднанні з міні-ТЕЦ для оптимізації роботи. Міні-ТЕЦ та теплоакumuлююча станція складають теплову систему. Тут вироблене тепло можна використовувати або зберігати в залежності від визначених потреб. Теплова система являє собою систему опалення будівлі з багатьма звичними вузлами. Хоча це не моделюється, в цій роботі передбачається, що існує котел для покриття пікових теплових навантажень; таким чином, коли теплова потужність міні-ТЕЦ не є достатньою для задоволення теплового попиту, котел забезпечує відсутню кількість енергії.

Для цілей побудови моделі припускається, що втрати відсутні, а процес зберігання є простим інтеграційним процесом. Теплоакumuлюючий резервуар може бути завантажений до досягнення його максимальної потужності; це просте рівняння завантаження (2.13). Розвантажувальна операція виникає тоді, коли тільки теплоакumuлюючий резервуар відповідає за постачання необхідної теплової енергії (2.14). Для такого роду операцій вміст теплоакumuлятора в залежності від часу $S(t)$ в кДж може бути описаний наступними рівняннями:

Просте завантаження

$$S(t) = \begin{cases} S_{\max} & \text{if } S(t-1) \geq S_{\max} \\ S_0 + \int_{t_0}^t P_{S,in}(t) & \text{if } 0 \leq S(t) < S_{\max} \end{cases} \quad (2.13)$$

Розвантаження

$$S(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } S(t-1) \leq 0 \\ S_0 - \int_{t_0}^t D_{th}(t) & \text{if } 0 < S(t) \leq S_{\max} \end{cases} \quad (2.14)$$

де S_0 - початковий вміст теплоаккумулятора, *кДж*

$P_{S,in}$ - теплова потужність, що надходить до теплоаккумулятора, *кВт*

D_{th} - потреба в тепловій потужності, *кВт*

S_{\max} - максимальна енергоакumuлююча здатність теплоаккумулятора, *кДж*.

На практиці при роботі з міні-ТЕЦ акумулююча ємність наповнюється якраз на той випадок, якщо теплова потужність міні-ТЕЦ більша за теплову потребу, тоді залишок енергії зберігається в акумулюючій ємності (2.15) [11].

Практична операція завантаження

$$S(t) = \begin{cases} S_{\max} & \text{if } S(t-1) \geq S_{\max} \\ S_0 + \int_{t_0}^t (P_{in}(t) - D_{th}(t)) & \text{if } P_{in}(t) > D_{th}(t) \\ S(t-1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.15)$$

Коли водосховище заповнюється, станція зупиняється і водосховище постачає необхідну кількість тепла. У рівнянні (2.16) запропоновано інший тип роботи, який дозволяє завантажувати водосховище, коли вироблена теплова потужність більша за необхідну, і розвантажувати його, за наявності акумульованої енергії, коли має місце протилежний випадок. Це може бути корисним для подовження часу роботи установки, коли необхідна дія контролю.

Запропонована операція для продовження дії контролю

$$S(t) = \begin{cases} S_{\max} & \text{if } S(t-1) \geq S_{\max} \\ S_0 + \int_{t_0}^t (P_{th}(t) - D_{th}(t)) & \text{otherwise} \\ 0 & \text{if } S(t-1) \leq 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

Технічні характеристики теплоакumuлюючого резервуару для роботи в комплексі з есорpower e4.7 взяті з [11]. Цей комерційний теплоакumuлюючий резервуар має максимальну потужність зберігання енергії 34,6 кВт-год та максимальний об'єм 1480 л.

Розроблено просту модель теплоакumuлюючого резервуару. Як видно з рівнянь, акумулююча ємність є інтегратором з обмеженою потужністю (S_{\max} і 0) та початковим станом (S_0). На вхід моделі подається теплова потужність $P_{S,in}(t)$, а на виході - накопичена енергія $S(t)$.

Представлення моделі теплоакumuлюючої ємності в Simulink.

На рис. 2.18 показано компонування в Simulink теплоакumuлюючого резервуару. Для цілей перерахунку одиниць виміру включено два факторні блоки.

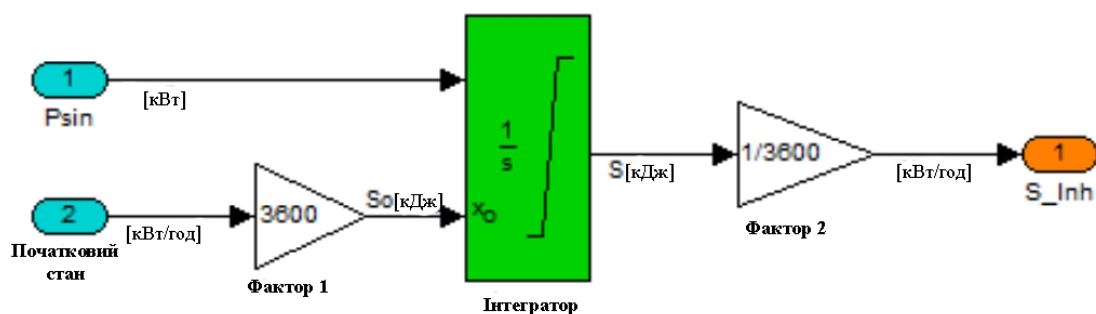


Рисунок 2.18 – Макет в Simulink моделі акумулюючої ємності

2.6 Режим роботи теплового вводу

В роботі [11] запропоновано варіант роботи міні-ТЕЦ, що працює спільно з акумулюючим резервуаром тепла. В рамках даної роботи цей режим роботи називається "режим роботи з тепловим виводом". Основною метою режиму роботи теплового вводу, окрім покриття попиту на тепло, є максимізація часових інтервалів, коли міні-ТЕЦ увімкнена або вимкнена. Для цього логіка наступна: міні-ТЕЦ працює на повну потужність для покриття потреби в тепловій енергії. Якщо попит на теплову енергію перевищує теплову потужність міні-ТЕЦ, котел повинен покривати ці піки попиту. Якщо теплова потужність міні-ТЕЦ перевищує теплову потребу, то відбувається завантаження акумулятора теплоти залишковою енергією, що утворилася внаслідок різниці між тепловою потужністю міні-ТЕЦ та тепловою потребою. Міні-ТЕЦ працює на повну потужність до повного заповнення теплоаккумулятора, після чого міні-ТЕЦ вимикається і теплоаккумулятор має забезпечити необхідну теплову енергію. Теплоакumuлюючий резервуар розвантажується до тих пір, поки вміст енергії в ньому не стане недостатньо високим для покриття попиту на тепло, після чого вмикається міні-ТЕЦ і цикл починається знову. Розроблено логічний блок управління для моделювання запропонованого режиму роботи теплового вводу. Даний блок дозволяє контролювати стан міні-ТЕЦ та визначати подачу в теплоакumuлюючу ємність. Для цього мають бути визначені різні стани режиму роботи, а також умови здійснення переходів між ними.

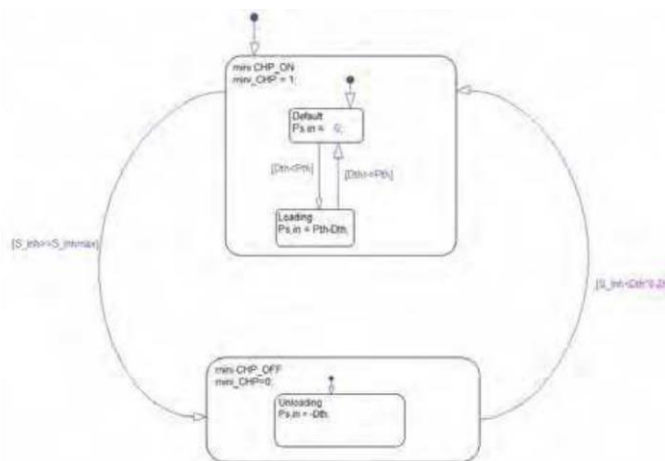


Рисунок 2.19 – Логічний блок управління роботою теплового вводу

На рис. 2.19 зображено схему логічної одиниці у вигляді діаграми станів. Стан за замовчуванням - це коли міні-ТЕЦ увімкнена. Усередині цього стану визначається вхід для теплоаккумулятора. Якщо теплова потужність міні-ТЕЦ менша, ніж потреба в тепловій енергії, то подача в акумулюючу ємність не здійснюється. При протилежній ситуації система переходить в стан "Завантаження" і в акумулюючу ємність подається різниця між тепловою потужністю міні-ТЕЦ та попитом на теплову енергію. Система залишається у включеному стані, виконуючи переходи між станами "За замовчуванням" та "Завантаження" до тих пір, поки вміст енергії в аккумуляторі не буде максимальним, після чого система переходить у стан "міні-ТЕЦ вимкнена", де стан "Розвантаження" визначає від'ємний вхід для аккумулятора, що дорівнює попиту на теплову енергію, який представляє собою операцію розвантаження аккумулятора. Система повертається в стан "міні-ТЕЦ увімкнена", коли вміст енергії в водосховищі S_{inh} в кВт-год є меншим, ніж потреба в тепловій енергії, розрахована за фактичним значенням потреби в тепловій енергії D_{th} в кВт за період п'ятнадцять хвилин.

2.7 Інтеграція в електричну мережу

Обстежувана низьковольтна мережа складається з шести фідерів, на кожному з яких розташовано по п'ять блоків приміщень фермерського господарства, а кожен блок складається з 6 будівель. Додатково в будівлі є можливість встановити міні-ТЕЦ, або тепловий насос. На рис. 2.20 показано конфігурацію прикладу низьковольтної мережі, де Нр - тепловий насос, mСНР - міні-ТЕЦ, а НUs - результуюче побутове навантаження на 6 житлових одиниць. Т5 - кінцевий вузол, де проводяться вимірювання напруги для оцінок, які розглядаються в наступному розділі.

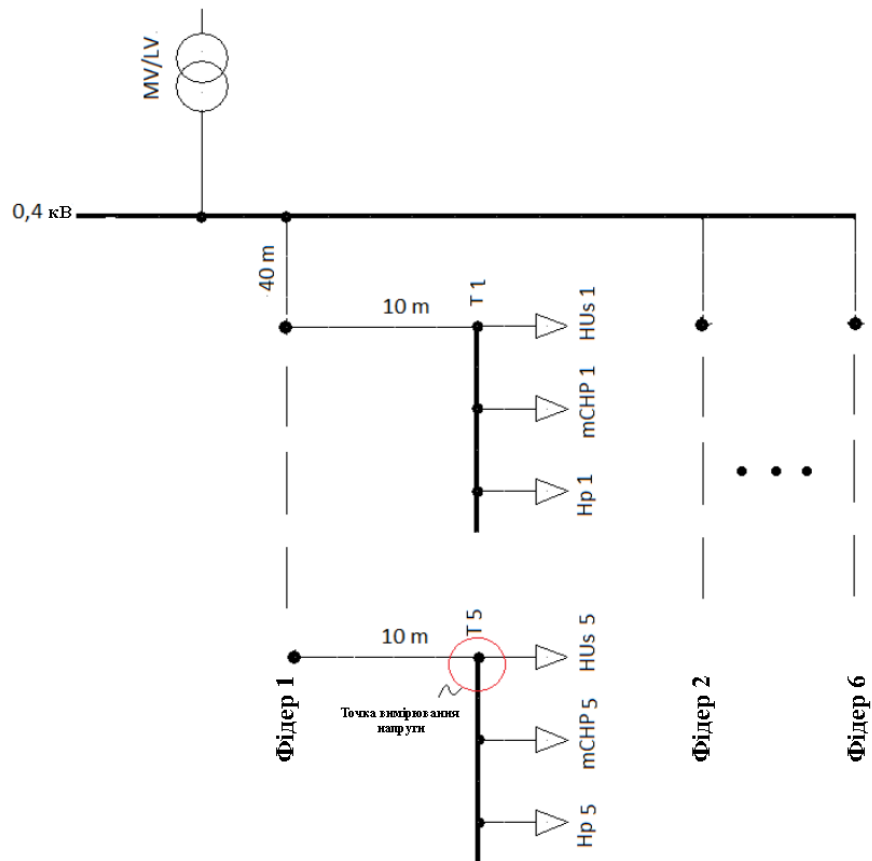


Рисунок 2.20 – Вигляд прикладу мережі низької напруги

В Таблиці 2.2 наведені відповідні електричні характеристики елементів мережі.

Таблиця 2.2 Електричні характеристики елементів мережі низької напруги

Елемент	Активна потужність в кВт	Коефіцієнт потужності
Міні ТЕЦ	4.7	0.98
Тепловий насос	4.7	0.95
Навантаження на одиниці	21	0.95

Інтеграція макету міні-ТЕЦ в електричну мережу

Міні-ТЕЦ представлена в DIgSilent як інверсне навантаження, яке вводить активну і реактивну потужність в електричну мережу. Значення інжектваної потужності отримані з динамічної моделі в Matlab/Simulink, як показано на рис. 2.21.

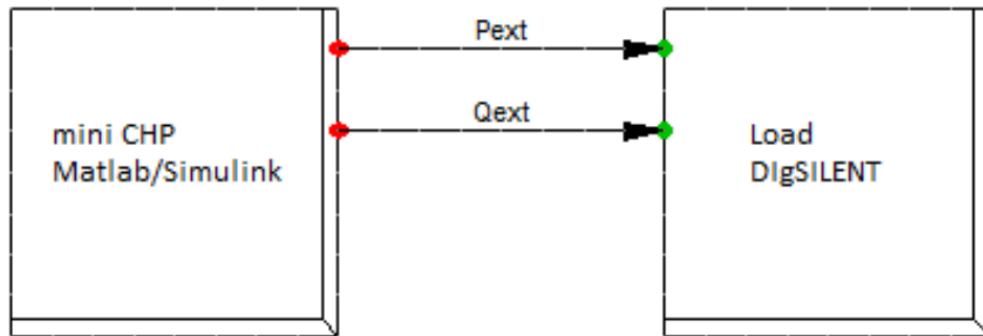


Рисунок 2.21 – Представлення міні-ТЕЦ в DIgSILENT

Підхід до системного моделювання в DIgSILENT

Для імітаційного аналізу перехідних процесів DigSILENT надає ієрархію рівнів для побудови динамічних моделей. Він поєднує в собі як графічні методи моделювання, так і скриптові [5]. Опис різних рівнів наведено нижче:

-Композитний фрейм: містить графічне представлення взаємодіючих елементів, представлених блоками. Зв'язки між сигналами різних елементів визначаються графічними зв'язками.

