

Я, Трифонов Олег Миколайович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«12» грудня 2025р.

Олег ТРИФОНОВ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ *Трифонову Олегу Миколайовичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розроблення системи автоматизації обліку теплоспоживанням з використанням бази знань на виробничому підприємстві*
затверджена наказом по університету від “ 10 ” листопада 2025р. № 1029 Ст.
2. Термін подання студентом роботи *“ 24 ” грудня 2025р.*
3. Вихідні дані до роботи *3.1 Облік теплоспоживання на виробничому підприємстві;*
3.2 Система керування знаннями – CLIPS;
3.3 База даних – PostgreSQL / TimescaleDB;
3.4 Мова програмування – Python 3.11;
3.5 Протокол обміну повідомленнями – HTTP, MQTT, Modbus TCP.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі *4.1 Вступ;*
4.2 Існуючі підходи та вимоги для створення автоматизованої системи обліку теплоспоживання;
4.3 Проектування автоматизованої системи обліку теплоспоживання;
4.4 Математичне моделювання функціонування автоматизованої системи обліку теплоспоживання;
4.5 Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи обліку теплоспоживання;
4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 22 с. формату А4.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Існуючі підходи та вимоги для створення автоматизованої системи обліку теплоспоживання</i>	01.09 – 15.09.25	<i>виконано</i>
2	<i>Проектування автоматизованої системи обліку теплоспоживання</i>	16.09 – 30.09.25	<i>виконано</i>
3	<i>Математичне моделювання функціонування автоматизованої системи обліку теплоспоживання</i>	01.11 – 15.11.25	<i>виконано</i>
4	<i>Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи обліку теплоспоживання;</i>	16.11 – 07.12.25	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	08.12 – 13.12.25	<i>виконано</i>
6	<i>Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism</i>	14.12 – 16.12.25	<i>виконано</i>
7	<i>Подання роботи на рецензію</i>	17.12 – 19.12.25	<i>виконано</i>
8	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	20.12 – 23.12.25	<i>виконано</i>
9	<i>Подання кваліфікаційної роботи в ЕК</i>	24.12.25	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання 01.09.2025р.

Здобувач _____ Олег ТРИФОНОВ
(підпис)

Керівник роботи _____ доцент Рауф АЛЛАХВЕРАНОВ
(підпис) (посада, власне ім'я прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 97 с., 4 табл., 16 рис., 7 дод., 27 джерел.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, ОБЛІК, ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ,
БАЗА ЗНАНЬ, БАЗА ДАНИХ, АЛГОРИТМ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

Мета роботи – підвищення точності вимірювань, оперативності аналізу та ефективності управлінських рішень на виробничому підприємстві з використанням бази знань.

Об'єкт дослідження – процес автоматизації обліку теплоспоживання на виробничому підприємстві.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та засоби реалізації системи автоматизованого обліку теплоспоживання з використанням бази знань.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано сучасні підходи до вимірювання параметрів теплоносія, побудовано комплексну фізичну, гідравлічну, енергетичну, стохастичну та логіко-математичну моделі, що описують процеси теплообміну та формування похибок вимірювання. На основі сформованих моделей розроблено архітектуру автоматизованої системи, алгоритми збору, фільтрації та аналізу даних, а також модулі програмного забезпечення мовою Python. Проведено імітаційне моделювання, тестування і верифікацію системи, що підтвердили її здатність забезпечувати високу точність обліку теплової енергії, своєчасне виявлення аномальних режимів та підвищення енергоефективності підприємства. Запропонована автоматизована система може бути впроваджена у промислові теплові вузли для автоматизації обліку і моніторингу теплоспоживання в реальному часі.

ABSTRACT

Explanatory note: 97 pp., 4 tab., 16 fig., 7 appendices, 27 sources.

AUTOMATED SYSTEM, ACCOUNTING, HEAT CONSUMPTION, KNOWLEDGE BASE, DATABASE, ALGORITHM, SOFTWARE.

The purpose of the work is to improve the accuracy of measurements, the speed of analysis, and the effectiveness of management decisions at a manufacturing enterprise using a knowledge base.

The object of research is the process of automating heat consumption accounting at a manufacturing enterprise.

The subject of research is methods, algorithms, and means of implementing an automated heat consumption accounting system using a knowledge base.

The thesis analyzes modern approaches to measuring heat transfer parameters and constructs comprehensive physical, hydraulic, energy, stochastic, and logical-mathematical models that describe heat exchange processes and the formation of measurement errors. Based on the developed models, the architecture of the automated system, algorithms for data collection, filtering, and analysis, as well as software modules in Python were developed. Simulation modeling, testing, and verification of the system were carried out, confirming its ability to ensure high accuracy of heat energy metering, timely detection of abnormal modes, and improvement of the enterprise's energy efficiency. The proposed automated system can be implemented in industrial heating units to automate real-time heat consumption accounting and monitoring.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ	10
1 Існуючі підходи та вимоги для створення автоматизованої системи обліку теплоспоживання	13
1.1 Загальна характеристика виробничого підприємства як об'єкта теплоспоживання	13
1.2 Проблеми традиційних систем обліку теплоспоживання	15
1.3 Необхідність упровадження автоматизованої системи обліку теплоспоживання	17
1.4 Аналіз вимог до автоматизованої системи та інформаційних потоків ...	19
1.5 Висновки до розділу	22
2 Проєктування автоматизованої системи обліку теплоспоживання	24
2.1 Загальні принципи проєктування системи	24
2.2 Структура та функціональні модулі системи	28
2.3 Проєктування архітектури бази знань	31
2.4 Алгоритм функціонування системи	35
2.5 Висновки до розділу	39
3 Математичне моделювання функціонування автоматизованої системи обліку теплоспоживання	41
3.1 Мета та завдання моделювання	41
3.2 Динамічна модель теплообміну	42
3.3 Гідравлічна модель масової витрати теплоносія	47
3.4 Енергетична модель теплоспоживання	52
3.5 Стохастична модель похибок	56

3.6	Логіко-математична модель бази знань	61
3.7	Інтегральна математична модель системи	65
3.8	Висновки до розділу	67
4	Розроблення програмного забезпечення автоматизованої системи обліку теплоспоживання	69
4.1	Архітектура програмного забезпечення автоматизованої системи	69
4.2	Програмна реалізація автоматизованої системи	74
4.3	Тестування програмного забезпечення автоматизованої системи	79
4.4	Розрахунок штучного освітлення в лабораторії з розроблення автоматизованої системи обліку теплоспоживанням	85
4.5	Висновки до розділу	89
	Висновки	92
	Перелік джерел посилання	95
	Додаток А Код програми db.py	98
	Додаток Б Код програми acquisition.py	100
	Додаток В Код програми analytics.py	102
	Додаток Г Код програми knowledge_base.py	104
	Додаток Д Код програми reports.py	106
	Додаток Е Код програми main.py	107
	Додаток Ж Демонстраційний матеріал	109

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСОТ – автоматизована система обліку теплоспоживання;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

БД – база даних;

БЗ – база знань;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ЛПО – люмінесцентний промисловий освітлювальний;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп'ютер;

ТЗ – технічне завдання.

ВСТУП

Розвиток промисловості на сучасному етапі супроводжується переходом до концепції індустрії 4.0, а також кіберфізичних виробничих систем, які, як відомо, інтегрують фізичні процеси з цифровими технологіями. За таких умов нагальним стає питання щодо енергоефективності виробництва, тобто йдеться про раціональну експлуатацію теплової енергії, адже це одна з пріоритетних складових витрат промислових підприємств.

Власне тепловою енергією послуговуються у більшості технологічних процесів, зокрема, для термообробки матеріалів, нагрівання, сушіння чи забезпечення на виробничих приміщеннях мікроклімату. Проте втрати тепла, що є необґрунтованими, або нераціональні режими функціонування обладнання, а також відсутність оперативного моніторингу – все це стає наслідками суттєвих економічних збитків. Зважаючи на сказане вище, з'являється необхідність щодо створення інтелектуальних систем автоматизованого обліку теплоспоживання, котрі, насамперед, спрямовані не лише на вимірювання, але й на аналітичне оцінювання разом із прогнозуванням енергоспоживання.

Утім проблема щодо енергозбереження й оптимізації теплових процесів наразі так і залишається однією з ключових для промислових підприємств України, адже переважна більшість систем обліку теплоспоживання орієнтовані виключно на фіксацію даних, проте глибокого аналітичного аналізу чи підтримки прийняття рішень вони не забезпечують.

Однак застосування бази знань як складової автоматизованої системи сприяє переходу від звичного контролю до інтелектуального керування

процесами, що, зі свого боку, підвищує ефективність виробництва, зменшує втрати, а, отже, є підґрунтям для сталого розвитку виробничого підприємства.

Мета роботи – підвищення точності вимірювань, оперативності аналізу та ефективності управлінських рішень на виробничому підприємстві з використанням бази знань.

Об’єкт дослідження – процес автоматизації обліку теплоспоживання на виробничому підприємстві.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та засоби реалізації системи автоматизованого обліку теплоспоживання з використанням бази знань.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні інтелектуальної автоматизованої системи обліку теплоспоживання, в якій залучено базу знань для аналітичного оцінювання ефективності теплових процесів. Окрім того, запропоновано метод побудови бази знань, якій властивий адаптивний аналіз на основі історичних даних, а, отже, в режимах споживання тепла можна виявляти аномалії.

Поставлену мету реально досягти, попередньо виконавши такі завдання:

- проаналізувати сучасні методи та системи автоматизації обліку теплоспоживання.
- окреслити вимоги до структури, функцій та інформаційних потоків системи.
- утворити архітектуру автоматизованої системи, враховуючи принципи модульності й інтегрованості.
- спроєктувати базу знань для інтелектуального оброблення даних із подальшим формуванням рекомендацій.
- розробити алгоритм функціонування системи обліку теплоспоживання.
- втілити та протестувати запропоновану систему, оцінивши її ефективність.

Пояснювальна записка з кваліфікаційної роботи оформлена згідно з рекомендаціями з підготовки і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти [1, 2], а також з ДСТУ 3008:2015 [3].

Апробацію результатів досліджень проведено у [4], отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

1 ІСНУЮЧИ ПІДХОДИ ТА ВИМОГИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ

1.1 Загальна характеристика виробничого підприємства як об'єкта теплоспоживання

Виробниче підприємство, передусім, – це складний техніко-економічний комплекс, у якому впроваджено процеси із перероблення матеріалів, сировини й енергії на готову продукцію. Проте одним із пріоритетних елементів енергетичного забезпечення виробництва визначено теплову енергію, котрою послуговуються для технологічних, побутових та допоміжних потреб. Так, раціональне споживання теплової енергії насамперед впливає як на ефективність виробничої діяльності, так і собівартість продукції й екологічні показники виробничого підприємства [6].

Зазвичай, найбільше використовується теплової енергії на промислових виробничих підприємств для таких напрямків:

- забезпечення технологічних процесів, які супроводжуються нагріванням або підтриманням певного температурного режиму, наприклад, плавлення, термообробка, сушіння, хімічні реакції тощо;
- подача гарячої води для господарсько-побутових потреб;
- опалення та вентиляція виробничих і адміністративних приміщень;
- утилізація вторинних енергоресурсів, а саме: теплоти відпрацьованих газів, конденсату чи технологічних стоків.

Здебільшого джерелами тепlopостачання можуть бути централізовані тепломережі або жлокальні системи, тобто котельні, теплообмінні установки, утилізаційні та когенераційні комплекси. Власне вибір джерела тепла залежить

від технологічних вимог, економічної доцільності або ж з огляду на можливості енергетичної інфраструктури виробничого підприємства.

Традиційно структура системи теплоспоживання містить три головні підсистеми [7]:

- підсистема генерації чи отримання тепла, елементами якої є джерела теплової енергії разом із обладнанням для її перетворення;

- підсистема транспортування теплової енергії, до якої належать трубопроводи, теплотраси, теплообмінники, арматура, а також системи контролю параметрів теплоносія;

- підсистема споживання тепла, яка забезпечує передачу теплової енергії безпосередньо технологічним об'єктам або приміщенням.

З метою забезпечення ефективності даних процесів важливо дотримуватись постійного контролю параметрів теплоносія – температуру, тиск та витрати. Власне ці показники і є основою для обчислення кількості спожитої теплової енергії.

З огляду на повсякденний розвиток сучасного виробництва, актуальності набуває впровадження автоматизованих систем обліку теплоспоживання (АСОТ), які, зі свого боку, спроможні не лише виконувати точний вимір і реєструвати енергетичні показники, але й застосовувати аналітичне оброблення даних у режимі реального часу.

Проте особливе значення надається застосуванню бази знань (БЗ) як складової таких систем, яка забезпечує автоматичне виявлення відхилень, формування рекомендацій з оптимізації теплових процесів, накопичення досвіду експлуатації та прогнозування споживання енергії. Такий підхід, здебільшого, сприятиме підвищенню рівня енергоефективності виробничого підприємства або зниженню витрат, а також покращенню екологічної стабільності виробництва.

1.2 Проблеми традиційних систем обліку теплоспоживання

Традиційні системи обліку теплоспоживання, котрими устатковані більшість вітчизняних виробничих підприємств, відзначаються фрагментарністю процесів збору даних, недостатнім рівнем автоматизації, а також низьким ступенем інтеграції з іншими інформаційними системами керування. Здебільшого облік теплоспоживання виконується вручну або шляхом застосування застарілих технічних засобів, які, зі свого боку, не гарантують необхідної точності вимірювань та оперативність оброблення інформації.

Втім ключові проблеми традиційних систем можна згрупувати за такими напрямками [7], а саме:

- за технічними недоліками. Здебільшого прилади обліку встановлені без централізованої системи збору даних. У зв'язку з цим доводиться періодично зчитувати показники в ручну. Крім того, дані вимірювання не дозволяють впроваджувати безперервний моніторинг параметрів теплоносія та виявляти відхилення від нормального режиму роботи своєчасно. Водночас, ускладнює інтеграцію приладів різних виробників і відсутність стандартизованих протоколів передавання даних;

- за інформаційними обмеженнями. Як правило, дані про теплоспоживання зберігаються у форматі окремих звітів або журналів, а, отже, не формують цілісної бази даних, якою можна послуговуватися для системного аналізу. З огляду на це, задіювати довгостроковий енергетичний моніторинг і виявляти тенденції змін, а також формувати прогнози неможливо. Таким чином, відсутність автоматизованого оброблення виключається можливість оперативного оцінювання щодо ефективності застосування теплової енергії;

– за організаційними недосконалостями. Як відомо, процеси зі збору, оброблення й аналізу інформації розподілено між різними службами виробничого підприємства, зокрема, енергетичною, технологічною, бухгалтерською. Так, брак єдиного інформаційного простору провокує затримки щодо передавання даних, а також підвищує ймовірність появи помилок, утім прийняття рішень керування, зі свого боку, спирається передусім на досвід персоналу, але не на об'єктивні аналітичні показники;

– за аналітичною неефективністю. На сталих системах обліку розповсюджено лише функцію фіксації фактів споживання, проте не передбачено інтелектуальну аналітику або підтримку прийняття рішень. Зважаючи на це, втрачається можливість щодо своєчасного виявлення нераціонального використання тепла разом із прихованими втратами чи потенціалом енергозбереження;

– за відсутністю адаптації до сучасних цифрових технологій. Іноді тепловий облік буває не інтегрованим до корпоративних систем керування (ERP, MES, SCADA), вочевидь, це обмежує його роль у загальній системі енергоменеджменту виробничого підприємства. Крім того, недостатній рівень автоматизації ускладнює залучення як сучасних методів аналітики даних, так і машинного навчання з інтелектуальною підтримкою.

Окреслені проблеми є підтвердженням про потребу переходити до інтелектуальних систем автоматизованого обліку теплоспоживання. Вони спроможні забезпечувати не лише точний збір і збереження даних, але й їхній глибокий аналіз із використанням методів штучного інтелекту.

Функціонування БЗ у складі такої системи дозволяє усунути головні недоліки сталих підходів шляхом акумуляції досвіду, правил і логічних взаємозв'язків між параметрами процесів теплоспоживання. Це гарантує підвищення достовірності обліку, ефективності керування енерговитратами, а

також стає підґрунтям для запровадження концепції «розумного виробництва» (SmartFactory).

1.3 Необхідність упровадження автоматизованої системи обліку теплоспоживання

Сучасні спрямування розвитку промислових підприємств окреслено підвищенням вимог до ефективності експлуатації енергетичних ресурсів, зокрема, і теплової енергії [8, 9].

Так, підвищення вартості енергоносіїв, упровадження міжнародних стандартів енергоменеджменту (ISO 50001) разом із необхідністю зменшення екологічного навантаження засвідчують потребу щодо створення високоточних і надійних систем для контролю та керування енергоспоживанням [10].

