

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему:

**«Забезпечення ефективного електроспоживання в системах
комунального водопостачання»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи *ЕНМ-23М*

ОПП «Енергетичний менеджмент»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,

_____Владислав ТРЕТЯК

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____Катерина ПЕТРОВА

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор

Петро ПЛЕСКОВ
« 02 » 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Третяка Владислава Вадимовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Забезпечення ефективного електроспоживання в системах комунального водопостачання

Ensuring efficient power consumption in municipal water supply systems

2. Керівник роботи Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 17.12.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою кваліфікаційної роботи є підвищення енергоефективності в системі комунального водопостачання через комплексне врахування зовнішньосередовищних чинників та вдосконалення методологічних підходів до моніторингу електроспоживання на об'єктах водопостачальної інфраструктури. Досягнення поставленої мети було забезпечене вирішенням наступних завдань: 1) проведення поглибленого аналізу поточного стану енергоефективності в системах комунального водопостачання; 2) розробка інноваційного методологічного підходу, здатного враховувати циклічні трансформації процесу водопостачання; 3) проведення ґрунтового факторного аналізу змінних, що безпосередньо впливають на електроспоживання насосних станцій; 4) обґрунтування методу уніфікації базового рівня електроспоживання відносно визначальних змінних; 5) розробка процедури моніторингу, що охоплює ефективне планування електроспоживання, комплексний контроль та впровадження результатів у систему енергетичного менеджменту підприємства.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. Савеленко І.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	16.09.2024 р.	
2	Огляд проблем енергоефективності та оптимізації використання електроенергії в СКВ	30.09.2024 р.	
3	Методологія аналізу впливових факторів на електроенергетичний режим насосної інфраструктури та розробка діапазонів визначальних параметрів базового електроспоживання	14.10.2024 р.	
4	Моделювання базового рівня електроспоживання насосних станцій	28.10.2024 р.	
5	Адаптація функцій систем моніторингу енергоефективності електроспоживання насосних станцій до динамічних умов реального режиму водопостачання	11.11.2024 р.	
6	Висновки, список використаних джерел	25.11.2024 р.	
7	Оформлення додатків	02.12.2024 р.	
8	Оформлення презентаційної частини КР	05.12.2024 р.	

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника _____ Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____ Владислав ТРЕТЯК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 96 с., 26 рис., 16 табл., 31 джерело

Третяк В.В. Забезпечення ефективного електроспоживання в системах комунального водопостачання. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет; Кропивницький, 2024 р.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення енергоефективності в системі комунального водопостачання через комплексне врахування зовнішньосередовищних чинників та вдосконалення методологічних підходів до моніторингу електроспоживання на об'єктах водопостачальної інфраструктури.

У роботі проведено аналіз поточного стану енергоефективності в системах комунального водопостачання. Розроблено інноваційний методологічний підхід, здатний враховувати циклічні трансформації процесу водопостачання. Особливої уваги набуло вдосконалення процедури моніторингу ефективності електроспоживання інфраструктурних об'єктів з урахуванням динамічних змін зовнішнього середовища. Проведено ґрунтовний факторний аналіз змінних, що безпосередньо впливають на електроспоживання насосних станцій. Запропоновано впровадження систем моніторингу, що поєднують ефективне планування, комплексний контроль та впровадження результатів у систему енергетичного менеджменту підприємств водопровідно-каналізаційного господарства з урахуванням широкого спектру зовнішніх факторів впливу.

ЕФЕКТИВНЕ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ, СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОГО
МОНІТОРИНГУ, БАЗОВИЙ РІВЕНЬ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ, СИСТЕМА
КОМУНАЛЬНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

ABSTRACT

Qualification work: 96 p.; 26 fig.; 16 tables; 31 source

Tretiak V. V. Ensuring efficient power consumption in municipal water supply systems. - Manuscript.

Qualification thesis second (master's) level of higher education on speciality
141 "Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics"
professional program "Energy management". – Central Ukrainian National
Technical University; Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the qualification work is to improve energy efficiency in the municipal water supply system through comprehensive consideration of environmental factors and improvement of methodological approaches to electricity consumption monitoring at water supply infrastructure facilities.

The work analyzes the current state of energy efficiency in municipal water supply systems. An innovative methodological approach has been developed, capable of accounting for cyclical transformations of the water supply process. Special attention was given to improving the procedure for monitoring the electricity consumption efficiency of infrastructure facilities, taking into account dynamic environmental changes. A thorough factor analysis of variables directly affecting electricity consumption at pumping stations was conducted. The implementation of monitoring systems is proposed, combining effective planning, comprehensive control, and result integration into the energy management system of water and sewage enterprises, considering a wide range of external influencing factors.

EFFECTIVE ELECTRICITY CONSUMPTION, ENERGY MONITORING
SYSTEM, BASELINE ELECTRICITY CONSUMPTION, MUNICIPAL WATER
SUPPLY SYSTEM

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СКВ.....	13
1.1. Науковий аналіз системних аспектів енергоефективності в комунальному водопостачанні.....	13
1.2. Загальний огляд методів та стратегій підвищення енергоефективності об'єктів водопостачання.....	21
1.3. Огляд інструментів для забезпечення енергоефективності виробничих об'єктів.....	26
Висновки до розділу 1	33
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ВПЛИВОВИХ ФАКТОРІВ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИЙ РЕЖИМ НАСОСНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА РОЗРОБКА ДІАПАЗОНІВ ВИЗНАЧАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ БАЗОВОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ.....	35
2.1. Ідентифікація зовнішніх детермінант, що впливають на електроенергетичну ефективність	35
2.2. Характеристики добового графіка водоспоживання	42
2.3. Аналізування та групування графіків водоспоживання за кластерами.....	46
Висновки до розділу 2	52
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВОГО РІВНЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ.....	54
3.1. Аналіз факторів, що впливають на електроспоживання НС.....	54
3.2. Розробка моделей базового рівня електроспоживання із	

застосуванням методів самоорганізації	61
Висновки до розділу 3	68
РОЗДІЛ 4. АДАПТАЦІЯ ФУНКЦІЙ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ДО ДИНАМІЧНИХ УМОВ РЕАЛЬНОГО РЕЖИМУ ВОДОПОСТАЧАННЯ.....	69
4.1. Призначення та компоненти системи моніторингу та планування енергоспоживання	69
4.2. Результати аналізу енергоефективності електроспоживання насосної станції II підйому	77
Висновки до розділу 4	83
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	88
ДОДАТКИ.....	91
ДОДАТОК А. Охорона праці.....	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БРЕ	– базовий рівень енергоспоживання;
ВВ	– витрата води;
ГВВ	– графік водоспоживання;
ГЕН	– графік електричного навантаження;
ДРТ	– діаграма радарного типу;
ЕЕ	– електрична енергія;
ЕД	– електродвигун;
ІАД	– інтелектуальний аналіз даних;
ІКС	– інформаційно-керуюча система;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
КА	– кластерний аналіз;
МГУА	– метод групового урахування аргументів;
ММ	– математична модель;
ННА	– нерегульований насосний агрегат;
НА	– насосний агрегат;
НСВ	– насосна станція водопостачання;
НЛЧУ	– нечітко-логічне частотне управління;
СВ	– система водоподачі;
СЕМ	– системи енергоменеджменту;
СКВ	– систем комунального водопостачання;
РНА	– регульований насосний агрегат.

ВСТУП

Енергетична ефективність нині розглядається як ключовий стратегічний напрямок розвитку в Європейському Союзі. Проблематика раціонального використання енергетичних ресурсів є міждисциплінарною, охоплюючи широкий спектр галузей та технологічних процесів.

У контексті глобальних викликів сьогодення питання оптимізації енергоспоживання набуває особливої значущості. Це пов'язано з об'єктивними тенденціями обмеження традиційних енергоносіїв та постійним зростанням їхньої ринкової вартості. Стратегічні рекомендації провідних міжнародних інституцій, зокрема Міжнародного енергетичного агентства, концентруються на підвищенні рівня ефективності кінцевого споживання енергії, особливо в комунальному секторі.

Найбільш вразливими та перспективними для впровадження інноваційних енергозберігаючих технологій є підприємства систем комунального водопостачання (СКВ). Комплексне вирішення проблеми потребує системного підходу, який включає впровадження сучасних технологічних рішень, вдосконалення виробничих процесів, розвиток системи управління енергоресурсами та розробку дієвих механізмів виявлення прихованих резервів економії.

Об'єктивний аналіз, кількісне оцінювання та системний контроль ефективності енергоспоживання є фундаментальною умовою досягнення відчутних практичних результатів. Ключовим інструментом ефективного управління енергетичними ресурсами в комунальній сфері виступають системи енергоменеджменту (СЕМ). Їх впровадження дозволяє здійснювати поглиблений моніторинг та контроль за енергоспоживанням з урахуванням циклічних змін виробничих процесів.

Актуальним науково-практичним завданням сьогодення є розвиток комплексної системи моніторингу енергоефективності. Це багатогранний процес, що передбачає послідовне удосконалення існуючих методологічних

підходів, розробку інноваційних процедур аналізу, впровадження адаптивних механізмів планування електроспоживання з обов'язковим врахуванням впливу зовнішніх чинників на функціонування систем комунального водопостачання.

Такий системний підхід дозволить забезпечити ефективне управління енергетичними ресурсами та підвищити рівень енергоефективності в комунальній інфраструктурі. Основні переваги запропонованого методологічного підходу полягають у його комплексності, здатності адаптуватися до динамічних змін та потенціалі довгострокової оптимізації енергоспоживання на рівні окремих підприємств та галузі в цілому.

Мета роботи - підвищення енергоефективності в системі комунального водопостачання через комплексне врахування зовнішньосередовищних чинників та вдосконалення методологічних підходів до моніторингу електроспоживання на об'єктах водопостачальної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **ключові завдання**:

- проведення поглибленого аналізу поточного стану енергоефективності в системах комунального водопостачання. Дослідження охоплювало ґрунтовне вивчення визначальних факторів, що впливають на електроспоживання водогосподарських об'єктів, а також комплексне дослідження сучасних методологічних підходів до раціонального управління енергетичними ресурсами.

- розробка інноваційного методологічного підходу, здатного враховувати циклічні трансформації процесу водопостачання. Особливої уваги набуло вдосконалення процедури моніторингу ефективності електроспоживання інфраструктурних об'єктів з урахуванням динамічних змін зовнішнього середовища.

- визначення типових робочих меж технологічних параметрів водопостачання. Науковий пошук був спрямований на встановлення часових діапазонів для ідентифікації головних змінних базового рівня

електроспоживання з обов'язковим врахуванням циклічних, сезонних та соціальних детермінант.

- проведення ґрунтового факторного аналізу змінних, що безпосередньо впливають на електроспоживання насосних станцій. Науковий підхід концентрувався на встановленні кореляційних зв'язків між вхідними та вихідними параметрами, формуванні репрезентативної сукупності головних змінних базового рівня електроспоживання.

- обґрунтування методу уніфікації базового рівня електроспоживання відносно визначальних змінних. Дослідження передбачало розроблення багатфакторної математичної моделі, здатної адекватно реагувати на сезонні трансформації зовнішнього середовища та соціальні чинники.

- розробка інноваційної процедури моніторингу. Науковий підхід охоплював ефективне планування електроспоживання, комплексний контроль та впровадження результатів у систему енергетичного менеджменту підприємств водопровідно-каналізаційного господарства з урахуванням широкого спектру зовнішньосередовищних факторів.

Під **об'єктом дослідження** розуміємо процес моніторингу електроспоживання НСВ з урахуванням багатфакторних впливів зовнішнього середовища.

Предмет дослідження – методологічні та прикладні аспекти планування електроспоживання НСВ, розроблення дієвих механізмів контролю та підвищення ефективності енергетичного менеджменту.

Розроблена науково-методична процедура моніторингу електроспоживання створює унікальний інструментарій для фундаментального та багатовекторного аналізу результативності енергетичних витрат. Вона надає можливість комплексно діагностувати детермінанти виникнення відхилень від запланованих показників, здійснювати глибинну оцінку ефективності технологічних механізмів водопостачання.

Методологічний підхід забезпечує системне дослідження причинно-наслідкових зв'язків у процесах електроспоживання, що створює фундаментальне підґрунтя для прийняття стратегічних управлінських рішень. Особливістю запропонованої процедури є її здатність не лише діагностувати поточні проблеми, але й формулювати превентивні рекомендації щодо оптимізації технологічного процесу загалом та підвищення рівня енергоефективності інфраструктурних об'єктів водопостачання.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СКВ

1.1. Науковий аналіз системних аспектів енергоефективності в комунальному водопостачанні

СКВ є важливим елементом життєзабезпечення сучасного суспільства, які споживають значні обсяги енергії для забезпечення своєї роботи. У світлі глобальних викликів, пов'язаних із необхідністю економії енергоресурсів та мінімізації екологічного впливу, питання підвищення енергоефективності цих систем набуває першочергового значення.

Енергоефективність систем водопостачання визначається низкою факторів, серед яких можна виділити технічний стан обладнання, ефективність управління процесами, рівень автоматизації та облік реальних потреб споживачів. Недоліки в кожному з цих аспектів можуть призводити до значних втрат енергії та нераціонального її використання.

Однією з основних характеристик, яка дозволяє оцінити ефективність роботи водопостачальних систем, є коефіцієнт корисної дії (ККД) насосного обладнання. У багатьох комунальних підприємствах спостерігається застарілість технічних засобів, що, у свою чергу, впливає на показники енергоефективності. Старі насоси мають високі експлуатаційні витрати, оскільки їх споживання електроенергії не відповідає сучасним стандартам.

Ще одним вагомим аспектом є витрати води у процесі транспортування до кінцевого споживача. Протікання трубопроводів, несанкціоновані відбори води та інші подібні фактори безпосередньо впливають на загальний рівень ефективності системи. Енергетичні втрати, пов'язані з цими недоліками, підвищують вартість водопостачання для користувачів та створюють додаткове навантаження на електромережу.

Не менш важливо враховувати й організаційно-управлінські аспекти. Відсутність ефективних методів моніторингу та контролю за споживанням

енергії унеможлиблює своєчасне виявлення проблемних ділянок. Використання застарілих підходів до планування та обліку енергоресурсів призводить до підвищення витрат і зниження загальної продуктивності системи.

Підсумовуючи, можна зазначити, що комплексне вирішення проблем енергоефективності у сфері комунального водопостачання вимагає як технічного оновлення обладнання, так і вдосконалення управлінських рішень. Лише інтегрований підхід із використанням сучасних технологій дозволить знизити витрати електроенергії та забезпечити надійне функціонування системи водопостачання.

Комплексне дослідження стану енергетичної результативності систем водопостачання розкриває глибокі структурні проблеми галузевого енергоспоживання. Житлово-комунальне господарство України характеризується надзвичайно високим рівнем енергетичного навантаження, що становить близько 44% сукупного використання енергоресурсів, або приблизно 80 млн тон умовного палива.

Щорічне споживання електроенергії комунальною інфраструктурою сягає 10 млрд кВт·год, причому витрати на одиницю наданих послуг у 1,5-2 рази перевищують європейські стандарти. Структура енергетичного господарства включає газопостачання, електромережі, теплокомунікації та водопровідно-каналізаційні системи.

Водопровідно-каналізаційне господарство виступає абсолютним лідером за обсягами електроспоживання, акумулюючи близько 7 млрд кВт·год на рік, що становить 75% галузевого та 3,9% загальнодержавного електроспоживання. Нераціональне використання водних ресурсів призводить до додаткових витрат електроенергії понад 2,3 млрд кВт·год.

Системи комунального водопостачання належать до надзвичайно енергоємних інфраструктурних об'єктів. Понад 70% електроенергії витрачається безпосередньо на водопостачання, при цьому питомі витрати

становлять близько 1,5 кВт·год/м³, що в 1,8-2,6 разів перевищує європейські показники.

Ключовою підсистемою, яка формує загальну енергоефективність, виступають насосні станції. Для великих промислових центрів встановлена потужність може досягати 50 МВт, причому основні насосні агрегати споживають від 75% до 95% сукупної електроенергії.

Найбільш проблемною ланкою є насосні станції другого підйому, режими роботи яких безпосередньо залежать від динаміки водоспоживання. Під час проектування не враховуються коливання добового графіка споживання, що призводить до встановлення електродвигунів надлишкової потужності та низької ефективності використання електроенергії.

Статистичні дослідження демонструють критичні показники нерациональних витрат: через незадовільний технічний стан мереж та обладнання втрати електроенергії можуть сягати 40%. Насосні агрегати, працюючи в змінному режимі, перевитрачають від 30% до 50% електроенергії.

Зношеність основних фондів та обладнання спричиняє перевищення питомих витрат енергетичних ресурсів у 2-3 рази порівняно з показниками розвинутих країн, що підкреслює нагальну необхідність системної модернізації та впровадження інноваційних технологій енергоменеджменту.

Дослідження виявило, що комунальне підприємство «Лубни-водоканал» має найбільші витрати електроенергії саме на транспортування та розподіл водних ресурсів (графічно представлено на рис.1.1). Аналіз добового споживання електричної потужності насосної станції водопостачання на водозаборі «Дубнівський» демонструє суттєві коливання: від 16 до 22 тисяч кіловат-годин на добу, а в деяких випадках показник сягає навіть 30 тисяч кіловат-годин за добу.

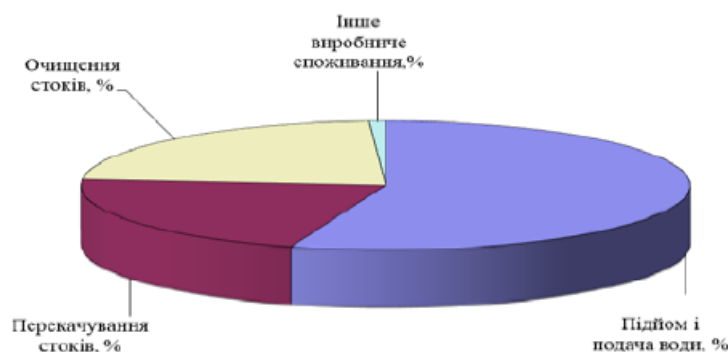


Рисунок 1.1 - Діаграма електроспоживання КП «Лубни-водоканал»

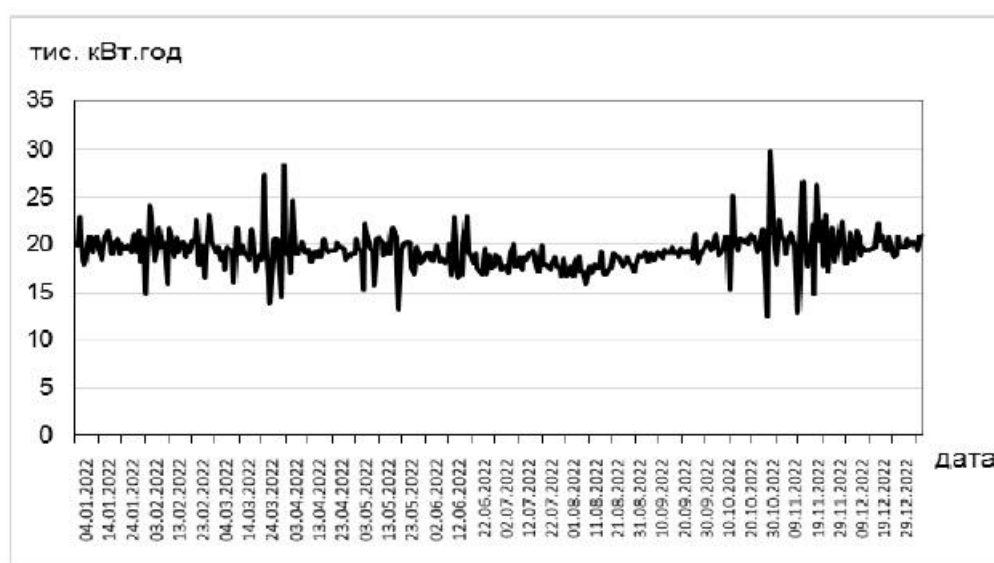


Рисунок 1.2. Характерний графік добового споживання ЕЕ на водозаборі КП «Лубни-водоканал»

Добове споживання електроенергії на одиницю об'єму води демонструє значні коливання (рис. 1.3). Залежно від дня, цей показник може варіюватися в межах від 0,45 до 0,65 кВт·год/м³, а в окремі періоди досягати близько 0,9 кВт·год/м³. Відхилення від середньорічного рівня питомого споживання електроенергії (рис. 1.4) можуть становити 30–50%, що є суттєвим.