-Визначення блоку: На цьому рівні встановлюються рівняння, що описують динамічну поведінку відповідного елемента. Вони можуть бути створені за допомогою вбудованої моделі, моделі, визначеної користувачем, або моделі, розробленої в Matlab/Simulink. Тут повинні бути визначені входи, виходи, змінні стану та початкові умови динамічної моделі. Це примітивне визначення і може використовуватися різними елементами, що представляють один і той же компонент, наприклад, коли потрібно змодельовати більше одного генератора, потрібно лише одне визначення блоку для моделі генератора.

-Загальна модель: базується на визначенні блоків. При цьому значення параметрів повинні бути налаштовані для кожного елемента окремо. Це фронт-енд визначеної динамічної моделі.

-Композитна модель: базується на композитній рамі. Загальні моделі повинні бути пов'язані з відповідним гніздом у композитній рамі. Це інтерфейс між елементом електричної мережі та компонентами на її фоні [5].

Композитний каркас. Створюється композитний каркас, в якому промальовуються пази і з'єднання для різних елементів. На рис. 2.22 зображено композитний каркас. Гнізда, які тут позначені як DigSILENT, повинні містити елементи, які вже існують у раніше побудованій електричній мережі. Як було сказано вище, присвоєння елементів відповідним слотам здійснюється в композиційній моделі.

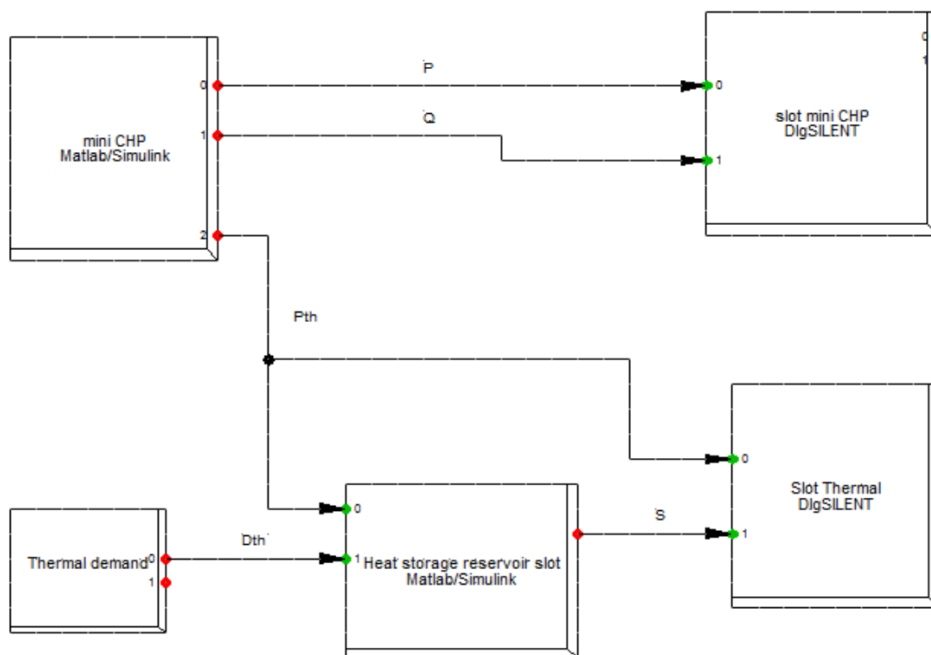


Рисунок 2.22 – Композитна рама

Визначення блоку

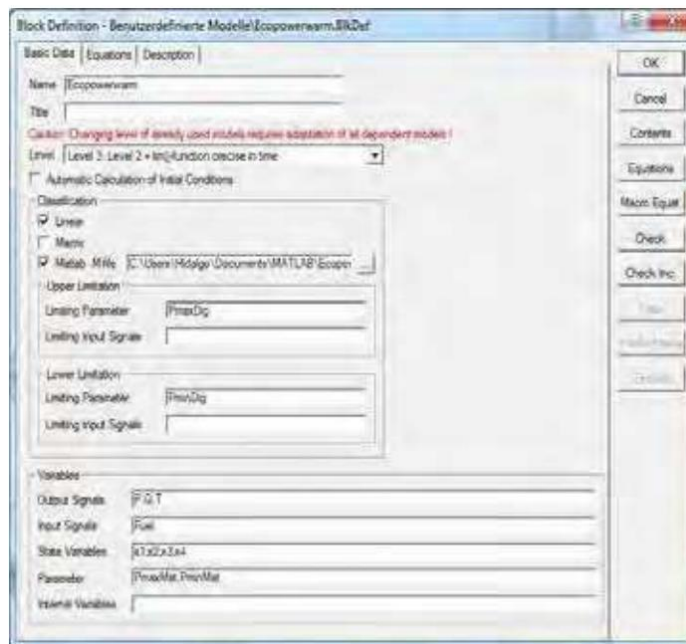


Рисунок 2.23 – Визначення блоку

Після створення композитного каркасу з його прорізами визначається визначення блоку, як показано на рис. 2.23. Тут вказується розширення Matlab/simulink файлу, а також відповідні змінні, входи та виходи блоку. Визначення блоку також складається з рівнянь, які описують початкові умови.

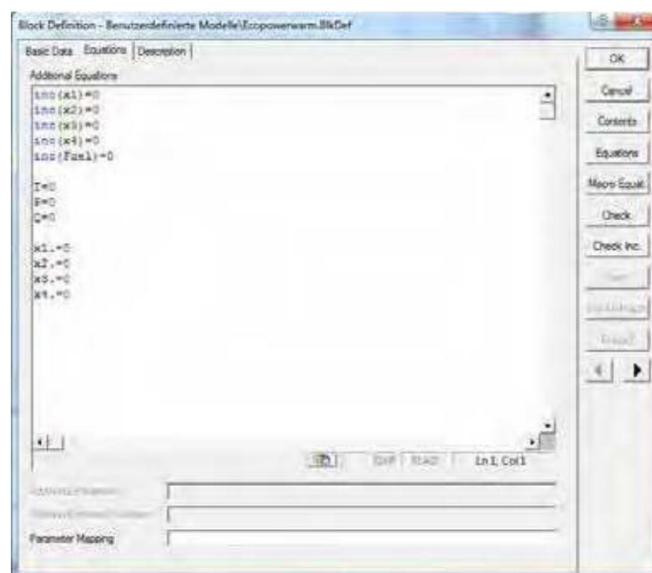


Рисунок 2.24 – Рівняння визначення блоку

Загальна модель. На основі визначення блоку загальна модель дозволяє надати значення параметрам моделі. Див. рис. 2.25.

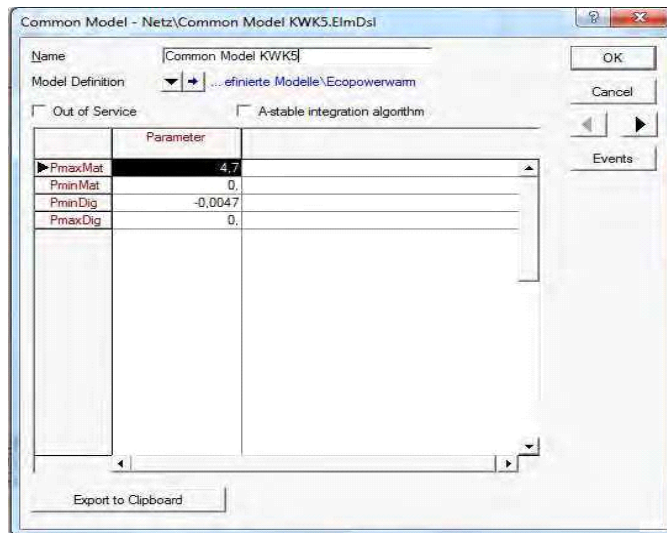


Рисунок 2.25 – Загальна модель

Композитна модель. При створенні композитної моделі має бути обраний фреймворк. Вибирається раніше розроблений композитний каркас і наявні слоти пов'язуються з відповідними загальними моделями або елементами мережі. Визначення композитної моделі для моделі міні-ТЕЦ можна переглянути на рис. 2.26

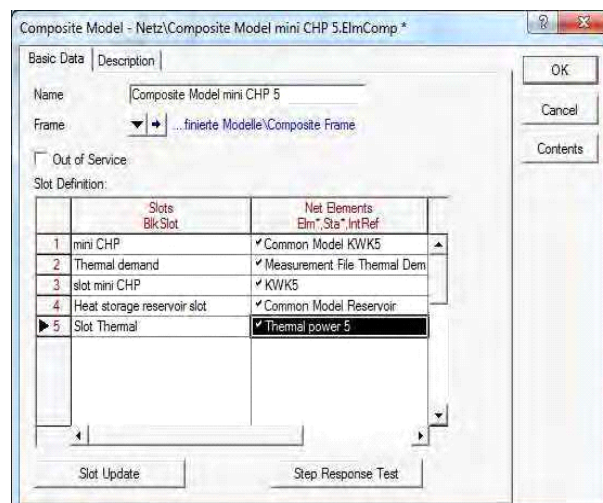


Рисунок 2.26 – Композитна модель

Перелік раніше створених елементів можна оцінити в менеджері даних DiGSILENT, як показано на рис. 2.27 [5].

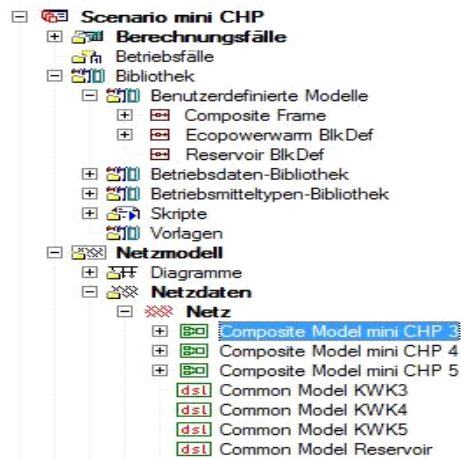


Рисунок 2.27 – Вигляд створених об'єктів у менеджері даних DIgSILENT

2.8 Висновки по розділу

1. Розроблена динамічна модель розподіленого ресурсу та електричної мережі.
2. Проведено ідентифікацію системи за допомогою моделі, яка представляє залежність між вхідним сигналом $u(t)$ і вихідною змінною $y(t)$ за певний проміжок часу на основі вимірянних даних.
3. Система взаємодіє з навколишнім середовищем за допомогою входів, які не залежать від внутрішніх змінних системи, та виходів, які не залежать від навколишнього середовища.
4. Розроблено просту модель теплоаккумулюючого резервуару.
5. Визначено композитну модель для моделі міні-ТЕЦ.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Регулювання напруги

У цьому розділі розкривається процедура проектування контролера. На основі розподільчої мережі, представленої на рис. 2.20, у розділі 3.2 оцінено вплив впровадження міні-ТЕЦ та теплових насосів, розглядаючи цю ситуацію як можливий майбутній сценарій, та обрано робочий сценарій. У розділі 3.3 отримана система, що підлягає управлінню, а в розділі 3.4 розроблений контролер.

3.2 Вплив впровадження міні-ТЕЦ

Різні сценарії оцінюються з метою визначення відповідних умов для ілюстрації результатів регулювання напруги. У Таблиці 3.1 наведено опис оцінених сценаріїв.

Таблиця 3.1 – Сценарії впровадження міні-ТЕЦ

Фідер	Сценарій 1		Сценарій 2	
	#міні ТЕЦ	#Теплові насоси	#міні ТЕЦ	#Теплові насоси
1	5	0	3	2
2	0	5	3	2
3	0	5	3	2
4	0	5	3	2
5	0	5	3	2

Сценарій 1

В таблиці 3.2 наведені значення рівня напруги в точці дослідження після введення визначеної кількості міні-ТЕЦ за сценарієм 1.

Таблиця 3.2 – Вплив міні-ТЕЦ на мережу за сценарієм 1

# кількість міні ТЕЦ	Рівень напруги
0	0.93395
1	0.93653
2	0.93845
3	0.93994
4	0.94100
5	0.94163

На рис. 3.1 зображено вплив міні-ТЕЦ на електричну мережу.

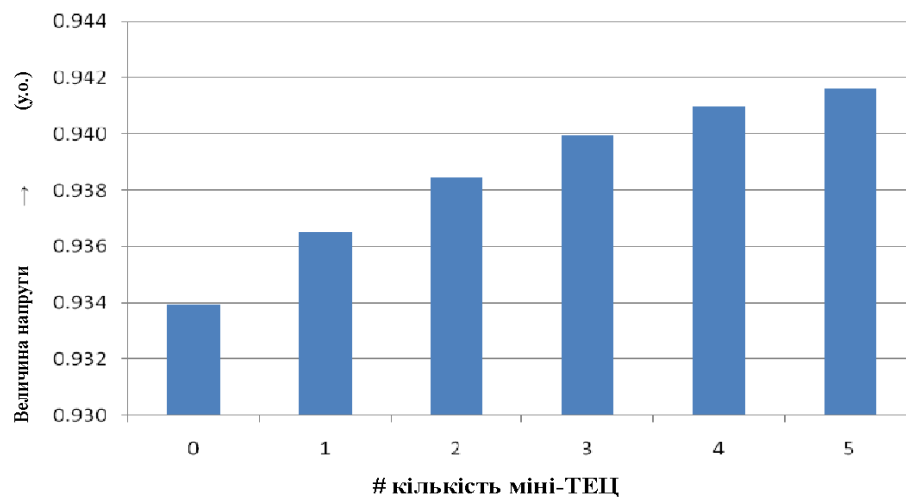


Рисунок 3.1 – Вплив міні-ТЕЦ на мережу за сценарієм 1

Для сценарію 1 рівень напруги змінюється від 0,93395 у.о. без міні-ТЕЦ до 0,94163 у.о. з п'ятьма введеними блоками.