За таких умов упровадження АСОТ набуває не лише доцільності, але й стає стратегічно важливим напрямом розвитку енергетичної інфраструктури виробничого підприємства.

До головних передумов упровадження АСОТ належать:

- енергетична ефективність. Безупинний контроль за параметрами теплоносія, а саме: температурою, тиском, витратами, надає можливість фіксувати втрати теплової енергії, нераціональні режими роботи обладнання і водночас перевитрати ресурсів. Спираючись на ці дані, система спроможна забезпечити формування рекомендацій щодо оптимізації теплових процесів;

- підвищення точності та достовірності даних. Так, автоматизований збір показників із приладів обліку усуває людський чинник, мінімізує помилки ручного введення, а також забезпечує високу роздільну здатність вимірювань. Підкреслимо, що дані реєструються з високою частотою, отже, можна задіювати детальний аналіз змін у режимах теплоспоживання;

– оперативність прийняття рішень керування. Шляхом застосування засобів телеметрії та віддаленого доступу система сприяє можливості контролювати показники в реальному часі. Таким чином, можна оперативно реагувати на відхилення чи аварійні ситуації, навіть на порушення технологічних параметрів;

– інтеграція з корпоративними інформаційними системами. АСОТ може бути інтегрованою з чинними SCADA, ERP або MES-системами виробничого підприємства, організовуючи єдине інформаційне середовище. Функціонування такої інтеграції сприяє ефективному плануванню енергоресурсів, а також підвищенню прозорості процесів керування;

– аналітична та прогностична функція. Послугування аналітичними алгоритмами, котрі спираються на БЗ, дозволяє системі як відобразити фактичні дані, так і формувати прогнози теплоспоживання, разом з тим моделювати наслідки зміни технологічних режимів і виявляти аномалії.

Запровадження АСОТ із БЗ супроводжується зниженням витрат виробничого підприємства на теплову енергію й оптимізацією навантаження на теплові мережі, а також зменшенням викидів парникових газів. Вочевидь, ефект економії може сягати 10 – 20 % від загальних енерговитрат завдяки своєчасному виявленню перевитрат і втрат [11-13].

До того ж, система стає підґрунтям для енергетичного аудиту та підготовки аналітичної звітності, що відповідають вимогам нормативних документів і стандартів з енергоефективності.

Запровадження АСОТ – це необхідна умова для підвищення енергетичної ефективності, прозорості та надійності під час керування тепловими процесами на виробничому підприємстві. Застосування БЗ як інтелектуального модуля системи реалізує глибокий аналіз і прогнозування теплоспоживання, стає

основою для втілення принципів адаптивного керування та інтеграції до концепції «розумного виробництва».

1.4 Аналіз вимог до автоматизованої системи та інформаційних потоків

Ефективність функціонування АСОТ на виробничому підприємстві передусім окреслюється чітким визначенням вимог до її структури, функціональними можливостями й організацією інформаційних потоків. З огляду на сучасні принципи створення кіберфізичних систем, АСОТ повинна запровадити інтеграцію технічних засобів збору даних, інтелектуальних підсистем оброблення інформації й аналітичних модулів.

На АСОТ покладено такі функції:

- збір первинних даних із вимірювальних пристроїв у реальному часі, тобто з теплолічильників, датчиків тиску, температурні дані, витрати теплоносіїв;
- оброблення та нормалізація даних задля усунення похибок, а також приведення параметрів до єдиних форматів і одиниць вимірювання;
- збереження даних у централізованій базі, тобто виконується накопичення історичних відомостей для подальшого аналізу;
- аналітичне оброблення інформації полягає в обчисленні фактичного споживання теплової енергії, визначенні втрат, а також оцінюванні ефективності систем тепlopостачання.
- візуалізація та звітність, де результати занотовуються у форматі таблиць, графіків, дашбордів, або енергетичні звіти формуються автоматично.
- інтелектуальний аналіз і підтримка прийняття рішень, що проводяться із залученням БЗ, тобто спираються на правила, алгоритми й експертні висновки.

– інтеграція з іншими інформаційними системами виробничого підприємства (SCADA, ERP, MES) відповідає за реалізацію комплексного енергетичного менеджменту.

Оскільки надійність системи насамперед повинна визначатися здатністю безперервного функціонування в умовах змін навантаження, температури та вологості, що притаманні виробничим приміщенням, то власне система має вирізнятися як високою достовірністю вимірювань, зокрема, похибкою не більше 1 – 2 %, а також безперервністю збору даних разом із стійкістю до втрат зв'язку. Водночас їй має бути властива можливість резервування інформації на серверному рівні та забезпечення захисту даних від несанкціонованого доступу.

На тлі функціонування АСОТ доречно виділити ключові типи інформаційних потоків, зокрема, первинні, аналітичні та керувальні.

Первинні потоки, як їх ще називають, вимірювальні, надходять до локальних контролерів або комунікаційних шлюзів від сенсорів і вимірювальних приладів. Вони фіксують показники температури, тиску, витрати теплоносія, а також часові мітки.

Аналітичні потоки, зі свого боку, формуються після оброблення первинних даних у програмному середовищі, адже вони засвідчують виявлені відхилення, результати обчислення теплової енергії, звіти про енергоефективність, а також прогнози на основі моделей БЗ.

Керувальні потоки передаються від аналітичних або експертних модулів до систем керування технологічним обладнанням або до оператора. У таких потоках розташовані рекомендації щодо оптимізації режимів роботи, виявлення несправностей чи перевитрат ресурсів.

Усі потоки, що були перелічені, циркулюють у межах єдиної інформаційної інфраструктури, до того ж, утворюють замкнутий контур

керування, отже, аналітичні висновки впливають на прийняття рішень у реальному часі.

БЗ, насамперед, посідає місце провідного елемента інтелектуалізації системи. Застосування такої бази реалізує перехід від звичайного збору даних до глибинного аналізу та підтримки рішень щодо керування.

Функціональні можливості її полягають у [11-13]:

- створенні правил типу «ЯКЩО – ТО» для автоматичного пошуку аномалій;
- навчання з урахуванням історичних даних (побудова моделей прогнозування);
- формалізації експертних знань про режими роботи теплових систем;
- підтримці діалогової взаємодії з оператором для пояснення рішень системи.

Таким чином, спираючись на наведені вище властивості, інформаційні потоки доповнюються семантичним рівнем оброблення даних, адже система не лише фіксує події, а також інтерпретує їх з точки зору ефективності та безпеки.

Структура інформаційних потоків, яку було розроблено, дозволяє, передусім, забезпечити комплексний підхід щодо керування теплоспоживанням на підприємстві. Так, АСОТ повинна забезпечувати надійний збір, оброблення й аналітичну інтерпретацію даних, спираючись власне на БЗ, адже це підвищує рівень точності, оперативності й обґрунтованості управлінських рішень.

1.5 Висновки до розділу

У першому розділі було опрацьовано предметну область системи обліку теплоспоживання на виробничому підприємстві, окреслено нагальні проблеми

чинних підходів, а також сформовано вимоги щодо побудови сучасної АСОТ з використанням БЗ.

З'ясовано, що виробниче підприємство – це складний енергоспоживний об'єкт, в якому тепла енергія є джерелом для технологічних, господарських і побутових потреб. Та більше, раціональна експлуатація теплових ресурсів позитивно впливає на економічну ефективність, а також збільшує конкурентоспроможність виробничого підприємства.

Виконаний аналіз підкреслив, що загально прийняті системи обліку теплоспоживання супроводжуються низкою істотних недоліків, зокрема, відсутністю безперервного моніторингу параметрів, низькою точністю вимірювань, фрагментарністю збереження даних, труднощами під час інтеграції з іншими системами керування й обмеженістю аналітичних можливостей. Зважаючи на сказане вище, власне процес керування теплоспоживанням все ж таки залишається малоефективним, отже, не дозволяє своєчасно помітити втрати чи нераціональне використання енергії.

Крім того, було доведено необхідність щодо впровадження АСОТ, адже вона активує безперервний збір, оброблений аналіз даних у режимі реального часу. До того ж, підвищує точність вимірювань, зменшує вплив людського чинника, а також формувати умови для інтелектуального керування тепловими процесами.

Особливе значення у структурі майбутньої системи надається БЗ, яка, зі свого боку, є інтелектуальним ядром АСОТ, оскільки здійснює накопичення досвіду, формалізацію експертних правил, виявлення аномалій під час споживання теплової енергії та формування рекомендацій щодо підвищення енергоефективності. Втім інтеграція БЗ до системи формує передумови для переходу до концепції «розумного виробництва», а також кіберфізичних систем керування енергоресурсами.

За результати проведеного аналізу було окреслено сукупність технічних, функціональних та інформаційних вимог до майбутньої системи. Встановлено як основні типи інформаційних потоків (первинні, аналітичні, керувальні), так і їхній взаємозв'язок із базою знань, внаслідок чого утворюється цілісність і замкнутість контуру керування теплоспоживанням.

Підкреслимо, що отриманні результати можна використовувати як теоретичне та методологічне підґрунтя за умови переходу до етапу проектування АСОТ. Більш детально ці аспекти будуть розглянуті в наступному розділі, зокрема, мова йтиме про розроблення архітектури системи, її функціональні модулі, алгоритми роботи та власне структуру БЗ.

2 ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ

2.1 Загальні принципи проєктування системи

Проєктування АСОТ було виконано з урахуванням сучасних принципів інженерії систем керування, інформаційних технологій і теорії кіберфізичних систем. Головна мета проєктування визначається як створення гнучкої, надійної та інтелектуальної системи, за допомогою якої можна проводити безперервний моніторинг, а також у реальному часі аналізувати параметри теплоспоживання.

На рисунку 2.1 наведено структурну схему АСОТ.

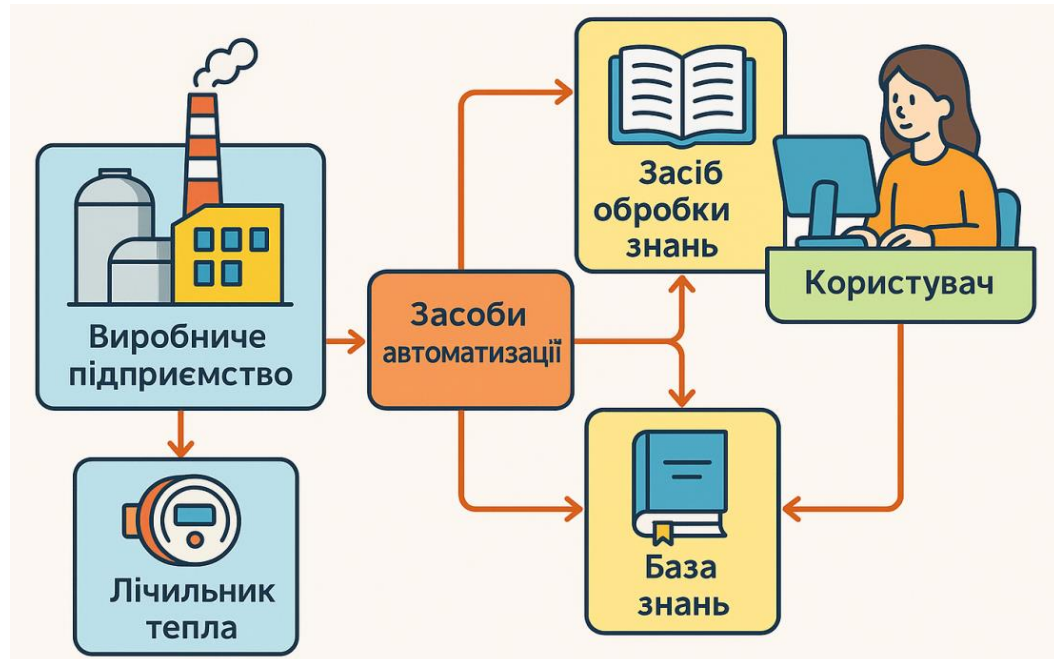


Рисунок 2.1 – Структурна схема АСОТ

2.1.1 Основні принципи побудови системи

АСОТ насамперед повинна складатися з окремих функціональних модулів, як показано на рисунку 2.2, до того ж, вони можуть розвиватися або модернізуватися незалежно один від одного.

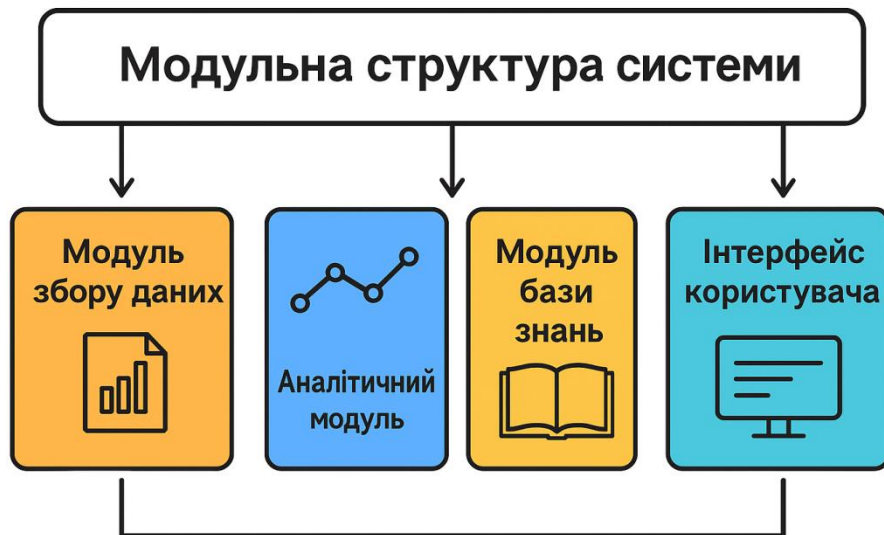


Рисунок 2.2 – Модульна структура АСОТ

Водночас архітектурі АСОТ необхідно підтримувати відкриті стандарти обміну даними (Modbus, OPC UA, MQTT), тобто формувати інтеграцію з іншими інформаційними системами виробничого підприємства, на кшталт ERP або SCADA [9, 14].

Окрім того, система повинна функціонувати без ускладнень на виробничих підприємствах різних масштабів – від локальної котельні до багатоповерхового виробничого комплексу, а додавання нових сенсорів або підсистем не повинно суттєво впливати на видозміну архітектури.

Система повинна гарантувати й збереження даних навіть тоді, коли трапляються короточасні збої зв'язку чи окремі компоненти виходять з ладу.

Це досягається шляхом дублювання серверів, а також створенням резервних копій даних.

Застосовуючи БЗ і алгоритми машинного навчання, система спроможна автоматично виявляти відхилення, прогнозувати споживання тепла, а також формувати рекомендації для енергоменеджера.

До того ж, системі необхідно підтримувати двосторонній зв'язок фізичних пристроїв (сенсорів, контролерів) із цифровими моделями процесів. Така взаємодія стає підґрунтям для формування цифрового двійника теплової системи. Водночас алгоритми аналізу даних повинні спрямовуватись на виявлення втрат теплової енергії, підвищення ККД систем, а також мінімізацію експлуатаційних витрат.

2.1.2 Архітектурна концепція

Як правило, проектування АСОТ виконується за принципом багаторівневої системи, приклад якої відображено на рисунку 2.3.

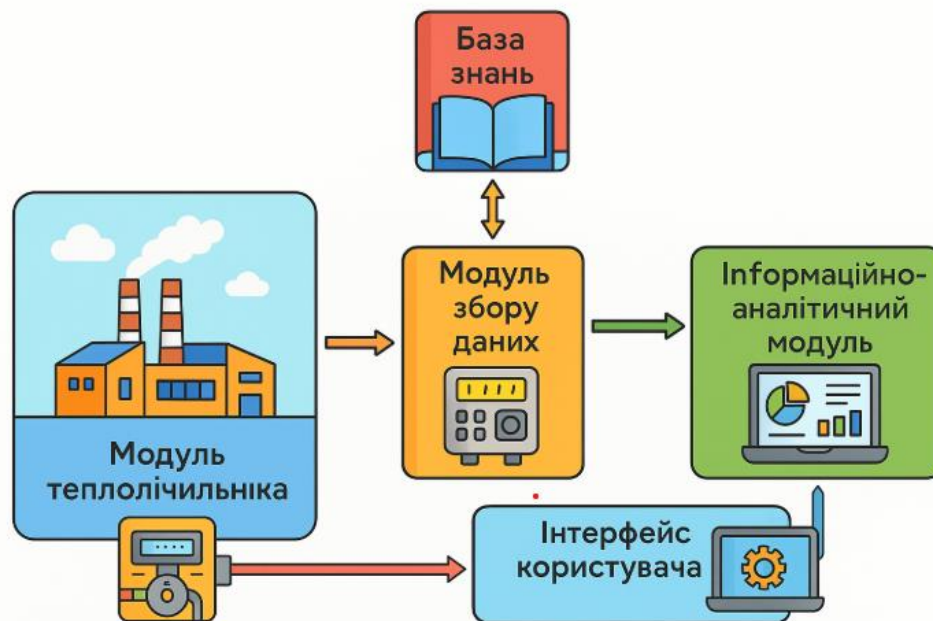


Рисунок 2.3 – Структура інформаційних потоків АСОТ

У цілому структура інформаційних потоків АСОТ складається з таких рівнів:

- нижнього (польового), де задіяні сенсори, прилади вимірювання, теплотічильники;
- середнього (комунікаційного), де функціонують контролери, шлюзи зв'язку, а також дані передаються до локальної мережі;
- верхнього (інформаційно-аналітичного), де розміщені сервер бази даних (БД), аналітичний модуль, БЗ, а також інтерфейс користувача.