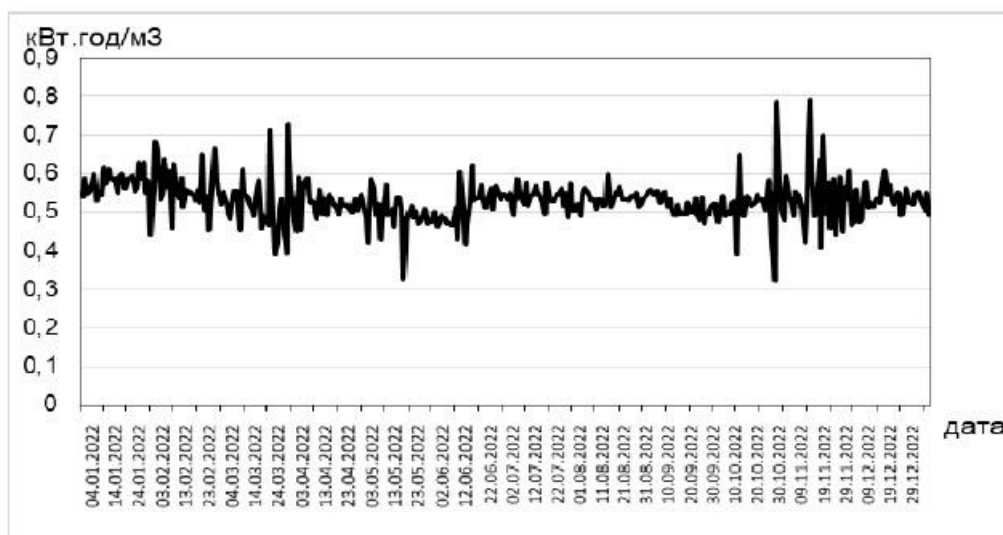


Рисунок 1.3. Зміна добового питомого споживання ЕЕ на водозабірні КП «Лубни-водоканал»

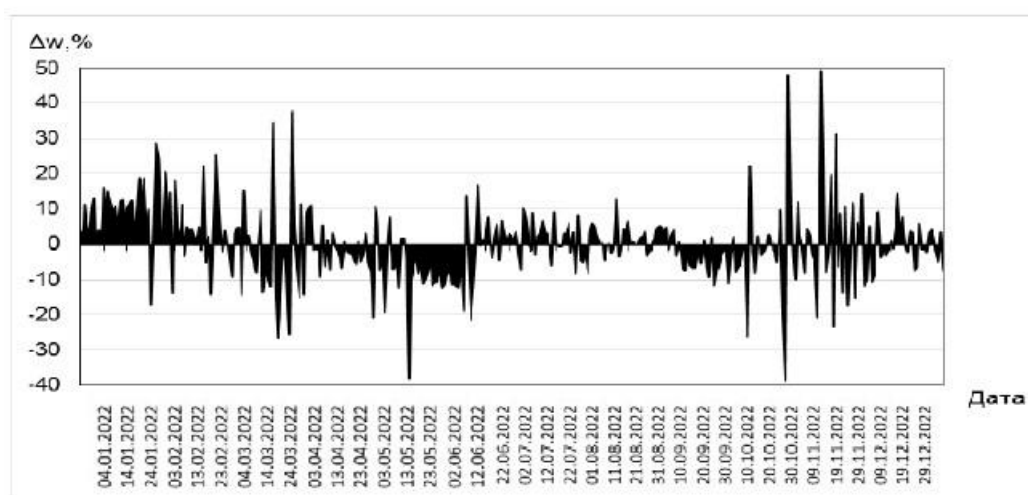


Рисунок 1.4. Відхилення питомого електроспоживання на водозабірні КП «Лубни-водоканал» від середньорічного рівня.

Аналіз типового графіка погодинного електроспоживання показує, що в нічний час споживання електроенергії значно нижче, ніж удень. Проте, питомі показники споживання ЕЕ (рис. 1.6) в нічні години залишаються високими.

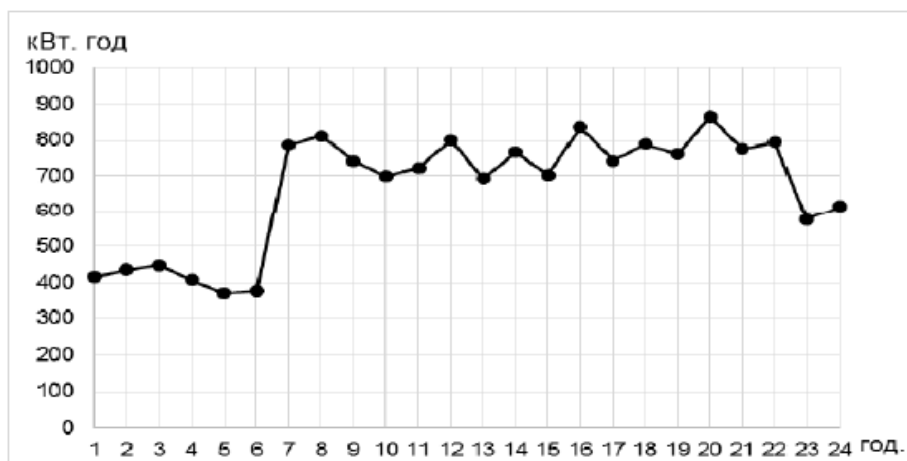


Рисунок 1.5. Погодинне споживання ЕЕ на водозаборі КП «Лубни-водоканал» за 20.06.2022 р.

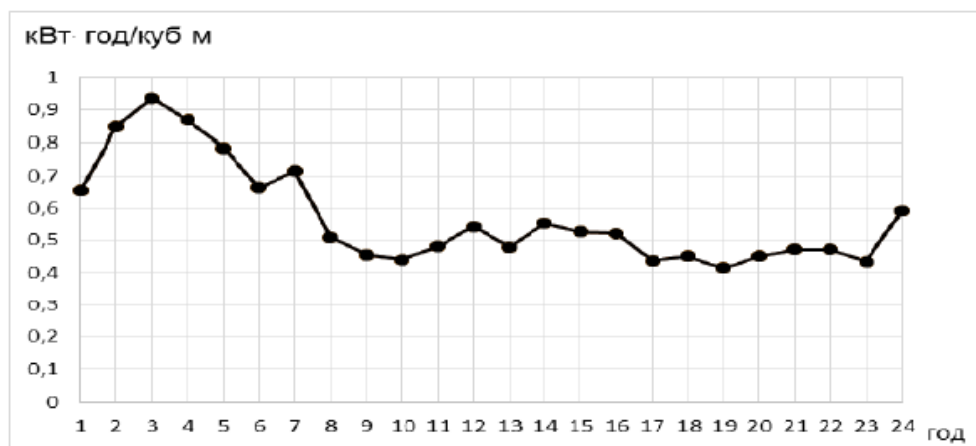


Рисунок 1.6. Погодинне питоме споживання ЕЕ на водозаборі КП «Лубни-водоканал» за 20.06.2022 р.

Високий рівень споживання електричної енергії залишається нагальною проблемою для підприємств водопостачання. Більша частина витрат на електроенергію в системах комунального водопостачання припадає на насосні станції другого підйому. Враховуючи це, підвищення ефективності їхньої роботи має стати ключовим напрямом оптимізації енергоспоживання.

Робота НСВ пов'язана зі споживанням ЕЕ для транспортування рідини та подолання гідравлічного опору трубопровідної системи. Напірний опір водопровідної мережі визначається її гідравлічними параметрами та особливостями діяльності споживачів, включаючи супутні технологічні

процеси. Хоча такі характеристики, як довжина і діаметр трубопроводів, геодезичні позначки насосних станцій і кінцевих споживачів, залишаються стабільними з часом, господарська діяльність є фактором із випадковою природою [29].

Витрати води в системі водопостачання залежать від багатьох чинників, зокрема поверховості будівель, рівня благоустрою житла, стану водозабірної обладнання, кількості споживачів, кліматичних умов і пори року. Режим водокористування характеризується нерівномірним розподілом витрат води протягом доби, місяця або року [27]. На ці коливання впливають такі фактори, як сезонність, температура зовнішнього повітря, а також святкові дати – державні чи релігійні [30].

Нерівномірність споживання води впродовж року пояснюється змінами в ритмі життя населення, наприклад, відключенням опалення чи гарячого водопостачання. Добові коливання ще більш виражені: понад 70% води споживається в денний час. Сезонні зміни менш значні, не перевищуючи 15–20% [30].

Дослідження [30] також вказують на вплив екстремальних температур зовнішнього повітря на рівень подачі води в міські мережі. В умовах підвищеної температури споживання води збільшується, тоді як за наявності опадів попит на воду серед населення зменшується [31].

Таким чином, ефективність роботи насосної станції залежить не лише від технічних характеристик мережі, а й від зовнішніх факторів, які впливають на водоспоживання. Виявлення і врахування цих чинників є ключем до оптимізації енергоспоживання в системах водопостачання.

Витрати електричної енергії, споживаної насосними агрегатами (НА) для перекачування води, залежать від низки взаємопов'язаних параметрів, таких як напір, витрата води, коефіцієнт корисної дії, підпір на всмоктуванні, стан обладнання, а також від режимно-експлуатаційних показників, які визначаються відповідністю характеристик обладнання (насосів, водопровідної мережі тощо) та реальними потребами споживачів у воді [32].

Енергоефективність роботи насосної станції (НС) прямо пов'язана з технічними параметрами обладнання, включаючи його заводські напірно-витратні та енергетичні характеристики, кількість працюючих одночасно насосів, методами управління їх параметрами, а також змінами в графіках водоспоживання впродовж доби [25]-[34]. Загальні витрати електроенергії на перекачування води визначаються технологічними факторами, такими як обсяг води та напір, необхідний для її транспортування. Напір, у свою чергу, залежить від втрат в системі водопостачання та вимог до напору на точках водорозбору, а витрати води – від загальних обсягів водоспоживання [5]. Отже, режим електроспоживання формується під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх факторів, що взаємодіють (рис. 1.7).

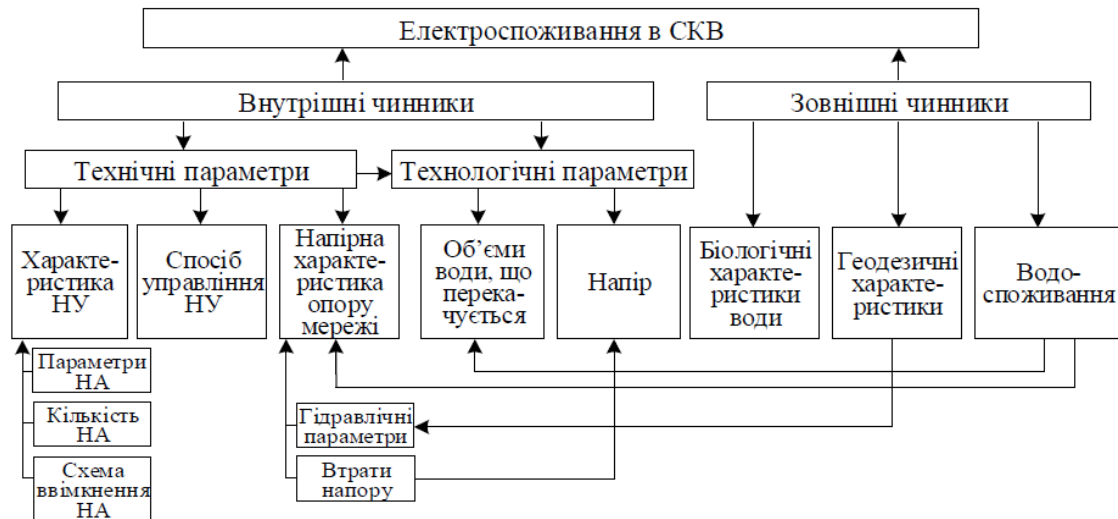


Рисунок 1.7 – Фактори, що впливають на споживання електроенергії в СКВ

Водоспоживання є ключовим фактором, що визначає обсяг води, що подається через мережу, і таким чином впливає на ефективність водопостачання. Разом з технологічними та іншими технічними аспектами, це також має прямий вплив на загальний рівень електроспоживання.

1.2. Загальний огляд методів та стратегій підвищення енергоефективності об'єктів водопостачання

Основною вимогою до інженерних систем міста є забезпечення їхньої надійної та ефективної роботи, зокрема в рамках централізованих СКВ. Один із ключових напрямків для зменшення витрат електроенергії в СКВ полягає в оптимізації витрат води, що передбачає заміну та модернізацію устаткування, вдосконалення методів обліку, контролю та регулювання параметрів роботи елементів системи. Важливим аспектом впровадження енергоощадження є реконструкція об'єктів водопостачання з урахуванням змінних умов водоспоживання та прогнозування можливих змін у найближчому майбутньому [6].

В усіх містах України є можливості для зниження енергоємності водопостачання шляхом оптимізації кількості насосних агрегатів на насосних станціях водопостачання на основі аналізу добових коливань споживання води [27]. Витрати води з мережі визначаються за допомогою ступінчастих графіків споживання, які мають кілька багатогодинних рівнів, навколо яких відбуваються незначні коливання годинних витрат води впродовж доби. Для ефективного регулювання роботи НСВ розробляються спеціальні організаційні та технологічні карти, які визначають режими роботи насосів відповідно до реальних режимів водоспоживання [17].

Ранжування графіків водоспоживання з подальшим їх усередненням за кількома характерними інтервалами є один із головних дієвих способів отримання графіка ефективного режиму роботи. Оптимальний рівень подачі води на насосній станції для заданого періоду часу визначається через усереднене значення витрат води. Визначений графік з найменшим значенням ступенів є, як правило, підґрунтям для багаторежимної оптимізації подачі води, що включає вибір моментів часу для переключення режимів, де графік споживання буде усереднено [30].

Складання деталізованого плану-графіку подачі води дозволяє встановити найкращі гідравлічні параметри роботи системи, такі як тиск на

колекторах насосних станцій II та III підйому, тиск в розподільній мережі, а також рівні води в резервуарах для питної води [24-29]. Однак для систем водопостачання міського масштабу, де домінує господарсько-питне водоспоживання, важко визначити «нормальний» рівень подачі. Це зумовлено тим, що реальні показники водоспоживання змінюються в залежності від сезону і місяця, а також носять випадковий характер: споживання води в мережі часто відбувається хаотично, і склад споживачів змінюється з часом [27].

У проектуванні СКВ часто не враховуються коливання в режимах водоспоживання, що призводить до того, що робочі режими насосних агрегатів знаходяться поза межами їхніх оптимальних характеристик. Це вимагає додаткового регулювання гідравлічних параметрів насосів [27]. Регулювання швидкості обертання робочого колеса насосів дозволяє значно підвищити енергетичні показники установок, зменшити втрати води за рахунок усунення надлишкового тиску в гідравлічній мережі та, відповідно, дозволить отримати значне заощадження ЕЕ [8]. Модернізація виробничого устаткування та узгодження режимів роботи насосів з водопостачальною мережею з урахуванням поточних потреб у воді мають вирішальний вплив на підвищення енергоефективності об'єктів водопостачання.

Основною складовою системи управління в СКВ є обґрунтування та визначення «стандарту» оптимальних режимів експлуатації для кожного з її об'єктів. Метою оптимізації технологічних процесів на НС є мінімізація витрат енергії при забезпеченні безперебійної подачі води споживачам відповідно до режиму водоспоживання і з дотриманням заданого напору у визначених для контрольних вимірювань точках водопровідної мережі, а також виявлення аварійних ситуацій. Таким чином, сучасні підходи до підвищення енергоефективності СКВ передбачають розробку енергозберігаючих технологій та алгоритмів управління, а також удосконалення систем для підвищення рівня енергетичної та технологічної керованості, систем ідентифікації аварійних ситуацій [9].

Наразі існує велика кількість досліджень, спрямованих на покращення енергоефективності СКВ, зокрема:

- розв'язання задачі розрахунку оптимальної кількості та параметрів насосних агрегатів, що працюють у мережі з змінним гідравлічним опором впродовж часу [27], що включає рекомендації для вибору оптимальних параметрів насосів і методів регулювання відповідно до коливань водоспоживання для мінімізації споживаної енергії насосними установками;
- питання оптимального управління приводами насосів водопостачання з урахуванням сумісної роботи насосів та підтримання необхідного тиску чи продуктивності, через вибір оптимальних варіантів для кожного насоса [28], зокрема для мінімізації споживання електроенергії насосною станцією, а також підвищення ефективності управління продуктивністю насосів [7], [13]-[15], [19];
- технічні рішення щодо автоматизації управління водопостачальними режимами, зокрема на основі ІКС [7], [10], НЛЧУ приводами насосів [17], що дозволяє оперативно регулювати технологічні процеси та підтримувати ефективні режими роботи системи, враховуючи зміни в водоспоживанні і вибираючи оптимальний метод управління насосами, при цьому основним критерієм оптимальності є витрати електроенергії;
- аналіз енергетичних процесів, контроль і моделювання енергетичних показників НСВ, враховуючи варіативність технологічних та енергетичних параметрів НА, що працюють в експлуатації, зокрема з урахуванням графіків водоспоживання, що дає можливість оцінити енергоефективність режимів роботи, технічний стан насосів та ухвалювати рішення щодо їх подальшого використання;
- моделювання водоспоживання, аналіз добових графіків водоспоживання та розробка принципів урахування сезонних та інших коливань споживання води [5], а також математична апроксимація добових

графіків і їх адаптація для оптимізації процесу управління СВ з урахуванням фактичних коливань водоспоживання [12].

Метою цих досліджень є створення енергозберігаючих алгоритмів для ефективного і надійного управління водопостачанням, що враховує динаміку водоспоживання. Для розуміння потенціалу та пошуку шляхів покращення ефективності використання водного та енергетичного потенціалу необхідно оцінювати рівень енергоефективності початкового стану об'єктів водопостачання та СКВ загалом, а також ефективність організації технологічних процесів і режимів роботи її структурних елементів.

У роботах [12], [15] для оцінки енергоефективності роботи насосних агрегатів (НА) та насосних станцій (НС) загалом пропонується використовувати інтегральний критерій енергоефективності функціонування системи централізованого водопостачання (СКВ). Цей критерій визначається за допомогою показника науково обґрунтованих питомих витрат ЕЕ на перекачування одного кубічного метра води при роботі НА в i -му режимі (із витратою Q_i). Показник розраховується на основі моделювання роботи НС, з обов'язковим урахуванням конструктивних особливостей НА та елементів підсистем СКВ, зокрема й робочого режиму системи. Враховуються залежності, пов'язані з Q - H характеристиками насоса та ККД електромеханічного комплексу (насос-привод-двигун). Основна увага приділяється визначенню робочих характеристик НА та можливих зон їх роботи, у тому числі технічним заходам щодо модернізації, що дають змогу порівнювати варіанти оновлення обладнання для підвищення енергоефективності.

У роботі [8] пропонується використовувати значення відносної питомої витрати ЕЕ як показника рівня енергоефективності. Цей показник обчислюється як відношення зміни поточного значення питомої витрати ЕЕ за визначений період до її базового значення. Такий підхід дозволяє детальніше оцінити структуру споживання електроенергії, відстежувати динаміку та оцінювати ефективність її використання для виконання управлінських

завдань. Витратними характеристиками для обчислення енергоефективності є подача води, що контролюється лічильниками, та реальна витрата води, яка наближено відображає рівень фактичного водоспоживання.

У роботах [3, 7, 9] загальний рівень витрати ЕЕ, необхідної для подачі води в місто, обчислюється з урахуванням використання насосних агрегатів (НА) та методів регулювання, які забезпечують відповідний рівень подачі води по кожній НС. Це визначається на основі погодинної статистики подач СВ, при цьому мінімізується споживання ЕЕ. Результати таких досліджень важливі для прийняття рішень щодо доцільності експлуатації та модернізації обладнання НС, а також для вибору найбільш ефективних методів управління режимом водопостачання. Однак більшість робіт фокусується на детальному аналізі характеристик насосів, що змінюються залежно від потрібної подачі води та характеристик мережі, що визначають параметри робочої точки і споживання електроенергії електроприводами НА, що робить ці дослідження доволі трудомісткими.

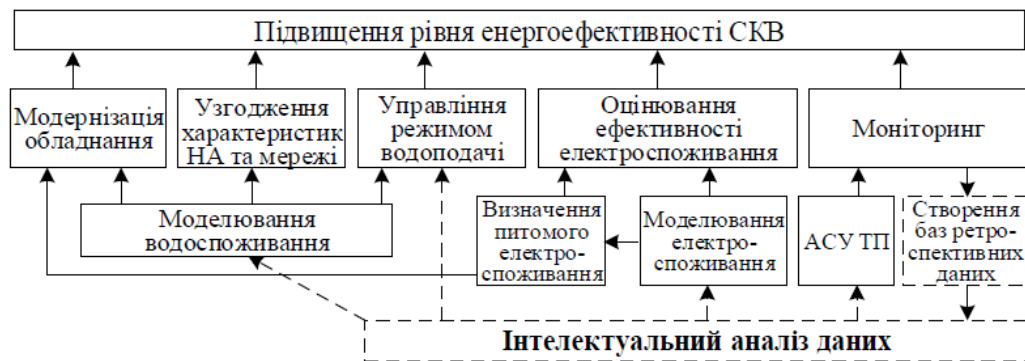


Рисунок 1.8 – Методи підвищення ефективності СКВ

У [6] зазначається, що для оцінки та підвищення енергоефективності СКВ необхідно враховувати, що система водопостачання має унікальні характеристики та закономірності функціонування, які відрізняються від окремих елементів. Отже, підвищення енергоефективності СКВ вимагає комплексного підходу, що охоплює всі складові системи, а не лише вдосконалення окремих її елементів. Для цього необхідно забезпечити

ефективне використання енергоресурсів на всіх етапах роботи і оптимальне управління енергоспоживанням.

У [10] зазначено, що управління енергоспоживанням в СКВ стикається з певними труднощами через вплив внутрішніх та зовнішніх факторів. Тому процес управління водопостачанням вимагає постійного моніторингу функціонування системи в реальному часі та подання даних у вигляді, який спрощує прийняття рішень, а також створення моделей електроспоживання, що підтримують цей процес.

У сучасних дослідженнях активно розвиваються методи побудови та вдосконалення систем моніторингу в галузі водопостачання та водовідведення [6], [8], [13]. Зважаючи на великі обсяги досліджень у сфері підвищення рівня енергоефективності СКВ, фактичні умови та вимоги до енергоспоживання вимагають удосконалення існуючих підходів та розробки нових методик для оцінки та управління електроспоживанням у водопостачальних системах.

1.3. Огляд інструментів для забезпечення енергоефективності виробничих об'єктів

Відповідно до [1], серед основних принципів досягнення енергоефективності виділяються: розробка та впровадження СЕМ; системний підхід до забезпечення ефективного використання ЕЕ; виявлення ключових чинників енергоефективності; визначення та оцінка показників ефективності енергоспоживання, а також їх перегляд та вдосконалення; поступове підвищення рівня енергоефективності; розробка методів удосконалення, зокрема через моніторинг і контроль.

Основною метою управління енерговикористанням на виробничих об'єктах є досягнення високої ефективності використання енергії при одночасному раціональному застосуванні інших ресурсів. Проблема енергоспоживання має комплексний характер, оскільки включає як явні, так і

приховані причинно-наслідкові зв'язки. Модель ефективного управління енерговикористанням, представлена в [4], виглядає наступним чином:

$$Y = \{F^{CS}\}(X, Z, U) \rightarrow opt|\{E_{US}\}, \quad (1.1)$$

де $\{F^{CS}\}$ - власне функція управління;

$\{E_{US}\}$ - об'єкт управління (енергогосподарство);

Y, X – значення вихідних та вхідних факторів енерговикористання;

Z – характерний показник стану системи;

U - керуючі дії.