Сценарій 2

Значення рівнів напруги для сценарію 2 наведені в Таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Вплив міні-ТЕЦ на мережу за сценарієм 2

# кількість міні ТЕЦ	Рівень напруги
0	0.93923
1	0.94178
2	0.94369
3	0.94517

Значення, представлені в Таблиці 3.3, візуалізовані на рис. 3.2 у вигляді діаграми.

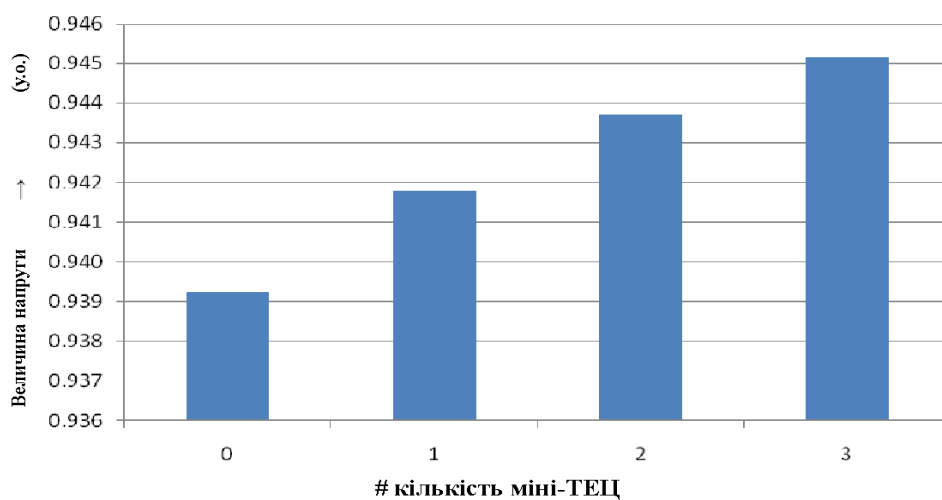


Рисунок 3.2 – Зміна рівня напруги для сценарію 2

Для сценарію 2 рівень напруги змінюється від 0,93923 у.о. без міні-ТЕЦ до 0,94517 у.о. при введенні трьох блоків.

Оскільки для приведення рівня напруги до необхідної нижньої межі (0,94 у.о.) потрібна лише одна міні-ТЕЦ, а інтервал регулювання напруги, як у сценарії 1, є більшим, то в якості тестового сценарію обрано сценарій 2.

3.3 Розглянута система регулювання напруги

При стратегічному розташуванні міні-ТЕЦ можуть сприяти підтримці напруги на потрібному рівні шляхом диспетчеризації або обмеження

електроенергії. Місця розташування міні-ТЕЦ та теплових насосів показані на рис. 3.3 для прикладу фідерної лінії.

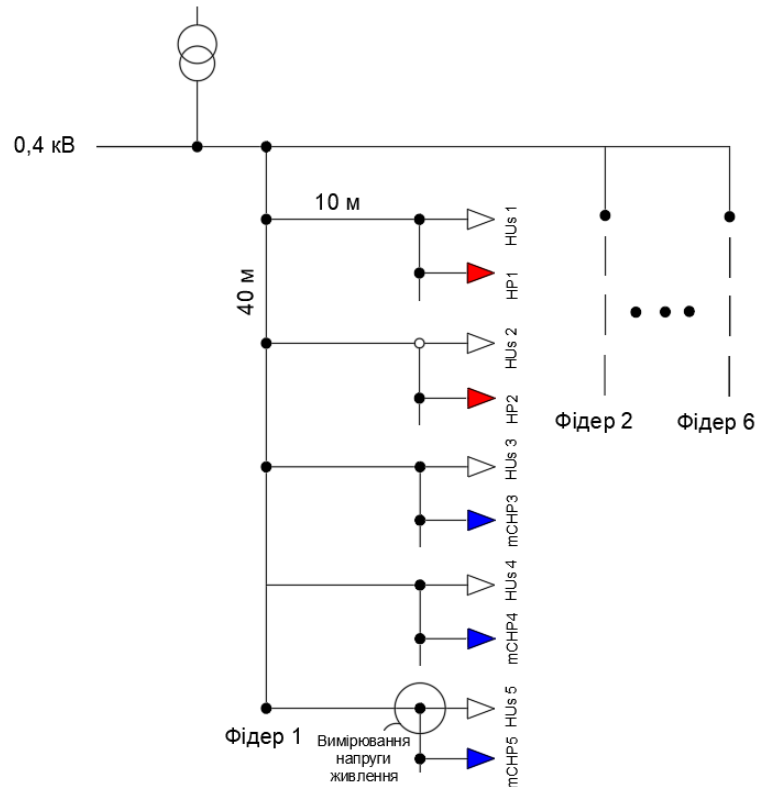


Рисунок 3.3 – Розташування блоків міні-ТЕЦ

Система, що підлягає управлінню, отримана шляхом дослідження результуючої напруги на виході при одночасному включенні трьох міні-ТЕЦ за схемою, наведеною на рис. 3.4.

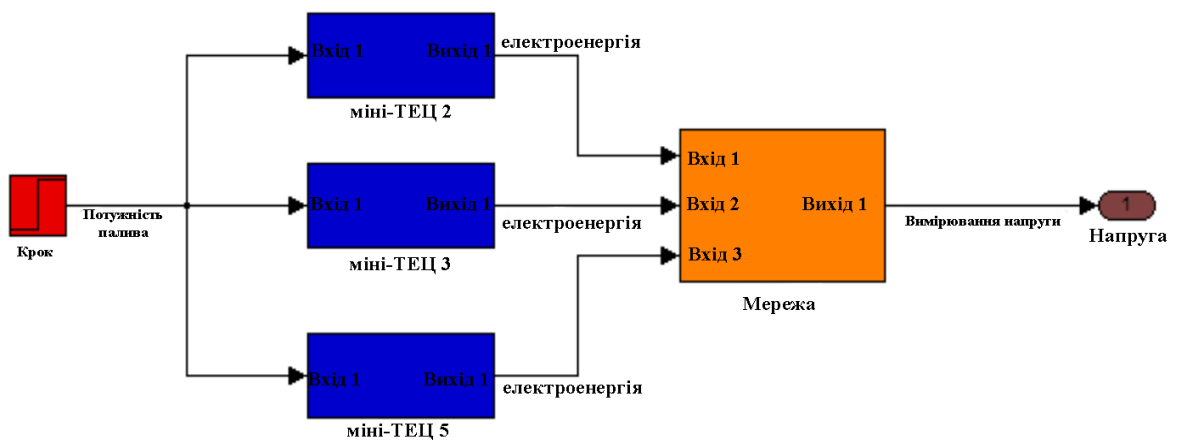


Рисунок 3.4 – Схема отриманої системи

Дані, що відповідають вольтамперній характеристиці (ΔU) та вхідним сигналам, використовуються в Matlab для виконання ідентифікації системи. Див. рис. 3.5.

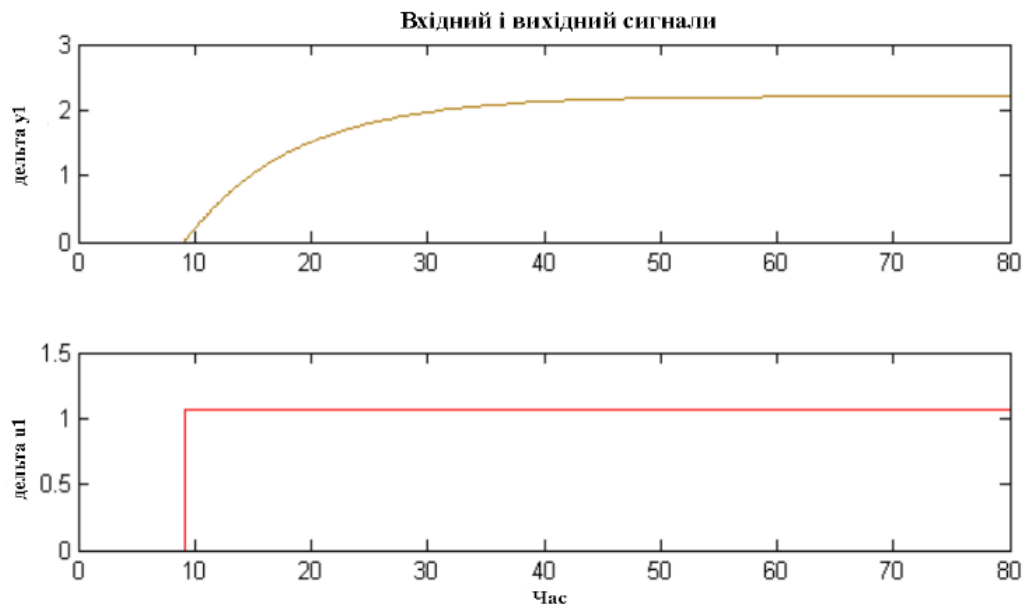


Рисунок 3.5 – Використані дані для ідентифікації отриманої системи

В результаті вийшла система G_{sys} :

$$G_{sys} = \frac{2.095}{1 + 9.5392 \cdot s} \quad (3.1)$$

На рис. 3.6 наведено виміряні дані та результати імітаційної моделі.

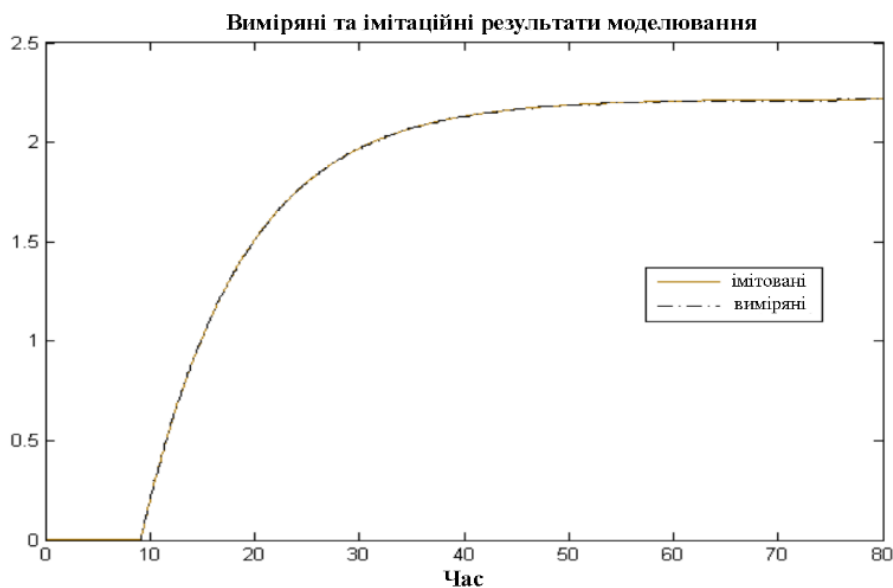


Рисунок 3.6 – Виміряна та змодельована потужність для кінцевої системи

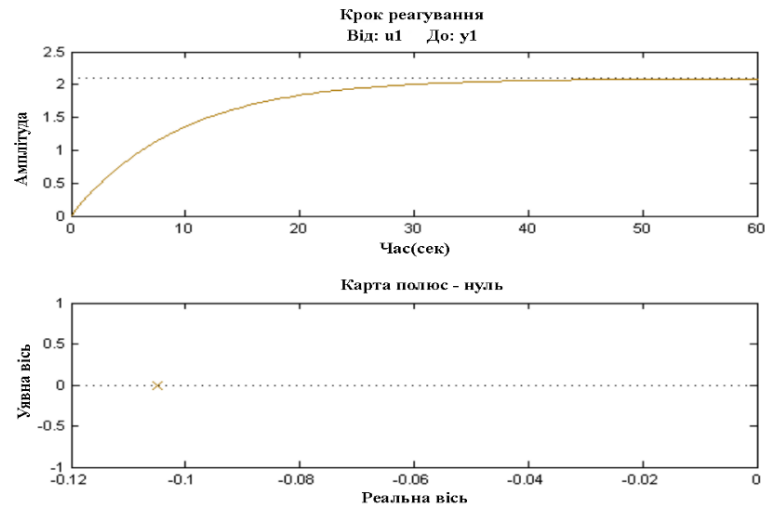


Рисунок 3.7 – Ступінчаста реакція та остаточно система полюс/нуль карти

Передавальна функція $G_{sys}(s)$ описує динаміку системи, що управляється. Система має унікальний полюс, розташований при $s = -0,1048$. Ступінчаста характеристика та розташування полюса системи показані на рис. 3.7. Оскільки полюс розташований у лівій півплощині, то система є стійкою.

3.4 Конструкція контролера

Запропонована стратегія управління передбачає блок управління, який регулює вхід для трьох міні-ТЕЦ з метою підтримання рівня напруги на визначеному заданому значенні напруги. Стратегія управління зображена на рис. 3.8.

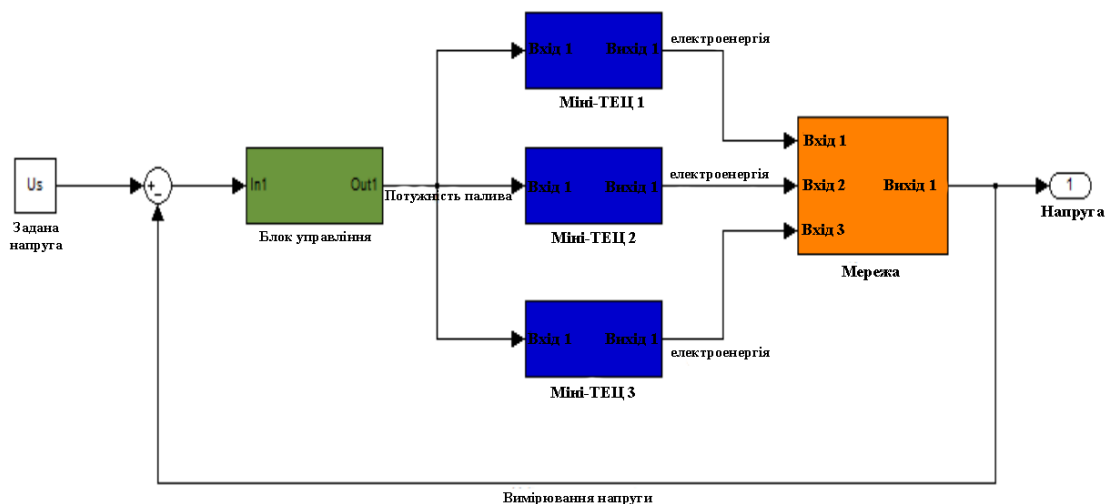


Рисунок 3.8 – Стратегія управління

Для системи першого порядку, яка описується $G_{sys}(s)$, запропонованим регулятором є ПІ-регулятор з наступною структурою G_{PI} [7]:

$$G_{PI} = P \left[1 + I \frac{1}{s} \right] \quad (3.2)$$

де P - пропорційний параметр

I - інтегральний параметр.

