

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Давиденко Ніна Володимирівна

УДК 658.26:621.311-047.36

**МОНІТОРИНГ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ
НАСОСНИХ СТАНЦІЙ СИСТЕМИ КОМУНАЛЬНОГО
ВОДОПОСТАЧАННЯ З УРАХУВАННЯМ ЧИННИКІВ
ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Спеціальність 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця - 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Луцькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Розен Віктор Петрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
завідувач кафедри автоматизації управління електро-
технічними комплексами.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Сінчук Олег Миколайович,
ДВНЗ «Криворізький національний університет»,
завідувач кафедри автоматизованих електромеханіч-
них систем в промисловості та транспорті

кандидат технічних наук, доцент,
Гладь Іван Васильович
Івано-Франківський національний технічний універси-
тет нафти і газу, доцент кафедри електропостачання та
електрообладнання промислових підприємств

Захист відбудеться «30» березня 2018 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, Україна, Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, Україна, Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «28» лютого 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Підвищення рівня енергоефективності технологій та ефективності кінцевого енергоспоживання є пріоритетним завданням підприємств, в тому числі, підприємств водопровідно-каналізаційного господарства (ПВКГ), вирішення якого потребує впровадження енергозберігаючих технологій, підвищення результативності та ефективності виробничих процесів і споживання енергоресурсів, розвитку системи управління енергоефективністю та розробки дієвих способів виявлення прихованих резервів економії енергії, а об'єктивний аналіз, обґрунтована оцінка та контроль ефективності енергоспоживання є необхідною умовою досягнення помітних практичних результатів.

Одним із інструментів ефективного управління енергоспоживанням ПВКГ є впровадження систем енергоменеджменту (СЕМ) і здійснення пооб'єктного контролю ефективності енергоспоживання з урахуванням циклічних змін виробничого процесу. Дослідження питань впровадження СЕМ, кількісної оцінки, моніторингу та контролю рівня енергоефективності знайшли відображення в роботах В.В. Грабка, С.П. Денисюка, В.І. Дешка, В.А. Жовтянського, О.В. Кириленка, М.М. Кулика, П.Д. Лежнюка, А.В. Новосельцева, Г.Г. Півняка, А.В. Праховника, В.П. Розена, О.В. Садового, О.М. Сінчука, Б.С. Стогнія, А.К. Шидловського та інших вчених. Проте проблема моніторингу ефективності електроспоживання в системах комунального водопостачання (СКВ) вирішена не в повній мірі. Актуальним завданням є удосконалення існуючих та розробка нових підходів і процедур аналізу, планування електроспоживання об'єктів водопостачання та контролю його ефективності з урахуванням фактичних умов їх функціонування, зумовлених впливом чинників зовнішнього середовища, для забезпечення управління енергоспоживанням в СКВ та підвищення рівня її енергоефективності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані в дисертаційній роботі дослідження відповідають напряму «Енергетика та енергоефективність» Закону України від 12.10.2010 р. №2519-17 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», а також пріоритетному напрямку «Способи застосування сучасного енергоменеджменту. Технології забезпечення енергобезпеки» Постанови Кабінету Міністрів України №942 від 07.09.2011р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року» із змінами, внесеними Постановою Кабінету Міністрів України №556 від 23.08.2016р.; направленості тематики НДР кафедри електропостачання Луцького НТУ. Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання НДР кафедри електропостачання Луцького НТУ «Удосконалення та розробка методів аналізу та підвищення ефективності енерговикористання в складних виробничих системах» ДР №0116 U001933.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення рівня енергоефективності системи комунального водопостачання шляхом урахування впливу чинників зовнішнього середовища та удосконалення функцій моніторингу ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені такі завдання:

1. Виконати аналіз існуючого стану енергоефективності в СКВ та чинників, що впливають на ефективність електроспоживання об'єктів водопостачання, а також шляхів підвищення рівня енергоефективності та сучасних принципів ефективного управління енергоспоживанням.

2. Запропонувати підхід для урахування циклічних змін процесу водоподачі, зумовлених впливом чинників зовнішнього середовища, в процедурі моніторингу ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання.