Взаємодія між рівнями підтримується роботою двосторонніх інформаційних потоків. Так, від сенсорів до серверів функціонує потік вимірювальних даних, а від БЗ до операторів – потік сигналів керування та рекомендаційних сигналів.

2.1.3 Інформаційна модель системи

З метою забезпечення цілісності та повноти інформаційних зв'язків утворюється інформаційна модель АСОТ, елементами якої є [14]:

- об'єкти вимірювання (прилади обліку, теплові вузли, технологічні контури);
- атрибути даних (температура, тиск, витрата, енергія, час);
- логічні зв'язки між параметрами;
- алгоритми обчислень і правила БЗ.

Так, принципи проектування, які були наведені вище, задовольняють вимогам щодо побудови інтелектуальної, масштабованої та відкритої системи, котра, зі свого боку, спроможна адаптуватися до потреб конкретного виробничого підприємства.

Власне побудова архітектури АСОТ із багаторівневою структурою та БЗ стає інструментом для підвищення точності обліку, оперативності прийняття рішень, а також рівня енергоефективності.

2.2 Структура та функціональні модулі системи

Як правило, АСОТ побудовано за багаторівневою архітектурою, завдяки чому забезпечується послідовний рух інформаційних потоків від пристроїв вимірювання до інтелектуальних модулів оброблення й керування. До того ж, структура системи характеризується відкритістю, масштабованістю й направленістю на інтеграцію з іншими інформаційними системами виробничого підприємства.

Сталими складовими АСОТ є п'ять взаємопов'язаних модулів, найменування яких зазначено на рисунку 2.4.

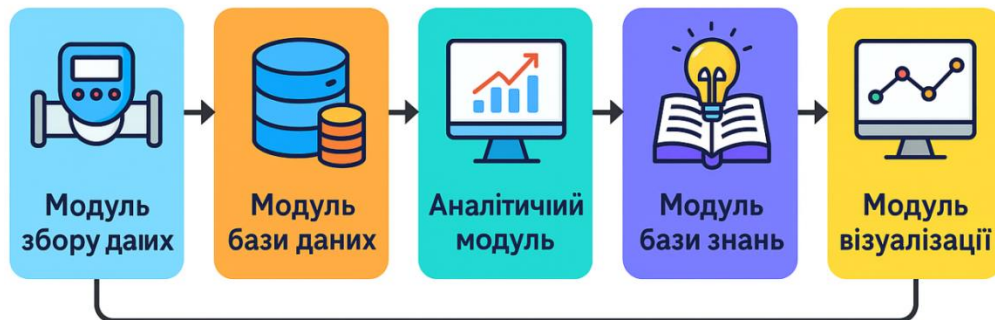


Рисунок 2.4 – Функціональні модулі АСОТ

Модуль зі збору даних вважається базовою ланкою системи, що забезпечує повсякчасний моніторинг параметрів теплоносія.

До головних функцій модуля належать:

- зчитування даних із теплообчислювачів, витратомірів, датчиків тиску та температури;

- первинна фільтрація та перевірка щодо достовірності отриманих сигналів;
- приведення параметрів до єдиної системи одиниць вимірювання;
- передавання даних до центрального сервера або безпосередньо до модуля БД.

Власне модуль збору даних може функціонувати як на базі промислових контролерів, та і мікропроцесорних пристроїв, які спроможні підтримувати стандартні протоколи обміну (Modbus, OPC UA, MQTT).

Модуль БД за функціональним призначенням є централізованим сховищем інформації, ключові завдання якого окреслені [15]:

- прийманням та архівуванням потоків даних із вимірювальних пристроїв;
- збереженням історії теплоспоживання в часових рядах;
- наданням структурованих даних аналітичному модулю та БЗ;
- оформленням проміжних звітів і вибірок для користувача.

БД реалізовано на реляційній або об'єктно-орієнтованій моделі, завдяки чому забезпечується швидкий доступ до великих обсягів інформації і водночас підтримуються запити в реальному часі. З метою забезпечення надійності виконується резервне копіювання та дублювання даних.

Аналітичний модуль функціонально спрямований на математичне та статистичне оброблення даних, головні завдання якого полягають в:

- обчисленні фактичного обсягу спожитої теплової енергії;
- визначенні втрат у трубопроводах та обладнанні;
- оцінюванні енергетичної ефективності технологічних процесів;
- виявленні відхилень від нормативних показників;
- створенні прогнозних моделей споживання тепла.

На зазначеному етапі дані можуть оброблятися шляхом залучення методів регресійного аналізу, кореляційних залежностей або алгоритмів машинного навчання.

Результати оброблення надходять до БЗ задля оформлення експертних висновків.

Модуль БЗ вважається інтелектуальним компонентом системи, котрий реалізує механізм експертної підтримки прийняття рішень, тому, він складається з [15]:

- фактичних даних, що надаються аналітичним модулем;
- експертних правил типу «ЯКЩО – ТО», що відображають досвід фахівців;
- логічних залежностей між параметрами теплоенергетичних процесів;
- прогностичних моделей, які зважають на сезонність і динаміку споживання.

Наведемо приклад експертного правила:

Якщо витрата теплоносія зростає без підвищення температури подачі, тоце може свідчити про ймовірність витoku або нераціональне розподілення енергії.

Модуль БЗ виконує такі завдання:

- виявляє неефективні режими роботи;
- формує рекомендації оператору;
- навчання системи з урахуванням історичних даних;
- передає сигнали керування або сповіщення до інтерфейсу користувача.

Модуль візуалізації (інтерфейс користувача) спрямований на взаємодію користувача із системою, а також характеризується такими функціями:

- графічним відображенням поточних і архівних даних;
- побудовою діаграм, графіків і теплових карт споживання;

- формуванням звітів і повідомлень;
- інтерактивною роботою з рекомендаціями БЗ.

Інтерфейс користувача, як правило, розроблено у вигляді вебзастосунку або SCADA-панелі, що допускає дистанційний доступ до системи. Так, на екрані відображаються питомі показники, зокрема, температура, витрати, обсяги споживання, енергоефективність, а також попередження про відхилення.

Взаємодія модулів відбувається за такою схемою: інформаційні потоки переміщуються від модуля збору даних до модуля візуалізації, таким чином, утворюється циклічний процес «збір → аналіз → рішення → відображення».

БЗ, зі свого боку, реалізує зворотний зв'язок, тобто передає аналітичні рекомендації назад до системи керування, створюючи механізм адаптивного контролю теплоспоживання [15].

Розроблена структура функціональних модулів полягає в комплексному охопленні всіх етапів обліку теплоспоживання: від отримання первинних вимірювань до формування інтелектуальних висновків. Водночас модульність призводить до масштабування системи, інтеграції з іншими енергетичними платформами та залучення сучасних технологій аналітики даних і штучного інтелекту.

2.3 Проєктування архітектури бази знань

БЗ розглядається як головний інтелектуальний компонент АСОТ, адже спроможна не лише зберігати й аналізувати дані, але й призначена для формування логічних висновків, рекомендацій та прогнозів, враховуючи досвіді закономірності функціонування системи. За результатами її впровадження власне систем обліку зазнає трансформації з інструменту фіксації фактів на активний елемент керування енергоефективністю виробничого підприємства.

Проектування БЗ виконується із урахуванням таких принципів [15]:

а) формалізації знань. Інформація, що надійшла від експертів, технологів і операторів, повинна перетворюватися на логічні правила, математичні залежності й описові моделі, тобто зручні для машинної інтерпретації;

б) структурованості. БЗ повинна вирізнятися ієрархічною структурою, що охоплює розподілення на рівні:

- 1) фактичні дані (з аналітичного модуля);
- 2) правила логічного висновку;
- 3) моделі прогнозування;
- 4) пояснювальні залежності та зв'язки між параметрами;

в) адаптивністю. Система повинна підлягати навчанню на базі історичних даних. Йдеться про оновлення чи уточнення правил у разі накопичення нової інформації;

г) прозорості рішень. Кожен висновок або рекомендація БЗ має супроводжуватися поясненням, зокрема, які опрацьовані дані або правила призвели до такого результату. Це гарантує підвищення довіри до системи, а також полегшує роботу оператора;

д) структури БЗ. БЗ АСОТ містить трирівневу структуру, приклад якої наведено на рисунку 2.5:

1) рівень фактів (даних). Оперує інформацією, отриманої з модулів збору й аналітики: про температуру, тиск, витрати теплоносія, результати обчислень і звіти.

2) рівень правил. Охоплює продукційні правила типу «ЯКЩО – ТО», що відтворює експертні знання про закономірності процесів теплоспоживання (як-от: ЯКЩО температура зворотного трубопроводу знижується під час постійної подачі, ТО вірогідно, що теплообмінник

несправний; ЯКЩО витрата перевищує норматив у разі постійного навантаження, ТО ймовірно відбуваються втрати в мережі);

3) рівень висновків і рішень. Спрямований на узагальнення результатів, а також формування висновків, прогнозів і рекомендацій для оператора чи системи керування.



Рисунок 2.5 – Архітектура бази знань автоматизованої системи обліку теплоспоживання

2.3.1 Формалізація правил і алгоритм логічного висновку

Головна одиниця репрезентації знань визначається як продукційне правило, що, зі свого боку, описується формою – R_i : ЯКЩО (Умова i) ТО (Дія i).

Для відтворення процесу логічного висновку доцільно використати прямий ланцюговий механізм (forward chaining), тобто це послідовне застосування правил до наявних фактів з метою формування нових знань.

Алгоритм базується на таких етапах:

– отриманні вхідних даних (поточних параметрів, які надходять із БД);

- пошуку відповідних правил, умови яких задовольняються поточним станом системи;
- застосуванні дій (додавання нових фактів або формування висновків);
- формуванні рекомендацій чи попереджень.

2.3.2 Інтеграція БЗ у загальну архітектуру системи

БЗ взаємодіє з іншими модулями за такою схемою:

- отримує дані з аналітичного модуля;
- передає висновки до інтерфейсу користувача;
- формує зворотний зв'язок з метою оптимізації режимів роботи обладнання;
- може ініціювати дії керування, як-от регулювання подачі теплоносія.

Інтеграційний обмін реалізується через API або внутрішні сервіси даних, у результаті чого з'являється оперативність і масштабованість роботи системи.

2.3.3 Технологічні засоби реалізації

Для запровадження БЗ можуть задіюватись такі інструменти [15]:

- системи керування знаннями – CLIPS, Drools, Jess;
- мови репрезентації знань – Prolog, OWL, RDF;
- алгоритми машинного навчання на Python (бібліотеки Scikit-Learn, TensorFlow) для побудови моделей прогнозування теплоспоживання.

Послугування комбінованим підходом відображається в поєднанні експертних правил із методами інтелектуального аналізу даних.

Проектування архітектури БЗ розглядається як критичний етап у створенні інтелектуальної системи обліку теплоспоживання [15]. Структура, котру було розроблено, забезпечує упорядкування експертних знань, їхнє

аналітичне оброблення та практичне використання з метою підтримки рішень у режимі реального часу.

Інтеграція БЗ до загальної архітектури системи створює передумови для переходу від традиційного моніторингу до інтелектуального керування тепловими процесами.

2.4 Алгоритм функціонування системи

Функціонування АСОТ характеризується діями безперервного циклу збирання, оброблення, аналізу та інтелектуальної інтерпретації даних про споживання теплової енергії.

Система працює в режимі реального часу за принципом замкнутого контуру керування «вимірювання – аналіз – рішення – вплив».

У таблиці 2.1 продемонстровано алгоритм через послідовності операцій.

Таблиця 2.1 – Алгоритм у вигляді послідовності операцій

№ етапу	Найменування операції	Опис виконуваної дії
1	ініціалізація системи	перевірка підключення датчиків і зв'язку з сервером
2	збір даних	отримання вимірювань з приладів обліку
3	фільтрація і нормалізація	усунення похибок, приведення даних до стандартного формату
4	збереження у базі даних	архівування і систематизація інформації
5	аналітичне оброблення	обчислення показників споживання, втрат, ефективності
6	логічний аналіз БЗ	застосування правил і моделей для формування висновків
7	формування звітів і рекомендацій	передача результатів до інтерфейсу користувача
8	відображення і взаємодія	користувач вивчає результати, приймає рішення
9	зворотний зв'язок	оновлення знань системи, коригування моделей і порогів

2.4.1 Алгоритм роботи системи

Алгоритм роботи АСОТ, приклад якого подано на рисунку 2.6, відображає послідовність дій, які функціонують в апаратно-програмному комплексі системи.



Рисунок 2.6 – Алгоритм функціонування автоматизованої системи обліку теплоспоживання

Сенсорні пристрої (теплолічильники, датчики температури, тиску, витрати) повсякчас фіксують параметри теплоносія. Власне інформація надходить до модуля збору даних, на базі якого застосовується первинне оброблення сигналів, а також перевірка достовірності вимірювань.

Відфільтровані показники, як правило, передаються до центрального сервера через комунікаційні шлюзи. Тут дані структуруються за часовими інтервалами та архівуються задля подальшого аналітичного оброблення.

Аналітичний модуль задіюється для обчислення фактичного споживання теплової енергії, крім того, фіксує відхилення від нормативів, а також виявляє потенційні втрати. Водночас визначається динаміка споживання та проводиться порівняльний аналіз із попередніми періодами.

Оброблені дані надходять до БЗ, яка, зі свого боку, може залучати експертні правила, математичні моделі, а також логічні залежності. Так, система аналізує ситуацію з огляду на ефективність, стабільність роботи та безпеку.

БЗ генерує висновки на кшталт «зафіксовано нераціональне споживання», «перевищено норматив», «можлива витрата теплоносія» тощо. Після ознайомлення з цими висновками формується набір рекомендацій або керувальних сигналів для оператора.

Інтерфейс користувача, як правило, відтворює поточні показники, аналітичні звіти, та попередження чи рекомендації. Оператор, на підставі виведених даних, може приймати рішення щодо зміни режиму роботи обладнання чи активувати коригувальні дії.

Отже, зважаючи на рішення, що були попередньо прийняті користувачем або системою, відбувається оновлення даних у БЗ. Це є приводом для адаптації системи до нових умов, а також підвищення точності її аналітичних висновків у майбутньому.

2.4.2 Особливості реалізації алгоритму

Безперервність роботи: система функціонує цілодобово, таким чином, дані оновлюються регулярно.

Інтелектуальність: БЗ дозволяє системі як реагувати на зміни, так і прогнозувати тенденції [15].

Самонавчання: під час опрацювання накопичення даних відбувається уточнення аналітичних моделей і правил.

Адаптивність: система при звичається до технологічних змін, модернізації обладнання, змін навантаження, сезонності.

Розроблений алгоритм роботи АСОТ забезпечує повну автоматизацію процесів збору, аналізу та оцінювання теплоспоживання.

Приведення в дію даного алгоритму реалізує:

- підвищення точності й оперативності обліку;
- знаходити нераціональні режими споживання;
- здійснювати прогнозування навантаження;
- формувати підґрунтя для самонавчальної системи енергоменеджменту

виробничого підприємства.

Алгоритм запроваджує замкнений цикл керування, котрий властивий інтелектуальним кіберфізичним системам [15].

2.5 Висновки до розділу

У другому розділі було виконано проектування АСОТ для виробничого виробничого підприємства, ключовими параметрами якої є окреслення архітектури, функціональних модулів, принципів роботи БЗ та алгоритму функціонування системи.

Під час проєктування було сформовано багаторівневу архітектуру системи, що об'єднує польовий (сенсорні пристрої та контролери), аналітичний (обчислювальні та статистичні модулі), а також інтелектуальний рівень (БЗ і модуль підтримки рішень) із рівнем збору та збереження даних (серверна інфраструктура, база даних). Описана структура відтворює узгоджену взаємодію між апаратними та програмними компонентами системи.