Інтегральний параметр вибирається для виконання скасування полюса/нуля, а пропорційний регулюється для досягнення розумної швидкісної реакції (від 3 до 10 разів швидше, ніж оригінальна система) і забезпечення стабільності. Отриманий контролер C_{PI} становить:

$$C_{PI} = 0.26641 \frac{(1 + 9.5392 \cdot s)}{s} \quad (3.3)$$

Зауважимо, що контролер C_{PI} має нуль, розташований при $s = -0.1048$, що призводить до зведення з полюсом системи G_{sys} . Упорядковуючи вираз для отримання параметрів, виставлених в рівнянні (3.2), регулятор ІСЦ можна виразити наступним чином:

$$C_{PI} = 2.541 \left[1 + 0.1048 \cdot \frac{1}{s} \right]$$

$$P = 2.541 \quad (3.4)$$

$$I = 0.1048$$

Карта полюс/нуль замкненої системи (C_{PI} та G_{sys}) наведена на рис. 3.9. Стійкість системи забезпечена, оскільки отриманий полюс має реальну від'ємну частину. Також можна спостерігати скасування полюса/нуля, що виконується контролером.

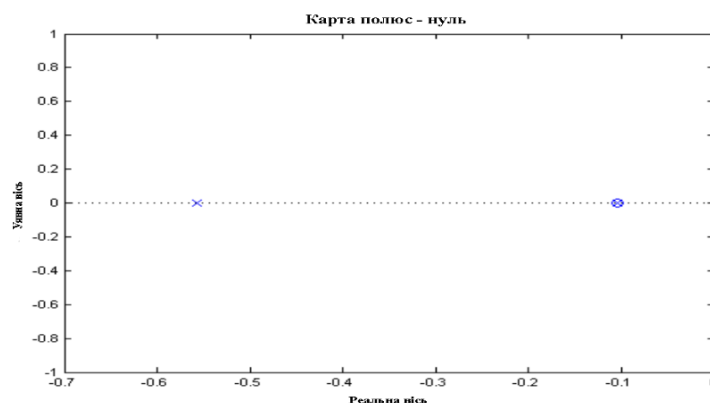


Рисунок 3.9 – Карта полюсів/нулів замкненої системи

Ступінчаста характеристика замкненої системи показана на рис. 3.10. Порівнюючи з рис. 3.7, можна побачити, що часова характеристика коротша і що реакція замкненої системи слідує за заданим еталоном (одиницею).

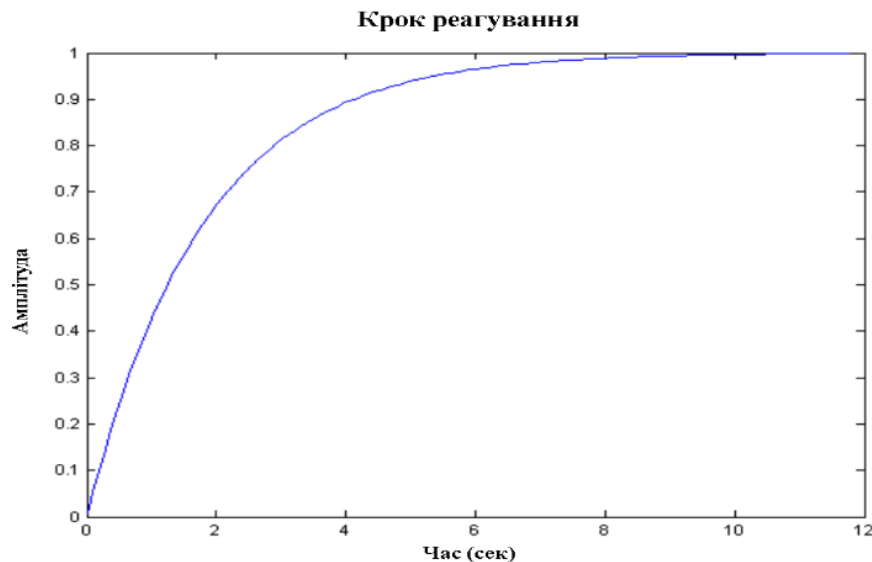


Рисунок 3.10 – Ступінчаста характеристика замкненого контуру

3.5 Результати моделювання

Поведінка теплоакумулюючої ємності

В даному розділі представлено поведінку акумулюючої ємності для досліджуваних режимів роботи, на рис. 3.11 наведено приклад поведінки ємності для режиму роботи з тепловим відводом. Для ситуації, що розглядається, міні-ТЕЦ працює на повне навантаження, а акумулююча ємність наповнюється тоді, коли теплова потужність станції перевищує попит на теплову енергію. Приблизно о 10:30 водосховище заповнюється, міні-ТЕЦ зупиняється, а накопичена енергія використовується для задоволення потреб у теплі. Міні-ТЕЦ перебуває у вимкненому стані до тих пір, поки вміст енергії у водосховищі не стане недостатнім для покриття потреби у теплі, це

відбувається близько 13:00. Після цього міні-ТЕЦ знову вмикається і починається новий цикл.

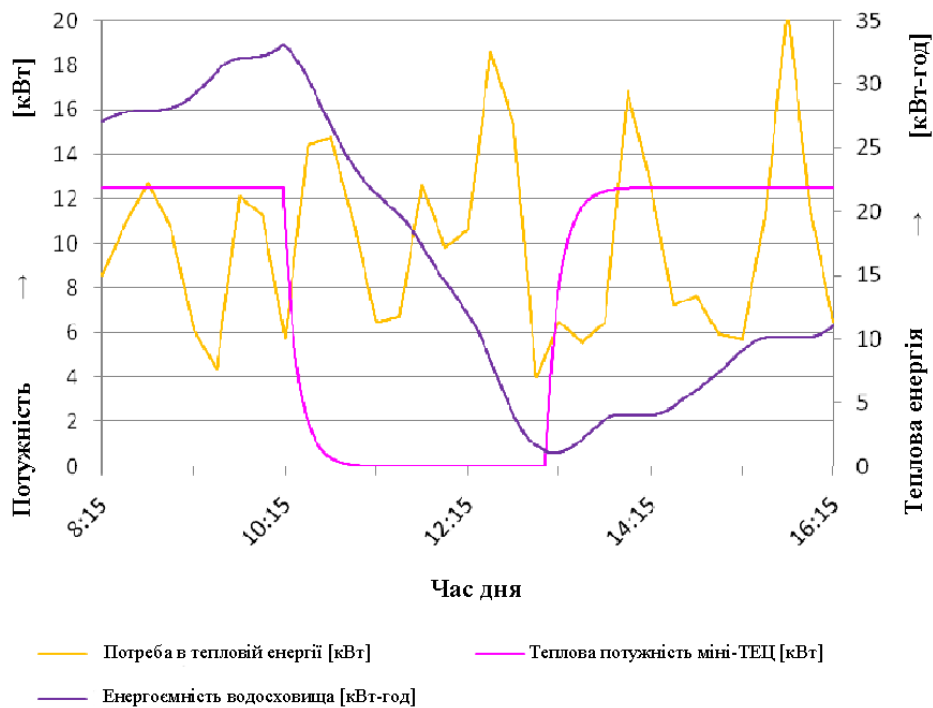


Рисунок 3.11 – Поведінка водосховища в режимі роботи з тепловим випередженням

На рис. 3.12 представлено поведінку водосховища для режиму регулювання напруги. Така поведінка акумулятора тепла є корисною для подовження часу активації міні-ТЕЦ, коли вона перебуває під дією регулюючої напруги. Як і в попередньому режимі роботи, водосховище наповнюється, коли теплова потужність станції перевищує попит, але різниця полягає в тому, що накопичена енергія використовується одразу, коли попит перевищує потужність міні-ТЕЦ. Таким чином, не обов'язково, щоб теплоаккумулятор був повністю заряджений для використання накопиченої в ньому енергії. Перевагою такого режиму роботи є те, що він дає своєрідний ступінь свободи для міні-ТЕЦ в плані регулювання напруги; оскільки водосховище допомагає покривати теплову потребу. Коли водосховище експлуатується таким чином і станція знаходиться під дією регулювання напруги, говорять, що система працює в режимі регулювання напруги.

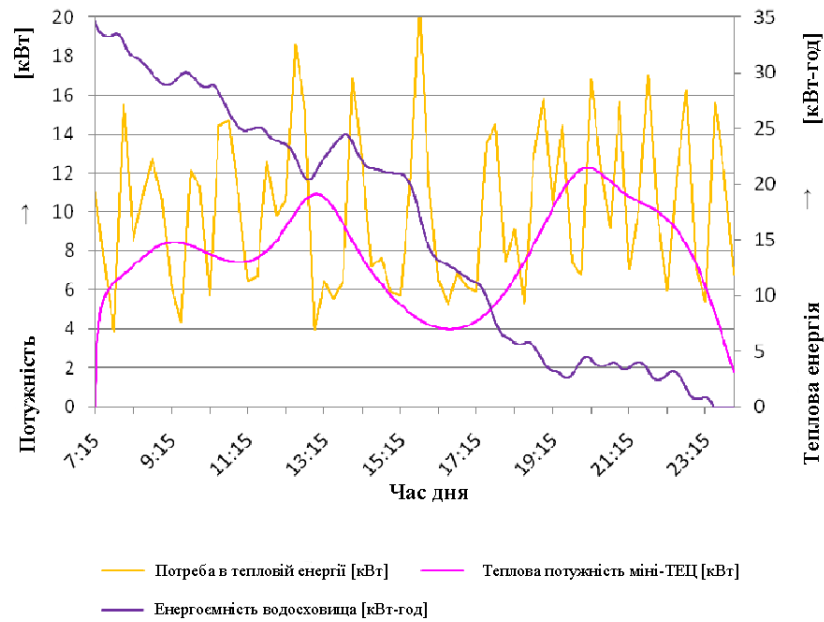


Рисунок 3.12 – Поведінка водосховища в режимі регулювання напруги

Тест контролера

У цьому розділі представлено симуляцію для тестування контролера. Для цього випробування розглядається профіль електричного навантаження для інтервалу високих і пікових навантажень. Цей інтервал становить від 07:15 до 24:00, як показано на рис. 3.13. Контур регулювання налаштований із задаванням 0,945 для величини напруги.

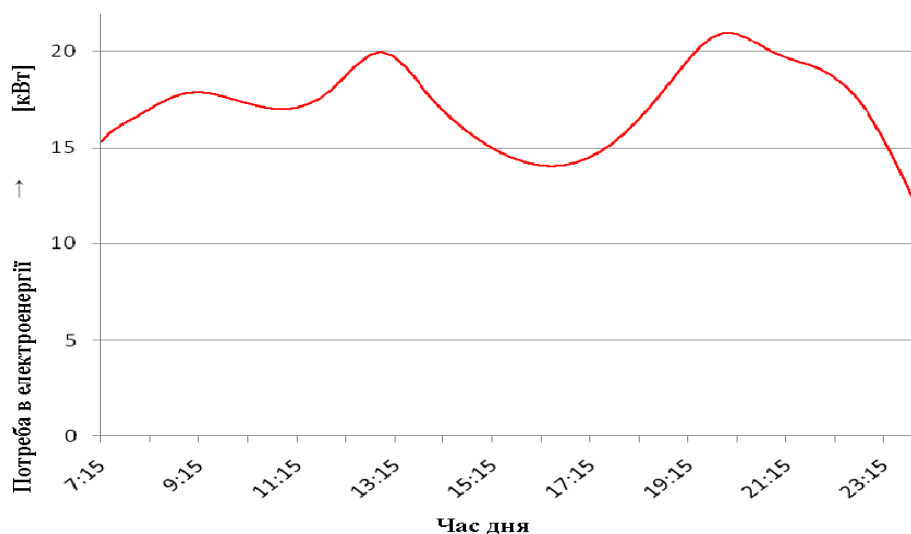


Рисунок 3.13 – Високе та пікове навантаження для тестування контролера

Керований профіль напруги разом з профілем напруги для випадку без введення міні-ТЕЦ наведено на рис. 3.14. Видно, що регулятор здатен змусити міні-ТЕЦ слідувати заданій уставці, відкидаючи збурення профілю електричного навантаження. Поведінка входу міні-ТЕЦ та виходу міні-ТЕЦ для тесту контролера представлена на рис. 3.15.