3. Визначити типові робочі межі основних технологічних параметрів процесу водопостачання та відповідні часові діапазони для визначення (спостереження) визначальних змінних базового рівня електроспоживання (БРЕ) з урахуванням циклічних, сезонних та соціальних чинників.

4. Провести аналіз факторного поля змінних, що впливають на електроспоживання насосної станції водопостачання (НС), дослідити взаємозв'язок вхідних і вихідних змінних та сформувати сукупність визначальних змінних БРЕ.

5. Вибрати метод унормування БРЕ до визначальних змінних та побудувати багатофакторну математичну модель електроспоживання, адаптовану до впливу сезонних змін зовнішнього середовища та соціальних чинників.

6. Запропонувати процедуру моніторингу, зокрема, планування електроспоживання та контролю його ефективності, з урахуванням чинників зовнішнього середовища і принципи використання його результатів в СЕМ ПВКГ.

Об'єкт дослідження: процес моніторингу електроспоживання насосними станціями водопостачання.

Предмет дослідження: планування електроспоживання насосних станцій водопостачання та контроль його ефективності.

Методи дослідження. Науково-методичну основу виконаних досліджень склали: методи морфометричного аналізу фігур різної форми та розмірів для опису нерівномірності добового графіка витрати води (ГВВ) з мережі водопостачання, представленого у формі діаграми радарного типу; методи кластерного та дискримінантного аналізу для виявлення подібності добових ГВВ; методи статистичного аналізу даних виробничого експерименту для опису вибірок та встановлення характеру взаємозв'язку між електроспоживанням та визначальними змінними; метод групового урахування аргументів (МГУА) для унормування БРЕ до визначальних змінних; методи статистичного контролю для організації процедури контролю ефективності електроспоживання НС водопостачання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Набула подальшого розвитку реалізація функцій моніторингу енергоефективності об'єктів системи комунального водопостачання, зокрема, планування та контролю електроспоживання, яка передбачає інтеграцію процедур інтелектуального аналізу даних не лише про об'єми електроспоживання та технологічні показники процесу водоподачі, а й про добовий графік витрати води з мережі водопостачання, що забезпечує можливість урахування впливу чинників зовнішнього середовища на ефективність режиму електроспоживання.

2. Запропоновано новий підхід до формалізації урахування впливу зовнішнього середовища на електроспоживання насосної станції водоподачі, який базується

на виділенні подібності добових графіків витрати води з мережі водопостачання, нерівномірність яких описана класичними та морфометричними показниками, що дозволяє виявити циклічні зміни технологічного процесу, зумовлені впливом сезонних і соціальних чинників, та визначити часові діапазони для визначення (спостереження) визначальних змінних та побудови БРЕ.

3. Вперше побудовано структуровану багатofакторну модель базового рівня електроспоживання насосної станції водоподачі, яка базується на груповому урахованні не лише технологічних параметрів процесу водоподачі, а й характеристик нерівномірності витрати води з мережі водопостачання залежно від типу дня, що дозволяє враховувати вплив на ефективність електроспоживання циклічних і сезонних змін стану зовнішнього середовища та соціальних чинників.

4. Удосконалено процедуру здійснення контролю ефективності електроспоживання насосної станції водоподачі, яка базується на використанні інструменту статистичного контролю та передбачає контроль як електроспоживання, так і технологічних показників, що забезпечує можливість виявлення не лише моментів невідповідної зміни рівня ефективності електроспоживання, а й причин, що зумовлюють ці зміни, а також сприяє виявленню факту неефективної організації технологічного процесу водоподачі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- процедура виявлення подібних добових ГВВ дозволяє виявити циклічні зміни технологічного процесу та визначити характеристики витрати води та профіль її добового ГВВ для типового дня кожного сезону з метою їх використання для планування ефективного режиму водоподачі та електроспоживання;

- розроблені моделі електроспоживання, які є адаптованими до режиму водоподачі для характерного типу дня відповідного сезону, дозволяють врахувати фактичні умови функціонування НС, зумовлені впливом сезонних та соціальних чинників, та визначити БРЕ, характерний для конкретного часового проміжку;

- запропонована процедура контролю електроспоживання, забезпечує можливість комплексного аналізу ефективності електроспоживання, причин, що зумовлюють відхилення від запланованого значення, а також ефективності технологічного процесу водоподачі, що є основою для прийняття рішень щодо удосконалення технологічного процесу та підвищення рівня енергоефективності НС.