Модульну структуру системи було розроблено, зважаючи на вимоги щодо гнучкості, масштабованості та сумісності з іншими інформаційними системами виробничого підприємства. Кожен модуль реалізує такі функції:

- модуль збору даних – зчитування та попереднє оброблення інформації з теплообчислювачів;
- модуль БД – централізоване збереження і систематизація даних;
- аналітичний модуль – оцінювання ефективності теплоспоживання;
- модуль БЗ – інтелектуальний аналіз і генерація рекомендацій;
- модуль візуалізації – надання користувачеві зручних інструментів для моніторингу та контролю.

База знань, яку визначено інтелектуальним ядром системи, спроектовано за принципом трирівневої структури із такими складниками: фактами (даними), правилами логічного висновку та модулем прийняття рішень. Дотримання продукційних правил типу «ЯКЩО – ТО» забезпечує автоматичну інтерпретацію даних і формування аргументованих рекомендацій щодо оптимізації теплових процесів.

Розроблений алгоритм роботи системи реалізує замкнений цикл керування, котрий охоплює збирання, фільтрацію, аналітичне оброблення, інтелектуальний аналіз, збереження, формування висновків і зворотний зв'язок. Така структура є підґрунтям для задіяння принципів адаптивного керування теплоспоживанням шляхом самонавчання.

Результат запровадження проектних рішень полягає у побудові інтелектуальної, гнучкої та енергоефективної системи, на підставі якої можна реалізувати:

- підвищення точності й оперативності обліку теплової енергії;
- зменшення втрат, а також позбавлення нераціонального використання ресурсів;
- автоматичну підтримку прийняття рішень;
- спроможність інтеграції з корпоративними системами енергоменеджменту.

Можемо констатувати, що запропонована АСОТ з БЗ має перспективи для впровадження у виробничих умовах, допомагає цифровізації енергетичних процесів і стає основою для переходу виробничого підприємства до концепції «розумного виробництва».

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ

3.1 Мета та завдання моделювання

На сьогодні питання енергоефективності й оптимального розподілу теплової енергії у сучасних виробничих системах стає одним із вагомих чинників щодо зниження експлуатаційних витрат, а також підвищення результативності роботи підприємства. Так, задля досягнення високої точності обліку теплоспоживання залучаються не лише надійні вимірювальні засоби, але й виробляється тенденція щодо побудови адекватних математичних моделей, які, зі свого боку, демонструють фізичну сутність процесів теплообміну чи гідравлічні характеристики системи.

У даному розділі акцент робиться на формуванні повного математичного опису роботи АСОТ. До того ж, приділено увагу детальному моделюванню всіх найважливіших процесів, як-от: передавання теплової енергії через теплоносій, зміни температурних параметрів у часі, формування масової витрати, теплових витрат, разом із стохастичними й інформаційними властивостями системи.

Утім фундаментальна роль у побудові АСОТ належить математичному моделюванню, адже за його допомогою можна описати фізичні процеси, що діють в тепловому вузлі виробничого підприємства, формально. Окрім того, математичне моделювання стає підґрунтям для подальшого алгоритмічного, програмного та технічного проектування системи.

Мета математичного моделювання полягає у створенні комплексного набору моделей, зокрема енергетичних, інформаційних, динамічних і логічних, які описують власне процес теплоспоживання [16].

3.2 Динамічна модель теплообміну

Теплоспоживання технологічних об'єктів окреслюється процесами транспозиції енергії між теплоносієм і споживачем. Загалом процес теплопередачі можна описати рівняннями енергетичного балансу, теплопровідності чи конвективного теплообміну. Власне аналіз орієнтується на перший закон термодинаміки, де будь-яка зміна внутрішньої енергії робочого середовища дорівнюватиме різниці між підведеною тепловою енергією з виконаною роботою над системою [16, 17].

На рисунку 3.1 продемонстровано фізичну модель теплоспоживання.

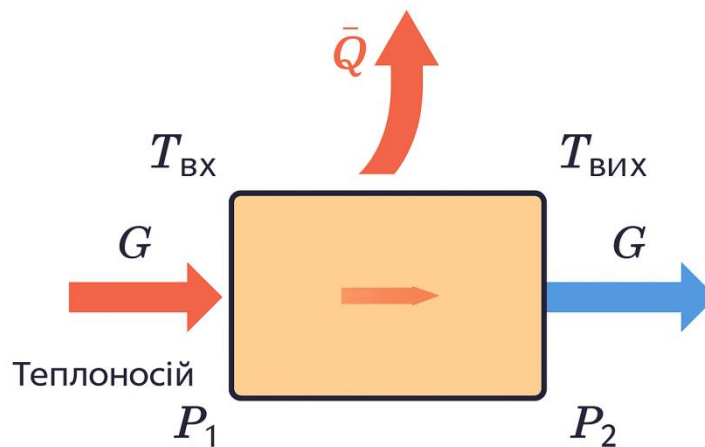


Рисунок 3.1 – Фізична модель теплоспоживання

3.2.1 Базове рівняння теплоспоживання

Як правило, процес обліку теплоспоживання у теплових системах виробничих підприємств базується на аналізі передавання теплової енергії потоком теплоносія. Зважаючи на те, що підґрунтям для математичного опису таких процесів обрано перший закон термодинаміки, то зміна внутрішньої енергії робочого середовища пов'язується з кількістю підведеної теплоти, втратами енергії, а також виконаною роботою. Так, у поточних теплотехнічних

системах, теплова енергія в яких передається циркуляційним контуром без зміни агрегатного стану води, теплоспоживання насамперед обчислюється як добуток масової витрати, питомої теплоємності та перепаду температур.

Зокрема кількість теплоти Q , що передається споживачу, у відкритій системі з постійним потоком теплоносія доречно описати рівнянням:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot \Delta t, \quad (3.1)$$

де Q – кількість теплоти, Дж або кВт·год;

G – масова витрата теплоносія, кг/с;

c – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·°C);

t_1, t_2 – температура подаючого та зворотного трубопроводів відповідно, °C;

Δt – тривалість інтервалу обчислення, с.

Наведене рівняння підкреслює, що теплоспоживання є прямо пропорційним кількості теплоносія, що проходить через систему, і температурному перепаду, котрий характеризує інтенсивність теплообміну.

У дійсності параметри теплоносія піддіються змінам у часі, тому може виникати необхідність у послуговуванні дискретними моделями [18]. Утім дискретизація рівняння дозволяє обчислювати теплоспоживання за фіксовані часові інтервали:

$$Q[k] = G[k] \cdot c \cdot (t_1[k] - t_2[k]) \cdot \Delta t. \quad (3.2)$$

Зауважимо, що даний підхід є опорним для автоматизованих систем обліку, адже він реалізує оброблення поточкових даних сенсорів у режимі реального часу. Однак фізичний сенс цієї моделі можна передати так: система

фіксує не тільки параметри теплоносія, але й визначає динаміку зміни теплоспоживання, аби аналізувати навантаження, оптимізувати режими та виявляти аномалії.

Окрім того, необхідно звернути увагу на таку властивість: фактичне теплоспоживання залежить як від масової витрати та температурного перепаду, так і від тепловтрат теплових мереж, інерційності системи і водночас точності вимірювальних засобів. У зв'язку з цим рівняння балансу може бути розширене шляхом додавання коректив відповідно до втрат або нелінійних ефектів [18]:

$$Q_{\text{реал}} = Q_{\text{ід}} - Q_{\text{вт}}. \quad (3.3)$$

Зважаючи на теплові втрати:

$$Q_{\text{вт}} = kS(T - T_{\text{пов}}), \quad (3.4)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі;

S – площа поверхні теплопровідних елементів.

Підсумуємо: базове рівняння теплоспоживання стає основою для моделювання теплового процесу подальшому, проте в умовах реальності доцільно врахувати й додаткові чинники, котрі, зі свого боку, позначаються на точності обліку. З огляду на це подальші підрозділи 4 розділу власне розширюють цю модель. Йдеться про енергетичні баланси, гідравлічні характеристики системи, а також стохастичні особливості вимірювальних сигналів.

3.2.2 Нелінійна модель теплового вузла

Шляхом застосування нелінійної моделі теплового вузла можна

відтворювати поведінку системи теплообміну, враховуючи інерційність і теплові втрати, а також зміни параметрів теплоносія в реальному часі. На противагу статичним моделям, які зорієнтовані на миттєвих значеннях температури та витрати, динамічна модель передусім спирається на здатність системи накопичувати тепло і водночас реагувати на зміну зовнішніх умов із певною часовою затримкою.

Загалом динаміку температури теплоносія можна подати як рівняння теплового балансу [18]:

$$C \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{\text{вх}} - \dot{Q}_{\text{кор}} - \dot{Q}_{\text{вт}}, \quad (3.5)$$

де C – теплова ємність теплоносія й елементів вузла;

$\dot{Q}_{\text{вх}}$ – теплова потужність, яка надходить до системи;

$\dot{Q}_{\text{кор}}$ – корисна теплова потужність, яку фактично споживає об'єкт;

$\dot{Q}_{\text{вт}}$ – тепловіддача у навколишнє середовище.

Розглянутий вище приклад належить до класу нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку, адже піддаватися змінам нелінійно у часі, з урахуванням функціонування насосів, стану трубопроводів і змінних умов навколишнього середовища, може і витрата G , і температура T .

Вагому роль у моделюванні теплового вузла відіграє інерційність. Навіть під час різкої зміни температури подачі або витрати система не спроможна миттєво відтворити новий режим. Наведемо декілька аргументів:

- труби та теплообмінники вирізняються значною теплоємністю;
- вода повільно змінює температуру, оскільки є теплоносієм;
- нагрів чи охолодження великого об'єму теплоносія потребує часу.

Таким чином, інерційність моделюється шляхом накопичення теплоти:

$$C \frac{dT}{dt} = \text{сума теплових потоків}, \quad (3.6)$$

це дозволяє брати до уваги перехідні режими, адже вони є надзвичайно важливими як для діагностики аварій, так і для точного обліку теплоспоживання.

Насправді частина теплоти все одно буде втрачатися через:

- трубопроводи;
- теплообмінники;
- неопалювальні приміщення;
- арматуру та з'єднання.

Так, втрати можна описати формулою:

$$\dot{Q}_{\text{вт}} = kS(T - T_{\text{пов}}), \quad (3.7)$$

де S – площа теплопередачі елементів;

k – коефіцієнт тепловіддачі, котрий залежить від матеріалу і стану теплоізоляції.

Утім присутність нелінійного члена $T - T_{\text{пов}}$ сприяє наближенню до реальної поведінки системи.

З огляду на те, що АСОТ функціонує з даними сенсорів у дискретні моменти часу (1 с, 10 с, 60 с), то цілком доречним стає перехід від диференціального рівняння до його дискретної форми:

$$T[k + 1] = T[k] + \frac{\Delta t}{C} (\dot{Q}_{\text{вх}}[k] - \dot{Q}_{\text{кор}}[k] - \dot{Q}_{\text{вт}}[k]). \quad (3.8)$$

Зокрема формула (3.8) відображає:

- зміну температури за один крок;

- накопичення теплоти;
- вплив теплових втрат;
- вплив споживання;
- часову затримку реакції системи.

Власне дана дискретна модель (3.8) присутня у модулі математичного обчислення теплоспоживання, забезпечуючи таким чином високу точність обчислень [18, 19].

Утім модель набуває значення нелінійної з огляду на:

- температурну залежність коефіцієнта теплопередачі;
- залежність витрат від кореня квадратного перепаду тиску;
- залежність теплових втрат від різниці температур;
- залежність температури води (теплоємність, густина) від температури;
- багатофакторність теплообмінних процесів.

Підсумуємо. По-перше, модель влучно описує реальні теплотехнічні процеси у промисловому тепловому вузлі. По-друге, нелінійна модель теплового вузла демонструє реальну динаміку теплообміну, зокрема інерційні властивості, тепловтрати, нелінійність витрат, а також залежність параметрів від температури. Розглянута модель є підґрунтям для точного моделювання перехідних процесів, формування достовірних теплових балансів. До того ж, в АСОТ вона забезпечує коректну роботу алгоритмів обліку й діагностики.

3.3 Гідравлічна модель масової витрати теплоносія

Гідравлічні процеси посідають значне місце у формуванні масової витрати теплоносія, котра, зі свого боку, визначає величину теплоспоживання у виробничих системах тепlopостачання безпосередньо. Так, для АСОТ коректне моделювання гідравлічних характеристик стає належною умовою для

забезпечення точності розрахунків, адже витрата є компонентом базового рівняння кількості теплоти.

Як правило, рух теплоносія трубопроводами описується законами гідродинаміки. Відповідно до них масова витрата залежить від різниці тисків на вході та виході, гідравлічного опору елементів мережі, властивостей насосного обладнання, а також характеристик трубопроводів [18, 19]. У більшості виробничих теплових системах моделювання базується на рівняння витрати у зв'язку із гідравлічним перепадом:

$$G = C_d A \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}, \quad (3.9)$$

де G – масова витрата теплоносія, кг/с;

C_d – коефіцієнт витрати, що залежить від типу трубопроводу та арматури;

A – площа живого перерізу потоку;

ρ – густина води;

P_1, P_2 – тиски на подачі та звороті відповідно.

На рисунку 3.2 продемонстровано гідравлічну модель масової витрати теплоносія.

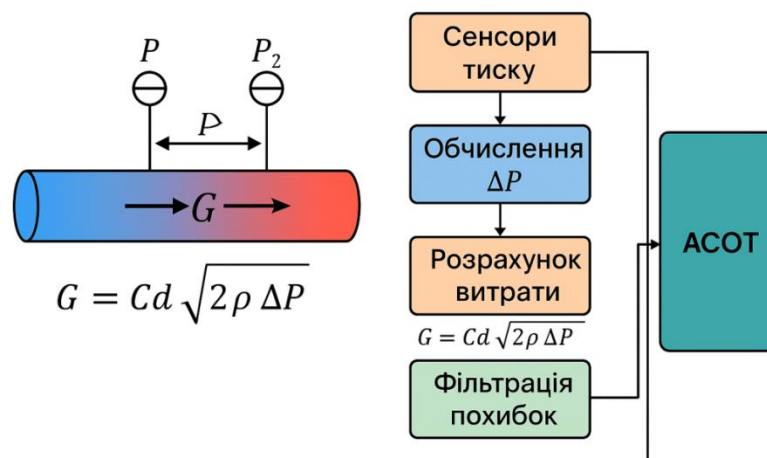


Рисунок 3.2 – Гідравлічна модель масової витрати теплоносія

Рівняння (3.9) є похідним від рівняння Бернуллі, що пов'язує кінетичну з потенційною енергією потоку. Втім нелінійна залежність витрати від перепаду тиску $\sqrt{(P_1 - P_2)}$ окреслює гідравлічну модель як важливий елемент математичного моделювання АСОТ.

Однак фактичний потік теплоносія демонструє залежність від гідравлічного опору мережі, зокрема на нього впливає довжина труб та їхній діаметр, коефіцієнт шорсткості разом із режимом течії (ламінарним або турбулентним). Так, для втрат тиску послуговуються формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3.10)$$

де L – довжина трубопроводу;

D – діаметр;

v – швидкість потоку;

λ – коефіцієнт тертя, котрий залежить від числа Рейнольдса.

Отже, масову витрату можна визначити не лише шляхом перепаду тиску на вузлі, але й за допомогою повного гідравлічного опору мережі. Проте значної вагомості це набуває у разі засмічування фільтрів, зношування клапанів, або появи гідравлічних перешкод, а також зміни режимів роботи насосів [18, 19].

Зазвичай у виробничих системах масова витрата теплопостачання утворюється здебільшого насосами.

Характеристику насоса можна відобразити, наприклад, як залежність:

$$G(f) = G_{\text{НОМ}} \left(\frac{f}{f_{\text{НОМ}}} \right), \quad (3.11)$$

де f – частота обертання.

Утім залежність (3.11) стає майже лінійною в робочій зоні частотних перетворювачів.

Під час зменшення частоти обертання масова витрата знижується, отже, безпосередньо впливає на теплоспоживання. Враховуючи сказане вище, АСОТ може аналізувати режими енергозбереження, а також попереджати про неефективну роботу.

Водночас клапани регулювання впливають на витрату за законом:

$$G(\alpha) = G_{\max} \sin(\alpha), \quad (3.12)$$

де α – кут або відсоток відкриття.

Використовуючи вираз (3.12), можна визначати неправильне налаштування, некоректне функціонування приводу чи застрягання клапана.

АСОТ власне працює з цифровими датчиками, тому масову витрату можемо представити як вибірку [19]:

$$G[k] = C_d A \sqrt{2\rho(P_1[k] - P_2[k])}. \quad (3.13)$$

Таке відтворення дозволяє формувати часові ряди витрати, аналізувати коливання, фільтрувати шум, а також виявляти аномалії.