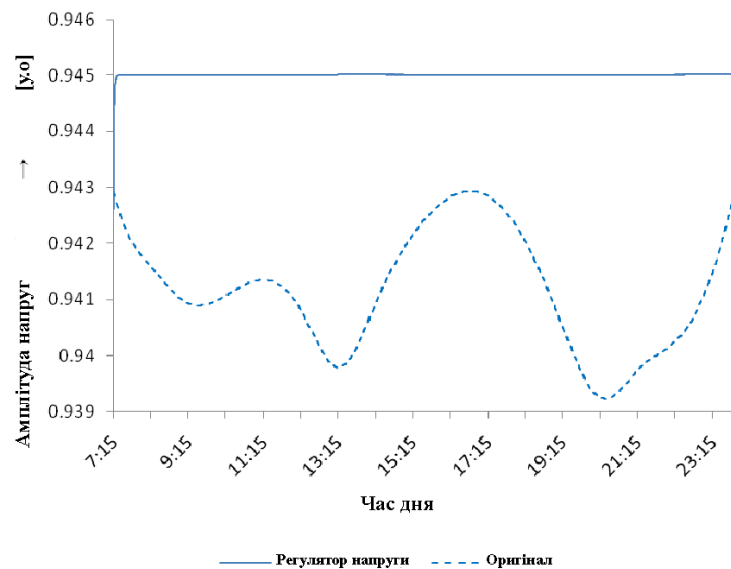


Рисунок 3.14 – Профіль напруги для перевірки контролера

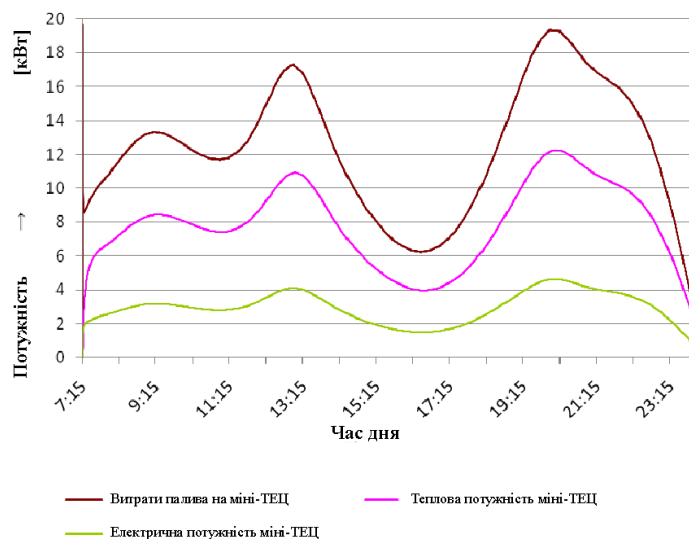


Рисунок 3.15 – Профілі входу та виходу міні-ТЕЦ для тестування контролера

Потреба в електричній та тепловій енергії

Профіль використаного електричного навантаження за добовий інтервал часу наведено на рис. 3.16. Видно, що в нічні та ранні ранкові години

спостерігається низьке споживання електроенергії. Близько 6:15 год попит починає зростати і о 13:15 год як пік наближається до 20 кВт. Вдень на графіку спостерігається долина, що свідчить про зниження попиту на електричну енергію, а у вечірні години електричне навантаження знову зростає, досягаючи піку 21 кВт о 20:15.

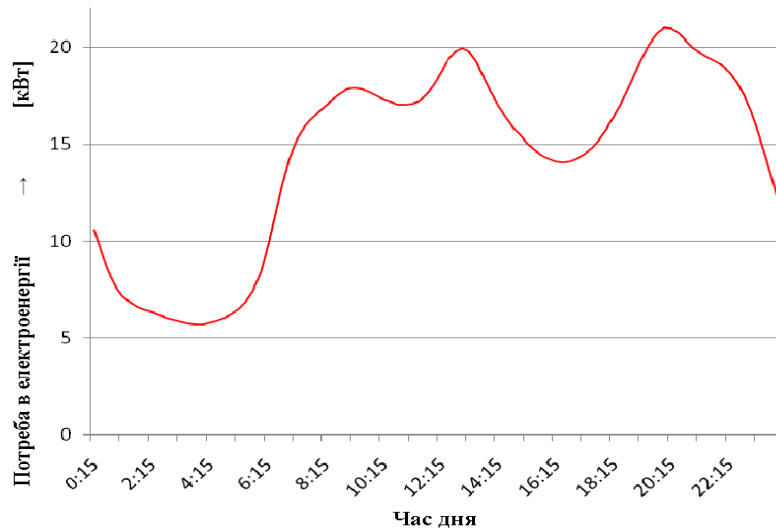


Рисунок 3.16 – Завантаженість житлових одиниць

Дані щодо попиту на теплову енергію взяті з [11] і наведені на рис. 3.17. Позначення відповідає порі року, ясним чи хмарним кліматичним умовам, а також робочому чи недільному дню. Для типового літнього робочого дня (ЛРД) попит на теплову енергію є низьким і використання міні-ТЕЦ є мінімальним, як показано на рис. 3.17(а). З іншого боку, на підділянці (b) для похмурого робочого зимового дня (РЗД) попит на теплову енергію є високим, і міні-ТЕЦ має працювати на повну потужність протягом усього дня. Потенційне використання режиму роботи з регульованою напругою виявлено для перехідних сезонів року - весни та осені.

Перехідні хмарні дні (хмарний робочий день ХРД та перехідна хмарна неділя ПХН) характеризуються піковим попитом понад 30 кВт у ранкові години. У вечірні години також спостерігається підвищений попит, особливо у перехідні робочі дні, коли він може перевищувати 20 кВт, як показано на рис. 3.20. (d) і (f). На підділянках (c) та (e) для перехідних світлих днів (світлий

робочий день СРД та перехідна світла неділя ПСН) попит майже завжди залишається нижче 20 кВт.

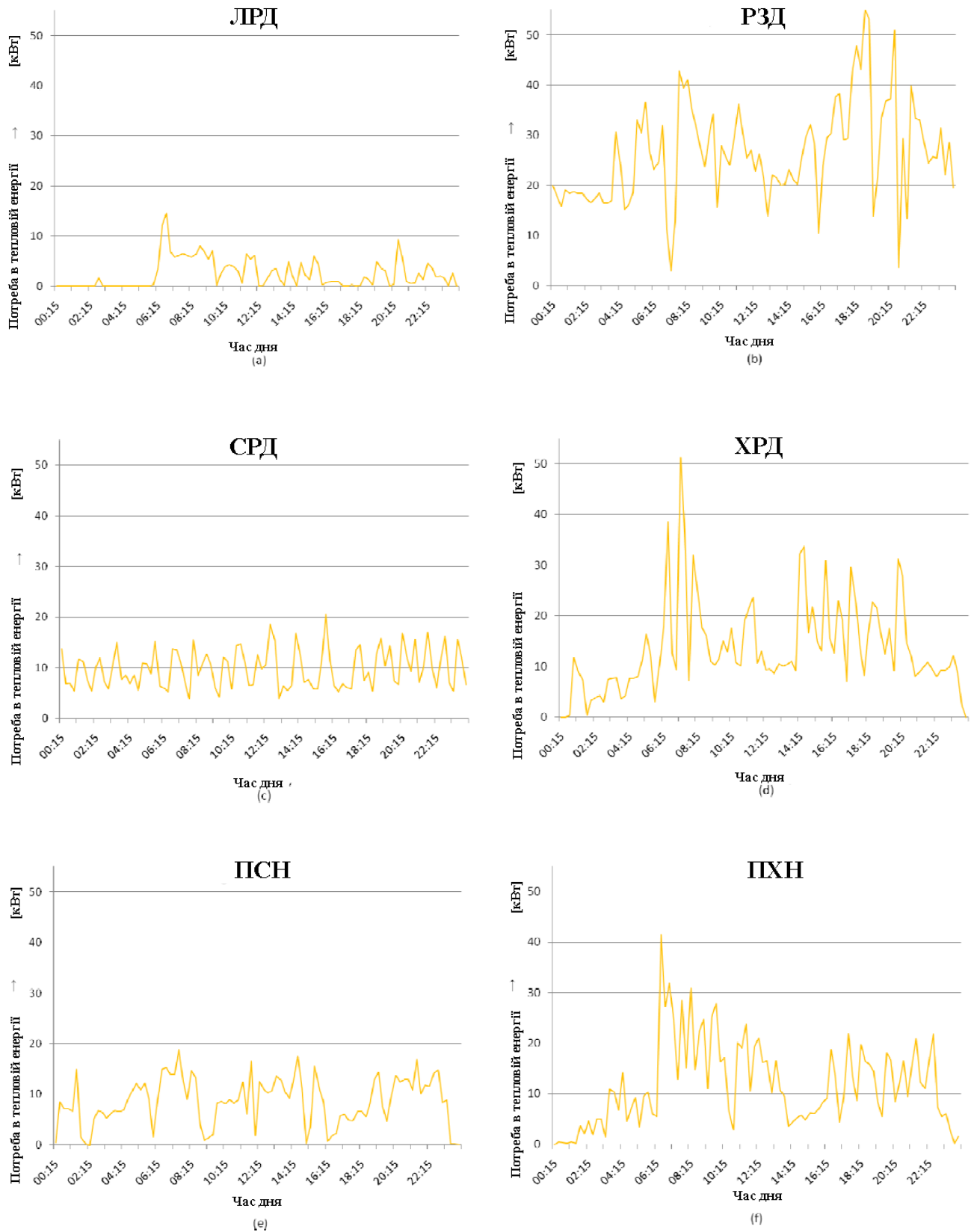


Рисунок 3.17 – Попит на теплову енергію для типових днів (а) ЛРД, (б) РЗД, (в) СРД, (д) ХРД, (е) ПСН та (ф) ПХН

Режим роботи теплового вводу

Для режиму роботи теплового вводу моделюються два випадки: випадок А - нульові початкові умови водосховища, випадок В - початкові умови з повним заповненням водосховища.

Робота теплового вводу для перехідного світлого робочого дня СРД

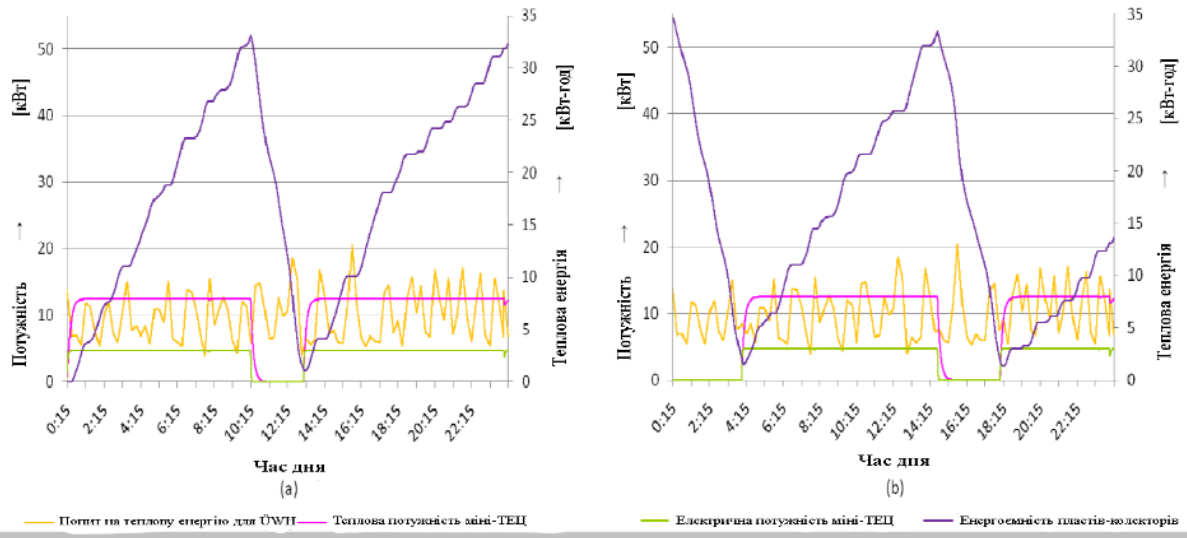


Рисунок 3.18 – Добові профілі для доби СРД для початкових умов водосховища (а) нульових та (б) повний

На рис. 3.18 показано поведінку теплоакumuлюючого резервуару та потужності міні-ТЕЦ для режиму роботи з тепловим випередженням для перехідного світлого робочого дня (СРД). Для випадку А на піддіаграмі (а) видно, що міні-ТЕЦ працює в нічні та ранкові години до повного завантаження водосховища близько 10:15, після чого міні-ТЕЦ робить паузу приблизно на три години і знову вмикається близько 13:00, коли накопиченої енергії водосховища не вистачає для покриття попиту на теплову енергію. Міні-ТЕЦ працює на повну потужність для забезпечення денного та вечірнього попиту на решту доби. Для повних початкових умов міні-ТЕЦ має два інтервали вимкнення, перший займає близько чотирьох годин на початку дня, а другий відбувається в другій половині дня і триває близько трьох годин, як показано на рис. 3.18 (b).

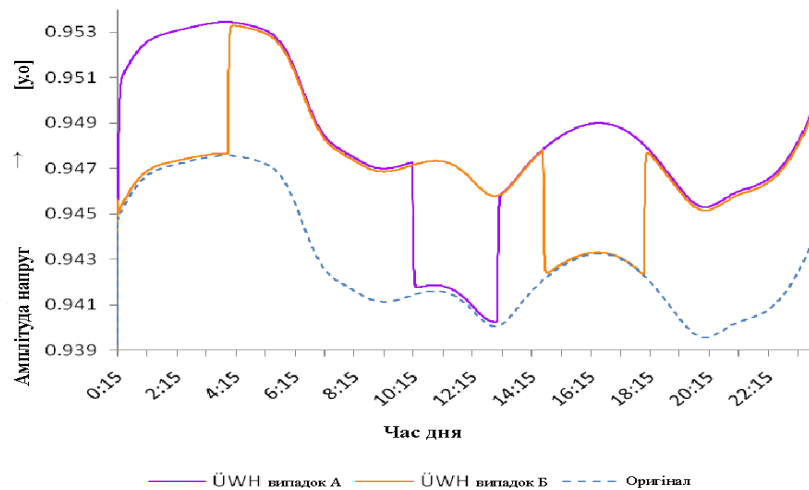


Рисунок 3.19 – Профіль напруги за добу СРД для різних початкових умов роботи водосховища

На рис. 3.19 представлені профілі напруги для раніше проаналізованих випадків. Профіль напруги для випадку А має підвищувальний градієнт у нічні та ранкові години до 4:15 та понижувальний близько полудня, коли станція зупинена. Ця долина збігається з піком споживання електроенергії, тому величина напруги наближається до нижньої межі напруги 0,94. Для випадку Б підвищення напруги відбувається близько 4:15, долина також з'являється в другій половині дня під час другої перерви в роботі станції, але вона не така глибока, як у випадку А, оскільки в цей момент немає піку споживання електроенергії. Виходячи з інтервалів відключення міні-ТЕЦ та профілю напруги, можна зробити висновок, що випадок А, коли водосховище має повне наповнення на початку, є найбільш придатним початковим станом для дня СРД, коли міні-ТЕЦ працює в режимі теплофікаційного відводу.