Реалізацію результатів роботи здійснено на КП «Луцьководоканал» під час побудови СЕМ підприємства для підвищення енергоефективності СКВ м. Луцьк. Результати дисертаційної роботи використані в НДІ автоматики та енергетики «Енергія» НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» під час розробки автоматизованого робочого місця енергоменеджера промислових підприємств, а також у навчальному процесі як частина дисципліни «Енергетичний аудит та енергоменеджмент», що викладається в Луцькому НТУ.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримано автором самостійно. В роботах [1]-[18], написаних та опублікованих в співавторстві, автору належать такі результати: [5] - результати виявлення прихованих закономірностей у ГВВ, їх опис та формування структурованого виду моделі електроспоживання; [6] - формулювання принципів контролю

енергоефективності в СКВ, опис сформованих категорій класів; [7] - опис множини характеристик нерівномірності добових ГВВ, побудова архітектури їх аналізу; [8] - формалізація процедури контролю енергоефективності в СКВ, принципи її інформаційного забезпечення; [9] - характеристика основних процедур та етапів оперативного контролю енергоефективності в СКВ; [12] - побудова архітектури контролю енергоефективності в СКВ, опис її етапів; [13] - опис процедури виявлення прихованих закономірностей у ГВВ та принципів урахування її результатів; [14] - характеристика етапів процедури контролю енергоефективності в СКВ; [15] - формування множини характеристик опису нерівномірності графіків витрати води з мережі водопостачання; [16] - побудова процедури планування електроспоживання та опис її етапів. Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1] – [18], були отримані у Луцькому НТУ.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень апробовано на таких наукових конференціях та семінарах: International Conference «Systems, Control and Information Technology», Industrial Research Institute for Automation and Measurements PIAP, Warsaw, Poland, 2016; International Conference «Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development», Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova, 2016; міжнародних науково-технічних та навчально-методичних конференціях «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку», НТУУ «КПІ», Київ, 2015 р., 2016 р., 2017 р.; міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», ХНТУСГ, Харків, 2015 р., 2016 р., 2017 р.; IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками», ВНТУ, м. Вінниця, 2017 р.; міжнародній науково-практичній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» НТУУ «КПІ», Київ, 2016 р.; XVII міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика.», КрНУ, Кременчук, 2016 р.; міжнародних науково-технічних конференціях «Підвищення ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах», Луцький НТУ, Луцьк, 2014 р., 2016 р.; міжнародній науково-практичній конференції молодих науковців, аспірантів та студентів «Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електротехніка», НУВГП, Рівне, 2016 р.; всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика», ДВНЗ «ПДТУ», Маріуполь, 2015 р.; I всеукраїнському науковому семінарі «Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах», Луцький НТУ, Луцьк, 2015 р.; всеукраїнських науково-технічних семінарах «Проблеми і перспективи енергозбереження в ЖКГ та на промислових підприємствах», Луцький НТУ, Луцьк, 2015 р., 2017р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 7 - у наукових фахових виданнях України (з них 3 внесені до міжнародних науково-метричних баз даних), 2 - у закордонних періодичних виданнях (з них 1 внесена до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus), 3 - у наукових журналах та збірниках наукових праць, 6 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 128 сторінок основного друкованого тексту, 28 рисунків, 14 таблиць, список використаних джерел із 175 найменувань та дев'ять додатків. Загальний обсяг роботи – 240 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, зазначено зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, подано відомості щодо апробації роботи та публікацій, особистого внеску здобувача.

У **першому розділі** виконано аналіз стану ефективності електроспоживання та причин, що зумовлюють високий рівень витрати електроенергії на об'єктах водопостачання. Встановлено, що основна частка електроенергії, що споживається в СКВ, припадає на НС II-го підйому. Проведений аналіз чинників, що впливають на електроспоживання в СКВ, дозволив стверджувати, що водоспоживання є одним з зовнішніх чинників, що визначає витрату води з мережі водопостачання, а отже ефективність режиму водоподачі та разом з іншими технічними та технологічними чинниками - ефективність режиму електроспоживання.