До того ж, на тлі гідравлічної моделі АСОТ може автоматично виявляти аномальні режими потоку (використання у БЗ):

- різке падіння витрати $dG / dt < -G_{\text{кр}}$ (ознака аварії насоса);
- надмірне зростання витрати $G > G_{\max}$ (ймовірний обрив трубопроводу чи витік);
- невідповідність між витратою та перепадом тиску $G \neq \sqrt{(P_1 - P_2)}$

(сигналізує про засмічення фільтра чи несправність витратоміра).

Тож зазначені правила утворюють базу діагностичної підсистеми.

У разі узагальненого опису гідравлічної моделі всі залежності можна відтворити як, наприклад, інтегральне математичне рівняння [18, 19]:

$$G[k] = C_d A \sqrt{2\rho(P_1[k] - P_2[k])} - G_{\text{вт}}[k] + G_{\text{нас}}[k] + G_{\text{клап}}[k]. \quad (3.14)$$

Для виразу (3.14) також необхідно врахувати втрати тиску, вклад насосів, вплив регулювальної арматури разом із фізичними характеристиками теплоносія.

Отже, гідравлічна модель масової витрати виступає як підґрунтя для точного розрахунку теплоспоживання в АСОТ. Зі свого боку вона враховує основні фізичні залежності потоку, а також реальні чинники виробничої системи, як-от: гідравлічний опір трубопроводів, функціонування насосів, регулювальну арматуру із теплотехнічними обмеженнями. Запровадження окресленої моделі у ПЗ є рушієм для діагностики режимів, прогнозування поведінки системи, своєчасного відстежування появи відхилення й аварійних станів.

3.4 Енергетична модель теплоспоживання

Енергетична модель теплоспоживання набула значення вагомого компонента математичного опису роботи АСОТ, адже зводить результати фізичних і гідравлічних моделей, котрі було опрацьовано у попередніх підрозділах, а також безпосередньо формує повний енергетичний баланс теплового вузла.

Так, енергетична модель є актуальною не тільки для прямого обчислення обсягу теплової енергії, але й залучається для аналізу ефективності теплообміну чи виявлення аномалій, прогнозування споживання й оптимізації режимів [19].

Зазвичай енергетичний баланс теплової системи можна відтворити як суму підведеної теплоти з втратами теплової енергії:

$$Q_{\text{підв}} = Q_{\text{кор}} + Q_{\text{вт}}, \quad (3.15)$$

де $Q_{\text{підв}}$ – загальна кількість теплоти, що надходить до системи;

$Q_{\text{кор}}$ – корисна теплота, що надходить до споживача;

$Q_{\text{вт}}$ – тепловтрати.

Загалом в АСОТ значну увагу приділено власне корисній кількості теплоти, котру можна обчислити так:

$$Q_{\text{кор}} = G \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot \Delta t \quad (3.16)$$

Рівняння (3.16) утворено з урахуванням першого закону термодинаміки для відкритої системи.

Зауважимо, що у чинній теплотехнічній системі корисна кількість теплоти завжди буде меншою за підведену. Це пояснюється наявністю теплових втрат у трубопроводах, адже частина енергії втрачається здебільшого через конвекцію, теплопровідність або витікання.

Втрати можна відтворити за допомогою такого рівняння:

$$Q_{\text{вт}} = kS(T_{\text{ср}} - T_{\text{пов}}) \cdot \Delta t, \quad (3.17)$$

де S – площа поверхні теплопередачі;

k – коефіцієнт тепловіддачі;

$T_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2}$ – середня температура потоку;

$T_{\text{пов}}$ – температура навколишнього середовища.

Долучення такої складової дозволяє створити реалістичний енергетичний баланс.

Отже, повне рівняння енергетичної моделі набуде такого вигляду:

$$Q_p = G \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot \Delta t - kS(T_{\text{ср}} - T_{\text{пов}}) \cdot \Delta t. \quad (3.18)$$

На рисунку 3.3 продемонстровано приклад енергетичної моделі теплоспоживання.

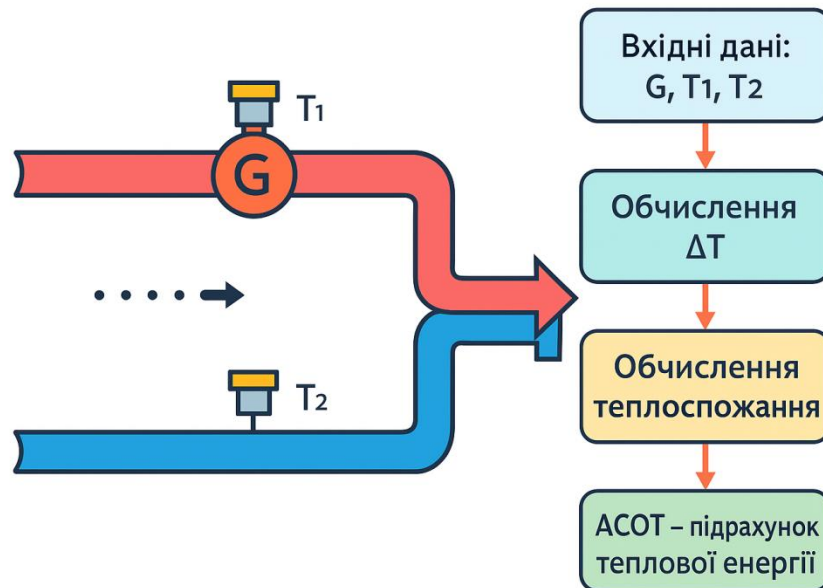


Рисунок 3.3 – Енергетична модель теплоспоживання

До того ж, вплив характеристик теплоносія, залежність фізичних параметрів теплоносія від температури є тими параметрами, на які теж необхідно звертати увагу:

- густина води ($\rho(T) = 1000 - 0,3T$);
- теплоємність ($c(T) = 4180 + 0,1T$);
- теплопровідність ($\lambda(T) = 0,56 + 0,001T$).

У чинній системі окреслені залежності впливають на точність обліку, тому що при високих температурах властивості змінюються на 2 – 5 %. Водночас АСОТ може залучати коефіцієнти уточнення – $c_{\text{еф}} = c(T_{\text{ср}})$ та $\rho_{\text{еф}} = \rho(T_{\text{ср}})$.

Так, енергетична модель є основою для визначення коефіцієнтів ефективності теплообміну:

$$K_{\text{еф}} = \frac{t_1 - t_2}{t_1}. \quad (3.18)$$

Утім коефіцієнти ефективності можуть набувати таких значень:

- $K_{\text{еф}} > 0,85$ – система функціонує стабільно;
- $0,70 < K_{\text{еф}} < 0,85$ – система функціонує зі зниженою ефективністю;
- $K_{\text{еф}} < 0,70$ – вірогідність виникнення аварій, засмічення чи витоку.

Коефіцієнт ефективності є компонентом правила логічної діагностики БЗ.

З урахуванням того, що АСОТ реалізовано в цифровому режимі з інтервалом опитування (1 – 60 с), то енергетичну модель трансформують на форму дискретну [18, 19]:

$$Q[k] = G[k] \cdot c[k] \cdot (t_1[k] - t_2[k]) \cdot \Delta t - kS(T_{\text{ср}}[k] - T_{\text{пов}}[k])\Delta t. \quad (3.19)$$

Відтак це є підставою для:

- виявлення швидких змін режимів;
- застосування цифрової фільтрації сигналів;

- інтегрування у реальному часі.
- формування часових рядів теплоспоживання;

Водночас енергетична модель наділяє АСОТ спроможністю щодо виявлення аномальних режимів:

- аномально низький температурний перепад ($t_1 - t_2 < \Delta T_{\min}$);
- низьку теплову ефективність ($K_{\text{еф}} < K_{\text{доп}}$);
- підозру на витік теплоносія ($G_{\text{под}} - G_{\text{зв}} > \Delta G_{\text{доп}}$);
- надмірні тепловтрати ($Q_{\text{вт}} > Q_{\text{крит}}$).

Окреслені залежності зводяться до експертної БЗ.

Таким чином, інтегральну енергетичну модель АСОТ можемо оформити як:

$$Q[k] = G[k] \cdot c[k] \cdot (t_1[k] - t_2[k]) \cdot \Delta t - kS \left(\frac{t_1[k] + t_2[k]}{2} - T_{\text{пов}}[k] \right) \Delta t - Q_a[k], \quad (3.20)$$

де Q_a – додатковий компонент, який враховує аварії, витоки, помилки сенсорів.

Підсумуємо: енергетична модель теплоспоживання набула значення центральної ланки математичного опису функціонування АСОТ. Вона зводить результати фізичної та гідравлічної моделей, а також враховує тепловтрати, властивості теплоносія разом із динамічними процесами в системі. Послугуючись даною моделлю можна точно обчислювати кількість спожитої теплової енергії, втілювати діагностику, прогнозування й оптимізацію режимів теплопостачання. До того ж, її функціонування у ПЗ АСОТ гарантує високу точність обліку та стійкість роботи, а також запобіганню аномальних режимів у реальному часі.

3.5 Стохастична модель похибок

Пріоритетним чинником, на підставі якого визначають точність функціонування АСОТ, називають вплив випадкових похибок вимірювання. Незважаючи на те, що сучасні датчики температури, тиску чи витрати забезпечують високу точність, утім на їхню роботу може впливати низка стохастичних відхилень, зокрема вони зумовлені електронними шумами, нестабільністю фізичних характеристик сенсорів, характеристиками навколишнього середовища й якістю сигналів. За таких умов з метою забезпечення достовірності обліку раціональним буде долучити систему стохастичних моделей, продемонстровану на рисунку 3.4, яка фіксує випадковий характер вимірювальних похибок, до математичного опису [19].

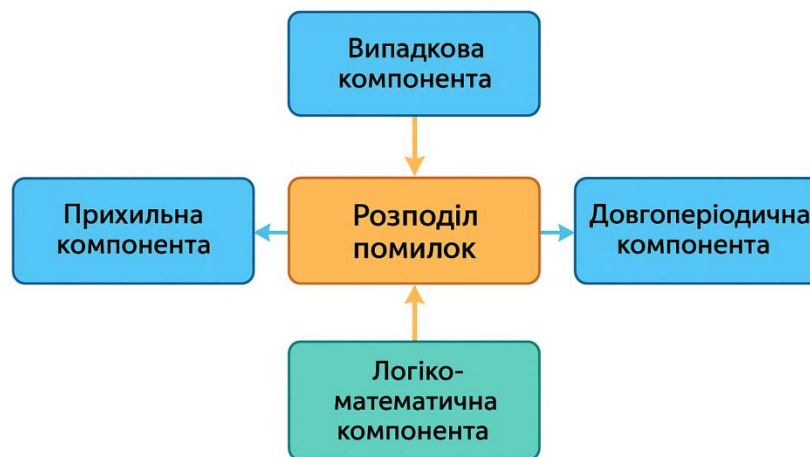


Рисунок 3.4 – Стохастична модель похибок

Як правило похибка вимірювання параметрів теплоносія може містити декілька компонентів:

$$\delta_{\text{заг}} = \delta_{\text{сист}} + \delta_{\text{вип}} + \delta_{\text{квант}} + \delta_{\text{шум}}, \quad (3.21)$$

де $\delta_{\text{сист}}$ – систематичної похибки (зміщення);

$\delta_{\text{вип}}$ – випадкової похибки;

$\delta_{\text{квант}}$ – квантування АЦП;

$\delta_{\text{шум}}$ – електронних шумів.

Утім загальну похибку, котру вирізняють як стохастичну величину, більш раціонально описувати за допомогою методів теорії ймовірностей, а також математичної статистики.

Зі свого боку температурні сенсори, що присутні у теплотехнічних системах, характеризуються температурною залежністю похибки:

$$\delta T = \pm(0,2 + 0,005T). \quad (3.22)$$

Однак випадкова складова температурної похибки описується сталим законом [19]:

$$\xi T \sim N(0, \sigma_T^2), \quad (3.23)$$

де σ_T – коваріація, котра встановлюється за паспортними даними датчика.

Проте реальне вимірне значення можна записати так:

$$T_{\text{вим}} = T_{\text{іст}} + \xi T. \quad (3.24)$$

Під час вимірювання витрати послуговуються витратомірами, проте їм властива відносна похибка: $\delta_G \approx 1,5 \%$, водночас випадкова складова моделюється за допомогою мультиплікативного шуму [19]:

$$G_{\text{вим}} = G_{\text{іст}}(1 + \xi_G), \quad (3.25)$$

де $\xi_G \sim N(0, \sigma_G^2)$ – випадкова величина із нормальним (гаусівським) розподілом, в якому середнє значення дорівнює 0 (однак похибка в середньому не зміщує вимірювання вгору чи вниз);

σ_G^2 – дисперсія, величина розкиду (тобто наскільки сильно коливається шум).

Якщо ж розглядати реальні умови, то в такому разі на точність відбиватимуться:

- гідравлічні впливи;
- нерівномірність потоку;
- пульсації насосів;
- турбулентність.

Підкреслимо, що перепад тиску встановлюються датчиками з похибкою $\delta_p = \pm(0,075 \dots 0,25) \%$.

Розглянемо стохастичну модель похибок [19]:

$$P_{\text{вим}} = P_{\text{іст}} + \xi_p, \quad (3.26)$$

де $\xi_p \sim N(0, \sigma_p^2)$ – випадкова величина із сталим (гаусівським) розподілом із середнім значенням, що дорівнює 0 (похибка в середньому не збільшує і не зменшує вимірюваний тиск);

σ_p^2 – дисперсія, величину розкиду (тобто демонструє, наскільки «розкидані» значення похибки).

Натомість відхилення тиску значно впливає на масову витрату, котру вже було прораховано.

З огляду на те, що теплота залежить від масової витрати та температурного перепаду, то стохастичну сумарну похибку теплоти буде доцільно обчислити за формулою:

$$\delta Q = \sqrt{\delta_G^2 + \delta_{\Delta T}^2}, \quad (3.27)$$

де

$$\delta_{\Delta T} = \delta_{T1}^2 + \delta_{T2}^2. \quad (3.28)$$

У практичній роботі АСОТ було обчислено, що $\delta_Q \approx 0,77\%$, тобто це суттєво нижче за типові допуски (до 2 %).

Підкреслимо, що всі вимірювальні дані утворюють часові ряди, до яких додаються і шумові компоненти.

Так, для опису шумів, як правило, використовують:

- шум індексний (білий шум) ($\xi(t) \sim N(0, \sigma^2)$);
- шум автокорельований ($\xi(t) = a\xi(t-1) + \varepsilon(t)$);
- модель шуму для цифрових сенсорів ($\xi[k] = \eta[k] + \epsilon[k]$, в якій η – шуми електронні, водночас ϵ – помилки квантування).

Власне дані моделі є актуальними для алгоритмів фільтрації, а також згладжування в АСОТ.

Нижче продемонстровані методи щодо зменшення впливу похибок у АСОТ.

Згладжування експоненціальне:

$$\hat{X}[k] = \alpha X[k] + (1 - \alpha)\hat{X}[k-1]. \quad (3.29)$$

Фільтрування медіанне:

$$\hat{X}[k] = \text{median}(X[k-n..k+n]). \quad (3.30)$$

Модель прогнозування (короткострокове):

$$\hat{Q}[k] = aQ[k - 1] + b. \quad (3.31)$$

Усереднення й інтегрування

$$Q_{\text{ср}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Qi. \quad (3.32)$$

Наведені методи не лише знижують рівень випадкових шумів, але й стабілізують дані.

Зокрема у модулі збору даних стохастичну модель можна відтворити так:

$$X_{\text{сенс}}[k] = X_{\text{іст}}[k] + \xi[k], \quad (3.33)$$

Утім аналітичний модуль спрямовано на:

- фільтрацію сигналів;
- компенсацію зміщення;
- оцінювання середньоквадратичної похибки (RMSE);
- згладжування часових рядів.

Окрім того, у модулі БЗ стохастичні моделі є нагальними для формування логічних висновків, якщо наявні умови невизначеності.

Підсумуємо: стохастична модель похибок набула значення неодмінної компоненти у математичному моделюванні АСОТ. За її допомогою враховується істинна природа вимірювальних сигналів, визначається точність обчислень теплоспоживання, оцінюється рівень довіри до даних сенсорів, і до того ж, задіюються ефективні алгоритми фільтрації й прогнозування. Доповнення ПЗ стохастичними моделями відтак забезпечуватиме високу

достовірність обліку або стійкість до шумів, а також спроможність діагностувати аномальні режими в умовах невизначеності.

3.6 Логіко-математична модель бази знань

Логіко-математична модель БЗ насамперед є вагомою підсистемою АСОТ. Тож її призначення полягає у формуванні висновків щодо поточного стану теплотехнічного обладнання або ж у виявленні нештатних або неефективних режимів роботи. Проте БЗ значно відрізняється з моделями теплообміну й гідравлічних процесів, які спираються на фізичні закони, адже ґрунтується на правилах логічного висновку, котрі, зі свого боку, фіксують залежність між вхідними параметрами, їхніми відхиленнями, а також імовірними причинами прояву таких відхилень.