Відповідно до [6], головним принциповим підходом під час формування власне функції управління є логічно послідовна інтеграція основних управлінських функцій, зокрема: вимірювання та облік, планування і нормалізація, моніторинг, контроль і аналіз, а також регулювання. Так, наприклад, функції обліку та вимірювання включають забезпечення точних даних щодо поточного стану об'єкту управління, а контроль і аналіз дозволяють визначити фактичне відхилення від норми та встановити причини таких відхилень. Нормалізація передбачає отримання основних характеристик електроспоживання, які залишаються стабільними протягом певного періоду, при цьому враховуються випадкові впливи і зовнішні фактори.

Згідно з [1], важливим аспектом ефективного енерговикористання є підхід, орієнтований на створення системи енергетичного менеджменту.

В [65] зазначено, що енергетичний менеджмент полягає у діяльності, спрямованій на раціональне використання первинних енергоресурсів (ПЕР). Це включає облік, проведення енергетичних вимірів і перевірок, оцінку ефективності використання ПЕР, а також впровадження заходів для збереження енергії. Згідно зі стандартом ISO 50001, основою енергоменеджменту є цикл Шухарта-Демінга: Плануй- Виконуй-Перевір-Дій [23].

Менеджмент енергоспоживання, що є частиною СЕМ, орієнтується на процеси споживання енергоресурсів підприємством [16]. Ефективність

енергоспоживання є важливим показником технічного рівня виробництва і організації енергоменеджменту. Управління енергоспоживанням на підприємстві включає ряд заходів, що впливають на технологічні і організаційні аспекти для підвищення енергоефективності. Основні етапи циклу управління енергоспоживанням: вимірювання та аналіз споживання енергії, розробка і впровадження енергозберігаючих заходів [23]. Впровадження СЕМ має призвести до покращення енергетичних показників, зокрема енергоефективності, яка може вимірюватися за допомогою показників енергоспоживання або питомого споживання енергії. Розробка управлінських дій ґрунтується на порівнянні результатів вимірювань з заданими показниками чи базовим рівнем енергоефективності.

Варто відзначити, що раніше в енергоменеджменті увага зосереджувалась на підприємстві в цілому. Контроль за енергоефективністю окремого обладнання та його режимами роботи не проводився безперервно і здійснювався лише після того, як неефективне споживання енергії спостерігалось протягом тривалого періоду. Наразі методологія енергетичного менеджменту включає високий рівень деталізації, зосереджуючи увагу на контролі енергоефективності кінцевого споживача та оперативному реагуванні на зниження ефективності енергоспоживання [67], [69]. Це створює потребу в систематичному управлінні енергоспоживанням, що передбачає впровадження постійного, оперативного [70] контролю за ефективністю використання енергії на рівні окремих об'єктів. Для цього необхідне удосконалення наявних та розробка нових функцій і процедур, а також їх інтеграція в систему енергетичного менеджменту (СЕМ). Важливою умовою є використання моніторингу енергоефективності виробничих систем та їх компонентів на постійній основі, враховуючи при цьому специфічні особливості кожного об'єкта.

Частиною процесу планування за циклом Шухарта-Демінга є енергетичне планування (див. рис. 1.9)., яке включає виконання енергетичного аналізу. Цей аналіз допомагає оцінити рівень досягнутої або

потенційно досяжної енергоефективності та іншу енергетичну інформацію, щоб зрозуміти процеси споживання енергії, виявити тенденції, сезонні зміни і різні змінні чинники, які впливають на енергоспоживання.



Рисунок 1.9 – Приклад енергетичного аналізу відповідно до стандартів ISO 50000

Результатом аналізу є набір даних, що дозволяють встановити БРЕ. Це значення служить для порівняння досягнутого або потенційного рівня енергоефективності в довгостроковій перспективі [8]. Важливо, щоб БРЕ враховувало зміни, які впливають на енергоспоживання; період для вимірювання базового рівня повинен бути типово відображати коливання в організаційних операціях, а дані, що стосуються змінних і фактичного енергоспоживання, повинні відповідати тому самому періоду, що й БРЕ.

БРЕ – це фактично прогнозне значення "нормативного" рівня споживання ЕЕ, якого можна досягти на конкретному об'єкті. Це не "ідеальна" норма, а мінімально необхідний рівень витрат енергоресурсів для даного об'єкта, який, тим не менш, відображає ефективність використання енергії, реально досягнуту на цьому об'єкті дослідження [12]. Порівнюючи

фактичні та прогнозовані показники енергоспоживання, можна визначити, чи відбулося покращення енергоефективності.

Моніторинг енергоефективності виробничої системи передбачає визначення її поточного стану, оцінку ефективності технологічних процесів, а також створення умов для вдосконалення роботи системи. Збір даних про енергоспоживання є безперервним процесом, що включає накопичення та зберігання інформації про витрати енергії та технічні параметри, що впливають на енергоспоживання. Це дозволяє виявити фактори, які впливають на споживання, встановити залежності між споживаними обсягами енергії та цими факторами, а також виявити часові та просторові тенденції.

Таким чином, СЕМ (рис. 1.10) має бути не лише технічним інструментом обліку і контролю, а й важливим елементом управлінського процесу, що підвищує енергоефективність.

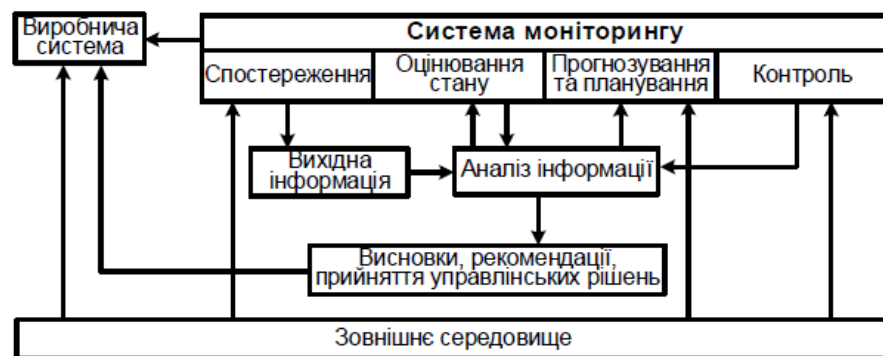


Рисунок 1.10 – Системна методологія СЕМ

Моніторинг є важливим елементом управління енергоспоживанням, оскільки дозволяє отримувати оперативні дані про спожиту енергію, роботу виробничих об'єктів і стан навколишнього середовища, що дає змогу своєчасно коригувати відхилення від встановлених показників та цільових значень [3]. Структура контролю енергоспоживання включає не тільки спостереження за технологічними процесами, але й аналіз результатів для виявлення та усунення причин позаштатних ситуацій.

Контроль є важливою складовою енергетичної ефективності, що вимагає постійного аналізу споживання енергії та визначення тенденцій до покращення чи погіршення показників. Для цього використовуються системи моніторингу та планування, такі як системи КіП (Monitoring and Targeting Systems), що дозволяють оперативно реагувати на зміни та підвищувати енергоефективність на об'єктах.

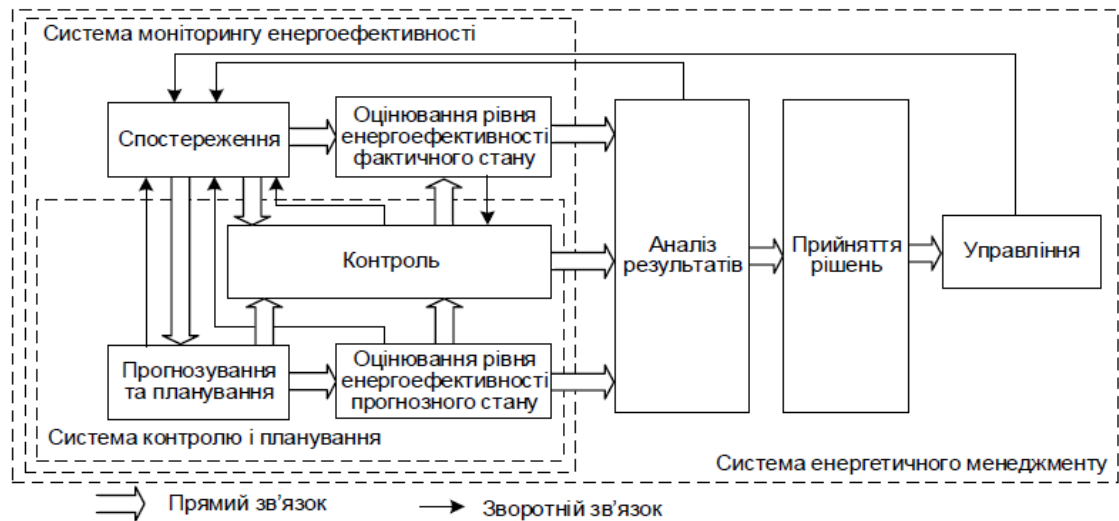


Рисунок 1.11 – Функціональний зв'язок елементів структури СЕМ

У цьому контексті під контролем розуміється впровадження процедур спостереження, збору та, за потреби, фіксації даних; виявлення, оцінка та повідомлення про відхилення реальних показників енергоспоживання від встановлених нормативів і стандартів. На основі результатів контролю здійснюються управлінські заходи для коригування роботи об'єкта.

Наприклад, режим подачі води в місто безпосередньо залежить від обсягів водоспоживання, що, в свою чергу, впливає на ефективність роботи насосних станцій (НС) та параметри розподільчої мережі [25]. Витрати води також мають значний вплив на виробництво та на енергоспоживання. Оскільки водоспоживання є випадковим фактором, це ускладнює точну оцінку ефективності роботи насосних станцій та енергоспоживання [27]. Неврахування цих випадкових коливань веде до зниження ефективності організації водопостачання та підвищення енергоспоживання. Тому важливим

є розробка підходів, які дозволять врахувати цей фактор та виявити його вплив на споживання енергії під час планування витрат ЕЕ.

Враховуючи зміну обсягів водоспоживання, змінюються й режими роботи насосних станцій, що впливає на технологічні параметри, а також на інші фактори, які визначають енергоспоживання та часи для їх вимірювання.

При створенні математичних моделей завжди потрібно знаходити баланс між рівнем загальності та деталізації. Для забезпечення ефективного управління енергоспоживанням важливими є точність і швидкість визначення споживаної енергії. Впровадження сучасних інформаційних та технологічних систем дозволяє покращити методи побудови моделей БРЕ. Створення великих баз даних через систему моніторингу забезпечує збирання інформації про режими роботи та енергоспоживання об'єктів, що дозволяє формувати точніші БРЕ.

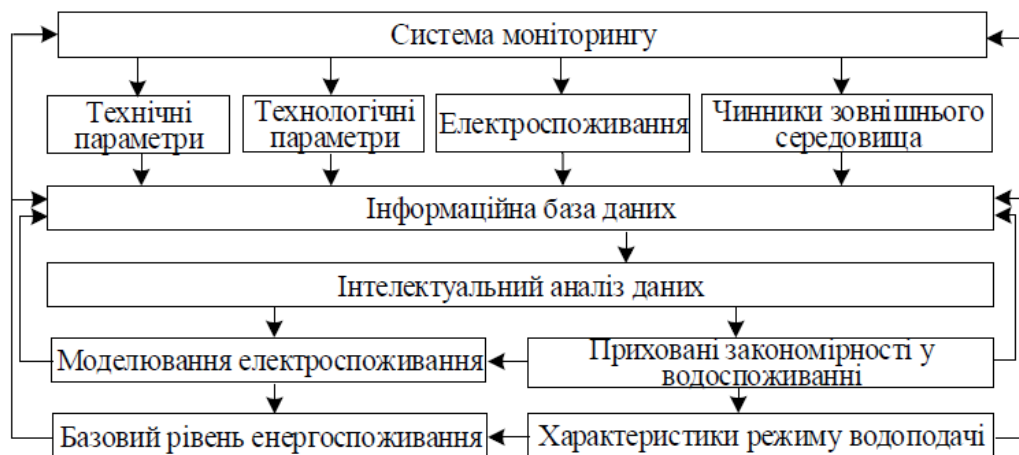


Рисунок 1.12 – Загальна структура процесу формування БРЕ

Для ефективного аналізу цієї інформації доцільно використовувати методи ІАД [6]. Тож, у загальному випадку ІАД — це процес, що поєднує підтримку прийняття рішень та полягає в пошуку прихованих закономірностей у великих масивах даних [10]. ІАД полягає у виявленні нових значущих кореляцій, образів та тенденцій шляхом аналізу великих масивів даних, використовуючи методи розпізнавання образів і статистичні методи.

Таким чином, використання ІАД дає змогу аналізувати постійно зростаючі обсяги інформації та виявляти приховані закономірності, які визначають формування технологічних режимів на об'єктах водопостачання.

Висновки до розділу 1

1. Аналіз ефективності електроспоживання в СКВ, факторів, що впливають на споживання енергії об'єктами водопостачання, а також можливих шляхів підвищення енергоефективності, показав, що вирішення цієї проблеми не обмежується лише вдосконаленням конструкцій і режимів роботи елементів. Важливим є впровадження методів ефективного управління з урахуванням поточних умов функціонування водопостачальних об'єктів та їх інфраструктури.

2. Енергоефективність роботи НС суттєво залежить від характеристик експлуатації обладнання, таких як заводські напірно-витратні та енергетичні показники, схеми включення НА тощо, а в результаті — ефективність електроспоживання. Водоспоживання, будучи випадковим фактором, ускладнює процес точного оцінювання рівня ефективності роботи НА та енергоспоживання загалом.

3. Для забезпечення ефективного управління процесом енергоспоживання та оперативного реагування на його зниження необхідно враховувати як явні, так і приховані причинно-наслідкові зв'язки через впровадження системи моніторингу витрат електричної енергії, технологічних параметрів НС та зовнішніх факторів. Важливим є також удосконалення організації функцій управління, таких як планування та контроль енергоспоживання. Необхідно вивчити та систематизувати змінні, що визначають рівень енергоефективності, їх роль у побудові моделей енергоспоживання та визначенні базових рівнів енергоспоживання для вирішення задач контролю ефективності.

4. Оскільки існує велика кількість факторів, що впливають на електроспоживання, їх взаємозв'язок та складність формулювання

математичних залежностей для подальшого його опису, актуальним є застосування інтелектуального аналізу даних. Це дозволить обробляти інформацію, накопичену в базах моніторингу, для врахування закономірностей режиму водопостачання та електроспоживання, а також для вивчення впливу зовнішніх чинників.

5. Аналіз наявних підходів до підвищення енергоефективності в СКВ та визначення завдань для ефективного вирішення цієї проблеми показав, що для цього необхідно удосконалити систему моніторингу електроспоживання НС водопостачання. Це включає покращення планування та контролю з урахуванням реальних умов функціонування об'єктів, зокрема сезонних і соціальних факторів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ВПЛИВОВИХ ФАКТОРІВ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИЙ РЕЖИМ НАСОСНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА РОЗРОБКА ДІАПАЗОНІВ ВИЗНАЧАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ БАЗОВОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

2.1. Ідентифікація зовнішніх детермінант, що впливають на електроенергетичну ефективність

Кореляційні залежності між модельними конструкціями водопостачальних систем та електроспоживання. У контексті загальної методології процес водопостачання становить собою трансформаційне перетворення електричної енергії через електромеханічні пристрої системи комунального водопостачання. В аналітичному вимірі це:

$$\Omega_{\text{в}} \xrightarrow{F_{\text{ВЕ}}} \Omega_{\text{Е}}, \quad (2.1)$$

де $\Omega_{\text{в}}$ - сукупність репрезентативних моделей водопостачальної інфраструктури;

$\Omega_{\text{Е}}$ - комплекс математичних конструкцій електроенергетичного споживання;

$F_{\text{ВЕ}}$ - функціональна трансформація між модельними представленнями.

Базуючись на концептуальних засадах моделювання, сукупність водопостачальних структурних конфігурацій можна інтерпретувати як ізоморфне відображення абстрактної множини, що формалізується кортежем [104]:

$$\Psi_{\text{в}} = \langle \{M_{\text{в}}\}, P_1, P_2, \dots, P_n \rangle, \quad (2.2)$$

де $\{M_{\text{в}}\}$ - інтегральна сукупність структурних елементів комунальної водної системи;

$P_1, P_2, \dots, P_n$ - предикативні взаємозв'язки між компонентами.

Будь-яка технологічна система перебуває в динамічному середовищі, внаслідок чого кожен її структурний елемент зазнає зовнішніх впливів. Кожен компонент репрезентується набором диференційованих сигналів: вхідних (x_e), зовнішньосередовищних дій (n_e), керувальних імпульсів (u_e), вихідних сигналів (y_e) та алгоритмом функціонування F_e^S :

$$M_{e_i} = \langle x_e, n_e, u_e, y_e, F_e^S \rangle. \quad (2.3)$$

Аналогічно, множину електроспоживання можна представити ізоморфним відображенням абстрактної множини Ψ_e у вигляді кортежу:

$$\Psi_e = \langle \{M_e\}, P_1, P_2, \dots, P_n \rangle, \quad (2.4)$$

де $\{M_e\}$ - сукупність електроенергетичних моделей структурних компонентів.

Вихідні параметри водопостачальних елементів слугують додатковими вхідними сигналами для моделей електроспоживання. Відтак модель електроспоживання кожного структурного елемента матиме вигляд:

$$M_{e_i} = \langle y_e, x_e, n_e, u_e, y_e, F_e^S \rangle. \quad (2.5)$$

З перспективи трансформаційних процесів перетворення $\Psi_e \rightarrow \Psi_e$, система комунального водопостачання як електроспоживчий об'єкт може бути репрезентована комплексним кортежем:

$$S = \langle \Psi_e, \Psi_e, P_0(\Psi_e, \Psi_e) \rangle. \quad (2.6)$$

Підмоделі Ψ_{ϵ} та Ψ_e презентуються через сукупність вхідних змінних x та вихідних сигналів y , у тому числі й трансформації їх стану z , що дозволяє врахування зовнішніх та керувальних впливів:

$$\Psi_{\epsilon} = \langle x_{\epsilon}, y_{\epsilon}, z_{\epsilon} \rangle, \quad (2.7)$$

$$\Psi_e = \langle y_{\epsilon}, x_e, y_e, z_e \rangle. \quad (2.8)$$

Підсумовуючи, ефективність електроспоживання в комунальній водній системі детермінується: внутрішніми властивостями інфраструктури, умовами функціонування елементів, диверсифікованими факторними впливами, результативністю організаційних процесів, характером управлінських інтервенцій та екзогенними середовищними чинниками.

Ефективне електроспоживання в системі комунального водопостачання можливе за умови результативності всіх її складових елементів та власне технологічних процесів. Отже, обраною цільовою функцією визначається мінімізація витрат електричної енергії, що математично формалізується через вектор характеристик системи з позиції ефективності електроспоживання:

$$W^* = \min \{W^j\}, \quad (2.9)$$

де W^j - вектор основних характеристик властивостей системи:

$$W^j = \langle W_1^j, W_2^j, \dots, W_p^j, \dots, W_n^j \rangle. \quad (2.10)$$

Реалізація такого критерію передбачає одночасне досягнення декількох взаємопов'язаних завдань: безпосереднє зниження обсягів електроспоживання шляхом оптимізації режимів роботи об'єктів, зменшення надлишкових напорів у мережі через забезпечення відповідності графіків водопостачання та

водоспоживання, редукцію втрат води та витрат на власні потреби через модернізацію структурних елементів, а також підвищення коефіцієнта завантаження технологічного обладнання через оптимізацію режимів відповідно до графіка водоспоживання.

Отже, умова ефективного електроспоживання:

$$W^* = \begin{cases} \langle w_{\text{факт}} \rangle \rightarrow \min \\ \langle \Delta h \rangle \rightarrow \min \\ \langle Q_{\text{втр}}, Q_{\text{вл.потр.}} \rangle \rightarrow \min \\ \langle K_{\text{зав}} \rangle \rightarrow \max \end{cases} \quad (2.11)$$

Принциповими обмеженнями є умови надійного та безперебійного забезпечення споживачів водою необхідної якості й у потрібній кількості:

$$Q = Q_{\text{необх}}; \quad (2.12)$$

а також забезпечення достатнього тиску в мережі:

$$H = H_{\text{необх}}. \quad (2.13)$$

Недотримання таких обмежень спричиняє погіршення надійності водопостачання та призводить до додаткових витрат електроенергії через перекачування надлишкових об'ємів та зростання витоків внаслідок понаднормового тиску. Основоположним підходом до організації ефективного режиму водопостачання є забезпечення максимальної відповідності водоподачі водоспоживанню. На останнє впливають кліматичні чинники, що характеризують залежність від погодних явищ (температурні зміни, атмосферні процеси), та соціальні фактори, пов'язані з особливостями життєдіяльності (тип дня, часові інтервали).

Зовнішнє середовище - це сукупність факторів різного (прямого чи непрямого) характеру дії, які потребують урахування при плануванні добової

водоподачі, визначають організацію технологічного процесу та мають суттєвий вплив на фактичний ефективність режиму електроспоживання.

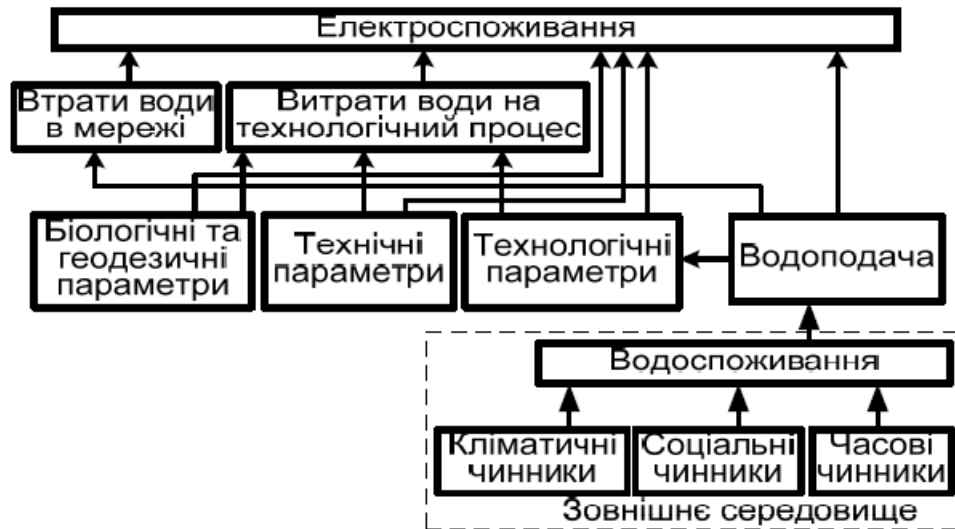


Рисунок 2.1 – Схема взаємозв'язків електроспоживання із чинниками впливу

Неврахування впливу зовнішньосередовищних чинників неминуче обумовлює зниження рівня ефективності організації режиму водоподачі та, відповідно, електроспоживання. Тому на першому етапі аналізу необхідна ретельна ідентифікація ключових факторів та їх всебічна формалізація.