На основі аналізу існуючих підходів та шляхів підвищення енергоефективності об'єктів водопостачання виявлено причини, які ускладнюють можливість їх застосування для управління енергоспоживанням. Виконано аналіз сучасних інструментів забезпечення енергоефективності, в тому числі, моніторингу ефективності енергоспоживання як складової СЕМ, їх призначення та завдань, а також питань, що потребують вирішення для реалізації принципів ефективного управління електроспоживанням в СКВ згідно вимог стандартів серії ISO 50000, зокрема, урахування циклічних змін виробництва під час визначення БРЕ.

Проведений аналіз показав необхідність удосконалення функцій моніторингу електроспоживання об'єктів водопостачання, зокрема, планування та контролю, шляхом урахування фактичних умов їх функціонування, зумовлених впливом сезонних і соціальних чинників. Зазначено, що основою управління енергоефективністю має бути інформаційна база даних (БД), що містить енергетичні, технічні, технологічні показники та характеристики зовнішнього середовища, використання якої дозволить вирішити задачу моделювання електроспоживання та визначення БРЕ, унормованого до визначальних змінних та адаптованого до збурюючих впливів зовнішнього середовища, що є основою контролю ефективності електроспоживання. Зважаючи на значну кількість чинників, що впливають на витрату електроенергії НС, наявність взаємозв'язку між ними та складність отримання їх математичного опису, доцільним є використання методів інтелектуального аналізу інформації, які на основі її вивчення забезпечують виявлення прихованих закономірностей, що визначають формування режиму водоподачі та електроспоживання, та отримання залежності з невеликою кількістю змінних.

У **другому розділі** запропоновано підхід до урахування циклічних змін процесу водоподачі, зумовлених впливом чинників зовнішнього середовища та виконано формування типових діапазонів для визначальних змінних БРЕ.

Для аналізу впливу зовнішніх чинників досліджено взаємозв'язок формування режимів водоподачі та електроспоживання, вплив на них водоспоживання, яке залежить від сезонних (відображають вплив температури повітря, опадів) та соціальних (відображають вплив зміни укладу життя у робочі, вихідні дні) чинників. Зазначено: основним показником режиму водопостачання є добовий ГВВ. Аналіз річного та добових ГВВ НС II підйому водозабору «Дубнівський» КП «Луцькводоканал» показав: зміни витрати води з мережі водопостачання в часі відображають циклічність щоденного способу життя; крім добової циклічності виявлено повторюваність добових ГВВ впродовж тижня та сезонів року.

Створення БД добової витрати води з мережі водопостачання в межах системи моніторингу режимів СКВ забезпечує можливість здійснення аналізу добових ГВВ для пошуку їх подібності з урахуванням впливу зовнішніх чинників.

Для опису добового ГВВ використано параметри, які відображають абсолютні характеристики режиму водоподачі, та класичні показники нерівномірності добових графіків: середнє, максимальне (мінімальне) значення протягом доби; дисперсію, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнти форми, максимуму, заповнення та нерівномірності. Виявлено наявність різних за формою графіків з однаковими значеннями їх характеристик. Для більш детальної оцінки нерівномірності ГВВ застосовано інструмент аналізу фігур різної форми - морфометричний підхід. Добовий ГВВ представлено у вигляді кругової діаграми радарного типу (ДРТ), а для опису використано базові (X, Y координати; периметр; площа; координати центра ваги; округлість; компактність; видовження; випуклість) та похідні (радіус вписаного та описаного кіл; довжина, ширина; головна та додаткова вісь видовження; периметр випуклості; площа випуклості; компактність випуклості; кут осей видовження) морфометричні параметри.