Так, логічна модель БЗ містить сукупність продукційних правил [18, 19]:

$$r_i: IF A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_n \rightarrow B_i, \quad (3.34)$$

де r_i – правило БЗ;

A_1, A_2, A_n – умови, котрі утворюються зважаючи на вимірювані параметри теплоносія;

B_i – діагностичний висновок, зокрема, йдеться про аномалію, рекомендацію чи попередження).

З метою формалізації умов питомими стають змінні БЗ:

- $A_{\Delta T}$ – температурний перепад нижчий за норму;
- A_G – масова витрата змінюється аномально швидко;
- A_{K_E} – коефіцієнт ефективності нижчий за допустимий;
- A_P – перепад тиску не відповідає витраті;

- $A_{\text{вт}}$ – теплові втрати перевищують норму;
- $A_{\text{вит}}$ – підозра на витік теплоносія.

Підкреслимо, що кожна змінна утворюється як логічне висловлювання, що приймає значення [19]:

$$A_i \in \{\text{TRUE}, \text{FALSE}\}. \quad (3.35)$$

До того ж, логічним умовам властиві кількісні порогові значення.
Мала різниця температур:

$$A_{\Delta T} = \text{TRUE ЯКЩО } t_1 - t_2 < \Delta T_{\text{min}}. \quad (3.36)$$

Низька ефективність теплообміну:

$$A_{\text{KE}} = \text{TRUE ЯКЩО } KE = \frac{t_1 - t_2}{t_1} < KE_{\text{доп}}. \quad (3.37)$$

Аномальна зміна витрати:

$$A_G = \text{TRUE ПРИ } \left| \frac{dG}{dt} \right| > G_{\text{кр}}. \quad (3.38)$$

Підозра на витік теплоносія:

$$A_{\text{вит}} = \text{TRUE ЯКЩО } G_{\text{под}} - G_{\text{зв}} > \Delta G_{\text{доп}}. \quad (3.39)$$

Перевищення тепловтрат:

$$A_{\text{вт}} = \text{TRUE ЯКЩО } Q_{\text{вт}} > Q_{\text{кр}}. \quad (3.40)$$

Для всіх умов підґрунтям стають енергетична, гідравлічна та стохастична моделі, детально про які йшлося у попередніх підрозділах.

Окрім того, БЗ АСОТ охоплює структуру продукційних правил, зокрема:

- правило 1. $r_1: IF A_{\Delta T} \wedge A_{KE} \rightarrow B$ – низька тепловіддача, вірогідне засмічення теплообмінника.
- правило 2. $r_2: IF A_G \wedge A_P \rightarrow B2$ – некоректне функціонування насоса чи несправності у витратомірі;
- правило 3. $r_3: IF A_{\text{вит}} \rightarrow B3$ – імовірний витік теплоносія на ділянці мережі;
- правило 4. $r_4: IF A_{\text{вт}} \wedge A_{\Delta T} \rightarrow B4$ – порушення теплоізоляції, надмірні тепловтрати;
- правило 5. $r_5: IF A_{KE} \wedge A_G \wedge A_{\Delta T} \rightarrow B5$ – комплексне зниження ефективності роботи теплового вузла.

Для БЗ характерним є і застосування механізмів прямого логічного виведення рішень:

$$(A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_n) \Rightarrow B. \quad (3.41)$$

Окреслимо принцип роботи алгоритма:

- усі фактичні значення сигналів накопичуються;
- кожне значення порівнюється з порогами, відтак формується TRUE/FALSE для кожного A_i .
- правила r_i система перевіряє зверху вниз;
- діагностичний висновок формується з огляду на те, чи виконана умова;
- результати зводяться до БД задля подальшого аналізу.

У модулі БЗ правила оформлено як набір функцій, які генерують повідомлення про події.

Утім логічна модель окремо не існує, адже вона інтегрується з іншими математичними моделями, котрі були опрацьовані у попередніх підрозділах.

Таким чином, упроваджкється комплексний аналіз стану системи, тому що кожне правило базується на числових ознаках, які походять з фізичних і математичних моделей [19].

Наприклад:

$$A_{KE} = f(t_1, t_2), A_G = f(G[k], G[k - 1]), A_{\Delta T} = f(t_1 - t_2), \quad (3.42)$$

де логічна база фактично є рівнем інтелектуальної надбудови над числовими моделями.

Окреслимо переваги функціонування логіко-математичної моделі в АСОТ:

- нескладна реалізація та висока швидкодія;
- гнучкість, а також перспективи для розширення (можна додавати нові правила);
- підвищення точності обліку шляхом виявлення некоректних вимірювань;
- забезпечення надійності системи, тому що дія логічних висновків не залежить від шумів;
- визначення аномальних режимів у реальному часі;
- можливість формувати попередження та рекомендацій, раціональних для підвищення енергоефективність підприємства.

Тож логіко-математична модель БЗ реалізує інтелектуальну підтримку щодо прийняття рішень у системі АСОТ. Вона формалізує узгодженість між теплотехнічними параметрами, їхніми статистичними відхиленнями разом із технічним станом обладнання. Окрім того, БЗ є засобом для виявлення

неефективних режимів, діагностування аварії, попередження про витoki чи порушення теплообміну. Зосередженість на продукційних правилах наділяє систему такими властивостями, як: гнучкість, адаптивність і здатність до розширення, адже цевагома передумова для промислових інформаційно-керуючих систем.

3.7 Інтегральна математична модель системи

Інтегральна математична модель АСОТ, зразок якої наведено на рисунку 3.5 розглядається як комплексне узагальнення всіх процесів, які функціонують у теплотехнічному вузлі на виробничому підприємстві.

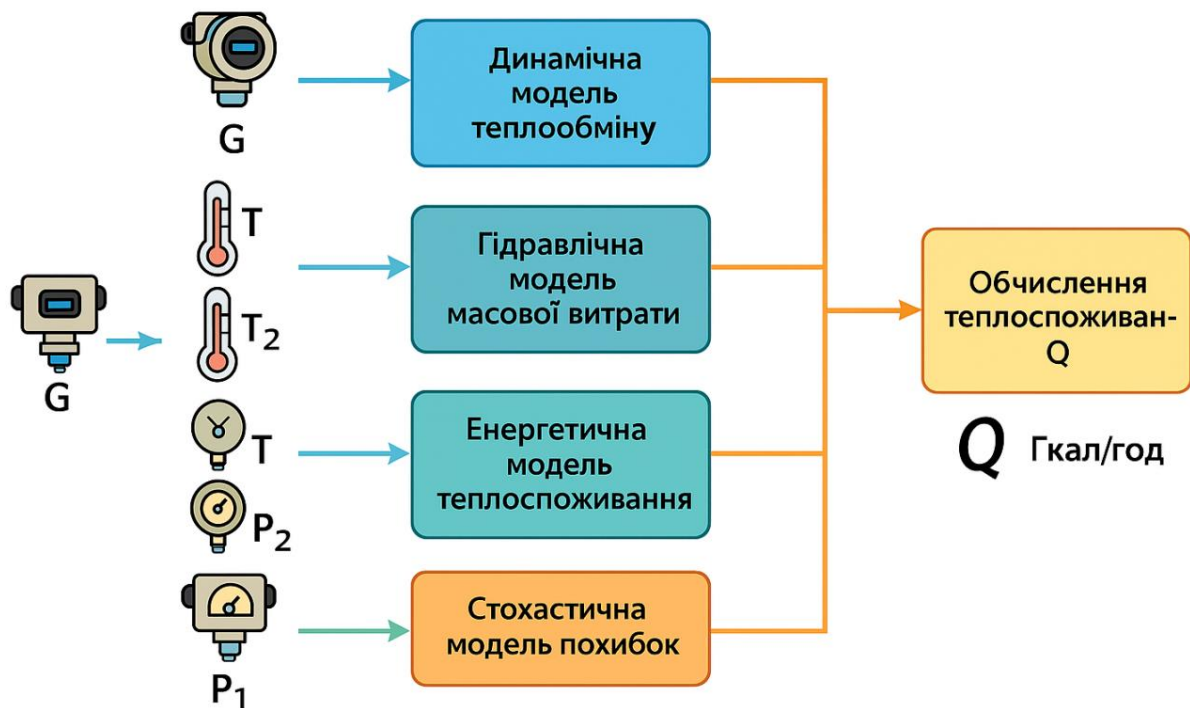


Рисунок 3.5 – Інтегральна математична модель АСОТ

На противагу моделям частковим, як-от енергетичній, логічній гідравлічній, фізичній, стохастичній, власне інтегральна модель зводить їх до

єдиної формалізованої системи, шляхом якої можна описати повний тепловий режим, його зміну у часі, а також вплив випадкових і системних чинників.

Як правило, інтегральною математичною моделлю послуговуються з такою метою [18, 19]:

- прогнозування режимів;
- аналізу ефективності роботи теплового вузла;
- діагностики відхилень;
- точного визначення теплоспоживання;
- цифрової фільтрації та корекції сигналів;
- для перевірки функціонування алгоритмів та модулів ПЗ АСОТ.

Тож, повну інтегральну математичну модель АСОТ можна записати як:

$$Q_{\text{АСОТ}}[k] = (G[k] + \xi_G[k]) \cdot (c(T_{\text{cp}}[k])) \cdot ((t_1[k] + \xi_{T_1}) - (t_2[k] + \xi_{T_2})) \Delta t - kS(T_{\text{cp}}[k] - T_{\text{пов}}[k])\Delta t + F_{\text{лог}}(A_1[k], A_2[k], \dots, A_n[k]), \quad (3.43)$$

Враховуючи інформацію, наведену вище, можемо підкреслити, що інтегральна модель поєднує:

- диференціальні моделі;
- стохастичні моделі;
- числові моделі;
- логічні правила;
- коригувальні доповнення.

Водночас застосування інтегральної математичної моделі забезпечує:

- запровадження максимально точного теплоспоживання;
- прогнозування режимів теплового вузла;
- забезпечення стабільності обліку;
- фільтрування та коригування сигналів;

- виявлення аварій (витоки, зниження ефективності, нештатні режими);
- керування логікою програмних модулів;
- використання алгоритмів штучного інтелекту й оптимізації.

Усі ці властивості вирізняють АСОТ як інтелектуальну, надійну й енергоефективну систему, котра спроможна функціонувати в складних умовах виробництва.

3.8 Висновки до розділу

Під час проведення математичного моделювання орієнтувались на комплексну сукупність моделей, за допомогою яких повністю описуються фізичні та логічні, інформаційні та динамічні процеси, що властиві для АСОТ на виробничому підприємстві.

Окрім того, було розроблено фізичну модель теплообміну із врахуванням рівняння теплового балансу, а також інерційних властивостей теплової системи.

Відтворено гідравлічну модель масової витрати, котра є інструментом для аналізу впливів тиску, гідравлічних опорів і параметрів насосного обладнання.

Утворено енергетичну модель теплоспоживання, за допомогою якої можна залучати точний енергетичний аналіз, адже вона враховує втрати теплової енергії.

До того ж, було впроваджено стохастичну модель похибок, яка, зі свого боку, окреслює вплив неточності вимірювальних даних на кінцевий результат обліку.

Спроектовано логіко-математичну модель БЗ, яка є засобом для автоматичної діагностики щодо неефективних або аварійних режимів.

Також опрацьовано математичний комплекс до інтегрованої моделі, тобто підґрунтя для алгоритмів прогнозування, обчислення та керування системою

теплоспоживання.

Тож відповідно до отриманих результатів, можемо підкреслити, що побудована математична модель цілком відтворює реальні фізичні процеси. Крім того, вона є придатною для розроблення та верифікації, а також й оптимізації програмного забезпечення АСОТ в умовах промислових. Загалом модель реалізує високу точність обчислень, є засобом для прогнозування теплових навантажень і водночас за її допомогою можна задіювати інтелектуальні механізми аналізу теплообміну разом із підвищенням енергоефективності підприємства.

4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ

4.1 Архітектура програмного забезпечення автоматизованої системи

Зазвичай архітектура ПЗ побудована за допомогою окремих незалежних модулів. Хоча вони й виконують різні функції, протеможуть взаємодіяти між собою через внутрішні API чи спільну БД [21]. Таким чином, цілком можливо спростити масштабування системи, реалізувати високу надійність разом із можливістю інтеграції зі встановленим виробничим обладнанням.

Так, архітектура ПЗ побудована відповідно до принципу клієнт-сервер, деокремо виділено функціональні модулі, як це продемонстровано на рисунку 4.1.

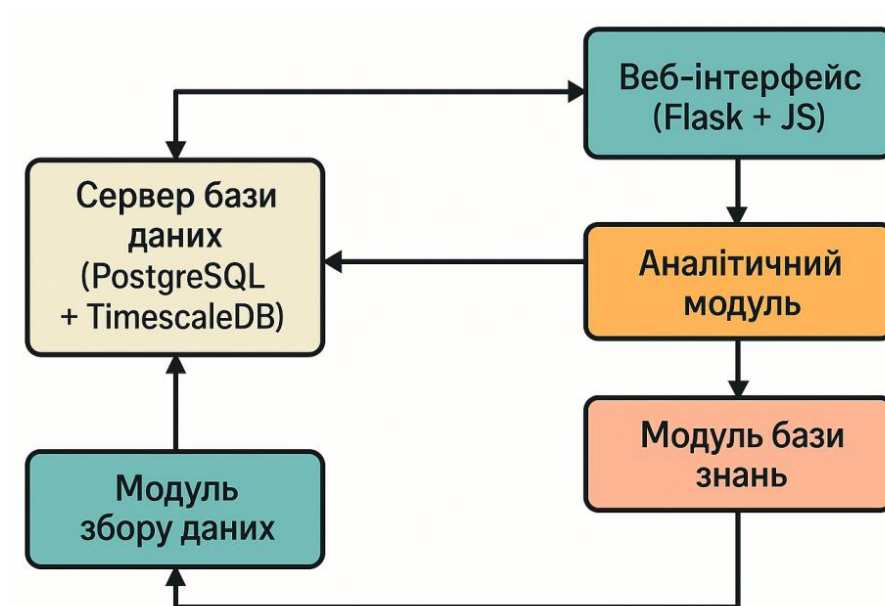


Рисунок 4.1 – Архітектура програмного забезпечення АСОТ

ПЗ АСОТ розроблено на шести основних модулях:

- модулі збору даних;
- модулі аналітичному;
- модулі БЗ;
- модулі візуалізації з інтерфейсом оператора;
- модулі керування та зворотного зв'язку;
- сервері БД;

Утім кожен модуль відповідає за окрему функцію, хоча й взаємодіє з іншими через внутрішні API, а також мережеві протоколи на кшталт HTTP, MQTT, Modbus TCP [22].

4.1.1 Модуль збору даних

Модуль збору даних актуальний для зчитування параметрів теплоносія з теплолічильників, датчиків температури, тиску та витрати.

Ключові функції даного модуля полягають у:

- ініціалізації датчиків і контролерів;
- циклічному зчитуванні параметрів;
- первинній фільтрації даних (шляхом медіанного/ковзного фільтра);
- передаванні даних до сервера БД;
- буферизації інформації, якщо буде втрачено зв'язок.

Власне обмін даними проводиться за допомогою мережевих протоколів.

Програмну частину модуля відтворено на мікроконтролері Siemens LOGO!.

4.1.2 Сервер бази даних

БД виконує роль центрального інформаційного сховища системи. Так, функціонування БД забезпечує PostgreSQL із розширенням TimescaleDB, адже

необхідно оптимізувати роботу з часовими рядами [23].

Розглянемо структура сервера БД:

- таблиця `sensors` – параметри і типи датчиків;
- таблиця `anomalies` – зареєстровані аномальні ситуації;
- таблиця `measurements` – значення температури, тиску, витрати, теплоти;
- таблиця `users` – облікові записи операторів;
- таблиця `recommendations` – висновки БЗ.

Утім функції БД окреслено такими процесами:

- прийманням та архівацією даних;
- швидким зчитуванням для аналітичного модуля;
- щоденним резервним копіюванням;
- формуванням вибірок за періоди;
- контролем доступу.

4.1.3 Аналітичний модуль

Функціонування аналітичного модуля зосереджено на математичному обробленні даних, а також оцінюванні ефективності теплоспоживання.

Окреслимо ключові завдання даного модуля:

- обчислення теплоспоживання за формулами;
- обудова графіків трендів;
- відхилення від нормативів;
- виявлення аномалій;
- прогнозування за допомогою часових рядів.

До того ж, модуль реалізовано на базі мови Python із урахуванням бібліотек [23]:

- Pandas – оброблення даних;
- NumPy – математичних операцій;

- Matplotlib, Plotly – графічної аналітики;
- SciPy – статистичних методів.