Основним показником режиму водопостачання є ГВВ впродовжж доби з мережі. Ці графіки можуть значно варіюватися залежно від пори року (див. рис. 2.3). Потреба у воді залишається стабільною на початку доби, але має різні значення протягом денних годин. Аналіз таких графіків показує, що подача води не є рівномірною не лише протягом доби, що зумовлено соціальними аспектами водоспоживання, але й значно змінюється в залежності від дня тижня (див. рис. 2.4).

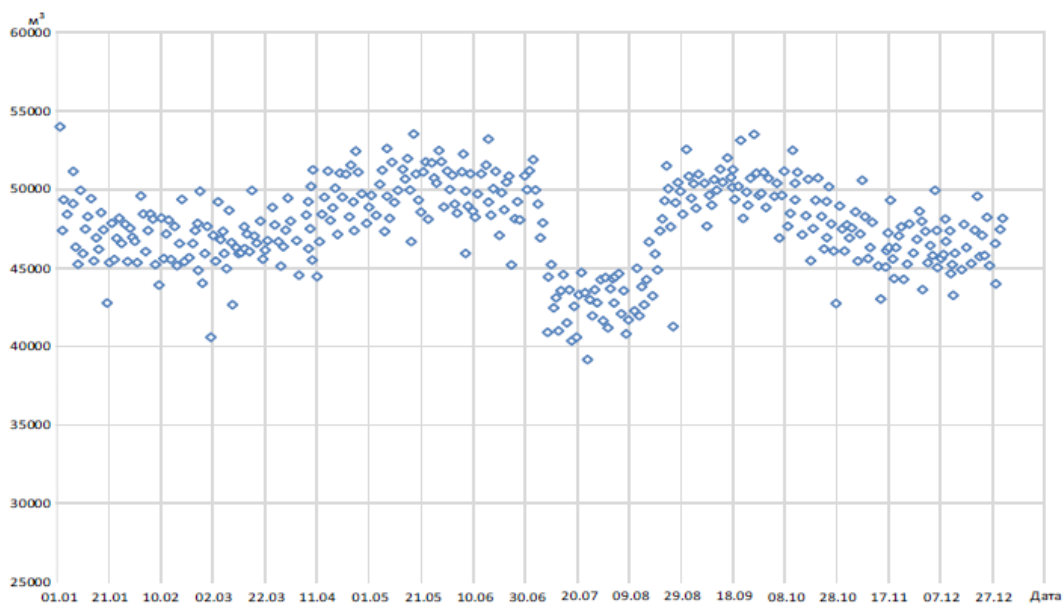


Рисунок 2.2 – Типовий графік ВВ з мережі водозабору впродовж року

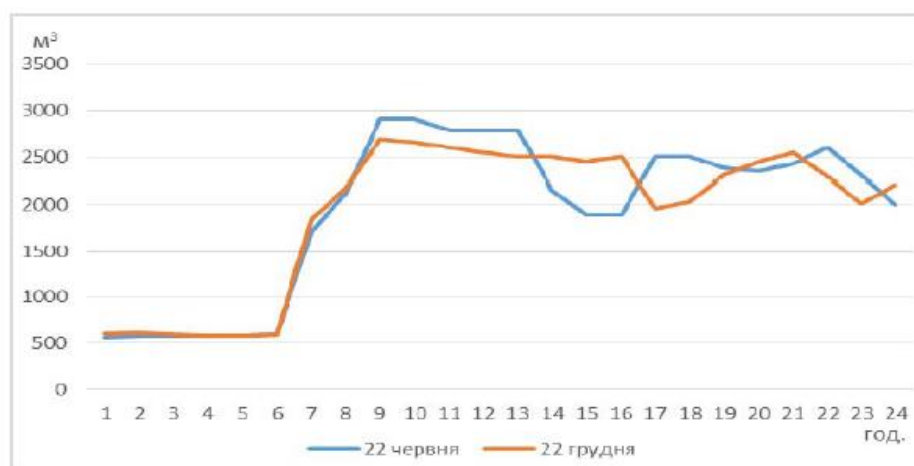
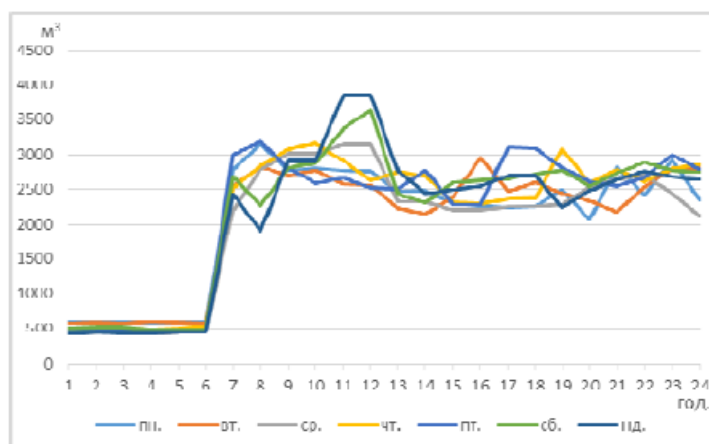
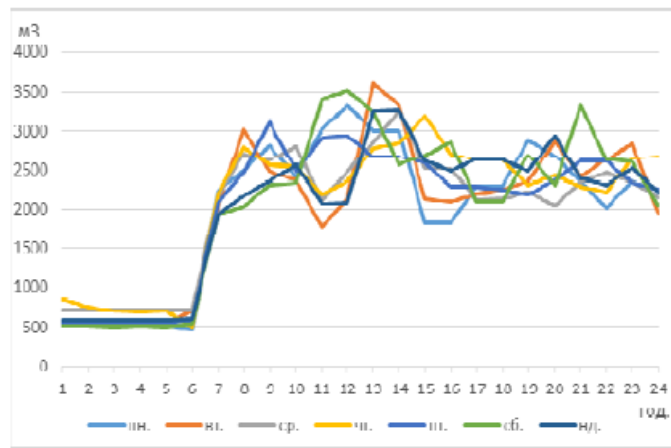


Рисунок 2.3 – Типові графіки ВВ з мережі водозабору за зимовий і літній день 2022 року



а)



б)

Рисунок 2.4 – Типові графіки витрат води з мережі водозабору за 2022 рік: а) літній та б) зимовий періоди

Варіативність обсягів водоспоживання впродовж доби ілюструють ритм повсякденного життя, що складається з робочих годин і періодів відпочинку. Окрім цього, спостерігається тижнева циклічність, а також щорічна повторюваність характеристик графіків [11].

Попри значну кількість досліджень, присвячених підвищенню ефективності роботи систем комунального водопостачання (СКВ), недостатньо уваги приділено аналізу реальних режимів водоспоживання міських водопроводів за допомогою методів математичної статистики. Також бракує робіт, які фокусуються на розробці показників для оцінки нерівномірності графіків водоспоживання (ГВВ).

Водночас, такі дослідження мають практичне значення, оскільки дозволяють оптимізувати режими подачі води та покращити управління насосними станціями (НС), що сприяє підвищенню енергоефективності СКВ.

Один із ефективних способів оптимізації роботи систем водопостачання полягає у створенні бази даних, яка фіксує добові обсяги споживання води. Ця база використовується в рамках системи моніторингу для контролю та аналізу водопостачання. Зібрані дані дозволяють проводити дослідження добових графіків водоспоживання (ГВВ), аналізувати їхні основні

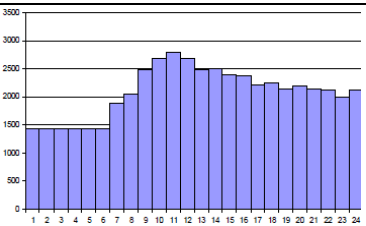
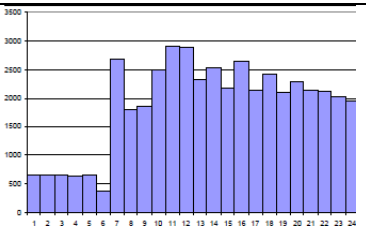
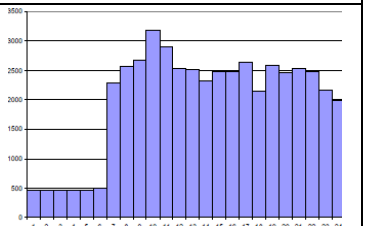
характеристики, а також виявляти схожість графіків з урахуванням впливу зовнішніх факторів, які формують процес споживання води [6], [7], [10].

2.2. Характеристики добового графіка водоспоживання

При вивченні добових графіків витрат води враховують загальноприйняті параметри, які характеризують режим подачі води [10], [18], [20]. До них належать середні, максимальні та мінімальні значення за добу, а також показники, що оцінюють нерівномірність графіка, такі як дисперсія, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт форми, максимуму, заповнення та нерівномірності. Ці параметри є стандартними показниками для опису нерівномірності добових графіків і розглядаються як випадкові величини.

На основі даних КП «Лубни-водоканал» за 2022 рік був проведений аналіз добових графіків водоспоживання. У таблиці 2.1 представлені фрагменти результатів розрахунку ключових параметрів.

Таблиця 2.1 – Основні параметри типових графіків витрат води впродовж доби

Дата замірів	1 січня 2022 р.	2 січня 2022 р.	3 січня 2022 р.
Форма графіку			
Q _{min}	1436,00	380,00	462,00
Q _{max}	2786,00	2911,00	3176,00
Q _{сум}	50076,00	45109,00	47740,00
Q _с	2086,50	1879,50	1989,10
Q _{ск}	2130,90	2038,90	2185,90
D	187565,10	624508,20	821421,80
СКВ	433,10	790,20	906,30
К _ф	1,020	1,080	1,10
К _м	1,330	1,550	1,600
К _з	0,750	0,650	0,630
К _н	0,690	0,200	0,230

Аналіз графіків показав, що добовий цикл чітко поділяється на кілька періодів: основну водоподачу в денний час, фонову – вночі, а також перехідні інтервали. Відмінності в графіках водоспоживання зазвичай найбільш виражені в денні години. Щоб підвищити точність виявлення особливостей графіків, параметри доцільно аналізувати окремо для денного та нічного періодів.

Однак дослідження також виявили можливість існування різних за формою графіків, які мають однакові статистичні характеристики. Це вимагає додаткового аналізу для уточнення особливостей їхньої структури.

Добовий графік водоспоживання (ГВВ) можна зобразити у вигляді кругової часової діаграми, відомої як діаграма радарного типу (ДРТ). Для більш точного аналізу нерівномірності ГВВ доцільно застосовувати морфометричний підхід. Цей метод, що використовується для вивчення форм і розмірів об'єктів, ефективно зарекомендував себе в різних сферах, включаючи контроль якості пластмас, аналіз складу сумішей [106, 107], а також дослідження нерівномірності ГЕН. Морфометрія забезпечує детальну оцінку форми графіків, відкриваючи нові можливості для їх дослідження.

Параметри морфометрії поділяються на дві категорії:

1. Базові параметри: координати x_0, y_0 ; периметр; площа; центр ваги; компактність; випуклість; округлість, а також видовження,
2. Похідні параметри: радіуси вписаного та описаного кіл; ширина та довжина; осі видовження; площа, периметр та компактність випуклості; випуклості; кут осей видовження.

Інтерпретація параметрів ГВВ:

- 1) Площа графіка - відповідає загальному об'єму добового водоспоживання, тоді як збільшення периметра вказує на підвищення нерівномірності витрат;
- 2) Співвідношення осей видовження - відображає розподіл обсягів водоподачі у певні години доби;

3) Округлість - характеризує нерівномірність водоспоживання протягом доби, а компактність - дозволяє оцінювати проміжні значення через лінійну апроксимацію;

4) Видовження - відображає баланс між нічним споживанням води та піковими значеннями;

5) Випуклість - інтегрально враховує максимуми ГВВ, відображені у формі випуклої фігури;

6) Кут видовження, який утворюється між головною віссю ДРТ і віссю абсцис, відображає зміщення максимального водоспоживання у часі. Цей показник корисний для аналізу змін у ритмах життя населення у святкові або вихідні дні.

Зміщення координат центру ваги (x_u, y_u) порівняно з початковими координатами (x_0, y_0) дозволяє оцінити нерівномірність графіка. Це зміщення зростає зі збільшенням піків і провалів.

Таким чином, застосування морфометричного підходу забезпечує багатогранний аналіз форми графіка ГВВ, що дозволяє виявити його ключові особливості та врахувати зміни в режимі водопостачання.

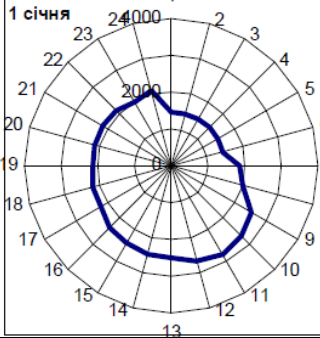
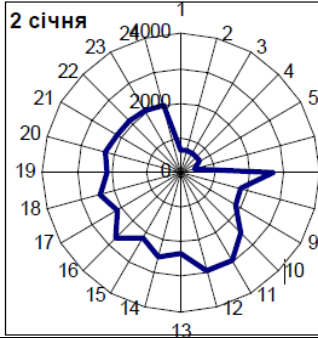
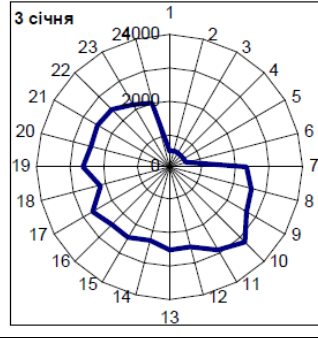
На основі даних КП «Лубни-водоканал» щодо обсягів води, поданої до мережі, було виконано перетворення добових графіків водоспоживання (ГВВ) у діаграми радарного типу. Також були розраховані морфометричні параметри та здійснено аналіз водоподачі [5], [14]. Результати цих розрахунків наведений у табл. 2.2.

Дослідження ГВВ виявило, що у вихідні дні водоспоживання є більш рівномірним, ніж у робочі. Соціальні фактори, такі як святкові дні (Різдво, Пасха, Новий рік), значно впливають на форму графіка, роблячи його менш нерівномірним [5].

Комплексний підхід до аналізу добових графіків, враховуючи пору року та періоди добового циклу, створює можливість визначити приховані закономірності, які показують вплив зовнішніх умов на характер споживання води та режим її подачі. Цей підхід дозволяє також встановити

репрезентативний часовий інтервал (характерний робочий діапазон змінних), необхідний для визначення базового рівня енергоефективності, з подальшим використанням його для порівняння із звітними періодами, що сприятиме контролю споживання ЕЕ.

Таблиця 2.2 – Значення морфометричних параметрів добових ГВВ

Дата замірів	1 січня 2022 р.	2 січня 2022 р.	3 січня 2022 р.
Форма графіку			
Периметр	786,190	888,210	789,500
Площа	40 673,00	32 625,00	32 132,00
Rmin	91,420	48,840	45,280
Rmax	137,480	153,380	138,130
Xс	114,00	112,00	91,00
Yс	111,00	107,00	113,00
Округлість	0,660	0,320	0,330
Компактність	0,830	0,520	0,650
Видовження	0,770	0,610	0,520
Головна вісь видовження	260,410	251,470	260,200
Додаткова вісь видовження	199,80	153,06	135,790
Кут видовження	127,00	131,00	145,00
Випуклість	0,970	0,770	0,850
Периметр випуклості	741,60	760,820	714,970
Площа випуклості	41 346,00	41 528,500	36 894,500
Компактність випуклості	0,940	0,90	0,910

Впровадження СЕМ на постійній основі дозволить накопичувати дані про погодинне водоспоживання. Це стане основою для уточнення параметрів добових ГВВ, виявлення меж варіативності коефіцієнтів нерівномірності та встановлення робочих діапазонів змінних, а також тривалості дії базового рівня енергоефективності. Зібрані дані дадуть змогу створювати профілі характерних днів водоспоживання та планувати ефективні режими електроспоживання, оптимізуючи роботу системи водопостачання.

2.3. Аналізування та групування графіків водоспоживання за кластерами

Метод кластерного аналізу (КА) ґрунтується на визначенні схожості об'єктів або їх характеристик. Для кількісної оцінки подібності вводиться поняття метрики [12]. Рівень схожості чи відмінності між об'єктами визначається за допомогою обчислення метричних відстаней [17]-[22], які можна оцінювати як між об'єктами вхідної матриці, так і між ними та прототипами кластерів. Кластери формуються шляхом об'єднання найбільш схожих об'єктів, при цьому координати прототипів заздалегідь не задані та визначаються в процесі кластеризації.

Для виконання кластерного аналізу було обрано ієрархічний агломеративний метод. Цей підхід дозволяє побудувати класифікаційне дерево для n -об'єктів, поступово об'єднуючи їх у кластери на основі заданого критерію схожості [112]. Результатом такого аналізу є дендрограма — графічне представлення зв'язків між об'єктами у вигляді дерева кластеризації.

Ключовим етапом кластерного аналізу є підбір критерію оптимальності та стратегії об'єднання кластерів. Як критерії оптимальності часто використовують різні метрики, наприклад, відстань Махаланобіса, Евклідову, зважену Евклідову, або Хеммінгову [9]. Найбільш популярними стратегіями об'єднання є: "найближчий сусід" (одиничний зв'язок), "дальній сусід" (повний зв'язок), попарне середнє (зважене або незважене), центроїдний методи та метод Ворда [19]. У цьому аналізі було використано Евклідову

відстань як міру схожості, а для об'єднання кластерів обрано метод повного зв'язку.

Базуючись на тому, що ієрархічні методи КА не визначають оптимальну кількість кластерів, одним із завдань є аналіз отриманих результатів і вибір найкращого розподілу даних. Для цього дослідник зазвичай аналізує дендрограму, яка ілюструє процес кластеризації. Додатково можуть використовуватися математичні критерії якості кластеризації [13].

Основними характеристиками кластерів є внутрішня однорідність (щільність) і зовнішня ізольованість. Оптимальне розбиття визначається як максимізація щільності об'єктів у межах кластерів або мінімізація середньоквадратичної відстані від центру кластера до його об'єктів. Критерій мінімізації міжкластерної відстані, який виконується на кожному етапі агломеративного процесу, також відображає якість класифікації та ступінь однорідності кластерів [12].

Для перевірки достовірності кластеризації застосовують такі методи: тести значущості для ознак, повторний відбір даних, тести для незалежних характеристик, а також метод Монте-Карло. Проте стандартні статистичні пакети часто не включають оцінку якості кластеризації, що ускладнює аналіз при великій кількості даних. Тому ієрархічний КА використовувався як попередній етап для визначення кількості кластерів, після чого було застосовано метод «k-means». Цей ітеративний алгоритм базується на мінімізації внутрішньокластерної дисперсії, що робить його ефективним для великих вибірок.

Кластерний аналіз був проведений із використанням програмного забезпечення Statistica 6.0.

Етап 1: Визначення впливу сезонності

Візуальний огляд побудованої дендрограми (рис. 2.6) дозволив ідентифікувати п'ять основних класів графіків витрати води (ГВВ):

1. Кластер "літо" — включає графіки, що відповідають періоду виконання профілактичних робіт у системах гарячого водопостачання та тепlopостачання.

2. Кластер "зима" — містить ГВВ, що характеризують опалювальний сезон.

3. Кластер "весна-літо-осінь" — охоплює графіки, які відображають споживання води протягом весняно-літньо-осіннього періоду.

4. Кластер "нерегулярні дні" — об'єднує ГВВ, що належать до різних сезонів і місяців.

5. Особливий клас — включає ГВВ, які відповідають святковим та вихідним дням (зокрема, першому січня).

Такий підхід до кластеризації дозволяє виявити закономірності у використанні води залежно від сезонних і нестандартних чинників.

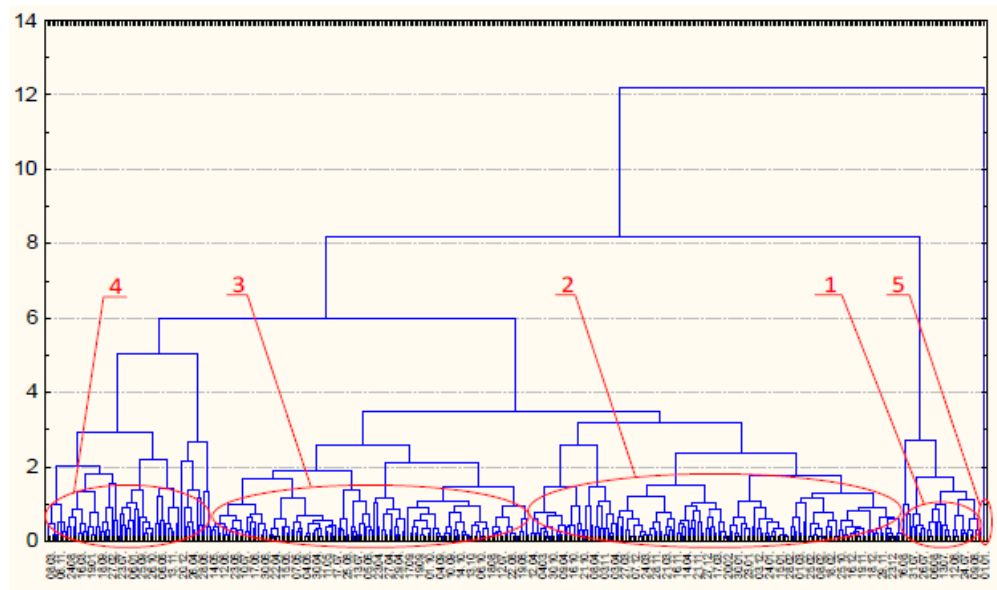


Рисунок 2.6 – Класифікації графіків витрати води впродовж доби, що відображає вплив сезонності

Незважаючи на певні обмеження кластерного аналізу (КА), такі як залежність кількості та складу кластерів від обраних методів об'єднання й оцінки коефіцієнтів відстані, результати аналізу дозволяють зробити наступні висновки [7]:

- Чітко спостерігається тенденція групування добових ГВВ, що відповідають конкретній порі року, у межах одного кластеру. Це підтверджує значний вплив сезонності на зміну характеру споживання води.