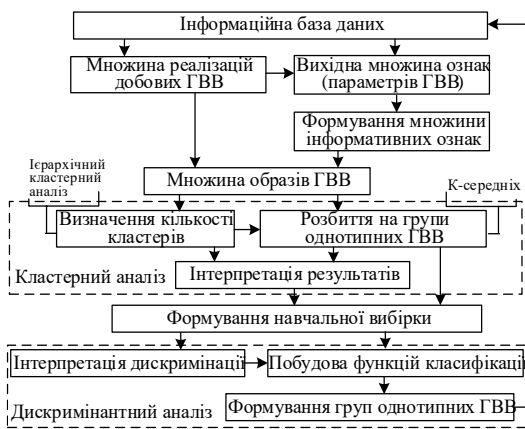


Рисунок 1 – Послідовність використання процедур КА та ДА для класифікації ГВВ

Оскільки одночасне врахування значної кількості класифікаційних ознак, що описують ГВВ, ускладнює інтерпретацію отриманих результатів, то виявлен-

Задача пошуку прихованих закономірностей у характері витрати води розв'язана шляхом формування класів подібних ГВВ. На початковому етапі використано кластерний аналіз (КА): ієрархічний КА та метод К-середніх (рис. 1). Це дозволило сформувати групи однотипних ГВВ (навчальну вибірку) та на їх основі методом дискримінантного аналізу (ДА) виконати побудову функцій класифікації для виявлення належності добових ГВВ до одного з класів та перевірку якості отриманих результатів кластеризації.

ня прихованих закономірностей у добових ГВВ виконувалось у два етапи: 1 етап - виявлення впливу сезонності; 2 етап - виявлення впливу соціальних чинників.

На першому етапі використано характеристику ГВВ за об'ємами водоподачі та класичні показники нерівномірності. Добові ГВВ характеризуються значною нерівномірністю та відмінністю для різних днів тижня. Тому, на другому етапі для врахування форми ГВВ використано морфометричні показники.

Відбір інформативних класифікаційних ознак виконано шляхом виключення взаємозалежних ознак на основі кореляційного аналізу. У результаті сформовано набори ознак для виявлення впливу: 1) сезонності: x_1 - об'єм добової витрати води з мережі; x_2 - максимальне значення добової витрати води; x_3 - мінімальне значення добової витрати води; x_5 - мінімальне значення витрати води протягом денних годин доби; x_9 - дисперсія за день; 2) соціальних чинників: x_2 - площа ДРТ; x_5 - округлість; x_6 - компактність; x_7 - видовження; x_{10} - кут видовження; x_{11} - випуклість; x_{15} - зміщення координат центра ваги.

Результати ієрархічного КА, дозволили стверджувати:

1 етап - формалізація впливу сезонності: має місце тенденція об'єднання в один кластер добових ГВВ, характерних для певної пори року, що підтверджує вплив сезонності на характер витрати води з мережі; наявним є кластер «Нерегулярні дні», що може бути обумовлено соціальними чинниками, погодними умовами, аварійними ситуаціями в мережі, що не були вчасно виявлені. Виділено п'ять класів ГВВ: 1 клас - «літо» - ГВВ, що відповідають періоду профілактичних робіт у системі тепло- та гарячого водопостачання; 2 клас - «зима» - ГВВ, що відповідають опалювальному періоду; 3 клас - «весна-літо-осінь» - ГВВ, що відповідають весняно-літньо-осінньому періоду; 4 клас - «нерегулярні дні» - ГВВ різних місяців та сезонів; 5 клас - ГВВ, що відповідає 01 січня.

2 етап - формалізація впливу соціальних чинників: аналіз результатів першого етапу дозволив припустити наявність закономірності групування об'єктів в межах кожного кластеру. Для демонстрації результатів вибрано діапазон значень добових ГВВ 2 класу, які відповідають сезону «зима». Отримані результати підтверджують наявність впливу на характер ГВВ соціального фактору, зумовленого зміною ритму життя у вихідні та святкові дні. Виділено чотири класи ГВВ: 1 клас - «робочі дні» - ГВВ, що відповідають робочим дням; 2 клас - «вихідні дні» - ГВВ, що відповідають вихідним та святковим дням; 3 клас - «нерегулярні дні» - ГВВ днів різного типу; 4 клас - ГВВ, що відповідає 01 січня.