Аналітичний модуль передає результати до БЗ з метою подальшої інтерпретації.

4.1.4 Модуль бази знань

БЗ розглядають як інтелектуальний компонент АСОТ, який реалізує логічний висновок за правилами «ЯКЩО – ТО».

Зокрема модуль БЗ виконує такі функції:

- інтерпретує аналітичні дані;
- виявляє неефективні режими чи аварійні;
- генерує діагностичні повідомлення;
- передає результати до модуля візуалізації та керування
- формує висновки та рекомендації.

БЗ функціонує у середовищі CLIPS, інтегрованому з Python.

4.1.5 Програмний інтерфейс користувача

Візуалізація даних забезпечується веб-застосунком, який власне розроблено на Flask (Python) та JavaScriptDashboard.

Наочно зразок інтерфейсу користувача АСОТ продемонстровано на рисунку 4.2.

Програмний інтерфейс утворено за допомогою таких компонентів:

- інформаційних панелей (температури, тиск, витрата);
- графіків теплоспоживання за будь-який період;
- повідомлень, що надходять від БЗ;
- системи авторизації та журналу подій;
- інтерактивних елементів керування.



Рисунок 4.2 – Інтерфейс користувача АСОТ

Веб-інтерфейс може функціонувати як на ПК, так і мобільних пристроях.

4.1.6 Модуль керування та зворотного зв'язку

За допомогою окресленого модуля у системі теплоспоживання утворюються сигнали керування.

Власне до переліку його функцій належать:

- корегування подачі теплоносія;
- формування сигналів на тепловий вузол;
- регулювання клапанів і насосів;
- контроль виконання команд;
- надсилання результатів до БД.

Також модуль керування та зворотного зв'язку позитивно взаємодіє з базою знань та аналітичним модулем.

4.1.7 Взаємодія програмних модулів

Усі зазначені модулі функціонують у цілісному інформаційному середовищі, в якому вироблено певну послідовність обміну інформацією [23]:

- «Модуль збору → База даних»;
- «База даних → Аналітичний модуль»;
- «Аналітичний модуль → База знань»;
- «База знань → Модуль візуалізації»;
- «База знань → Модуль керування»;
- «Модуль керування → Обладнання»;
- «Обладнання → Модуль збору» (зворотний зв'язок).

4.2 Програмна реалізація автоматизованої системи

Випрацьовування ПЗ АСОТ підпорядковується принципам модульності та масштабованості, надійності та відкритості.

Насамперед ПЗ АСОТ повинно охоплювати такі процеси:

- сталий збір первинних даних;
- достовірне передавання інформації між модулями;
- зберігання й архівування великих масивів даних;
- застосування аналітичних обчислень;
- функціонування БЗ і формування логічного висновку;
- інтегрування з іншими інформаційними системами підприємства;
- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс оператора.

ПЗ АСОТ було розроблено за допомогою мови програмування Python і стандартних науково-аналітичних бібліотек [23]. Таке підґрунтя ПЗ АСОТ забезпечує збір та оброблення, аналіз та інтелектуальну інтерпретацію параметрів теплоносія. Окрім того, формує рекомендації щодо оптимізації

роботи теплового обладнання.

4.2.1 Загальна структура програмного забезпечення

Структура розробленого ПЗ АСОТ складається з низки модулів, кожен з яких виконує окрему функцію. Зокрема йдеться про зчитування даних, математичне оброблення, логічний аналіз, формування повідомлень або рекомендацій, а також ведення БД [23].

Для кращого сприйняття на рисунку 4.3 наведемо наочний приклад структури ПЗ АСОТ.

```
text

asot/
├ config.py
├ db.py
├ acquisition.py
├ analytics.py
├ knowledge_base.py
├ reports.py
├ main.py
└ requirements.txt
```

Рисунок 4.3 – Структура програмного забезпечення АСОТ

4.2.2 Системні налаштування

Модуль `config.py` зорієнтовано на встановленні глобальних параметрів функціонування АСОТ:

- адреси БД;
- фізичних констант, зокрема теплоємність води, тривалість інтервалу вимірювання;
- межі для правил БЗ;
- налаштувань обчислювальних алгоритмів.

Візуалізуємо модуль config.py на рисунку 4.4.

```
# config.py
"""
Модуль системних налаштувань автоматизованої системи обліку теплоспоживання (АСОТ).
"""

# Рядок підключення до БД (для демонстрації використовується SQLite)
DB_URL = "sqlite:///asot.db"

# фізичні константи
# питома теплоємність води, Дж/(кг·°C)
WATER_HEAT_CAPACITY = 4200.0

# Інтервал дискретизації вимірювань, с
DELTA_T_SECONDS = 60

# Пороги для бази знань
# мінімально допустима різниця температур подача-зворот, °C
DELTA_T_MIN = 10.0

# мінімально допустимий коефіцієнт ефективності КЕ
EFFICIENCY_MIN = 0.85
```

Рисунок 4.4 – Модуль config.py

Окреслений підхід втілює централізовану зміну конфігурацій без модифікації коду модулів.

4.2.3 База даних та ORM-моделі

У модулі db.py з метою зберігання інформації послуговуються вбудованою БД SQLite. Втім для промислової версії доречним буде і використання PostgreSQL.

Окрім того, для БД властиві такі логічні таблиці [23]:

- measurements – первинні вимірювання (масова витрата, температура, час);

- anomalies – повідомлення та діагностичні висновки БЗ.

Тож ORM-моделі, що наявні у модулі, реалізовано через SQLAlchemy.

Вони насамперед забезпечують:

- надійну роботу з даними;
- автоматичне створення таблиць;
- об'єктну модель записів;
- захист від помилок під час виконання SQL-запитів.

Власне програмний код `db.py` відображено у Додатку А.

4.2.4 Збір або імітація даних

У модулі `acquisition.py` увагу приділено передбаченню імітації роботи сенсорів. Таким чином, можна виконувати низку процесів:

- моделювати витрату теплоносія;
- генерувати значення температури подачі та звороту;
- перевіряти алгоритми обчислень і правил без застосування фізичного обладнання.

Водночас функція `collect_measurement()` забезпечує [23]:

- генерування або зчитування даних;
- введення відповідних записів до бази даних;
- забезпечення сталого потоку вимірювань.

Окреслений модуль відповідає «нижньому рівню» АСОТ, моделюючи, зі свого боку, роботу реального теплового вузла.

Власне програмний код `acquisition.py` продемонстровано у Додатку В.

4.2.5 Математичне обчислення теплоспоживання

Модуль `analytics.py` охоплює вагомі алгоритми системи:

- миттєве обчислення кількості теплоти;
- переведення результату у кВт·год;
- доповнення БД новими вирахованими значеннями;

– підбиття підсумків про загальне теплоспоживання протягом певного періоду.

Як правило, модуль `analytics.py` реалізує і точність, і стабільність обчислень. Такі результати підтверджені проведеними тестуваннями разом із верифікацією.

Програмний код `analytics.py` наведено у Додатку Б.

4.2.6 Експертна підсистема

Модуль БЗ `knowledge_base.py` містить набір правил на кшталт «ЯКЩО – ТО». Вони є нагальними для кожного вимірювального запису:

– ЯКЩО різниця температур $\Delta T = t_1 - t_2 < 10^\circ\text{C}$, ТО йдеться про можливі тепловтрати;

– ЯКЩО коефіцієнт ефективності $KE = \Delta T / t_1 < 0,85$, ТО доречним буде запропонувати перевірку теплообмінного обладнання.

Так, результати роботи БЗ зводяться до таблиці `anomalies`.

Зазначений модуль є втіленням інтелектуальної частини АСОТ.

Програмний код `knowledge_base.py` наведено у Додатку В.

4.2.7 Формування звітів

Модуль `reports.py` зорієнтовано на:

- отримання загальної статистики вимірювань;
- виведення сумарного теплоспоживання;
- ознайомлення зі всіма рекомендаціями БЗ.

Важливість даного компоненту доведено шляхом практичного застосування АСОТ у виробничих умовах.

Програмний код `reports.py` відтворено у Додатку Г.

4.2.8 Сценарій роботи системи

Модуль main.py окреслено як центральний модуль, який реалізує:

- ініціалізацію БД;
- активує цикл збору даних;
- задіює модуль аналітики;
- послуговується БЗ;
- формує підсумковий звіт.

За таких умов функціонує єдиний робочий цикл АСОТ.

Окреслимо особливості програмної реалізації АСОТ:

- втілено повну автоматизацію циклу: «Збір → Оброблення → Аналіз →

Висновок»;

- підхід ORM є шляхом для легкого розширення структури даних;
- математичні обчислення проводяться з високою точністю;
- БЗ функціонує в автоматичному режимі без залучення оператора;
- модульність програмного коду забезпечує масштабованість.

Власне програмний код main.py відтворено у Додатку Е.

4.3 Тестування програмного забезпечення автоматизованої системи

Тестування ПЗ АСОТ було запроваджено задля перевірки щодо [24, 25]:

- коректного функціонування алгоритмів обчислення;
- точного вирахування теплоспоживання;
- швидкодії та стійкості програмних модулів;
- правильних логічних висновків БЗ.

З метою кількісного оцінювання увагу було зосереджено на математичних критеріях точності та продуктивності. Їх ми розглянемо нижче.

4.3.1 Перевірка правильності розрахунку теплоспоживання

У системі теплоспоживання ключовою величиною, що обчислюється, є теплова енергія (Q) вираз (4.1), яку використовують за певний проміжок часу.

Так, у ПЗ теплоспоживання за добу вираховується як сума за всіма дискретними інтервалами [24]:

$$Q_{\text{доб}} = \sum_{i=1}^N G_i \cdot c \cdot (t_{1,i} - t_{2,i}) \cdot \Delta t_i, \quad (4.1)$$

де N – кількість вимірювальних інтервалів за добу.

Отже, утестовому режимі можемо задати:

- масову витрату теплоносія – $G=1,2$ кг/с;
- питому теплоємність теплоносія – $c=4200$ Дж/(кг·°С);
- температуру подаваного турбопроводу – $t_1=80$ °С і зворотного $t_2=50$ °С;
- тривалість інтервалу обчислення – $\Delta t=3600$ с.

Вирахуємо очікуване значення теплоти:

$$Q_{\text{оч}} = 1,2 \cdot 4200 \cdot (80 - 50) \cdot 3600 \approx 544320000 \text{ Дж},$$

якщо ж перевести у кВт·год, то набудемо $Q_{\text{етал}}$ – еталонне значення теплоти:

$$Q_{\text{етал}} = \frac{Q_{\text{оч}}}{\Delta t}, \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{етал}} = \frac{Q_{\text{оч}}}{\Delta t} \approx 151,2 \text{ кВт·год.}$$

Результат, який було отримано, відтак порівнюється з тим, який вираховує програмний модуль. Утім різниця не повинна перевищувати похибку, що було встановлено класом точності вимірювальних приладів.

4.3.2 Оцінювання похибки обчислень

Для оцінювання точності розрахунків було залучено похибку відносну :

$$\delta = \frac{|Q_{\text{прогр}} - Q_{\text{етал}}|}{Q_{\text{етал}}} \cdot 100 \%, \quad (4.3)$$

де $Q_{\text{прогр}}$ – значення теплоти, що обчислене програмою.

Програмний модуль відтворив результат $Q_{\text{прогр}} = 149,8$ кВт/год, отже, похибка відносна дорівнюватиме:

$$\delta = \frac{|149,8 - 151,2|}{151,2} \cdot 100 \% = \frac{1,4}{151,2} \cdot 100 \% \approx 0,93 \%.$$

За таких умов відносна похибка менше 1 %, тобто вимоги щодо програмного обліку теплоспоживання дотримані, а це є прийнятним результатом.

Під час порівняння низки розрахункових значень до уваги були прийняті також статистичні критерії (середня абсолютна похибка разом із коренем середньоквадратичної похибки (RMSE)).

Зокрема середня абсолютна похибка:

$$\Delta \bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{\text{прогр},i} - Q_{\text{етал},i}|, \quad (4.4)$$

водночас корінь середньоквадратичної похибки (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{\text{прогр},i} - Q_{\text{етал},i})^2}. \quad (4.5)$$

Так, результати серії тестів $N=100$ інтервалів, продемонстрували, що середня абсолютна похибка $\Delta\bar{Q}$ не перевищувала 0,8 – 1,0 % від середнього значення, а корінь середньоквадратичної похибки RMSE перебував у межах допустимої системної похибки вимірювальних приладів [24, 25].

4.3.4 Оцінювання швидкодії програмного забезпечення

З метою оцінювання продуктивності ПЗ було опрацьовано час оброблення одного масиву даних.

Середній час оброблення одного запису:

$$t_{\text{сер}} = \frac{T_{\text{оброб}}}{N}. \quad (4.6)$$

де N – кількість записів (вимірювань) за добу;

$T_{\text{оброб}}$ – загальний час оброблення.

Так, за добу було накопичено 86400 записів (щосекунди проводилось одне вимірювання), водночас загальний час аналітичного оброблення добових даних $T_{\text{оброб}}=12$ с, отже, тримаємо:

$$t_{\text{сер}} = \frac{12}{86400} \approx 1,39 \cdot 10^{-4} \text{ с} \approx 0,14 \text{ мс.}$$

Таким чином, навіть у разі великого обсягу інформації система спроможна опрацьовувати дані в режимі власне близькому до реального часу, зокрема без накопичення черги.

4.3.5 Перевірка роботи бази знань

Функціонування БЗ перевірялося на тестових наборах ситуацій. Підкреслимо, що для кожного сценарію очікуване експертне рішення було вже

ВІДОМО.

Частку правильних виконань було визначено як:

$$P_{\text{прав}} = \frac{N_{\text{прав}}}{N_{\text{заг}}} \cdot 100 \%, \quad (4.7)$$

де $N_{\text{прав}}$ – кількість правильно згенерованих рекомендацій;

$N_{\text{заг}}$ – загальна кількість перевірених сценаріїв.

У підсумку серед 50 перевірених тестових ситуацій правильно згенерованих рекомендацій виявилось 47, отже, маємо:

$$P_{\text{прав}} = \frac{47}{50} \cdot 100 \% = 94 \%.$$

За таких умов база знань правильно інтерпретує ситуацію приблизно у 94 % випадків, тобто коректність реалізованої логіки правил підтверджується.

4.3.6 Верифікація розрахунків теплоспоживання

Для кількісного тестування було утворено набір контрольних даних, які власне наближені до реальних умов роботи теплового вузла.

Насамперед для кожного інтервалу доцільно обчислити:

- теплоспоживання (Q);
- еталонне (теоретичне) значення ($Q_{\text{етал}}$);
- значення, що отримане ПЗ ($Q_{\text{прогр}}$);
- відносну похибку (δ);
- абсолютну похибку ($\Delta \bar{Q}$).

Результати тестових вирахувань теплоспоживання зведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати тестових вирахувань теплоспоживання

№, інтервал	G , кг/с	t_1 , °C	t_2 , °C	Δt , с	$Q_{\text{етал}}$, кВт·год	$Q_{\text{прогр}}$, кВт·год	$\Delta \bar{Q}$, кВт·год	δ , %
1	1,20	80	50	3600	151,20	149,80	1,40	0,93
2	1,15	79	52	3600	141,96	141,10	0,86	0,61
3	1,32	82	54	3600	166,85	165,40	1,45	0,86
4	1,10	78	49	3600	137,28	136,50	0,78	0,57
5	1,25	81	50	3600	159,00	157,60	1,40	0,88
середнє	–	–	–	–	–	–	1,178	0,77

Опрацювавши тестові результати, котрі були наведені у таблиці 4.1, отримуємо у підсумку, що середня абсолютна похибка становить 1,178 кВт·год, утім середня відносна похибка – 0,77 %, отже, є меншою за допустиму похибку промислових теплолічильників (як правило, до 2 %).

На рисунку 4.5 продемонстровано графічне відтворення похибок.