- Виділяється кластер із назвою «Нерегулярні дні», який об'єднує графіки витрати води, характерні для різних сезонів і днів тижня. Його поява може бути пов'язана із соціальними чинниками (наприклад, релігійними святами чи підготовкою до них), впливом погодних умов (спека, посуха) або аваріями у водопровідній мережі, які залишилися непоміченими. Для точнішого розуміння природи цього кластеру необхідно врахувати дані про погодні умови.

Етап 2: Вплив соціальних факторів

Деталізований розгляд результатів кластеризації свідчить про існування певних закономірностей у групуванні об'єктів усередині кожного кластеру. Через велику кількість класифікованих об'єктів, що ускладнює інтерпретацію, подальший аналіз виконували з урахуванням висновків першого етапу.

Для демонстрації було обрано значення добових ГВВ другого кластеру, що відповідають зимовому періоду. Аналіз побудованої дендрограми (рис. 2.7) показує, що соціальні фактори, такі як зміна ритму споживання води населенням у вихідні та святкові дні.

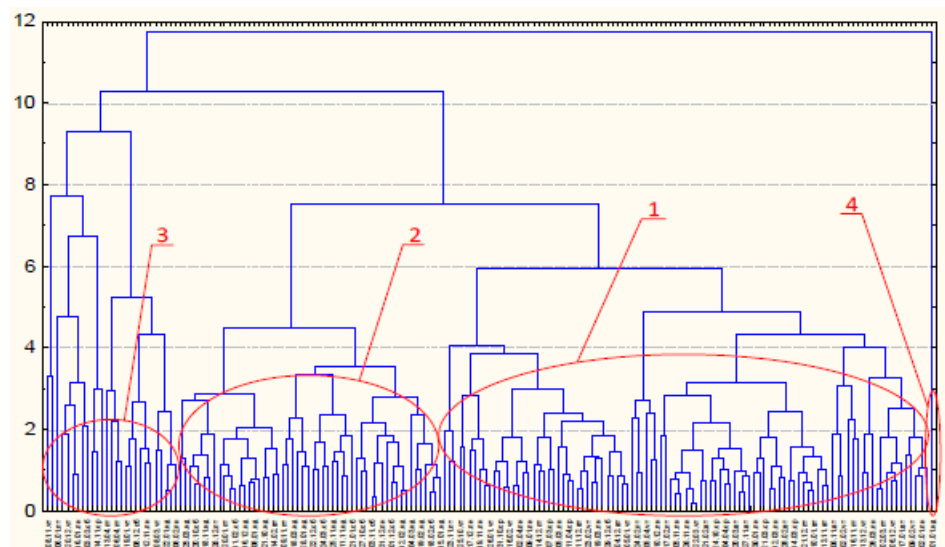


Рисунок 2.7 –Класифікація добових графіків водоспоживання у зимовий період

У результаті класифікації було виділено чотири групи добових ГВВ (рис.2.8):

1. Робочі дні – клас включає добові графіки, характерні для буднів.
2. Вихідні та святкові дні – клас містить графіки, що відповідають неробочим дням.
3. Нерегулярні дні – до цієї групи належать графіки різного типу, які можуть бути зумовлені соціальними факторами або технічними збоями, такими як аварії чи витoki у системі.
4. Перше січня – клас окремо виділяє графік, що відповідає новорічному дню.

На обох етапах класифікації ГВВ, графік першого січня завжди формував окремий клас. Це додатково підтверджує вплив соціальних факторів на характер витрат води з мережі.

Кластеризацію виконували за методом k -середніх. З огляду на те, що ієрархічний аналіз показав існування кластеру з єдиним ГВВ (що відповідав першому січня), цей кластер не враховували у подальшому аналізі. У результаті методу k -середніх було визначено, до якого кластеру належить кожен добовий графік водоспоживання. На першому етапі класифікацію проводили за сезонами, що дало 4 кластери, а на другому – за типом дня, що дозволило виділити 3 кластери.

Під час аналізу результатів кластеризації перевіряли обґрунтованість отриманих кластерів, точність методики, однорідність характеристик об'єктів у межах кожного кластеру, а також їх значущість для групування об'єктів. Результати дисперсійного аналізу показали, що змінна x_3 (виокремлена як інформативна на першому етапі) та змінні x_6 і x_{15} (визначені на другому етапі) мають низький вплив на класифікацію, тому їх було вилучено з подальшого аналізу.

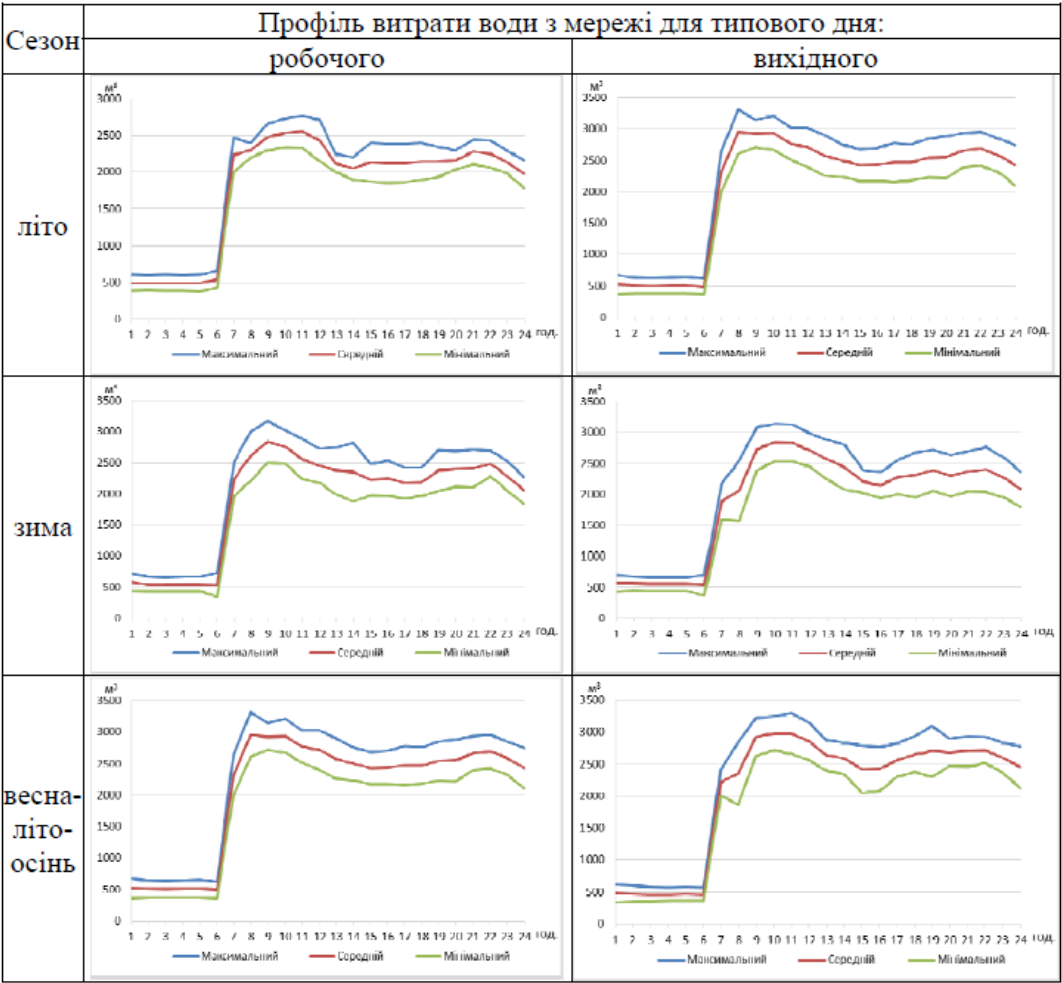


Рисунок 2.8 – Типові добові ГВВ

Метод k-середніх підтвердив припущення про відмінності у добових ГВВ залежно від сезонів і типів днів. Це дозволило виділити типові групи добових графіків, на основі яких сформували навчальну вибірку для подальшого створення правил визначення належності ГВВ до конкретного кластеру (рис.2.9).

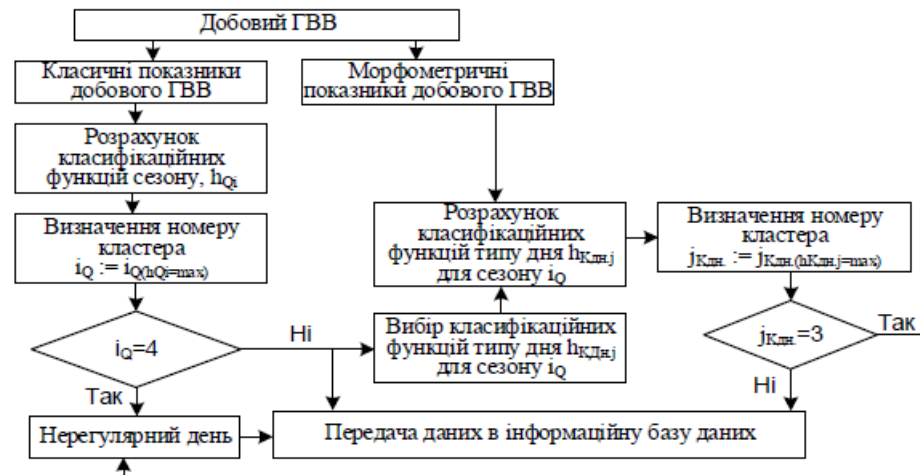


Рисунок 2.9 – Алгоритм кластеризації ГВВ

При аналізі класифікації виявлено випадки, які не відповідали передбачуваній інтерпретації, тобто графіки відносилися до кластерів, що не відповідали їх логічній належності (наприклад, за сезоном чи типом дня). Це викликало необхідність уточнення отриманих результатів кластеризації.

Висновки до розділу 2

1. Ефективність електроспоживання в системі комунального водопостачання формується під впливом багатофакторного середовища, що включає внутрішньосистемні властивості, організаційні механізми та зовнішні детермінанти. Визначальними чинниками виступають відносно статичні біологічні та технічні параметри, а також динамічне водоспоживання, яке має стохастичну природу та нерівномірну інтенсивність протягом календарного та добового циклів.

2. Проведений аналіз графіків водовикористання засвідчив наявність стійкої повторюваності добових профілів упродовж тижневого та сезонного періодів. Для комплексного дослідження зовнішніх впливів необхідним є глибокий аналіз фактичного режиму водоспоживання через призму створеної моніторингової бази даних. Принципового значення набуває застосування математико-статистичних методів для виявлення латентних закономірностей з урахуванням сезонної динаміки та внутрішньодобових інтервалів.

3. Методологія дослідження передбачає диференційований підхід до вивчення зовнішніх чинників: класичні показники нерівномірності використовуються для діагностування сезонних трансформацій, а морфометричні індикатори - для ідентифікації соціальних впливів.

4. Інструментарієм дослідження обрано теорію розпізнавання образів, зокрема методи дискримінантного та кластерного аналізу. Такий підхід дозволяє здійснити багатовимірну кластеризацію графіків водовикористання, забезпечити їх типологізацію за сезонними та соціальними характеристиками, а також розробити алгоритми класифікації нових емпіричних даних.

5. Отриманий дослідницький інструментарій створює методологічне підґрунтя для прецизійного моделювання електроспоживання, коректного планування енергетичних режимів та формування базового рівня електроспоживання насосних станцій.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВОГО РІВНЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

3.1 Аналіз факторів, що впливають на електроспоживання НС

Контроль енергоефективності, заснований на визначенні БРЕ, потребує врахування всіх ключових факторів, які значно впливають на обсяги споживаної енергії.

Споживання ЕЕ НС залежить від багатьох змінних, серед яких основними є: кількість води, що перекачується або передається споживачам, рівень створюваного напору, надлишковий тиск у певних точках системи, технічні характеристики обладнання, такі як продуктивність та ККД насосів. Додатково враховуються соціальні та сезонні чинники, а також умови експлуатації.

Обсяг ЕЕ, спожитої станцією з паралельною роботою кількох насосів, визначається залежно від таких параметрів, як тривалість роботи кожного насоса (t_i) та його подача (Q_i):

$$W_{nc} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i \cdot H_i(Q_i) \cdot t_i}{\eta_i(Q_i)}, \quad (3.3)$$

До уваги беруться також ККД насосів за поточного навантаження, а також інші технічні характеристики трубопровідної мережі та системи керування гідравлічними параметрами.

Енергоспоживання НС залежить від об'єму перекачуваної води та рівня напору, який створюється насосами. При цьому подача насосів визначає загальну продуктивність станції, а напірні характеристики насосів впливають на загальний ККД станції:

$$W_{nc} = f\{Q, H_{nc}, \eta_{nc}\}. \quad (3.4)$$

Для ефективної роботи станції необхідно забезпечити, щоб обсяг води, поданої в мережу, відповідав поточним потребам у споживанні, тоді як рівень напору має компенсувати втрати та відповідати розрахунковим значенням у місцях забору води.

Оцінка енергетичної ефективності роботи станції базується на узагальненому ККД, який відображає співвідношення між гідравлічною енергією на виході та витраченими енергоресурсами:

$$\eta_{\text{нс}} = \frac{Q_{\Sigma \text{нс}} \cdot H_{\text{нс}}}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i \cdot H_i(Q_i)}{\eta_i(Q_i)}}. \quad (3.5)$$

Для станцій, які здійснює транспортування рідини в діапазоні від мінімального до максимального значення продуктивності, криву ефективності можна аналізувати відповідно до інтенсивності водоподачі:

$$\eta_{\text{нс}} = F(Q). \quad (3.6)$$

Критерій оцінки раціональності електроенергетичного навантаження гідравлічної станції, який відображає взаємозв'язок між графіком водоспоживання та витратами електричної потужності:

$$K_{\text{еф}}^{\text{НС}} = \frac{\sum_i Q_i H_{\text{необх}} t_i}{\sum_i Q_i H_{\text{нас}} t_i \eta_{\text{НАі}}}, \quad (3.7)$$

де i – позначення часової дискретності;

Q – об'єм транспортованої рідини;

$H_{\text{необх}}$ - проєктний гідравлічний напір;

$H_{\text{нас}}$ - фактичний тиск насосного агрегату;

η_{HA} - сумарний коефіцієнт корисної дії технологічного комплексу, що інтегрує показники ефективності насосного механізму, електродвигуна та трансмісійної системи:

$$\eta_{HA} = \eta_{нас} \cdot \eta_n \cdot \eta_{дв}, \quad (3.8)$$

або

$$\eta_{HA} = \eta_{нас} \cdot \eta_n \cdot \eta_{дв} \cdot \frac{H_{необх}}{H_{нас}}. \quad (3.9)$$

Відтак, електричні потужності, спрямовані на генерування понаднормативного тиску, де різниця між розрахунковим та фактичним напором ($\Delta H = H_{потр} - H_{реал}$), не вважаються продуктивними. Можна констатувати, що для гідравлічної станції з незмінною конфігурацією насосних агрегатів, функціонуючих у штатному робочому діапазоні відповідно до попередньо встановленого експлуатаційного регламенту:

$$K_{эф}^{HC} = F(\Delta H_{\Sigma}), \quad (3.10)$$

З метою оцінки результативності технологічного процесу та ефективності контролю водопостачання в динамічних умовах змінного водоспоживання пропонується запровадити індикатор раціональності енергетичних витрат, який враховує нецільові електроенергетичні втрати через механізми регулювання водного потоку: використання засувних механізмів або байпасних ліній для нерегульованих насосних агрегатів:

$$K_{эф}^{HHA} = \frac{Q_{факт}}{\sum_{i=1}^n Q_{ном.i} \cdot T_{факт.i}} \quad (3.11)$$

де $Q_{факт}$ - реальна продуктивність гідравлічної системи; $Q_{ном.i}$ - номінальна потужність локального насосного механізму; $T_{факт.i}$ - фактична тривалість

експлуатації окремого агрегату впродовж розрахункового періоду; k – сумарна чисельність робочих насосних пристроїв.

Враховуючи попередній аналіз, електроенергетичне навантаження НС з нерегульованими НА можна інтерпретувати як:

$$W_{nc} = f\{Q, K_{ef}^{HNA}, \Delta H_{\Sigma}\} \quad (3.12)$$

Сучасні підходи до забезпечення енергоефективності в системах водоподачі передбачають впровадження частотно-регульованих насосних агрегатів (зазвичай, одного на групу з трьох-чотирьох нерегульованих). Зміна частоти обертання робочого колеса РНА шляхом регулювання обертів ЕД дозволяє плавно варіювати як подачу, так і напір у широкому діапазоні, що дає змогу оперативно реагувати на випадкові коливання споживання води з мережі.

Енергоспоживання НС, яка має у своєму складі як нерегульовані, так і регульовані насосні агрегати, формується на основі кількох чинників:

$$W_{nc} = W_{HNA} + W_{RNA} \quad (3.13)$$

Для нерегульованих агрегатів (ННА) споживання ЕЕ визначається їхньою подачею, тиском і ККД, які впродовж доби залишаються сталими, а також тривалістю їх роботи. У випадку РНА споживання ЕЕ залежить від часу роботи, величини подачі, створюваного тиску та ККД, що змінюється залежно від подачі.

Загальне значення енергоспоживання визначають:

$$W_{nc} = \sum_i^m \frac{\rho \cdot g \cdot H_i(q) \cdot Q_i \cdot t_i}{\eta_i(Q_i)} + t \cdot \sum_{j=0}^n \frac{\rho \cdot g \cdot H(q_j) \cdot q_{vj}}{\eta_{RNA}(q_{vj})} \cdot f_j(q_{vj}), \quad (3.14)$$

де t_i , Q_i — тривалість роботи та значення подачі i -го ННА відповідно;

m — загальна кількість працюючих ННА;

$\eta_i(Q_i)$ — значення ККД i -го ННА, що відповідає витраті Q_i .

Для РНА енергоспоживання визначається через густину розподілу випадкових змін витрати на РНА:

$$q_{vj} = q_j - \sum_i^m Q_{iHHA}, \quad (3.15)$$

Для спрощення процесу моделювання доцільно застосовувати методи, що базуються на морфометричному аналізі нерівномірності добового ГВВ, з урахуванням результатів аналізу їх подібностей. У цьому випадку енергоспоживання НС із комбінованим регулюванням з використанням морфометричних характеристик, можна подати у вигляді:

$$W_{nc} = f\{Q, K_{ef}^{HHA}, \Delta H_{\Sigma}, M_1, M_2, M_3, M_4\}, \quad (3.16)$$

Для створення ММ електроспоживання ключовим етапом є дослідження взаємозалежності між вхідними та вихідними змінними. Для визначення характеру цього взаємозв'язку застосовувався метод кореляційного аналізу:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^n (x_{il} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jl} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{l=1}^n (x_{il} - \bar{x}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=1}^n (x_{jl} - \bar{x}_j)^2}}; \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, m, \quad (3.17)$$

Коефіцієнти кореляції варіюються в межах від -1 до +1, відображаючи силу та напрямок взаємозалежності між змінними. Якщо коефіцієнт кореляції дорівнює 0, це вказує на відсутність статистично значущого зв'язку між розглянутими змінними.

Між споживанням ЕЕ (W) і коефіцієнтом ефективності водоподачі ННА (K_{ef}^{HHA}), а також морфометричними параметрами зазвичай виявляється слабка кореляція, в деяких випадках — помірна (табл.3.5).