3.6 Режим роботи регулятора напруги

Проведено моделювання для різних заданих значень. На рис. 3.20 наведено отримані профілі напруги. Падіння напруги о 09:15, 13:15 та 20:15 для уставки 0,946, 0,947 та 0,948 величини напруги в у.о. виникають, коли станція

досягає максимальної потужності і не в змозі більше відкидати збурення, що надходять від електроспоживача. При уставці 0,945 таких падінь не відбувається, оскільки міні-ТЕЦ не працює на максимальній потужності і може підтримувати заданий рівень напруги. Підвищувальний градієнт в нічні та ранкові години спостерігається для профілів напруги з уставкою 0,945, 0,946 та 0,947. Це пов'язано з тим, що електрична потужність міні-ТЕЦ вже дорівнює нулю, а попит на електроенергію є низьким.

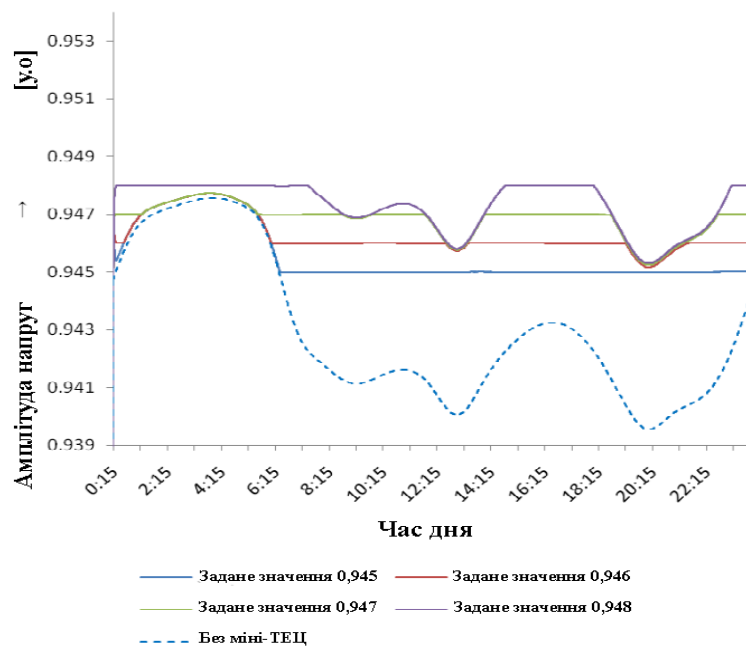


Рисунок 3.20 – Профілі напруги для різних уставок

Як було показано в попередньому розділі для роботи теплопроводу, з двох змодельованих початкових умов теплоаккумулятора найбільш вигідним є початковий стан з повним заповненням. Цей випадок також вивчається для режиму регулювання напруги з метою подальшого порівняння.

Режим регулювання напруги для перехідного сонячного робочого дня СРД.

На рис. 3.21 показана результуюча поведінка вихідної потужності міні-ТЕЦ при регулюючому впливі з різними уставками, представленими на рис. 3.20, для світлого робочого дня в перехідний сезон. Також зображено зміну енергоємності теплоаккумулятора резервуару. Водосховище розвантажується

протягом ночі до моменту часу близько 04:15, а для ділянок (а), (b) і (c) міні-ТЕЦ активується близько 06:00, залишаючи інтервал близько двох годин, протягом яких тепловий дефіцит повинен покриватися за рахунок котла.

Для підділянок (а) та (б) існує мало інтервалів часу, коли водосховище може бути завантажене, що призводить до ситуації з високим навантаженням на котел.

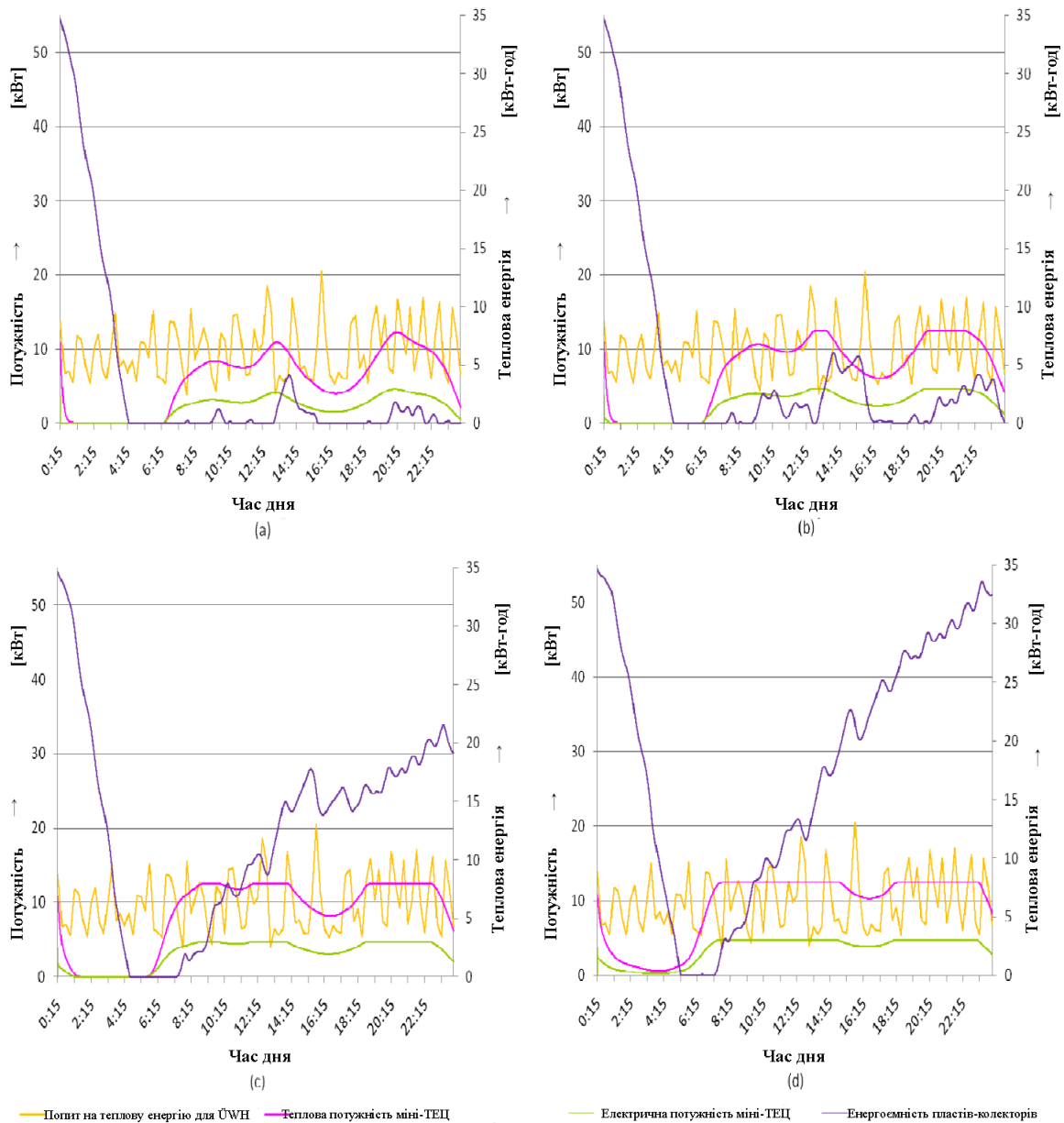


Рисунок 3.21 – Добові профілі для доби СРД, отримані для заданих значень величини напруги: (а) 0,945, (b) 0,946, (c) 0,947 та (d) 0,948

Профіль наповнення водосховища на ділянках (c) та (d) показує зростаючий рівень енергоємності, тому починаючи з моменту часу близького

до 7:15 потреба в теплі може бути покрита за рахунок міні-ТЕЦ та водосховища і немає необхідності використовувати котел в решту годин доби.

Режим регулювання напруги для перехідного хмарного робочого дня ХРД



Рисунок 3.22 – Добові профілі для доби ХРД, отримані для заданих значень величини напруги: (а) 0,945, (b) 0,946, (с) 0,947 та (d) 0,948

Для профілів, показаних на рис. 3.22, розвантаження водосховища на початку доби триває близько п'яти з половиною годин. Існує лише кілька інтервалів, коли водосховище може бути завантажено, а це означає, що для такого типу доби в режимі регулювання напруги більшу частину теплового

навантаження доводиться задовольняти за рахунок міні-ТЕЦ та котельні. Для профілів, отриманих при регулюванні напруги з уставкою 0,945 та 0,946 від величини напруги в п.о., теплова потужність станції знаходиться на низькому рівні, а навантаження на котел - на високому, як показано на підграфіках (а) та (b) рис. 3.22.

Коли відношення напруги для регулювання встановлюється на 0,947 та 0,948, теплова потужність установки збільшується, як показано в підпунктах (с) та (d), і, відповідно, зменшується навантаження на котел.

Операція регулювання напруги для перехідної сонячної неділі ПСН

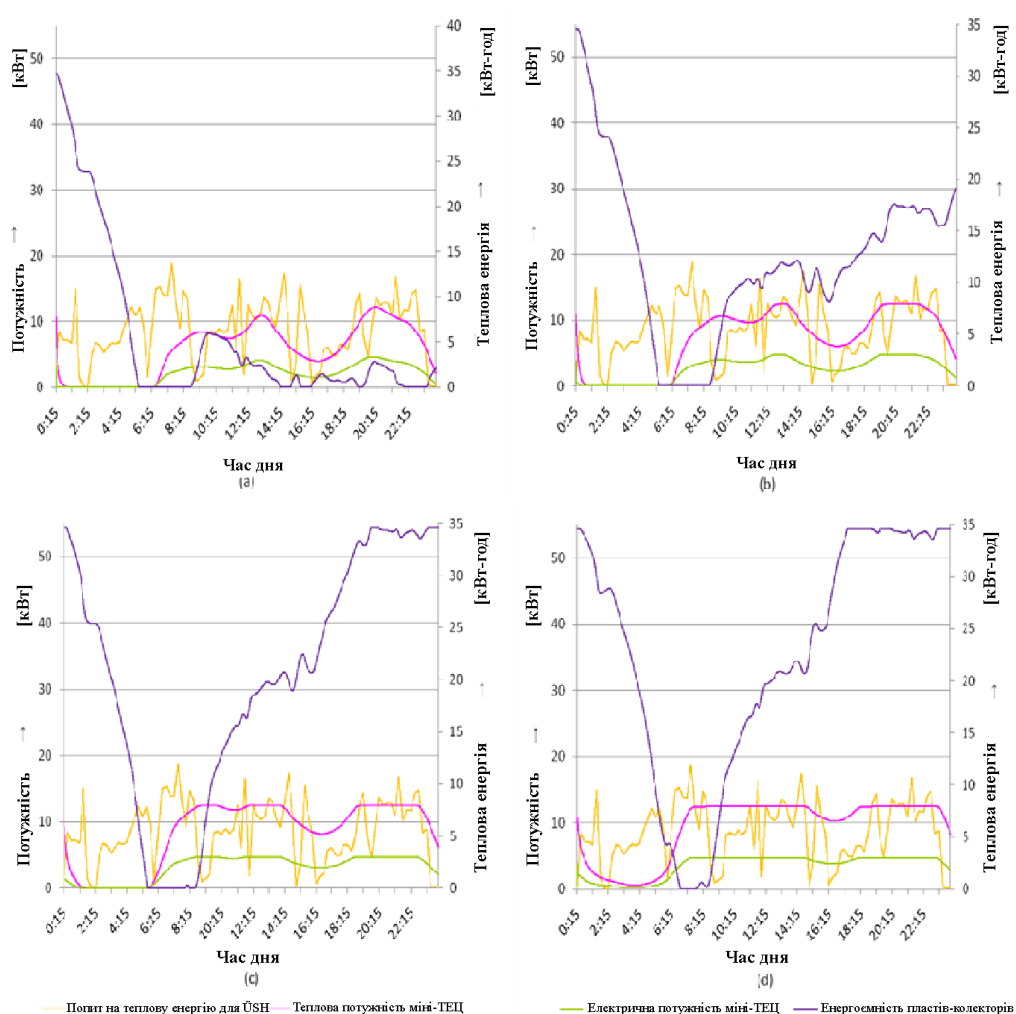


Рисунок 3.23 – Добові профілі для доби ПСН, отримані для заданих значень величини напруги: (а) 0,945, (b) 0,946, (с) 0,947 та (d) 0,948

Для ділянок (b), (с) та (d) на рис. 3.23, починаючи з моменту часу близько 08:30, теплова потреба покривається станцією та водосховищем разом, котел не

потрібен протягом решти дня. Для цього типу доби попит на теплову енергію не є високим і при режимі регулювання напруги з уставкою 0,946, 0,947 або 0,948 акумулююча ємність може бути завантажена і використовуватися для забезпечення попиту на енергію, що перевищує видачу станції, а станція використовується для підтримання рівня напруги.