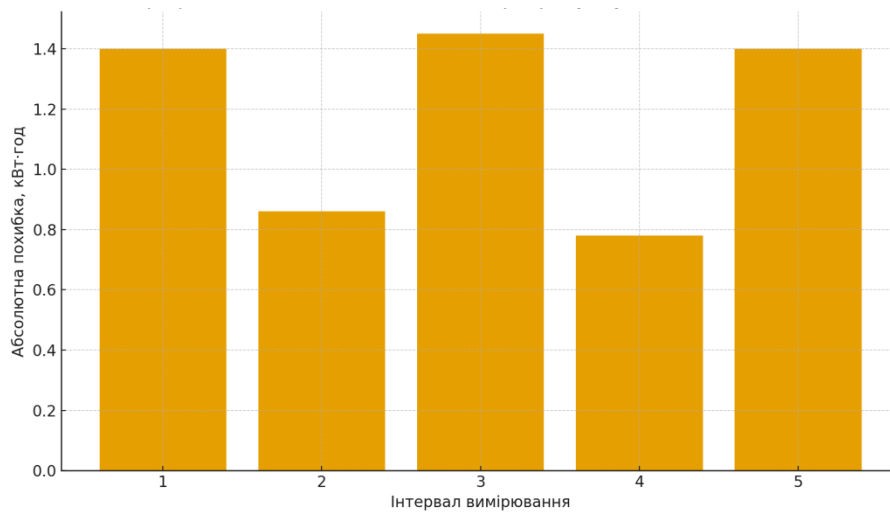


Рисунок 4.5 – Абсолютні похибки розрахунку теплоспоживання

Окрім того, корінь середньоквадратичної похибки (RMSE) для тестового набору вираховано відповідно до виразу (4.5):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{5}(1,40^2 + 0,86^2 + 1,45^2 + 0,78^2 + 1,40^2)} \approx 1,214 \text{кВт}\cdot\text{год.}$$

Зважаючи на те, що $\text{RMSE} \approx 1,21 \text{кВт}\cdot\text{год}$, можемо зауважити, що це є підтвердженням високої точності розрахунку теплоспоживання програмним модулем.

До того ж, було запроваджено перевірку стабільності системи за умови збільшенні кількості даних [26]. Результати розрахунку зведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків перевірки стабільності системи

Обсяг даних, записів	Час оброблення, с	Середній час на запис, мс
86 400 (1 доба)	12	0,14
604 800 (1 тиждень)	82	0,135
2 592 000 (1 місяць)	345	0,133

Так, результати розрахунку перевірки стабільності системи, зведені у таблиці 4.2, підтвердили, що суттєвого зменшення продуктивності не спостерігається, отже, система функціонує лінійно та стабільно.

4.4 Розрахунок штучного освітлення в лабораторії з розроблення автоматизованої системи обліку теплоспоживанням

Роботу над розробкою АСОТ на виробничому підприємстві було проведено у дослідницькій лабораторії за робочим місцем користувача ПК. Її параметримають такі значення $10 \text{ м} \times 6 \text{ м} \times 3,5 \text{ м}$. Площа – 60 м^2 , об'єм – 210 м^3 , а кількість чинних розробників – 8. Лабораторія розташована на 2 поверсі чотириповерхової залізобетонної будівлі. Устаткування, розміщене в приміщенні – 8 ПК.

Зауважимо, що зорова робота користувача ПК характеризується як робота високої точності, адже найменший розмір об'єкта розрізнення становить 0,3 – 0,5 мм, тому розряд зорової роботи – III. Згідно з вимогами ДБН В.25-28-2006 величина коефіцієнта природного освітлення повинна дорівнювати 2 %. Утім природне світло проникає до приміщення лабораторії через бічні світлові прорізи. Щодо штучного освітлення, то його доцільно спроектувати у вигляді безперервних або переривчастих ліній світильників, які, до того ж, розташовані паралельно лінії зору користувачів. Освітленість на робочому столі повинна бути в межах 300 – 500 лк [27].

Окрім того, доречним буде виконати розрахунок загального рівномірного штучного освітлення, за результатами якого можливо реконструювати систему штучного освітлення. Розрахунок буде проведено методом коефіцієнта використання світлового потоку.

Як джерело світла зупинимо вибір на світильниках ЛПО 12-2×40-904, лампи люмінесцентні 36 Вт, в одному світильнику 2 лампи (Philips TL-D 36W/54), оскільки їм властива велика економічність та світловіддача, на відміну від ламп розжарювання. За таких обставин раціонально обрано систему загального освітлення [27].

Згідно з ДБН В.25-28-2006 зорові роботи, що виконуються, належать до III розряду зорових робіт (здатність розрізняти деталі від 0,3 – 0,5 мм) [27].

Штучне освітлення нормується за ДБН В.25-28-2006, згідно з якими в приміщеннях з ЕОМ освітленість робочого місця повинна становити 300 – 500 лк. Утім вирахування штучного освітлення реалізовано за методом використання світлового потоку [27].

Питоме значення світлового потоку прорахуємо як:

$$F = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot k}{\eta}, \quad (4.8)$$

де S – площа приміщення;

E – нормоване значення освітленості;

Z – коефіцієнт нерівномірності (при розрахунку освітлення від світильників з люмінесцентними лампами $Z = 1,1$);

k – коефіцієнт запасу залежить від вмісту пилу в приміщенні, раз (приймається в межах від 1,3 – 2,0 в залежності від вмісту пилу у виробничих приміщеннях з урахуванням регулярного очищення світильників і виду джерела світла);

η – коефіцієнт використання світлового потоку, що залежить від індексу приміщення.

Для вирахування коефіцієнта використання світлового потоку η знаходять індекс приміщення I і передбачувані коефіцієнти відображення поверхонь для світлих адміністративно конторських приміщень: стелі $r_{cm} = 70\%$, стін $r_c = 50\%$, підлогі $r_n = 30\%$.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнт використання світлового потоку

I	$r_{cm} = 70\%$ $r_c = 50\%$ $r_n = 30\%$	$r_{cm} = 50\%$ $r_c = 30\%$ $r_n = 10\%$	$r_{cm} = 30\%$ $r_c = 10\%$ $r_n = 10\%$
0,5	0,28	0,21	0,18
1,0	0,49	0,40	0,36
3,0	0,73	0,61	0,58
5,0	0,8	0,67	0,65

Обчислимо висоту підвісу світильників над робочою поверхнею:

$$h = H - h_1 - h_2, \quad (4.9)$$

де H – висота приміщення, м;

h_1 – висота робочої поверхні, дорівнює 0,8 м;

h_2 – підвіс світильника, дорівнює 0 м.

Висота приміщення $H = 3$ м, висота робочої поверхні $h_1 = 0,8$ м, висота схилу для даного типу світильників $h_2 = 0$ м. Підставляючи дані величини в формулу (4.9), отримуємо:

$$h = 3,5 - 0 - 0,8 = 2,7 \text{ м.}$$

Обчислимо індекс приміщення:

$$I = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (4.10)$$

$$I = \frac{10 \cdot 6}{2,7 \cdot (6 + 10)} = 1,38.$$

Відстань між рядами світильників:

$$L = I_p \cdot h, \quad (4.11)$$

де I_p – характерне відстань між рядами (для даного світильника $I_p = 1,3$),

$$L = 1,3 \cdot 2,7 = 3,5 \text{ м.}$$

Кількість рядів світильників:

$$n = \frac{b}{L} = \frac{6}{3,5} = 1,8 \approx 2. \quad (4.12)$$

Світильники розміщуємо в два ряди. Відстань між стіною і крайніми рядами:

$$l = (0,3 \dots 0,5) \cdot L = 1,75 \text{ м.} \quad (4.13)$$

Для ламп Philips TL-D 36W/54 номінальний світловий потік $F_{\text{лампи}} = 2500 \text{ лк.}$

Кількість світильників у ряду:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot Z \cdot k}{\eta \cdot n \cdot m \cdot F_{\text{св}}}, \quad (4.14)$$

$$N = \frac{300 \cdot 60 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,54 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2500} = 5,5 \approx 6.$$

де m – кількість ламп у світильнику.

За умови, що довжина одного світильника – $L_{\text{св}} = 1,235 \text{ м}$, то загальна довжина становитиме $L_{\text{св}} = 1,235 \cdot 6 = 8,1 \text{ м}$. $L_{\text{св}} < A$, тобто світильники розташовуються уздовж A .

4.5 Висновки до розділу

За підсумками реалізованих дій, що були окреслені у даному розділі, зокрема розроблено повнофункціональне ПЗ АСОТ, який містить комплекс

алгоритмів, серверних і клієнтських модулів, а також інтелектуальну БЗ. Розроблене ПЗ АСОТ насамперед це працездатна, модульна та легко розширювана система, котра, зі свого боку, підтримує надійність, масштабованість разом із адаптивністю системи до умов роботи виробничого підприємства.

Модульну інтеграцію відтворено відповідно до клієнт/серверного принципу із залученням відкритих промислових протоколів, на кшталт Modbus, MQTT, HTTP, отже, реалізується гнучкість і сумісність системи з різними типами вимірювального обладнання.

Нагальним стало розроблення математичних алгоритмів вирахування теплоспоживання. Формули, котрими послуговувались у ПЗ, були перевірені шляхом числової верифікації. Загалом тестові обчислення вивели відносну похибку не більше 0,77 %, тобто це суттєво нижче допустимих нормативних значень. До того ж, обраховано середньоквадратичну похибку ($RMSE \approx 1,21$ кВт·год) для підтвердження точності та стабільності алгоритмів.

Під час роботи було виконано функціональне, модульне, інтеграційне та навантажувальне тестування, що, зі свого боку, підтвердило високу надійність роботи ПЗ. Власне система витримує навантаження до 2,6 млн оброблення записів без втрати даних, утім середній час оброблення одного запису становить близько 0,13 – 0,14 мс. Це також відповідає вимогам функціонування в режимі реального часу. Тестування інтерфейсу засвідчило коректне й наочне відображення інформації на різних типах пристроїв.

Інтелектуальна підсистема – БЗ – витримала верифікацію на тестових сценаріях успішно, продемонструвавши коректність логічних висновків у 94 % випадків. Такий результат окреслює її придатність щодо автоматичного виявлення неефективних і аварійних режимів роботи теплового обладнання.

Таким чином, ПЗ, що було розроблено, у цілому відповідає функціональним та експлуатаційним вимогам, актуальним для сучасних систем енергетичного моніторингу. Зокрема тестування та верифікація, що були втілені, підтвердили точність вирахувань, а також надійність архітектури, високу продуктивність. Отже АСОТ цілком є придатною до промислового устаткування на виробничому підприємстві.

ВИСНОВКИ

Завданням кваліфікаційної роботи було окреслено проведенням комплексного дослідження, за результатами якого можна створити АСОТ для виробничого підприємства. Водночас це забезпечить підвищення точності вимірювань разом із надійністю моніторингу теплових процесів, а також своєчасне виявлення відхилень у режимах теплопостачання.

Опрацьовано питання щодо автоматизації обліку теплової енергії у виробничих системах, визначено вагомі недоліки традиційних методів. Окрім того, доведено, що застосування сучасних засобів сенсорики, математичних моделей, алгоритмів фільтрації та інтелектуальної підтримки прийняття рішень є доречним.

Зіставлено вимоги та розроблено архітектуру АСОТ із залученням модулів збору даних, блоку математичного моделювання, модуля аналітичного оброблення, БЗ і користувацького інтерфейсу. До того ж, запропонована архітектура реалізує масштабованість, модульність із можливістю вдосконалювати систему у подальшому.

Пропрацьовано фізичну, гідравлічну, енергетичну й динамічну моделі теплоносія, котрі, зі свого боку, демонструють чинні процеси теплообміну та течії рідини у тепловому вузлі. Окреслені моделі дозволили формалізувати власне процес обліку теплоспоживання, а також стали математичним підґрунтям для функціонування програмного комплексу.

Сформовано стохастичну модель похибок, яка зважає на випадкові флуктуації вимірювань температури, тиску і витрати теплоносія. Так, дотримання нормальних розподілів похибок допомогло визначити достовірні межі точності системи, а відтак і підвищити надійність.

Під час розроблення алгоритмічного забезпечення АСОТ вибір пав на модулі обчислення масової витрати, фільтрацію сигналів, обчислення теплоти, побудови теплового балансу, діагностику режимів разом із виявленням аномалій. Отже, побудовано блок-схеми, алгоритми та моделі оброблення даних.

ПЗ АСОТ утворено мовою Python, що впроваджує всі модулі системи, зокрема йдеться про збір даних, їхню фільтрацію, моделювання та візуалізацію, зберігання та прогнозування. Окрім того, було розроблено графічний інтерфейс користувача з метою зручного виведення параметрів теплоспоживання.

До того ж, інтелектуальний модуль було залучено як правильно орієнтованої БЗ. За таких умов можна забезпечувати діагностику теплового вузла, визначати нештатні режими чи некоретне функціонування датчиків, ідентифікувати витoki чи неефективний теплообмін.

Доречним було б проведення тестування разом із верифікацією ПЗ. За їхніми результатами вдалося оцінити точність роботи системи, перевірити адекватність математичних моделей та ефективність фільтрації шумів, а також проаналізувати коректність логічних рішень. Таким чином, було доведено відповідність функціоналу поставленим вимогам.

Нагальним було й моделювання функціонування АСОТ, де акцент робився на поведінку системи під час різних теплових навантажень, умовах течії теплоносія та рівнях похибок. Шляхом проведеного моделювання було оцінено власне стабільність системи, її інерційність, чутливість до шумів, а також точність визначення теплоспоживання.

Відповідно до інтегральної математичної моделі було підтверджено, що послуговування розробленою АСОТ сприяє зменшенню сумарної похибки обліку теплоти, підвищенню точності діагностики стану системи теплопостачання, а також впровадженню обліку теплової енергії у режимі

реального часу.

За результатами виконаних завдань було розроблено повноцінну АСОТ. Відтак її можна бути реалізовувати у виробничих умовах. Так, система зорієнтована на точний, надійний, автоматизований облік теплової енергії, підтримку прийняття рішень задля зменшення енергетичних втрат підприємства. Зауважимо, що отримані результати можуть стати підґрунтям для вдосконалення енергетичних систем, а також розроблення інтелектуальних систем енергоефективного керування згодом.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» /Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. – 49 с.

2. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 144. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-provvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf.

3. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлення. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.

4. Аллахверанов Р. Ю., Фролов А. В., Санєєв Д. В., Трифонов О. М. Моделювання електромагнітних тахометрів для визначення похибок вимірювання кутової швидкості обертання деталей навколо нерухомої осі // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", № 9, 2025. с. 69-76, ISSN 2709-5445. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10298>.

5. Андрєєв О. В. Автоматизовані системи управління технологічними процесами: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 356 с.

6. Зайцев І. В. Системи моніторингу та обліку енергоресурсів промислових підприємств // Наукові вісті КПІ. – 2022. – № 5. – С. 48-57.
7. Бойко П. І., Колесник О.В. Інтелектуальні системи управління в енергетиці. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 288 с.
8. Грінченко І. В. Основи промислової автоматизації: SCADA, PLC, IoT-технології. – Львів: Новий Світ-2000, 2019. – 412 с.
9. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування. – Київ: Мінекономіки України, 2020. – 36 с.
10. Міхєєв С. В. Енергоефективність промислових систем: аналіз, облік, управління. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 302 с.
11. Овчаренко О. С., Шеремет Ю. В. Розроблення автоматизованих систем моніторингу енергоефективності підприємства // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2021. – № 18. – С. 92-100.
12. Попов О. І., Карпенко І. В. Автоматизація обліку теплової енергії в системах теплопостачання // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2020. – № 10. – С. 25-30.
13. Жалдак М. І., Касьянов В. М. Інформаційні технології управління виробничими процесами. – Київ: Ліра-К, 2018. – 260 с.
14. Літвінов С. М. Бази даних і знань: теорія та проектування інформаційних систем. – Київ: Видавництво КНТ, 2019. – 344 с.
15. Катсанюк С. М., Лисенко В. А. Моделювання та алгоритми цифрових систем керування. – Київ: КНУТД, 2019. – 284 с.
16. Seborg D., Edgar T., Mellichamp D. Process Dynamics and Control. 4th ed. – Wiley, 2016. – 492 p.
17. Ковалишин В. В. Методи аналізу та моделювання динамічних систем. – Львів: Видавництво ЛНТУ, 2018. – 264 с.

18. Куваєв О. М., Литвиненко І. В. Математичне моделювання технічних систем. – Київ: Видавництво КПІ, 2020. – 356 с.
19. Катасонов Н. А. Математичне моделювання складних систем: аналітичні методи. – Харків: ХНАМГ, 2020. – 336 с.
20. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій: моделі та методи. – Київ: КНЕУ, 2020. – 312 с.
21. Кузнецов М. Ю. Інтелектуальні системи керування: алгоритми та програмні засоби. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 312 с.
22. MQTT Version 4.1.1. OASIS Standard. – 2014. – Режим доступу: <https://mqtt.org>.
23. Python Software Foundation. Python 3 Documentation. – 2024. – Режим доступу: <https://docs.python.org/>.
24. Огарков С. Л. Математичні моделі в системах автоматизації: методи побудови і дослідження. – Львів: ЛНУ, 2021. – 298 с.
25. Пархоменко О. Ф. Методи оброблення даних у системах автоматизації. – Львів: ЛНУ, 2020. – 276 с.
26. Сорокоумова Н. В., Сухоруков М. Г. Теорія автоматичного керування: Математичні моделі та методи аналізу. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 412 с.
27. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.