Таблиця 3.1 – Результати обчислення попарних коефіцієнтів кореляції
для робочого зимового дня

	W	Q	K_{ef}	ΔH_{Σ}	M_4	M_3	M_2	M_1
W	1,000	0,810	-0,190	0,890	0,170	0,140	0,330	-0,140
Q	0,810	1,000	0,950	0,190	0,110	0,090	0,160	0,030
K_{ef}	-0,190	0,950	1,000	0,190	0,110	0,090	0,160	0,030
ΔH_{Σ}	0,890	0,190	0,190	1,000	0,170	0,040	0,330	-0,040
M_1	0,170	0,110	0,110	0,170	1,000	0,490	0,480	0,480
M_2	0,140	0,090	0,090	0,040	0,490	1,000	0,060	0,490
M_3	0,330	0,160	0,160	0,330	0,480	0,060	1,000	0,010
M_4	-0,140	0,030	0,030	-0,040	0,480	0,490	0,010	1,000

Таблиця 3.2 – Результати обчислення попарних коефіцієнтів кореляції
для вихідного зимового дня

	W	Q	K_{ef}	ΔH_{Σ}	M_4	M_3	M_2	M_1
W	1,000	0,760	-0,160	0,880	0,230	0,230	0,280	-0,280
Q	0,760	1,000	0,960	0,150	0,360	0,200	0,110	0,140
K_{ef}	-0,160	0,960	1,000	0,150	0,360	0,210	0,110	0,140
ΔH_{Σ}	0,880	0,150	0,150	1,000	0,230	-0,220	0,090	-0,280
M_1	0,230	0,360	0,360	0,230	1,000	0,280	0,470	0,250
M_2	0,230	0,200	0,210	-0,220	-0,280	1,000	-0,040	0,440
M_3	0,280	0,110	0,110	0,090	0,470	-0,040	1,000	-0,080
M_4	-0,280	0,140	0,140	-0,280	0,250	0,440	-0,080	1,000

Таблиця 3.3 – Результати обчислення попарних коефіцієнтів кореляції
для робочого дня (осінь-весна)

	W	Q	K_{ef}	ΔH_{Σ}	M_4	M_3	M_2	M_1
W	1,000	0,890	-0,130	0,910	0,140	0,150	0,210	-0,180
Q	0,890	1,000	0,950	0,190	0,140	0,140	0,240	0,140
K_{ef}	-0,130	0,950	1,000	0,130	0,120	0,170	0,300	0,150
ΔH_{Σ}	0,910	0,190	0,130	1,000	0,040	0,040	0,100	-0,070
M_1	0,140	0,140	0,120	0,040	1,000	0,210	0,220	0,220
M_2	0,150	0,140	0,170	-0,040	0,210	1,000	0,110	0,450
M_3	0,210	0,240	0,300	0,100	0,220	0,110	1,000	0,030
M_4	-0,180	0,140	0,150	-0,070	0,220	0,450	0,030	1,000

Таблиця 3.4 – Результати обчислення попарних коефіцієнтів кореляції
для вихідного дня (осінь-весна)

	W	Q	K_{ef}	ΔH_{Σ}	M_4	M_3	M_2	M_1
W	1,000	0,710	-0,370	0,780	0,310	0,150	0,220	-0,120
Q	0,710	1,000	0,980	0,500	0,170	0,090	0,320	0,090
K_{ef}	-0,370	0,980	1,000	0,480	-0,160	0,080	0,300	0,100
ΔH_{Σ}	0,780	0,500	0,480	1,000	-0,310	0,150	0,220	0,120
M_1	0,310	0,170	-0,160	-0,310	1,000	0,370	0,250	0,480
M_2	0,150	0,090	0,080	0,150	0,370	1,000	0,250	0,440
M_3	0,220	0,320	0,300	0,220	0,250	0,250	1,000	0,230
M_4	-0,120	0,090	0,100	0,120	0,480	0,440	0,230	1,000

Таблиця 3.4 – Результати обчислення попарних коефіцієнтів кореляції
для робочого дня (літній сезон)

	W	Q	K_{ef}	ΔH_{Σ}	M_4	M_3	M_2	M_1
W	1,000	0,850	-0,150	0,920	0,270	0,140	0,110	-0,120
Q	0,850	1,000	1,000	0,040	0,030	0,020	0,180	0,020
K_{ef}	-0,150	1,000	1,000	0,050	0,030	0,020	0,180	0,020
ΔH_{Σ}	0,920	0,040	0,050	1,000	0,070	0,240	0,020	0,120
M_1	0,270	0,030	0,030	0,070	1,000	0,390	0,340	0,420
M_2	0,140	0,020	0,020	0,240	0,390	1,000	0,080	0,470
M_3	0,110	0,180	0,180	0,020	0,340	0,080	1,000	-0,080
M_4	-0,120	0,020	0,020	0,120	0,420	0,470	-0,080	1,000

Таблиця 3.4 – Результати обчислення попарних коефіцієнтів кореляції
для вихідного дня (літній сезон)

	W	Q	K_{ef}	ΔH_{Σ}	M_4	M_3	M_2	M_1
W	1,000	0,710	-0,230	0,950	0,450	0,280	0,130	-0,350
Q	0,710	1,000	0,660	0,410	0,100	0,110	0,240	0,170
K_{ef}	-0,230	0,660	1,000	0,030	-0,150	0,030	-0,320	-0,100
ΔH_{Σ}	0,950	0,410	0,030	1,000	-0,460	-0,370	-0,130	-0,350
M_1	0,450	0,100	-0,150	-0,460	1,000	0,230	0,460	-0,230
M_2	0,280	0,110	0,030	-0,370	0,2300	1,000	0,330	0,470
M_3	0,130	0,240	-0,320	-0,130	0,460	0,330	1,000	-0,420
M_4	-0,350	0,170	-0,100	-0,350	-0,230	0,470	-0,420	1,000

Таблиця 3.5 – Результати обчислення коефіцієнтів кореляції

Сезон	День тижня	W	Q	ΔH	$K_{\text{эф}}^{\text{HHA}}$	M_4	M_3	M_2	M_1
Літній	Роб.	1,000	0,850	0,920	-0,150	0,270	0,140	0,110	-0,120
	Вих.	1,000	0,710	0,950	-0,230	0,450	0,2800	0,130	-0,350
Весна-осінь	Роб.	1,000	0,890	0,910	-0,130	0,140	0,150	0,210	-0,180
	Вих.	1,000	0,710	0,780	-0,370	0,310	0,150	0,220	-0,120
Зимовий	Роб.	1,000	0,810	0,890	-0,190	0,170	0,140	0,330	-0,140
	Вих.	1,000	0,760	0,880	-0,160	0,230	0,230	0,080	-0,280

Отримані дані слугують базою для визначення набору змінних, які значно впливають на споживання ЕЕ, і на їх основі формується модель електроспоживання.

3.2. Розробка моделей базового рівня електроспоживання із застосуванням методів самоорганізації

Моделювання споживання ЕЕ було проведено у програмі GMDH Shell DS 3.8.2. Цей інструмент дозволяє проводити структурно-параметричну оптимізацію математичних моделей, що описують закономірності багатопараметричних даних об'єкта. Для цього застосовувався комбінаторний алгоритм, що передбачає перебір усіх можливих моделей з обраного базису з метою визначення найкращих варіантів згідно з обраним критерієм відбору. Пошук моделей з оптимальним рівнем складності здійснювався серед таких класів опорних функцій:

1. Клас лінійних моделей, що описують лінійні функції (кластер №1):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_i \quad (3.31)$$

2. Клас моделей лінійного типу з урахуванням взаємодії (оскільки коефіцієнти кореляції між змінними не дорівнюють нулю, можна припустити, що ці змінні взаємодіють одна з одною) (кластер №2):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} x_i x_j \quad (3.32)$$

3. Клас моделей нелінійного типу: $p=2$ (кластер №3); $p=3$ (кластер №5):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_i^p \quad (3.33)$$

4. Клас поліноміального типу з урахуванням взаємодії – поліноміальні функції: $p=2$ (кластер №4); $p=3$ – (кластер №6):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_i^p + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} x_i^p x_j^q \quad (3.34)$$

Незалежно від типу та методу створення ММ, питання щодо її можливості застосування для прогнозування витрати ЕЕ на певний майбутній момент може бути вирішено лише після проведення верифікації. Це включає перевірку точності побудови моделі, оцінку її адекватності та підтвердження доцільності її використання в подальшому. Основні характеристики ММ електроспоживання подано у табл. 3.6.

Оскільки оптимальний вибір моделі в межах кожного класу опорних функцій здійснювався за зовнішнім критерієм регулярності з подальшим визначенням мінімального зсуву, значення цих критеріїв для всіх моделей наближаються до нуля (див. табл. 3.6). Коефіцієнт детермінації використовують як загальну міру ступеня статистичної залежності між однією випадковою величиною та кількома іншими змінними. Чим ближчий його результат до одиниці, тим точніше модель описує реальні дані. Зазвичай модель вважається адекватною, якщо R^2 перевищує 0,75. Також оптимальною вважається модель з найнижчим значенням критерію ВІС.

Таблиця 3.6 – Характеристика ММ електроспоживання

Кластер за сезоном	Кластер за типом дня	Показники	Кластер					
			№ 1,0	№ 2,0	№ 3,0	№ 4,0	№ 5,0	№ 6,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9
літо	робочий	$\Delta^2(A)$	0,000910	0,000190	0,000890	0,000930	0,00120	0,000180
		$\Delta^2(B)$	0,00160	0,00520	0,00270	0,00290	0,00430	0,00990
		nzc	0,000590	0,000230	0,000580	0,01850	0,000870	0,000170
		δ^2	0,000010	0,00110	0,0000270	0,0000310	0,000210	0,00180
		R	0,99980	0,99420	0,99920	0,99920	0,99820	0,99780
	вихідний	Складність	4,0	7,0	4,0	4,0	4,0	4,0
		$\Delta^2(A)$	0,000430	0,000310	0,000840	0,000320	0,00220	0,0000810
		$\Delta^2(B)$	0,00660	0,00190	0,02080	0,00180	0,04410	0,00950
		nzc	0,000160	0,000140	0,00120	0,0001390	0,00430	0,0000360
		δ^2	0,00660	0,00180	0,02080	0,00170	0,04410	0,00540
		R	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Продовження табл.3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
зима	робочий	Складність	7,0	11,0	6,0	11,0	6,0	19,0
		$\Delta^2(A)$	0,01660	0,01560	0,03230	0,01470	0,07790	0,01490
		$\Delta^2(B)$	0,00370	0,00830	0,04530	0,00720	0,17770	0,05330
		$n_{зс}$	0,00090	0,0	0,00140	0,01820	0,04880	0,02250
		δ^2	0,000030	0,0000045	0,000310	0,0000087	0,00060	0,00160
		R	0,99980	0,99920	0,99780	0,99940	0,9920	0,99610
	вихідний	Складність	4,0	11,0	4,0	19,0	4,0	10,0
		$\Delta^2(A)$	0,00060	0,00040	0,00430	0,00010	0,01660	0,000380
		$\Delta^2(B)$	0,11980	0,12270	0,21290	0,14940	0,46470	0,12390
		$n_{зс}$	0,0000260	0,0000180	0,000230	0,000010	0,00089	0,00370
		δ^2	0,02220	0,02670	0,00170	0,03950	0,00610	0,02730
		R	0,98930	0,98930	0,98070	0,98760	0,96470	0,98910
весна- осінь	робочий	Складність	4,0	8,0	5,0	13,0	4,0	5,0
		$\Delta^2(A)$	0,000340	0,000310	0,00180	0,000280	0,00610	0,000340
		$\Delta^2(B)$	0,000470	0,00060	0,00620	0,000720	0,02230	0,000450
		$n_{зс}$	0,00410	0,0000330	0,01010	0,000027	0,000610	0,00410
		δ^2	0,000050	0,0000640	0,000930	0,000070	0,00290	0,000053
		R	0,99980	0,999780	0,99770	0,99970	0,99220	0,99980
	вихідний	Складність	5,0	12,0	6,0	11,0	5,0	11,0
		$\Delta^2(A)$	0,000140	0,0000510	0,000490	0,000033	0,00130	0,0000320
		$\Delta^2(B)$	0,00060	0,000710	0,000350	0,01060	0,00060	0,00110
		$n_{зс}$	0,0000290	0,0000180	0,000140	0,000011	0,000410	0,000010
		δ^2	0,00000020	0,00000040	0,0000050	0,001600	0,000130	0,0000017
		R	0,99620	0,99560	0,99780	0,95440	0,99750	0,99280

Для точнішого вибору моделі електроспоживання варто використовувати також критерій точності короткострокового прогнозу $\Delta^2(C)$. Отже, цільові функції для багатокритеріального вибору найкращої моделі виглядатимуть таким чином:

$$\begin{aligned} \Delta^2(B) &\rightarrow \min; \quad n_{zc} \rightarrow \min; \\ R^2 &\rightarrow \max; \quad BIC \rightarrow \min; \quad \Delta^2(C) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Ключовою умовою для вибору оптимальної моделі є наближення значень усіх критеріїв до нуля, за винятком коефіцієнта детермінації, який має прагнути до одиниці. Тому була введена величина, обернена коефіцієнту детермінації: $Toler = 1 - R^2$. Крім того, всі часткові критерії були виражені у відносних величинах, порівняних із максимальними значеннями в групі вибраних моделей. Це дало змогу представити набір критеріїв, що характеризують якість ММ та точності прогнозу у вигляді ДРТ з додатковим обчисленням площі цієї діаграми (табл. 3.8).

Таблиця 3.7 – Розрахункові значення критеріїв адекватності ММ

Кластер за сезоном	Кластер за типом дня	Клас функції	R^2	$\Delta^2(B)$	BIC	n_{zc}	$\Delta^2(C)$
1	2	3	4	5	6	7	8
Літній сезон	робочий	1	0,99640	0,00160	0,0570	0,000590	0,00160
		2	0,99920	0,00520	0,02250	0,000230	0,00410
		3	0,99620	0,00270	0,05940	0,000580	0,00260
		4	0,99620	0,00290	0,07340	0,01850	0,00280
		5	0,99480	0,00430	0,08390	0,000870	0,0040
		6	0,99920	0,00990	0,020	0,000170	0,00770
	вихідний	1	0,99940	0,00660	0,01530	0,000160	0,00000002
		2	0,99960	0,00190	0,01350	0,000140	0,000110
		3	0,99860	0,02080	0,03260	0,00120	0,00000020
		4	0,99960	0,00180	0,01350	0,0001390	0,000130
		5	0,99640	0,04410	0,08820	0,00430	0,000010
		6	0,99980	0,00950	0,00330	0,000036	0,00410

Продовження табл.3.7

1	2	3	4	5	6	7	8
Зимовий сезон	робочий	1	0,99420	0,00370	13,57700	0,00090	0,00370
		2	0,9950	0,00830	11,91610	0,00	0,00830
		3	0,9900	0,04530	21,89340	0,00140	0,04370
		4	0,99520	0,00720	11,55240	0,01820	0,00720
		5	0,97910	0,17770	46,56460	0,04880	0,17260
		6	0,99520	0,05330	11,17610	0,02250	0,05050
	вихідний	1	0,9998	0,11980	0,13350	0,0000260	0,10660
		2	0,9998	0,12270	0,11140	0,0000180	0,10490
		3	0,9988	0,21290	1,16340	0,000230	0,21280
		4	0,9998	0,14940	0,03980	0,000010	0,11540
		5	0,9956	0,46470	4,50620	0,000890	0,45480
		6	0,9998	0,12390	0,10240	0,00370	0,10500
Осінньо-весняний сезон	робочий	1	0,9992	0,000470	0,07460	0,00410	0,000550
		2	0,9992	0,00060	0,077400	0,0000330	0,0004300
		3	0,9966	0,00620	0,36370	0,01010	0,00550
		4	0,9994	0,000720	0,0820	0,000027	0,000670
		5	0,9892	0,02230	1,09160	0,000610	0,01990
		6	0,9992	0,000450	0,09710	0,00410	0,000410
	вихідний	1	0,9998	0,00060	0,01820	0,0000290	0,00060
		2	0,9998	0,000710	0,00560	0,0000180	0,00070
		3	0,9992	0,000350	0,06090	0,000140	0,000340
		4	0,9998	0,01060	0,005050	0,0000110	0,00890
		5	0,9978	0,00060	0,14990	0,000410	0,000470
		6	0,9998	0,00110	0,005050	0,000010	0,001100

Таблиця 3.8. – Розраховані значення критеріїв адекватності моделей (нормалізовані)

Кластер за сезоном	Кластер за типом дня	Клас функції	R ²	$\Delta^2(C)$	$\Delta^2(B)$	n_{zc}	ВІС	Площа ДРТ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Літній сезон	робочий	1	0,99720	0,20780	0,16160	0,03190	0,67940	0,42280
		2	1,00	0,53250	0,52520	0,01240	0,26820	0,33750
		3	0,9970	0,33770	0,27270	0,03130	0,7080	0,5120
		4	0,9970	0,36360	0,29290	1,0	0,87480	1,22990
		5	0,99560	0,51950	0,43430	0,0470	1,00	0,85970
		6	1,00	1,00	1,00	0,00920	0,23838	0,71130
	вихідний	1	0,99960	0,00000 48	0,14970	0,03720	0,17350	0,10280
		2	0,99980	0,02680	0,04310	0,03250	0,15310	0,09140
		3	0,99880	0,00049 0	0,47160	0,27910	0,36960	0,37080
		4	0,99980	0,03170	0,04080	0,03230	0,15310	0,09160
		5	0,99660	0,00240	1,00	1,00	1,00	1,42540
		6	1,00	1,00	0,21540	0,00840	0,03740	0,14290

Продовження табл.3.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зимовий сезон	робочий	1	0,29160	0,27750	0,02080	0,01840	0,02140	0,04430
		2	0,25590	0,23920	0,04670	0,00	0,04810	0,0360
		3	0,47020	0,46890	0,25490	0,02870	0,25320	0,2020
		4	0,24810	0,22970	0,04050	0,37290	0,04170	0,08070
		5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,37770
		6	0,240	0,22970	0,29990	0,46110	0,29260	0,21740
	вихідний	1	0,02960	1,00	0,25780	0,0070	0,23440	0,05030
		2	0,02470	1,00	0,2640	0,00490	0,23060	0,04640
		3	0,25820	0,9990	0,45810	0,06220	0,46790	0,32510
		4	0,00880	1,00	0,32150	0,002703	0,25370	0,04580
		5	1,00	0,99580	1,00	0,24050	1,00	1,6530
		6	0,02270	1,00	0,26660	1,00	0,23090	0,64480
Осінньо-весняний сезон	робочий	1	0,06830	0,99980	0,02110	0,40590	0,02760	0,23190
		2	0,07090	0,99980	0,02690	0,00330	0,02160	0,03620
		3	0,0752	1,00	0,03230	0,00270	0,03370	0,03870
		4	0,33320	0,99720	0,2780	1,00	0,27640	0,84460
		5	1,00	0,98980	1,00	0,06040	1,00	1,47910
		6	0,08890	0,99980	0,02020	0,40590	0,02060	0,24020
	вихідний	1	0,12140	1,00	0,05660	0,07070	0,06740	0,09890
		2	0,03730	1,00	0,0670	0,04390	0,07860	0,04390
		3	0,40630	0,99940	0,0330	0,34140	0,03820	0,36860
		4	0,03370	1,00	1,00	0,02680	1,00	0,53340
		5	1,00	0,9980	0,05660	1,00	0,05280	1,00240
		6	0,03370	1,00	0,10380	0,02440	0,12360	0,03690

Згідно з аналізом отриманих даних, було обрано найкращу модель для типових днів, характерних кожному сезону (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – Математичні моделі електроспоживання

Кластер за сезоном	Кластер за типом дня	Математична модель електроспоживання
1	2	3
Літній сезон	робочий	$W = 8.205 + Q \cdot (0.516) + Q \cdot \Delta H \cdot (0.333) + Q \cdot M_4 \cdot 0.492 + \Delta H \cdot 2.394 + M_1 \cdot (-4.559) + M_1 \cdot M_3 \cdot 9.527 + M_2 \cdot M_3 \cdot (-5.892) + M_2 \cdot M_4 \cdot 6.920 + M_4 \cdot (-30.210)$
	вихідний	$W = 14.684 + Q \cdot (0.646) + Q \cdot M_2 \cdot (0.218) + \Delta H \cdot M_4 \cdot 1.221 + M_3 \cdot 1.238 + M_1 \cdot M_3 \cdot (4.439) + M_4 \cdot (-14.776)$

Продовження табл.3.9

1	2	3
Зимовий сезон	робочий	$W = 13.8727 + Q \cdot (0.546) + Q \cdot \Delta H \cdot 0.161 + Q \cdot M_1 \cdot (0.511) + \Delta H \cdot M_2 \cdot (-1.724) + \Delta H \cdot M_4 \cdot 3.94 + M_1 \cdot M_3 \cdot 5.57 + M_1 \cdot M_4 \cdot 24.226 + M_2 \cdot M_3 \cdot 34.535 + M_3 \cdot 54.08 + M_3 \cdot M_4 \cdot (-91.948)$
	вихідний	$W = 23.342 + Q \cdot (0.446) + Q \cdot M_2 \cdot 0.185 + Q \cdot M_3 \cdot (-0.135) + Q^2 \cdot 0.004 + \Delta H \cdot 2.577 + \Delta H^2 \cdot 0.018 + M_1 \cdot 1.884 + M_1 \cdot M_2 \cdot (-5.378) + M_1 \cdot M_3 \cdot (-4.044) + M_1^2 \cdot 5.873 + M_2 \cdot M_3 \cdot (-10.959) + M_2 \cdot M_4 \cdot 41.373 + M_2^2 \cdot (-28.438) + M_3 \cdot (-6.611) + M_3 \cdot M_4 \cdot 20.997 + M_3^2 \cdot 2.728 + M_4 \cdot (-55.145) + M_4^2 \cdot 9.957$
Весняно- осінній	робочий	$W = 10.867 + Q \cdot (0.454) + Q \cdot \Delta H \cdot (-0.263) + \Delta H \cdot 2.108 + \Delta H \cdot M_2 \cdot (-0.396) + \Delta H \cdot M_4 \cdot 0.19 + M_2 \cdot 7.386 + M_2 \cdot M_4 \cdot (-3.5)$
	вихідний	$W = 34.635 + Q \cdot (0.358) + Q \cdot \Delta H \cdot (0.558) + Q \cdot M_2 \cdot 0.101 + \Delta H \cdot 4.235 + \Delta H \cdot M_2 \cdot 1.434 + \Delta H \cdot M_4 \cdot (-3.351) + M_1 \cdot M_2 \cdot 3.011 + M_1 \cdot M_3 \cdot (-3.777) + M_2 \cdot (-24.646) + M_3 \cdot 1.073 + M_4 \cdot 43.894$

Згідно з отриманими результатами, обрані моделі відносяться до кластеру моделей з ефектом взаємодії, переважна більшість з них - лінійні.

Висновки по розділу 3.

1. Концептуальна модель електроенергетичного навантаження гідравлічної системи водопостачання потребує адаптації до виявлених збурюючих факторів, представлених соціально-демографічними та кліматичними параметрами, що формують водоспоживання. Методологія передбачає розроблення диференційованих моделей для кожного типового дня в різних сезонних періодах на основі вхідних змінних, детермінованих з урахуванням специфіки водопостачання протягом розрахункової доби. Межі застосування моделі обмежуються сезонними діапазонами максимальних та мінімальних обсягів водоподачі, а також планованим режимом функціонування насосних агрегатів, котрий визначатиме інтегральні показники енергоефективності.

2. Визначення основних змінних шляхом аналізу факторного поля чинників, включає формування вибірок даних для відповідних періодів часу та проведення структурно-параметричної ідентифікації ММ споживання ЕЕ. Характерна структура і механізм взаємодії параметрів, що є невідомими,

вивчалися через комбінаторний алгоритм групового врахування аргументів, що дозволив вибрати оптимальні моделі для характерних днів різних сезонів.

3. Поетапне оцінювання ММ за множиною критеріїв якості та власне точності прогнозу, з одночасним поєднанням до застосування морфологічних критеріїв, дозволило обрати кращу структуру моделі, що дозволило побудову структурованої ММ електроспоживання. Ця модель враховує фактичні умови роботи об'єктів водопостачання, спричинені сезонними змінами та соціальними факторами.