Операція регулювання напруги для перехідної хмарної неділі ПХН

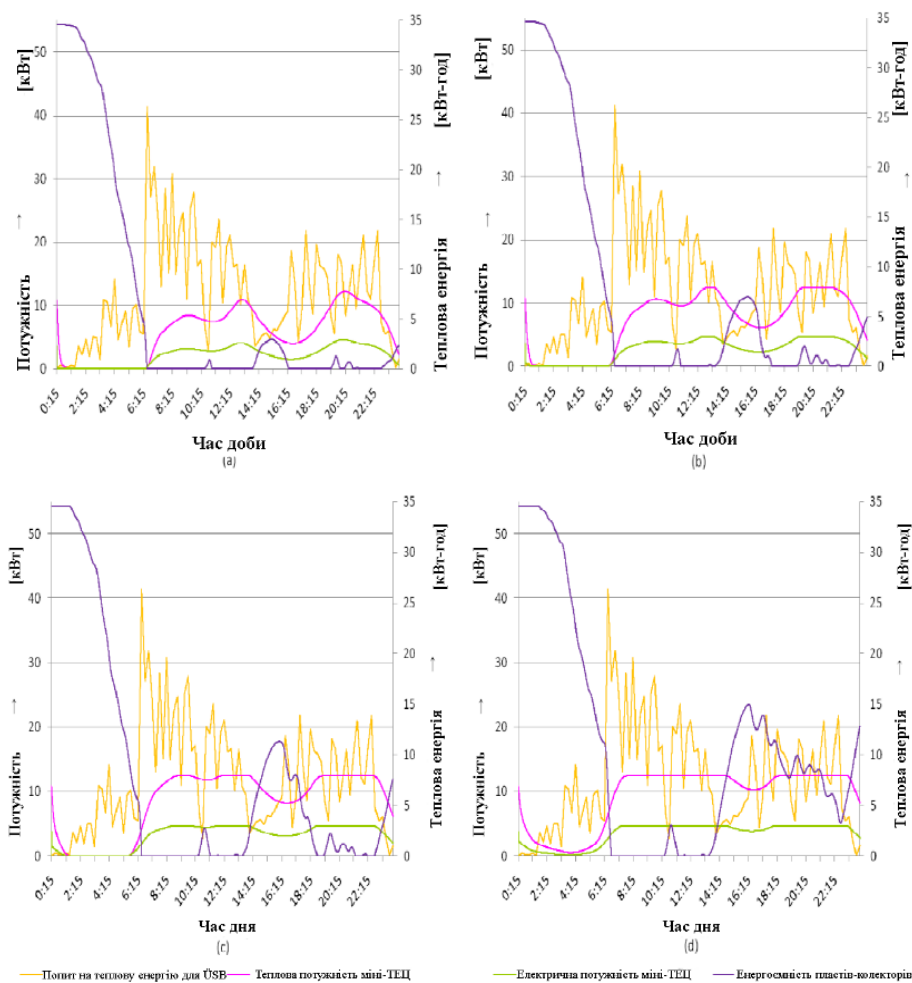


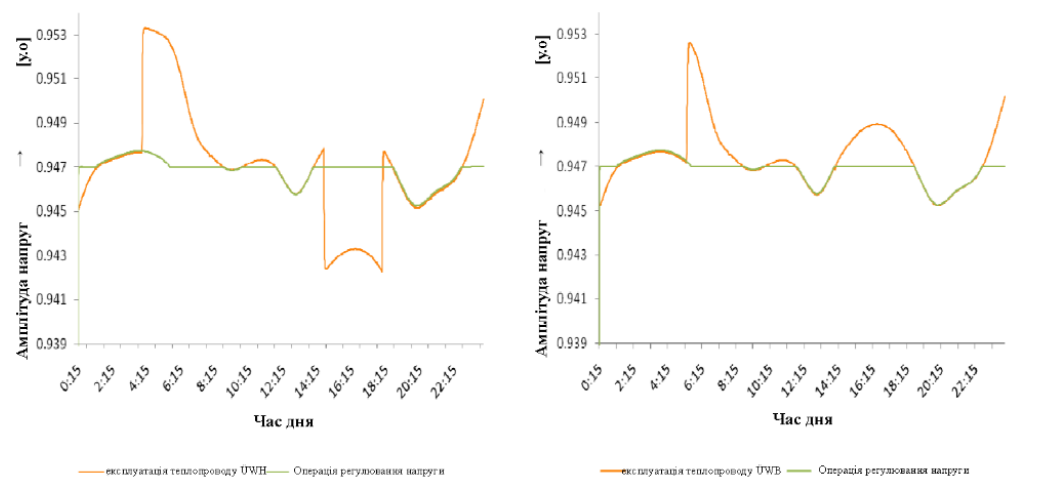
Рисунок 3.24 – Добові профілі для ПХН за добу, отримані для заданих значень величини напруги: (a) 0,945, (b) 0,946, (c) 0,947 та (d) 0,948

Останній аналіз профілів режимів роботи регулятора напруги з різними уставками відповідає типовому перехідному хмарному недільному дню. Як і в попередніх випадках, водосховище розвантажується на початку дня протягом приблизно шести-семи годин, як показано на рис. 3.24. Близько 13:00 існує інтервал низького дефіциту теплової потужності, коли водосховище може бути

завантажене. Цей інтервал завантаження краще оцінюється на підділянках (с) та (d), де станція працює на вищій точці виробництва. Поза цим інтервалом є декілька моментів, коли можливий спуск водосховища. Більшу частину часу потреба в тепловій енергії повинна покриватися за рахунок потужності міні-ТЕЦ за допомогою котла, якщо виникають піки попиту на теплову енергію. На підділянці (d), починаючи з 13:00 і до кінця дня, попит на теплову енергію задовольняється за рахунок міні-ТЕЦ та водосховища.

3.7 Оцінка результатів моделювання для режимів роботи

Порівнюються профілі для режиму регулювання напруги з уставкою 0,947 від величини напруги та профілі для режиму роботи теплового вводу з повним заповненням початкового стану водосховища для розглянутих перехідних діб.



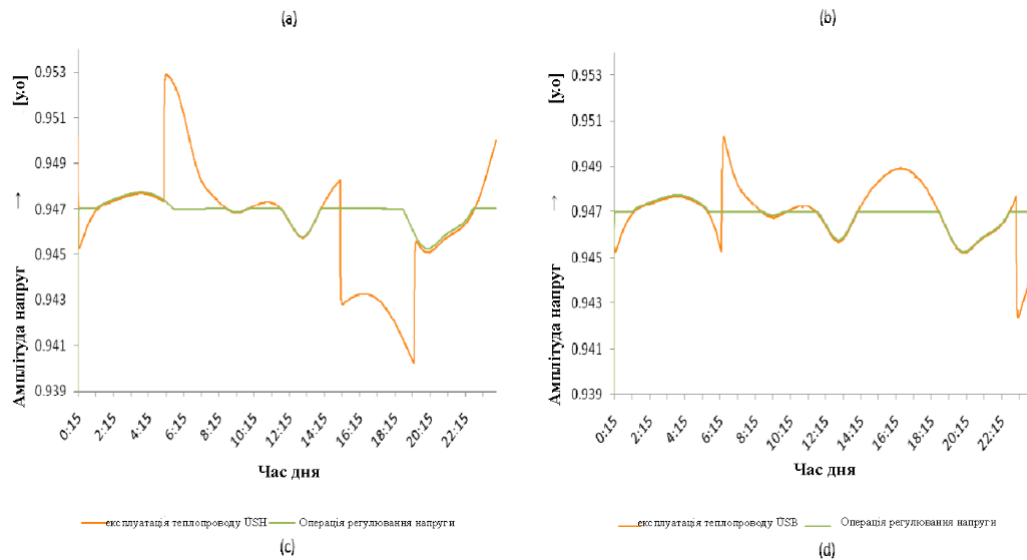


Рисунок 3.25 – Порівняння профілів напруги для (а) СРД, (б) ХРД, (с) ПСН та (д) ПХН

По-перше, на рис. 3.25 наведено порівняння профілів напруги, що формуються. Можна спостерігати, що на контрольованому профілі напруги не спостерігається зростання напруги в ранкові години. Для дня СРД та дня ПСН падіння напруги близько 16:00, спричинене інтервалом вимкнення міні-ТЕЦ в режимі роботи теплотраси, пропадає для режиму регулювання напруги, як показано на піддіаграмах (а) та (с). Невеликі градієнти підвищення в післяобідні години на ділянках (б) та (д) при роботі з тепловими мережами регулюються міні-ТЕЦ при роботі в режимі регулювання напруги, як показано зеленою лінією на тих же ділянках.

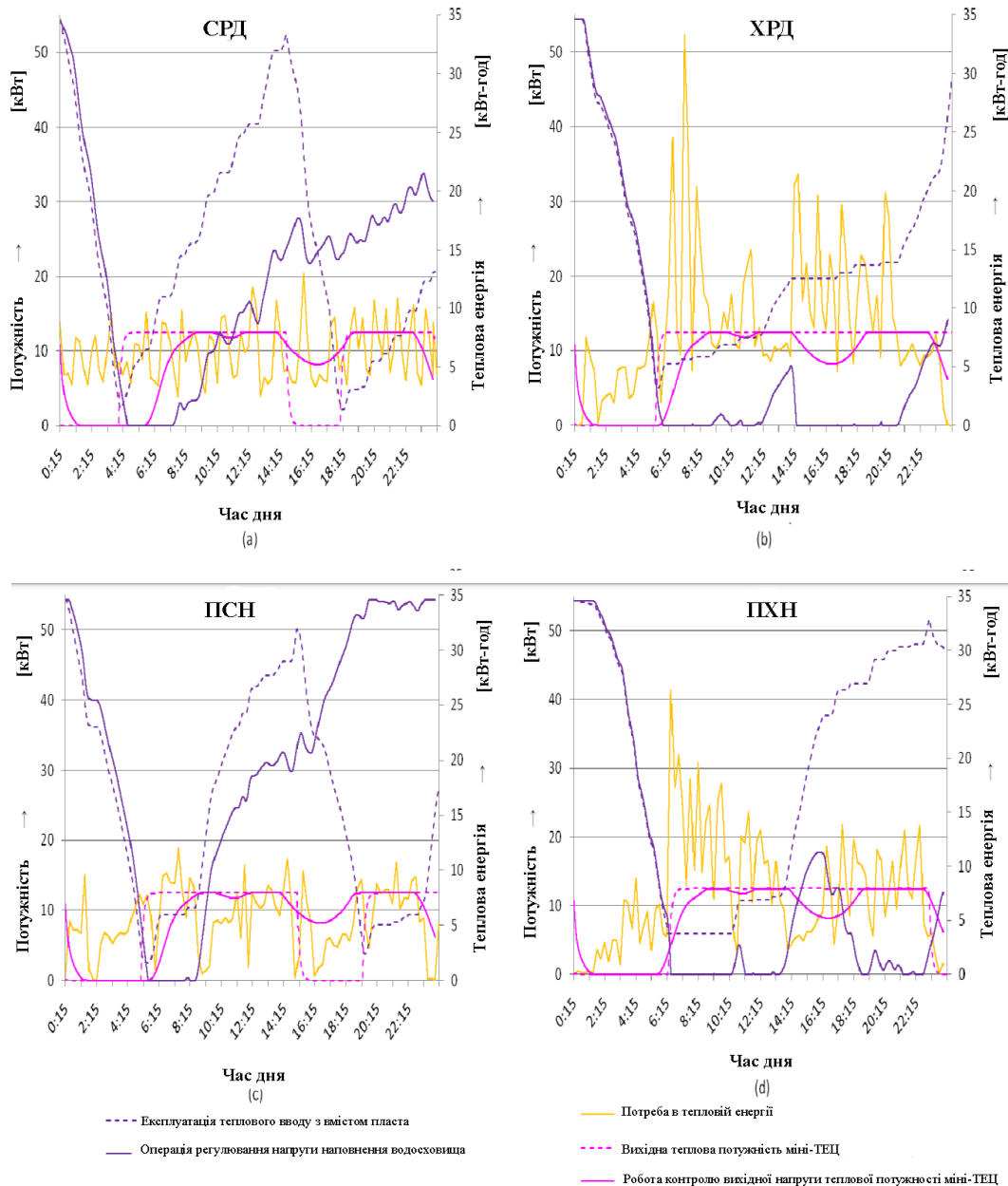


Рисунок 3.26 – Порівняння теплових профілів для (а) СРД, (б) ХРД, (с) ПСН та (д) ПХН при режимі роботи з регулюванням свинцю та напруги

Порівняння теплових режимів роботи теплопроводу та режиму регулювання напруги наведено на рис. 3.26. У режимі регулювання напруги відбувається зниження вихідної потужності міні-ТЕЦ близько 17:00, коли попит на електричну енергію низький і немає потреби у видачі активної потужності в мережу для підтримання рівня напруги. За такого режиму роботи міні-ТЕЦ має лише один інтервал вимкнення близько п'яти годин рано вранці; підграфіки (б) та (д) показують аналогічну поведінку для теплової потужності міні-ТЕЦ при роботі в режимі теплового відведення для днів ХРД та ПХН. Інший випадок має місце для світлич днів при роботі на тепловому підводі,

коли є два інтервали вимкнення для міні-ТЕЦ, як показано на піддіаграмах (а) та (с). За ці дні в режимі регулювання напруги з моменту часу близько 08:00 міні-ТЕЦ та водосховище здатні забезпечити необхідну кількість тепла і немає необхідності використовувати котел протягом решти доби.

Для ГЕС на підділянці (а) існує проміжок часу близько 05:00, коли водосховище порожнє, а міні-ТЕЦ не ввімкнена в режим роботи з регулюванням напруги. Це означає, що котел повинен забезпечити необхідну кількість тепла в цей проміжок часу, що може бути економічно та технічно недоцільним. Порівнюючи два режими роботи в похмурі дні, режим регулювання напруги може мати перевагу, оскільки існує однакова кількість інтервалів відключення, профіль напруги регулюється і навантаження на котел приблизно однакове, з тією різницею, що в режимі регулювання напруги енергія, накопичена в резервуарі, відразу використовується, коли це потрібно, і це зменшує навантаження на котел.

Для режиму регулювання напруги та заданих умов роботи розподільчої мережі уставка 0,947 величини напруги в у.о. найкраще відповідає вимогам регулювання напруги та теплового навантаження. Перевагою режиму регулювання напруги є те, що електрична потужність міні-ТЕЦ, яка видається в мережу, регулюється таким чином, що вона видається саме тоді, коли рівень напруги має тенденцію до зниження від заданого значення, тобто коли попит на електричну енергію є високим, а отже електрична потужність міні-ТЕЦ використовується в мережі саме тоді, коли вона необхідна.