РОЗДІЛ 4

АДАПТАЦІЯ ФУНКЦІЙ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ДО ДИНАМІЧНИХ УМОВ РЕАЛЬНОГО РЕЖИМУ ВОДОПОСТАЧАННЯ

4.1. Призначення та компоненти системи моніторингу та планування енергоспоживання

Моніторинг являє собою автономний, перманентний процес управлінської діяльності, який концентрується на спостереженні, верифікації, акумуляції та (за потреби) фіксації інформації про результативність функціонування керованої системи; своєчасній ідентифікації девіацій від встановлених стандартів, дослідженні витоків їх походження; розробці стратегічних рішень щодо корегування операційної діяльності контролюваного об'єкта.

Для здійснення діагностики стану досліджуваного об'єкта та його операційних режимів визначаються поточні значення індикаторів та оцінюється їх девіація від встановленого (або визначеного) нормативного показника. Вважається, що система функціонує неефективно, якщо відхилення перевищує припустиму межу. Контрольовані параметри мають відповідати певним обмеженням:

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad i = \overline{1, N} \quad (4.1)$$

Розрахункові показники контрольованих характеристик роботи визначаються рівнянням стану:

$$x_i^*(t) = F(x_i(t_0), u_{[t_0, t]}, K_i) \quad (4.2)$$

де $x_i(t_0)$ – вектор аналітичних технологічних характеристик досліджуваного об'єкта; $u_{[t_0, t]}$ – операційні умови функціонування в часовому інтервалі $[t_0, t]$; K_i – інтегральний вектор параметрів, який відображає специфіку режиму експлуатації.

Результати спостережень за контрольованими параметрами визначаються характеристиками виробничого процесу та умовами експлуатації під час проведення вимірювань:

$$x_i(t) = H(v_i(t), u_i(t)), \quad (4.3)$$

де $v_i(t)$ – вектор значень параметрів, зафіксованих у поточний момент часу; $u_i(t)$ – умови експлуатації об'єкта дослідження на відповідний момент.

Контроль енергоефективності включає наступні функції:

- забезпечення точного моніторингу технологічних процесів;
- отримання необхідних показників енергоефективності, їх вимірювання та спостереження;
- фіксація та аналізування виявлених позаштатних ситуацій.

Основна мета такого контролю – це постійний моніторинг споживання енергії об'єктом та параметрів, що на нього впливають, виявлення розбіжностей між фактичними та нормативними (або плановими) характеристиками, а також оперативне попередження небажаних відхилень. У системі управління енергоспоживанням контроль відіграє ключову роль, забезпечуючи інформаційну базу для прийняття рішень з підвищення енергоефективності.

Отже, СЕМ ефективності електроспоживання НС системи контролю водопостачання має забезпечувати:

- спостереження за основними параметрами режиму подачі води;
- аналіз динаміки показників енергоефективності;
- контроль виконання базових нормативів енергоефективності.

Таким чином, енергоефективний контроль повинен бути комплексним і враховувати всі важливі аспекти роботи системи водопостачання.

Для визначення ступеня ефективності використання електроенергії як показника різниці між фактичними та плановими показниками споживання застосовують різницю між значеннями фактичних y_n та планових $\hat{y}_{n(g)}$, які обчислюються відносно верхньої межі довірчого інтервалу (коли спостерігаються перевитрати енергії) або нижньої межі (в умовах економії енергії):

$$\Delta y_{n(g)} = y_n - \hat{y}_{n(g)}. \quad (4.4)$$

У той же час, рівень перевитрат (або заощаджень) виражають у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta y_{n(g)}}{\hat{y}_{n(g)}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

Тобто, параметр δ залежить не тільки від абсолютної різниці між фактичними та плановими значеннями, а й від величини запланованого енергоспоживання.

Впровадження СЕМ дозволяє створювати великі бази даних, що містять інформацію щодо фактичних режимів роботи об'єктів та їх фактичного електроспоживання. ІАД сприяє поетапному вирішенню завдань, серед яких можна виокремити:

- розробку графіка для характерного дня та отримання його параметрів, а також оцінку ПЕЕ, що характеризують енергоефективність технічного стану об'єкта та організації технологічного процесу подачі води, враховуючи профіль ГВВ;
- побудову ММ електроспоживання, адаптованої до впливів збурень, тобто до режиму подачі води в характерні дні.

Заключним етапом планування електроспоживання є отримання БРЕ, що базується на даних щодо вхідних змінних, отриманих для запланованого

режиму водоподачі з урахуванням профілю ГВВ впродовж доби (рис. 4.1). Здійснення попередніх етапів дає змогу отримати значення основних змінних для характерного типу дня, а також ММ електроспоживання. Фінальним результатом цього процесу є визначення БРЕ або його довірчого інтервалу, який характерний для конкретного часового проміжку та попередньо запланованого режиму подачі води.

Також передбачено виконання таких завдань:

- аналіз режимів водоспоживання та виявлення тенденцій їх варіативності залежно від кліматичних умов, сезону року та інших факторів; пошук неявних закономірностей у добових ГВВ та групування їх за подібними характеристиками;
- формалізоване описання режиму подачі води: формування усереднених характеристик ВВ з мережі, враховуючи сезонність та профіль добового водоспоживання.

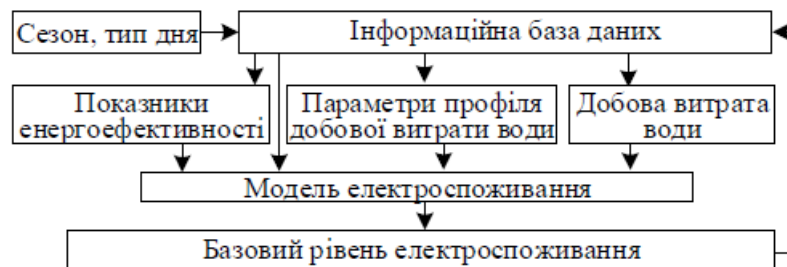


Рисунок 4.1 – Алгоритм розрахунку базового рівня електроспоживання

Сучасні підходи до управління енергоефективністю згідно з вимогами ISO 50001 передбачають впровадження автоматизованих облікових систем енергії, а також управління технологічними процесами, які є частиною системи моніторингу. Окрім цього, до них належать інформаційні системи енергетичного менеджменту (СЕМ), які взаємодіють з автоматизованими системами управління та SCADA-системами. Головними компонентами таких систем є функції сигналізації («аларми»). Реалізація підсистеми сигналізації

(alarms) залежить від конкретних завдань функції контролю та характеру вимірюваних параметрів.

Для ефективного контролю енергоефективності необхідно застосовувати аналогові аларми, що ґрунтуються на порівнянні значень змінних з певними межами, які встановлюються або вручну енергоменеджером, або визначаються автоматично. З огляду на завдання моніторингу енергоспоживання, аларми можуть бути налаштовані на різні параметри, зокрема: High та High High (верхня і вище за верхню межу); Low і Low Low (нижня і нижче за нижню межу); Deviation (відхилення від нормальних значень) тощо. Для досягнення оптимальних результатів необхідно здійснити фільтрацію алармів, організувавши їх за типами контрольованих параметрів, пріоритетами та можливими комбінаціями алармів. Також важливо налаштувати індивідуальні значення та пріоритети для різних меж: мінімальної нижньої межі («Low-Low»), нижньої («Low»), верхньої («High»), максимальної верхньої («High-High») тощо, з відповідними вказівками щодо їх застосування.

Таблиця 4.1 - Характеристика засобів сигналізації для ключових параметрів

Ключовий параметр	Тип сповіщення	Значення	Характер сповіщення	Тип сповіщення
1	2	3	4	5
Q	«Low-Low»	$\bar{x}_i - 3\sigma_i$	Невідповідність плановому режиму	Звуковий сигнал
	«Low»	$\bar{x}_i - 2\sigma_i$	Ймовірний вихід за допустиму межу	Попереджувальне повідомлення
	Deviation	$\bar{x}_i \pm \sigma_i$	Відхилення від норми	Звичайне повідомлення
	«High»	$\bar{x}_i + 2\sigma_i$	Ймовірне перевищення допустимої межі	Попереджувальне повідомлення
	«High-High»	$\bar{x}_i + 3\sigma_i$	Невідповідність плановому режиму	Звуковий сигнал

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
ΔH	«Low-Low»	$\bar{x}_i - 3\sigma_i$	Досягнення максимально ефективного режиму	Звичайне повідомлення
	«Low»	$\bar{x}_i - 2\sigma_i$	Досягнення ефективнішого режиму, ніж запланований	Звичайне повідомлення
	Deviation	$\bar{x}_i \pm \sigma_i$	Ймовірне досягнення ефективнішого, ніж запланованого режиму	Звичайне повідомлення
	«High»	$\bar{x}_i + 2\sigma_i$	Ймовірне перевищення допустимої межі та погіршення рівня ефективності електроспоживання	Попереджувальне повідомлення
	«High-High»	$\bar{x}_i + 3\sigma_i$	Перевищення допустимої межі. Погіршення рівня ефективності електроспоживання	Звуковий сигнал
$K_{\text{еф}}^{\text{ННА}}$	«Low-Low»	$\bar{x}_i - 3\sigma_i$	Невідповідність запланованому режиму. Погіршення рівня ефективності електроспоживання	Звуковий сигнал
	«Low»	$\bar{x}_i - 2\sigma_i$	Ймовірне перевищення граничної межі	Попереджувальне повідомлення
	Deviation	$\bar{x}_i \pm \sigma_i$	Відхилення від норми	Звичайне повідомлення
	Deviation	$\bar{x}_i + 2\sigma_i$	Ймовірне досягнення ефективнішого режиму роботи НС	Звичайне повідомлення
	«High»	$\bar{x}_i + 3\sigma_i$	Досягнення ефективнішого, ніж запланованого режиму	Звичайне повідомлення
	«High-High»	$\bar{x}_i - 3\sigma_i$	Досягнення максимально можливого ефективного режиму роботи	Звичайне повідомлення

Створення повідомлення для енергоменеджера про перевищення встановленого ліміту електроспоживання враховує специфіку побудови нормативного значення, яке визначається як довірчий інтервал для прогнозованого споживання, межі якого виконують роль контрольних (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 - Характеристика засобів сигналізації для моніторингу електроспоживання

Тип сповіщення	Значення	Характер сповіщення	Тип сповіщення
Low	$\bar{x}_i - 2\sigma_i$	Заощадження ЕЕ	Інформаційне повідомлення
High	$\bar{x}_i \pm \sigma_i$	Перевитрата ЕЕ	Повідомлення+ звуковий сигнал
Deviation	$\bar{x}_i + 2\sigma_i$	Споживання ЕЕ у допустимих межах	Інформаційне повідомлення

У структурі системи контролю енергоефективності «нормативи» та «аларми» мають тісний взаємозв'язок [17]: завдяки даним системи моніторингу можна визначити певний норматив для окремого параметра, прив'язати до нього «аларм» і здійснювати моніторинг відхилень від встановленого нормативу. Це дозволяє виявляти аномалії та неекономне споживання електроенергії, розпізнавати причини таких відхилень і знаходити потенційні можливості для підвищення енергоефективності.

Алгоритм моніторингу енергоефективності з урахуванням зовнішніх впливів наведено на рис. 4.2. Ефективність контролю забезпечується при отриманні та правильному використанні достовірної й актуальної інформації щодо системи та відповідність її роботи запланованим цілям. Процес моніторингу гарантує регулярне отримання надійних даних про електроспоживання та важливі технологічні параметри НС, що дозволяє постійно порівнювати їх із заданими нормативами.

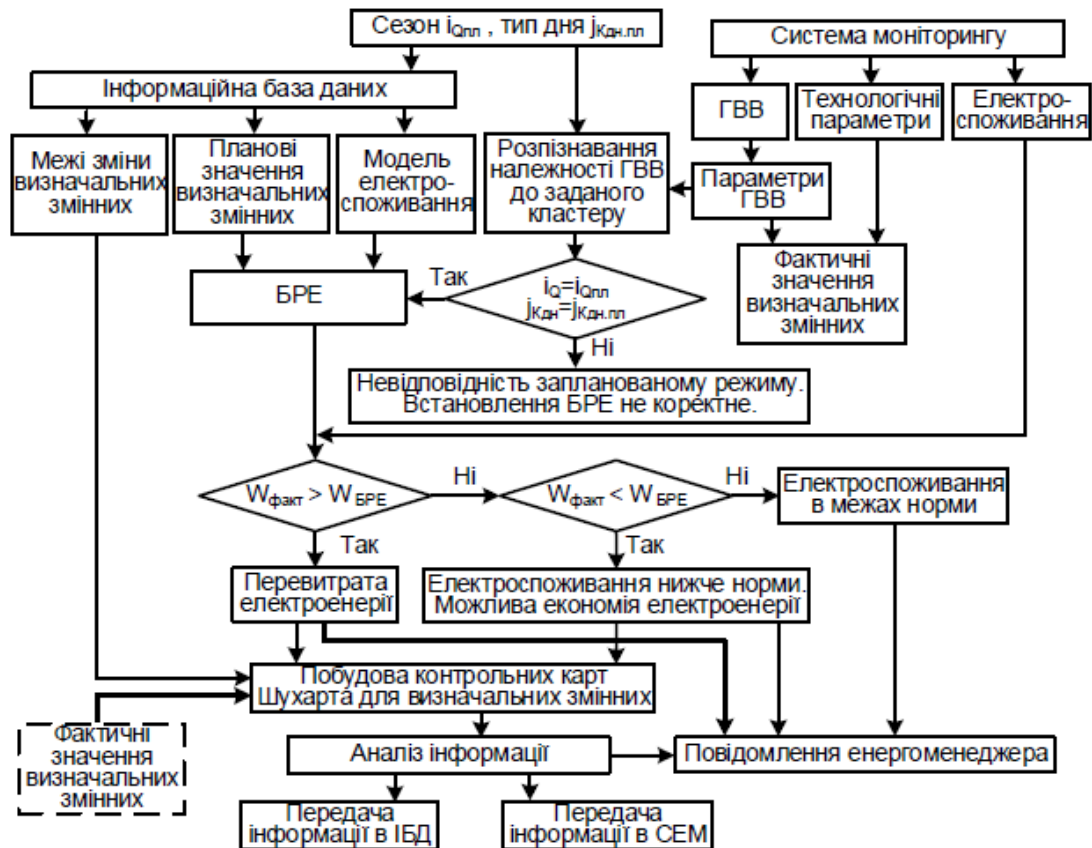


Рисунок 4.2 - Схема інтегрованого моніторингу ефективності енергоспоживання

4.2. Результати аналізу енергоефективності електроспоживання насосної станції II підйому

На підставі даних про технологічні параметри режиму водоподачі та електроспоживання НС II підйому водозабору КП «Лубни-водоканал» було проведено аналіз ефективності споживання електроенергії для робочих днів лютого місяця та оцінено отримані результати.

Для підтвердження відповідності фактичного ГВВ заданому сезону та типу дня проведено ідентифікацію його приналежності до відповідних кластерів (за сезоном року та типом дня). Результати показали, що: ГВВ 04 лютого не відповідало зимовому сезону, а ГВВ 05 лютого виявилось нерегулярним за характерним типом дня. Відповідно, оцінка ефективності електроспоживання для цих днів не проводилася через неможливість точно визначити БРЕ.

Планові значення електроспоживання були встановлені у вигляді довірчого інтервалу для очікуваного споживання, розрахованого на основі відповідної ММ електроспоживання (зима, робочий день). Порівняння фактичного електроспоживання з плановими значеннями (рис. 4.3) виявило періоди не випадкового зниження (або підвищення) ефективності споживання електроенергії. Для аналізу причин цих змін була проведена перевірка відповідності визначальних змінних встановленим контрольним межам (рис. 4.4) через побудову контрольних карт Шухарта. У якості визначених контрольних меж використовувались довірчі інтервали визначальних змінних, отриманих на основі вибірок, класифікованих за результатами ГВВ для зимових робочих днів.

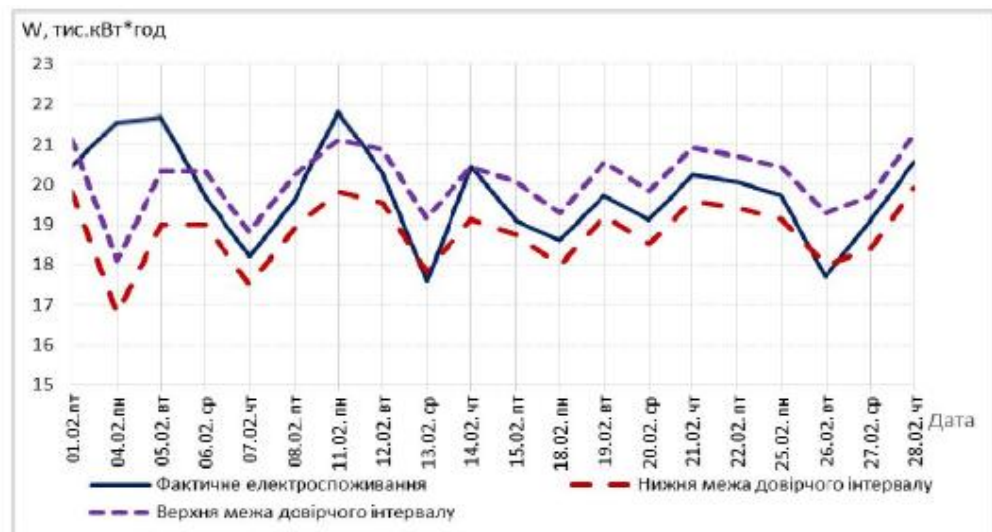


Рисунок 4.3 - Моніторинг ефективності споживання електроенергії насосної станції за допомогою встановлення довірчих інтервалів

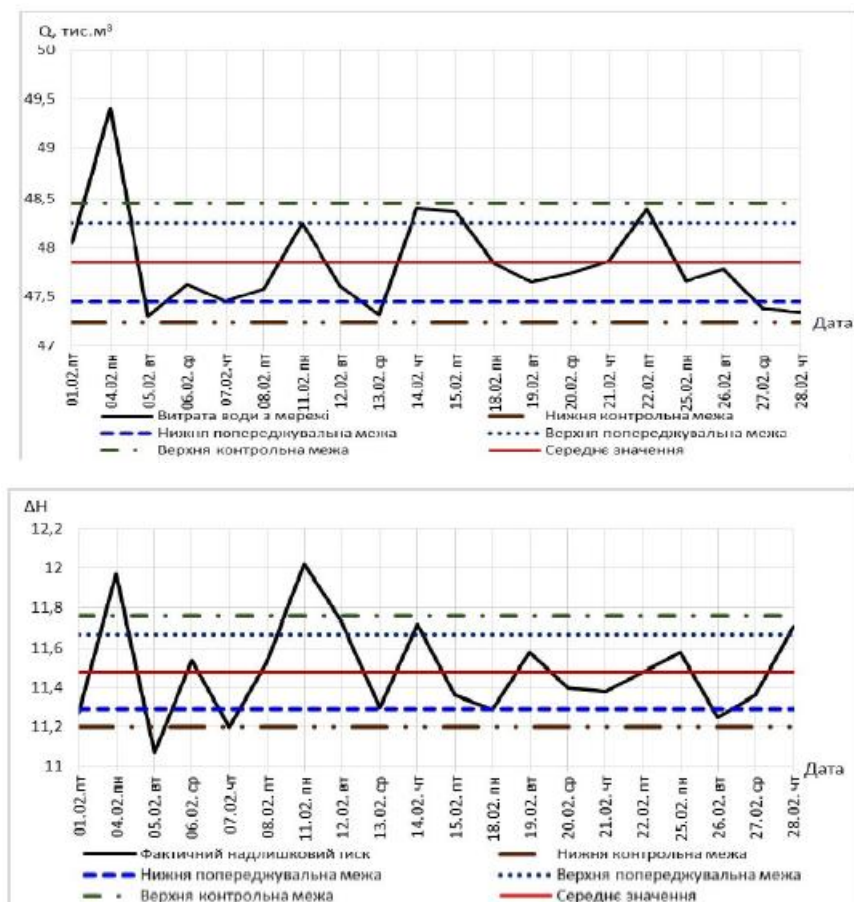


Рисунок 4.4 – Визначені контрольні Х-карти для персональних параметрів технологічних параметрів водопостачання

Результати моніторингу ефективності енергоспоживання насосної станції II підйому, проведеного на основі цільових змінних, встановлених через довірчі інтервали до математичної моделі споживання електроенергії, та подальшого аналізу причин невідповідних змін рівня енергоефективності, використовуючи одновимірні карти Шухарта, подано в таблиці 4.3.

Отримані результати показують, що 11.02 відбулося перевищення нормативу споживання електроенергії, що було спричинено підвищенням значення надлишкового тиску в критичних точках мережі (перевищення параметра ΔH за верхній контрольний поріг) на фоні незначного зростання витрат води (перевищення параметра Q за верхній попереджувальний поріг). Отже, можна зробити висновок, що причина перевитрати електроенергії полягає в неефективному режимі водопостачання.