Режим роботи з тепловим навантаженням може бути корисним, коли інтервали відключення не збігаються з інтервалами підвищеного попиту на електроенергію. Якщо міні-ТЕЦ вводить потужність в інтервалі часу, коли попит на електроенергію є низьким, може відбуватися рекуперація енергії в мережі середньої напруги. Це означає втрати при транспортуванні та трансформації, яких можна уникнути, використовуючи режим регулювання напруги. Недолік режиму роботи з регулюванням напруги проявляється тоді, коли водосховище порожнє, а напруга все ще вище заданої уставки, оскільки існує інтервал часу, коли теплова потреба повинна бути задоволена котлом, що призводить до високого інтервалу навантаження на котел і до економічно не вигідної ситуації.

3.8 Висновки до розділу

1. Розглянуто 2 сценарії впровадження міні-ТЕЦ, з різним впливом на електричну мережу, та обрано більш оптимальний з них.
2. Розроблено стратегію управління, яка регулює вхід для трьох міні-ТЕЦ з метою підтримання рівня напруги на визначеному заданому значенні напруги.
3. Представлено поведінку акумулюючої ємності для досліджуваних режимів роботи.
4. Проведено тестування контролера напруги шляхом випробування профілю електричного навантаження для інтервалу високих і пікових навантажень.
5. Проведено оцінку режиму роботи регулятора напруги для перехідного сонячного та хмарного робочого дня, , перехідної яскравої та хмарної неділі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Заходи, які зменшують небезпеку виникнення вибухів та пожеж

Запобігання вибухів та пожеж – це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на виключення можливості виникнення вибухів та пожеж.

Організаційні і технічні заходи щодо запобігання пожежі реалізуються ще на стадії проектування окремих об'єктів підприємств. При цьому заздалегідь вивчаються особливості технологічних процесів і об'єктів, можливі причини і джерела виникнення вибухів та пожеж. Запобігання пожежі великою мірою сприяє правильне планування, розміщення основних об'єктів з урахуванням рельєфу місцевості, дотримання протипожежних розривів між будівлями відповідно до вимог генерального плану.

Попередження вибухів та пожеж на підприємствах досягається:

- запобіганням утворенню горючого середовища;
- запобіганням виникненню в горючому середовищі або появи в ньому джерел запалювання.

Запобігання утворення горючого середовища повинно досягатися:

- максимально можливим застосуванням негорючих і важко горючих речовин і матеріалів;
- обмеженням маси і об'єму горючих речовин, матеріалів та найбільш безпечним способом їх розміщення;
- ізолюванням горючого середовища;
- підтримуванням концентрації горючих газів, пари, суспензій і окислювача в суміші за межею їх спалаху;
- достатньої концентрації флегматизатора в повітрі захищеного об'єкту;
- підтримуванням його температури і тиску, за якими розповсюдження полум'я неможливе;
- максимальною механізацією і автоматизацією технологічних процесів, пов'язаних з вживанням горючих речовин;

- встановленням пожежонебезпечного обладнання, по можливості, в ізольованих приміщеннях чи на відкритих площадках;
- застосуванням для горючих речовин герметичного обладнання і тари;
- застосуванням пристроїв захисту виробничого обладнання з горючими речовинами від ушкоджень і аварій, встановленням відключаючих, відсікаючих та інших пристроїв;
- застосуванням ізольованих відсіків, камер, кабін. Попередження утворення в горючому середовищі джерел запалювання повинно досягатися такими основними заходами [12]:
 - застосуванням машин, механізмів, обладнання, пристроїв, під час експлуатації яких не утворюються джерела запалювання;
 - застосуванням електрообладнання, що відповідає класу пожежовибухонебезпеки приміщення або зовнішньої установки, групі і категорії вибухонебезпечної суміші;
 - застосуванням в конструкції швидкодіючих засобів захисного відключення можливих джерел запалювання;
 - застосуванням технологічного процесу і обладнання, що відповідає вимогам електростатичної іскробезпеки;
 - пристроєм блискавкозахисту будівель, споруд і обладнання. Будівлі та споруди складів паливно-мастильних матеріалів захищають від прямих ударів блискавки, електростатичної та електромагнітної індукції та заносу потенціалів;
 - підтримкою тиску в горючому середовищі нижчого за максимально допустимий за горючістю;
 - зменшенням визначального розміру горючої суміші середовища нижче максимально допустимого за горючістю.;
 - регламентацією виконання, застосування і режиму експлуатації машин, механізмів та іншого обладнання, матеріалів і виробів, що можуть бути джерелом запалювання горючого середовища;
 - застосуванням енергоустаткування, що відповідає класу пожежовибухонебезпеки приміщення або зовнішньої установки, групі і категорії вибухонебезпечної суміші;
 - застосуванням технологічного процесу і обладнання, що відповідає вимогам електростатичної іскробезпеки.;

- регламентацією максимально допустимої температури нагрівання поверхонь обладнання і матеріалів, що можуть увійти в контакт з горючим середовищем. Режими роботи насосів, перекачувальних паливно-мастильних матеріалів не повинні спричиняти підвищене нагрівання їх поверхонь;
- регламентацією максимально допустимої енергії іскрового розряду в горючому середовищі. Знижувати енергію іскрового розряду можна, зменшуючи напруження між частинами обладнання, при якому відбувається іскровий розряд в горючому середовищі;
- регламентацією максимально допустимої температури нагрівання горючих речовин, матеріалів і конструкцій;
- застосуванням інструмента, що не іскрить під час роботи з легкозаймистими речовинами. Слід застосовувати інструмент і пристосування, що не висікають іскри під час ударів і падіння;
- ліквідацією умов для хімічного самозагоряння речовин і матеріалів. До samozапалювальних речовин в технологічних процесах належать пірофорні речовини, що розігріваються при окисненні киснем повітря до 600 °С;
- усуненням контакту з повітрям пірофорних речовин.

4.2 Фізичні основи електробезпеки

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [12].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, токопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтнопрофілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів електроенергетики в воєнний час

Збереження енергосистеми під час війни

Це питання має три відповіді. Перша – суто військова. Україні потрібно більше засобів протиповітряної та протиракетної оборони, які б захищали енергетичні об'єкти.

Велика кількість обладнання для високовольтних мереж, наприклад, трансформаторів не лежить просто так на складах, а потребує тривалого виготовлення.

Тому після ракетних ударів енергетики спочатку повинні оглянути об'єкт, визначити, що саме пошкоджено і потребує заміни, а вже потім починати працювати над усуненням пошкоджень.

Тому оперативно відновлювати енергосистему після пошкоджень – це складне завдання.

Другий фронт – це робота Уряду над залученням технічної та грантової допомоги для відновлення енергосистеми.

Уряд загалом, і Міністерство енергетики зокрема, наполегливо працюють над залученням коштів і ресурсів міжнародних партнерів для того, щоб в енергетиків було все необхідне для усунення результатів обстрілів.

Наприклад, нещодавно повідомлялося про надання 550 млн євро на відновлення енергетичної інфраструктури з боку Європейського інвестиційного банку.

Окремі закупівлі здійснюються з боку USAID за кошти міжнародних донорів в рамках програм, що реалізують Міненерго.

Третій аспект – це поведінка споживачів. Мова йде про економію і грамотне споживання.

Енергосистема переживає найбільші навантаження протягом, т.зв. "пікових годин" доби, тобто з 6:00 до 9:00 і з 17:00 до 23:00. В цей час українці можуть допомогти енергетикам за рахунок таких простих кроків:

- не вмикати одночасно всі електроприлади та зменшити їх потужність;
- не використовувати вуличне освітлення;
- змінити побутові звички і максимальну кількість справ, наприклад, прання та нагрівання води бойлером робити у нічні "непікові" години;
- за можливістю, замінити використання електроприладів для опалення або приготування їжі на менш енергомісткі пристрої.

Реалізація цих простих, на перший погляд заходів, у критичні моменти вже дозволяє Україні економити від 7 до 20% електроенергії.

За рахунок цього, енергосистема може працювати не на повну потужність, електростанції – економити вугілля, що знадобиться для

проходження зимового опалювального періоду, а енергетики у випадку аварії – отримують можливість вести роботи з мінімальними відключеннями споживачів.

У довгостроковій перспективі побутовим споживачам слід очікувати зростання цін на енергоресурси.

Чинний тариф — до 1,68 грн за 1 кВт-год - є субсидованим за рахунок промислових споживачів. За теперішніх обставин, довго така ситуація тривати не буде.

Промисловість просто не витримає додаткового зростання вартості електроенергії, що становить значну частину собівартості продукції. Тому на тлі очікування зростання цін інвестиції в енергоефективність та альтернативні джерела енергії будуть розумним рішенням.

Найпростіші рішення, такі як розетки з таймером, коштують кілька сотень гривень та можуть бути куплені будь-яким господарством, а для реалізації складніших – таких як встановлення сонячних панелей або термомодернізація будинку – доцільно розглянути через можливість залучення грантів чи кредитів у банках.

Вимоги до будівництва комунально-енергетичних систем

Електропостачання є основою усякого виробництва. Порушення нормальної подачі електроенергії на об'єкт чи окремі ділянки виробництва може призвести до повного припинення роботи об'єкта.

Для забезпечення надійного електропостачання в умовах війни при його проектуванні та будівництві повинні бути враховані наступні основні вимоги, що впливають із задачі ЦЗ.

Вимоги до систем електропостачання:

1. Електропостачання повинне здійснюватися від енергосистем, до складу яких входять електростанції, що працюють на різних видах палива. Великі електростанції варто розміщати одну від одної і від великих міст на відстані не менше двох радіусів зон можливих руйнувань.

2. Районні понижуючі станції, диспетчерські пункти енергосистем і лінії електропередач варто розміщати за межами зон можливих сильних руйнувань.

3. Постачання електроенергією великих міст і об'єктів, що не припиняють роботу у воєнний час, необхідно передбачати від двох незалежних джерел. При електропостачанні об'єкта від одного джерела повинне бути не менш двох уведень з різних напрямків.

4. Трансформаторні підстанції необхідно надійно захищати, їхня стійкість повинна бути не нижчою ніж стійкість самого об'єкта.

5. Електроенергію до ділянок виробництва варто подавати по незалежних електрокабелях, прокладених у землі на глибині 0,8 – 1,2 м.

6. Крім того, необхідно створювати автономні резервні джерела електропостачання. Для цього можна використовувати пересувні електростанції на залізничних платформах і суднах, малопотужні електростанції, не включені в енергосистеми, тощо.

7. При проектуванні систем електропостачання варто зберігати в якості резервних дрібні стаціонарні електростанції об'єктів.

8. У містах, розташованих на берегах морів і рік, необхідно створювати берегові пристрої для прийому електроенергії від суднових енергоустановок.

9. Система електропостачання повинна мати захист від впливу електромагнітного імпульсу ядерного вибуху.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто підхід до інтеграції міні-ТЕЦ в електричну розподільчу мережу для виконання активної ролі в регулюванні напруги фермерського господарства. Він полягає в регулюванні вхідної потужності міні-ТЕЦ за допомогою контролера з метою підтримання заданого рівня напруги на заданому рівні. Для цього побудовано динамічну модель міні-ТЕЦ на основі експериментальних даних міні-ТЕЦ еsopower e4.7.

2. Для ілюстрації поведінки міні-ТЕЦ розроблено просту модель теплоаккумулюючого резервуару.

3. Запропоновану систему представлено та змодельовано в середовищі Matlab/Simulink. Розглянуто тип режиму роботи теплового вводу, та створено логічний блок управління для імітації цього режиму роботи.

4. Для інтеграції моделі міні-ТЕЦ в електричну мережу використано програмне забезпечення DigSILENT PowerFactory. Побудовано приклад розподільчої мережі з урахуванням майбутніх сценаріїв впровадження теплових насосів та міні-ТЕЦ, а також представлено схему інтеграції обох систем.

5. Розроблено регулятор напруги для випадку, коли трьома міні-ТЕЦ керує централізований контролер.

6. Проведено імітаційне моделювання запропонованої системи для двох досліджуваних режимів роботи та оцінено характер теплової та електричної поведінки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Енергоефективність генерування тепла та електроенергії на міні-ТЕС// П.В. Білоус, В.П. Коваль / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2022
2. Freris, Leon. Infield, David: Renewable Energy in Power Systems, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2010.
3. Thomas, Bernd: “Mini-Blockheizkraftwerk” Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten, Vogel, Würzburg, 2007.
4. Energytech.at: TechnologiePortrait Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), URL: <http://energytech.at/kwk/portrait.html>, May 2002.
5. DIgSILENT GmbH: PowerFactory User’s Manual, Version 14.0, DIgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany, 2010.
6. Engell, Sebastian et al: Lecture notes of modeling of dynamic systems I, Technische Universität Dortmund - Department of Biochemical and Chemical Engineering - Process Dynamics and Operations, 2008.
7. Ogata, Katsuhiko: Modern Control Engineering, 4th Edition, Prentice Hall, 2001.
8. Chen, Chi-Tsong: Analog and digital control system design, Saunders College Publishing, 1993.
9. Engell, Sebastian et al: Lecture notes of modeling of dynamic systems II, Technische Universität Dortmund - Department of Biochemical and Chemical Engineering - rocess Dynamics and Operations, 2009.
10. Ljung, Lennart: System Identification Toolbox™ 7 User’s Guide, The Mathworks Inc., 2010.
11. Teuwsen, Jan: Analyse der Auswirkungen des Betriebsverhaltens von dezentralen Kraft-Wärme-gekoppelten Erzeugungseinheiten auf die Energieeffizienz sowie Wirtschaftlichkeit der Anlagen, Diplomarbeit, Technische Unversität Dortmund, 2010

12. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці: підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с
13. Jenkins, Nick et al: Embedded Generation, First edition, The Institution of Engineering and Technology, London, 2000.
14. Pehnt, Martin et al: Micro Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems, First Edition, Springer, 2005.

Додаток А

Есоpower e4.7

Технічні характеристики

есопower e4.7

Fuel	Gas
Electrical power	1,3 to 4,7 kW _{el} , modulated
Thermal power	4,0 to 12,5 kW _{th} , modulated
Fuel power	5,9 to 19 kW _{Br}
Total efficiency factor	ca. 90%
Once cylinder 4-Stroke-Reciprocating engine	272 cm ³
Variable engine speed	1,200 - 3,600 U/Min