Таблиця 4.3 – Підсумки моніторингу енергоефективності електроспоживання насосної станції

Дата контрольн ого заміру	Обсяг відхилення від нормативного значення, %	Перевищення ключових параметрів за допустимі або сигнальні межі		Підстава	Сповіднення від фахівця з енергоменеджменту
		Q, м ³	ΔH, м		
01 лютого	0,00	0,00/0,00	<u>0,00</u> -0,020		Споживання ЕЕ у допустимих рамках
04 лютого	-	+951,00 +1152,67	+0,210 +0,300	Підвищення Q	Некоректне співвідношення ГВВ із режимом водоподачі
05 лютого	-	<u>0,00</u> -141,670	-0,1300 -0,2200		Некоректне співвідношення ГВВ із режимом водоподачі
06 лютого	0,00	0,00/0,00	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих рамках
07 лютого	0,00	0,00/0,00	<u>0,00</u> -0,09		Споживання ЕЕ у допустимих рамках
11 лютого	+3,20	<u>0,00</u> +1,70	+0,260 +0,350	Підвищення ΔH	Перевитрата ЕЕ
12 лютого	0,00	0,00/0,00	<u>0,000</u> +0,050		Споживання ЕЕ у допустимих рамках
13 лютого	-1,30	<u>0</u> -131	0,00/0,00	Зменшення Q	Споживання ЕЕ нижче норми
14 лютого	0,00	<u>0,00</u> +151,71	<u>0,00</u> +0,05		Споживання ЕЕ у допустимих межах
15 лютого	0,00	<u>0,00</u> +117,67	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих межах
18 лютого	0,00	0,00/0,00	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих межах
19 лютого	0,00	0,00/0,00	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих межах
20 лютого	0,00	0,00/0,00	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих межах
21 лютого	0,00	0,00/0,00	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих межах
22 лютого	0,00	<u>0,00</u> +145,80	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих межах
25 лютого	0,00	0,00/0,00	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих межах
26 лютого	-1,50	0,00/0,00	<u>0,00</u> -0,04	Зменшення ΔH	Споживання ЕЕ нижче норми
27 лютого	0,00	<u>0,00</u> -67,67	0,00/0,00		Споживання ЕЕ у допустимих межах
28 лютого	0,00	<u>0,00</u> -106,67	<u>0,00</u> +0,04	Підвищення ΔH за зниження Q	Зниження ефективності режиму водоподачі

13 та 26 лютого було зафіксовано зменшення фактичного електроспоживання порівняно з встановленим нормативом. Однак, зниження електроспоживання 13 лютого було супроводжено зменшенням витрат води з мережі (параметр Q перевищив нижній попереджувальний поріг). Тому не можна стверджувати про підвищення енергоефективності у цьому випадку. Водночас, зменшення електроспоживання 26 лютого супроводжувалось зниженням надлишкового тиску в критичних точках мережі (параметр ΔH перевищив нижній попереджувальний поріг), при цьому витрата води залишалася в межах контрольних значень. Це дає підстави для висновку, що в цей період спостерігалось підвищення ефективності водопостачання та споживання електроенергії.

Окрему увагу заслуговують результати контролю споживання електроенергії 28.02, коли фактичне споживання відповідало встановленому БРЕ. Однак, на фоні зниження витрат води (параметр Q перевищив нижній попереджувальний поріг) відбулося підвищення надлишкового тиску в мережі (параметр ΔH перевищив верхній попереджувальний поріг). Це свідчить про зниження ефективності водопостачання.

Запропонована методика моніторингу та аналізу енергоефективності, що ґрунтується на використанні контрольних карт, дозволяє об'єктивно визначати періоди часу, коли відбуваються значущі невідповідності зміни в ефективності споживання електроенергії у технологічному процесі водопостачання, а також аналізувати причини цих змін, що дає змогу планувати заходи для підвищення енергоефективності.

З урахуванням цілей та завдань функцій системи моніторингу, зокрема планування та перевірки ефективності електроспоживання, проведена формалізація процесу комплексного моніторингу з використанням об'єктно-орієнтованих технологій. Узагальнений вигляд архітектури комплексного моніторингу енергоефективності зображено на рис. 4.5.

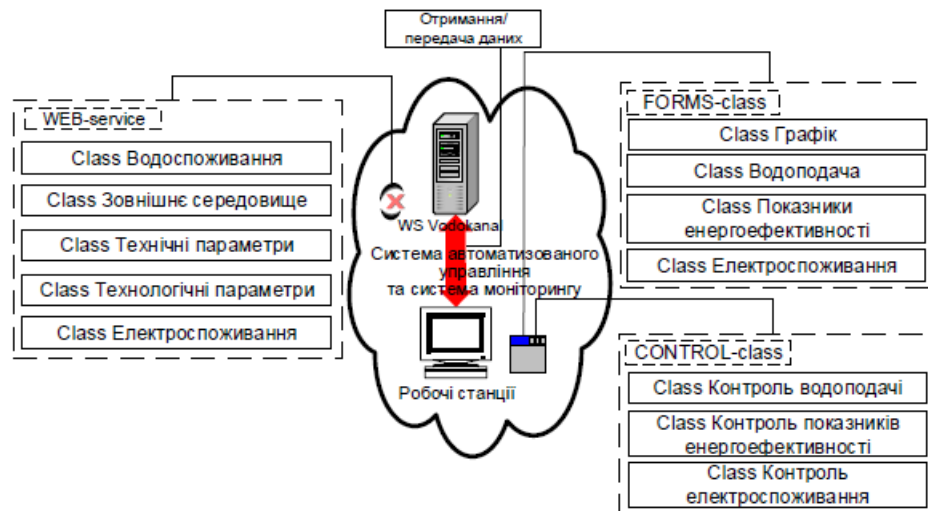


Рисунок 4.5 - Архітектура моніторингової системи енергоефективності в СКВ

Для нормального функціонування запропонованої архітектури необхідно налагодити процедури обміну вхідними та вихідними даними відповідно до умов задачі. Сучасні підходи в управлінні енергоефективністю згідно стандарту ISO 50001 передбачають активне впровадження автоматизованих систем для обліку енергоресурсів та управління технологічними процесами, які є частиною загальної системи, а також інтеграцію з інформаційними системами енергоменеджменту. Наявність автоматизованих управлінських систем спрощує процес збору та аналізу даних для кожного суб'єкта в рамках предметної області. Інформаційна підтримка енергоефективності може бути побудована на основі баз даних існуючих автоматизованих систем управління технологічними процесами підприємства, а також систем обліку енергоспоживання. Ця база, доповнена технічними характеристиками, що впливають на рівень енергоефективності, дозволить автоматизувати процес планування параметрів енергоефективності, зокрема цільових значень споживання та економії електричної енергії, через застосування як детермінованих, так і статистичних методів, що дозволяють обробляти масиви даних.

Висновки до розділу 4.

1. СЕМ водопостачальної станції повинна враховувати всі важливі характеристики технологічного процесу водоподачі, що дозволяє ефективно здійснювати не лише контроль енергоспоживання, а й основних параметрів режиму водоподачі.

2. Процес планування енергоспоживання передбачає встановлення нормативів для основних змінних, таких як середні значення для кожної змінної, що використовуються як планові для обчислення базового рівня енергоспоживання (БРЕ) для типового дня кожного сезону. Також проводиться визначення значень визначальних змінних та електроспоживання з урахуванням профілю ГВВ та впливу зовнішніх факторів (соціальних та сезонних), що дозволяє забезпечити коректний контроль на основі реальних умов.

3. Для виявлення неефективного електроспоживання доцільно порівнювати фактичні показники з БРЕ, що є довірчим інтервалом на основі відповідної моделі енергоспоживання для сезону та характерного типу дня. Для контролю параметрів використовуються контрольні карти Шухарта, де контрольні межі визначаються за допомогою довірчого інтервалу з високою ймовірністю ($p = 0,997$). Важливо також підтвердження відповідності фактичних даних до заданого енергоменеджером кластеру.

4. Запропонований метод контролю енергоефективності, який включає перевірку БРЕ та використання контрольних карт Шухарта, дає можливість об'єктивно оцінити періоди, коли відбувалися значні зміни у рівні енергоспоживання та ефективності водоподачі. Це дозволяє визначати причини цих змін та планувати заходи для підвищення енергоефективності.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено питання підвищення енергоефективності в системі комунального водопостачання через комплексне врахування зовнішньосередовищних чинників та вдосконалення методологічних підходів до моніторингу електроспоживання на об'єктах водопостачальної інфраструктури.

Основні висновки полягають у тому, що:

1. Аналіз ефективності електроспоживання в СКВ, факторів, що впливають на споживання енергії об'єктами водопостачання, а також можливих шляхів підвищення енергоефективності, показав, що вирішення цієї проблеми не обмежується лише вдосконаленням конструкцій і режимів роботи елементів. Важливим є впровадження систем ефективного керування енергоспоживанням, котре базується на поточних умовах функціонування водопостачальних об'єктів.

2. Енергоефективність роботи НС суттєво залежить від характеристик експлуатації обладнання, таких як заводські напірно-витратні та енергетичні показники, схеми включення НА тощо, а в результаті — ефективність електроспоживання. Водоспоживання, будучи випадковим фактором, ускладнює процес точного оцінювання рівня ефективності роботи НА та енергоспоживання загалом.

3. Для забезпечення ефективного управління процесом енергоспоживання та оперативного реагування на його зниження необхідно враховувати як явні, так і приховані причинно-наслідкові зв'язки через впровадження системи моніторингу витрат електричної енергії, технологічних параметрів НС та зовнішніх факторів. Важливим є також удосконалення організації функцій управління, таких як планування та контроль енергоспоживання. Необхідно вивчити та систематизувати змінні, що визначають рівень енергоефективності, їх роль у побудові моделей

енергоспоживання та визначенні базових рівнів енергоспоживання для вирішення задач контролю ефективності.

4. Ефективність електроспоживання в системі комунального водопостачання формується під впливом багатфакторного середовища, що включає внутрішньосистемні властивості, організаційні механізми та зовнішні детермінанти. Визначальними чинниками виступають відносно статичні біологічні та технічні параметри, а також динамічне водоспоживання, яке має стохастичну природу та нерівномірну інтенсивність протягом календарного та добового циклів.

5. Проведений аналіз графіків водовикористання засвідчив наявність стійкої повторюваності добових профілів упродовж тижневого та сезонного періодів. Для комплексного дослідження зовнішніх впливів необхідним є глибокий аналіз фактичного режиму водоспоживання через призму створеної моніторингової бази даних. Принципового значення набуває застосування математико-статистичних методів для виявлення латентних закономірностей з урахуванням сезонної динаміки та внутрішньодобових інтервалів. Методологія дослідження передбачає диференційований підхід до вивчення зовнішніх чинників: класичні показники нерівномірності використовуються для діагностування сезонних трансформацій, а морфометричні індикатори - для ідентифікації соціальних впливів.

6. Інструментарієм дослідження обрано теорію розпізнавання образів, зокрема методи дискримінантного та кластерного аналізу. Такий підхід дозволяє здійснити багатовимірну кластеризацію графіків водовикористання, забезпечити їх типологізацію за сезонними та соціальними характеристиками, а також розробити алгоритми класифікації нових емпіричних даних.

7. Концептуальна модель електроенергетичного навантаження гідравлічної системи водопостачання потребує адаптації до виявлених збурюючих факторів, представлених соціально-демографічними та кліматичними параметрами, що формують водоспоживання. Методологія

передбачає розроблення диференційованих моделей для кожного типового дня в різних сезонних періодах на основі вхідних змінних, детермінованих з урахуванням специфіки водопостачання протягом розрахункової доби. Межі застосування моделі обмежуються сезонними діапазонами максимальних та мінімальних обсягів водоподачі, а також планованим режимом функціонування насосних агрегатів, котрий визначатиме інтегральні показники енергоефективності.

8. Визначення основних змінних шляхом аналізу факторного поля чинників, включає формування вибірок даних для відповідних періодів часу та проведення структурно-параметричної ідентифікації ММ споживання ЕЕ. Характерна структура і механізм взаємодії параметрів, що є невідомими, вивчалися через комбінаторний алгоритм групового врахування аргументів, що дозволив вибрати оптимальні моделі для характерних днів різних сезонів. Поетапне оцінювання ММ за множиною критеріїв якості та власне точності прогнозу, з одночасним поєднанням до застосування морфологічних критеріїв, дозволило обрати кращу структуру моделі, що дозволило побудову структурованої ММ електроспоживання. Ця модель враховує фактичні умови роботи об'єктів водопостачання, спричинені сезонними змінами та соціальними факторами.

9. СЕМ водопостачальної станції має поєднувати та контролювати всі нюанси технологічного процесу водоподачі, що дозволяє ефективно здійснювати не лише контроль енергоспоживання, а й основних параметрів режиму водоподачі. Процес планування енергоспоживання передбачає встановлення нормативів для основних змінних, таких як середні значення для кожної змінної, що використовуються як планові для обчислення базового рівня енергоспоживання (БРЕ) для типового дня кожного сезону. Також проводиться визначення значень визначальних змінних та електроспоживання з урахуванням профілю ГВВ та впливу зовнішніх факторів (соціальних та сезонних), що дозволяє забезпечити коректний контроль на основі реальних умов.

10. Запропонована методика контролю енергоефективності, яка інтегрує аналіз дотримання базового рівня електроспоживання та використання контрольних карт Шухарта, надає можливість об'єктивної ідентифікації моментів суттєвих невідповідних змін рівня ефективності електроспоживання та режимів водопостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
2. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13066>.
3. Бублик, М. І. Енергетичний менеджмент: навч. посібник / М. І. Бублик, С. С. Бобух, І. В. Чижик. – Київ: Кондор, 2019. – 286 с.
4. Суходоля, О. М. Управління енергозбереженням: монографія / О. М. Суходоля. – Київ: НАДУ, 2016. – 424 с.
5. Кириленко, О. В. Інтелектуальні електричні мережі: проблеми та перспективи / О. В. Кириленко, В. В. Писарев. – Київ: Наукова думка, 2018. – 256 с.
6. Дергачова, В. В. Модернізація систем управління енергетичною ефективністю / В. В. Дергачова, І. М. Сотник. – Суми: СумДУ, 2017. – 312 с.
7. Костюк, М. П. Діагностика та оптимізація електроспоживання в комунальному секторі / М. П. Костюк, Г. Г. Підгайний. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 218 с.
8. Кудря, С. О. Відновлювана енергетика: стратегія розвитку / С. О. Кудря. – Київ: ІВЕ НАН України, 2019. – 322 с.
9. Канчавелі, О. Б. Управління енергоефективністю підприємств / О. Б. Канчавелі. – Харків: ХНЕУ, 2016. – 187 с.
10. Мельник, Л. В. Економіка енергетики: навчальний посібник / Л. В. Мельник, О. І. Шаблій. – Львів: ЛНУ, 2017. – 246 с.

11. Літвінов, О. С. Інтелектуальні системи обліку електроенергії / О. С. Літвінов. – Київ: Техніка, 2018. – 204 с.
12. Остапчук, Я. П. Моделювання режимів електроспоживання / Я. П. Остапчук. – Рівне: НУВГП, 2019. – 176 с.
13. Романюк, В. І. Енергозберігаючі технології в комунальному господарстві / В. І. Романюк. – Київ: Кондор, 2016. – 268 с.
14. Заболотня, Т. М. Стратегічне управління енергоефективністю / Т. М. Заболотня. – Черкаси: ЧДТУ, 2017. – 192 с.
15. Находов, В. Ф. Контроль ефективності енерговикористання / В. Ф. Находов, О. В. Бориченко. – Київ: НТУУ "КПІ", 2014. – 198 с.
16. Сотник, І. М. Економічні механізми енергозбереження / І. М. Сотник. – Суми: СумДУ, 2015. – 274 с.
17. Bertoldi, P. Energy Management in Water Utilities: Strategies and Innovations / P. Bertoldi, B. Acurio. – London: Springer, 2019. – 412 p.
18. Sorrell, T. Smart Metering Technologies in Municipal Infrastructure / T. Sorrell, M. Eames. – New York: Routledge, 2020. – 287 p.
19. Jayaweera, R. Performance Optimization of Pumping Systems / R. Jayaweera, H. Bilal. – Cambridge: Cambridge University Press, 2018. – 224 p.
20. Chen, K. Energy Efficiency in Water Distribution Networks / K. Chen, S. Laima. – Berlin: De Gruyter, 2019. – 356 p.
21. Garcia-Bernedo, J. Predictive Energy Management in Water Treatment / J. Garcia-Bernedo, L. Martinez. – Barcelona: Elsevier, 2017. – 298 p.
22. Sanchez-Garcia, A. Smart Grid Integration for Utilities / A. Sanchez-Garcia, R. Lopez-Lopez. – Boston: MIT Press, 2020. – 412 p.
23. Noronha, K. Machine Learning in Energy Management / K. Noronha, M. Silva. – Manchester: IEEE Press, 2019. – 267 p.
24. Henderson, T. Energy Performance Indicators in Infrastructure / T. Henderson, S. Williams. – Sydney: Wiley, 2018. – 334 p.
25. Madsen, H. Optimization of Pumping Systems / H. Madsen, J. Poulsen. – Copenhagen: Academic Press, 2018. – 276 p.

26. Rodrigues, E. Data-Driven Energy Strategies in Utilities / E. Rodrigues, F. Santos. – Porto: Taylor & Francis, 2020. – 312 p.
27. Boccelli, L. Real-Time Energy Management in Water Systems / L. Boccelli, D. Tryby. – Chicago: AWWA Research Foundation, 2019. – 389 p.
28. Neves, M. Advanced Control Strategies in Water Supply / M. Neves, P. Costa. – Lisbon: IWA Publishing, 2017. – 246 p.
29. Khalil, A. Intelligent Monitoring Systems for Utilities / A. Khalil, R. Ahmed. – Dubai: Balkema, 2018. – 276 p.
30. Sagioglu, N. Big Data Analytics in Municipal Management / N. Sagioglu, M. Simsek. – Ankara: Springer, 2019. – 334 p.
31. Kovalenko, O. Energy Efficiency Assessment Methodology / O. Kovalenko, Y. Popkov. – Kiev: Nova Science Publishers, 2020. – 256 p.

ДОДАТКИ

Додаток А. Охорона праці

А.1. Загальні положення охорони праці в системах комунального водопостачання

Охорона праці — це комплекс заходів, що спрямовані на створення безпечних та комфортних умов праці для персоналу, який працює в системах комунального водопостачання (СКВ). Цей аспект є важливою складовою у діяльності підприємств водопостачання, оскільки технологічні процеси, пов'язані з використанням електрообладнання, характеризуються підвищеним рівнем ризику.

Робота в СКВ включає експлуатацію насосних станцій, трубопроводів, електрообладнання та систем автоматизації. Це вимагає не лише високого рівня професійної підготовки працівників, але й суворого дотримання норм охорони праці. Законодавчі основи організації безпеки праці закладені в Законах України «Про охорону праці», «Про електроенергетику», а також у нормативно-правових актах з технічної експлуатації електроустановок.

Основними завданнями охорони праці є:

- попередження виробничого травматизму;
- зниження рівня професійних захворювань;
- забезпечення безпечних умов для роботи з обладнанням, особливо підвищеної небезпеки;
- підвищення енергоефективності роботи систем через оптимізацію умов праці та технологічних процесів.

А.2. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

При забезпеченні електроспоживання в СКВ виникає низка небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. До основних факторів можна віднести:

Фізичні небезпечні фактори:

- Ураження електричним струмом через недотримання правил експлуатації або несправність ізоляції;
- Надмірний рівень шуму та вібрації від роботи насосів і двигунів;
- Висока температура в машинних залах під час роботи обладнання.

Механічні небезпеки:

- Травмування працівників через необережність при роботі з рухомими частинами механізмів;
- Падіння обладнання або предметів у разі неправильного монтажу чи експлуатації.

Хімічні фактори:

- Використання хлорвмісних реагентів або інших хімічних речовин для очищення води;
- Корозія обладнання через високу вологість у приміщеннях.

Пожжежо- і вибухонебезпеки:

- Застосування електроустановок у приміщеннях з високою вологістю;
- Можливість займання через короткі замикання або перегрів електрообладнання.

Психофізіологічні фактори:

- Перевтома через змінний графік роботи, що включає нічні зміни;
- Стресові ситуації при аварійних або нестандартних умовах експлуатації.

А.3. Комплекс заходів з охорони праці

Для мінімізації впливу небезпечних факторів на підприємствах комунального водопостачання розробляються та впроваджуються організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні та інші заходи.

Електробезпека:

- Використання сучасних автоматизованих пристроїв захисту від перевантажень і коротких замикань.
- Обов'язкове заземлення всього електрообладнання та регулярна перевірка його стану.
- Проведення інструктажів, навчання і атестації працівників, які працюють з електроустановками.

Шум і вібрація:

- Використання шумоізоляційних матеріалів для покриття приміщень насосних станцій;
- Встановлення демпферів для зниження вібраційного впливу від роботи насосного обладнання;
- Оснащення працівників засобами індивідуального захисту, такими як протишумові навушники або вкладиші.

Пожежна безпека:

- Установлення пожежної сигналізації та систем автоматичного пожежогасіння;
- Розміщення первинних засобів пожежогасіння (вогнегасників) у легкодоступних місцях;
- Регулярні тренування працівників щодо дій у разі виникнення пожежі.

Організація робочого місця:

- Забезпечення належного освітлення робочих приміщень.
- Дотримання ергономічних норм під час проектування робочих місць.
- Облаштування зон відпочинку для персоналу.

Медичне забезпечення та профілактика:

- Проведення регулярних медичних оглядів персоналу, особливо тих, хто працює в умовах підвищеної небезпеки.

- Забезпечення працівників аптечками першої допомоги та навчання їх використанню.

A.4. Впровадження енергоефективних рішень як фактор зниження небезпеки

Впровадження енергоефективних технологій не лише знижує витрати електроенергії, але й сприяє поліпшенню умов праці. Наприклад:

Автоматизація: Використання автоматизованих систем управління знижує ризик аварійних ситуацій, викликаних людським фактором.

Сучасне обладнання: Заміну старих насосів і двигунів на нові енергоефективні моделі супроводжує зниження рівня шуму, вібрації та тепловиділення.

Оптимізація режимів роботи: Розробка графіків роботи насосів, які враховують пікові навантаження, дозволяє зменшити ризик перегріву обладнання.

A.5. Організаційні аспекти охорони праці

Ефективне управління охороною праці включає:

- Призначення відповідальних осіб за охорону праці на кожній ділянці підприємства;
- Проведення регулярних перевірок стану безпеки робочих місць.
- Розробку інструкцій з безпеки праці для кожного виду робіт.
- Організацію навчальних семінарів і тренінгів для підвищення кваліфікації працівників.

A.6. Висновки

Охорона праці в системах комунального водопостачання є багатогранним завданням, що включає заходи з безпеки, гігієни та енергоефективності. Дотримання нормативних вимог, впровадження сучасних технологій і забезпечення належного рівня підготовки персоналу є

ключовими факторами зниження виробничих ризиків. У результаті підприємства отримують не лише безпечне середовище праці, але й підвищення загальної продуктивності та енергоефективності.