Розбиття ГВВ на групи однотипних для першого та другого етапу виконано за допомогою методу k-середніх (кластер, який містив один ГВВ (01 січня) виключено з розгляду). Результатом є формування груп однотипних ГВВ, що підтвердило подібність ГВВ за сезоном і типом дня. Обґрунтованість розбиття на вибрану кількість кластерів; правильність побудови та надійність виділених кластерів; однорідність класифікаційних ознак об'єктів, об'єднаних в один кластер, та значимість їх внеску в розподіл об'єктів на групи підтверджено результатами дисперсійного аналізу. Встановлено: змінна x_3 , визначена як інформативна для етапу 1, а також змінні x_6 та x_{15} , визначені як інформативні для етапу 2, мають незначний вплив на класифікацію, тому їх було виключено з розгляду.

Результати ДА підтвердили статистичну значущість дискримінації, значущість та інформативність ознак, відібраних на етапі автоматичної класифікації, висновки щодо незначущості ознаки x_3 для етапу 1 та ознак x_6 та x_{15} для етапу 2. Аналіз значущості дискримінантних функцій та їх навантаженості дискримінантними змінними дозволив стверджувати: для виявлення впливу сезонності найбільш важливою у моделі дискримінації ГВВ є змінна x_1 – добова витрата води з мережі (хоча важливими є й змінні x_5 та x_2), що підтверджує припущення про відмінність ГВВ, зумовлену зміною характеру водоспоживання в різні пори року; для виявлення впливу соціальних чинників найбільш важливими є змінні x_7 – видовження та x_{10} – кут видовження, що підтверджує припущення про відмінність у ГВВ, зумовлену зміною ритму життя у робочі та вихідні дні.

На заключному етапі ДА виконано побудову рівнянь функцій класифікації ГВВ за сезоном $h_{Q_i}=f(x_n)$ та типом дня $h_{K_{дн,j}}=f(x_m)$, які забезпечують можливість розпізнавання належності нових спостережень ГВВ до одного з типових класів.

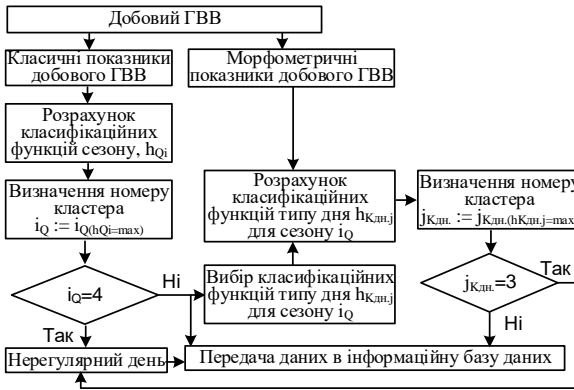


Рисунок 2 – Алгоритм ідентифікації належності ГВВ до типових кластерів

задачі: формування для отриманих класів усереднених характеристик витрати води з мережі та усереднених добових ГВВ характерних днів (профілів) і визначення їх параметрів для подальшого планування електроспоживання. Як усереднене значення сезонної витрати води з мережі прийнято вибіркове математичне сподівання добових витрат води вибірок, утворених відповідними об'єктами певного кластеру, а межі її зміни визначено як довірчий інтервал до вибіркового середнього. Розрахунки (табл.1) виконано з урахуванням результатів класифікації ГВВ на основі даних про добуву витрату води для КП «Луцькводоканал».

Таблиця 1 – Значення витрати води з мережі

Кластер	Сезон	Добова витрата води Q , м ³	
		Середнє значення	Довірчий інтервал ($p=0,997$)
1	«літо»	42992,86	$(41928,85 < \bar{Q} < 44313,65)$
2	«зима»	47850,1	$(47241,9 < \bar{Q} < 48458,3)$
3	«весна-літо-осінь»	49860,44	$(48466,25 < \bar{Q} < 51254,63)$

Процедура ідентифікації ГВВ до відповідного кластеру містить два етапи (рис. 2): 1) за сезоном; 2) за типом дня за умови не відповідності ГВВ класу нерегулярних днів. Перевірка умови необхідна для коректного формування БРЕ та подальшого контролю електроспоживання.

Виявлення подібності у добових ГВВ та формування їх однотипних груп забезпечило можливість формалізованого опису режиму водопо-

Процедура побудови профілів для типових днів передбачає:

- накладання ГВВ отриманого кластера один на одний;
- визначення середніх значень витрати води з мережі для кожної t -ї години:

$$\bar{Q}_t = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Q_{j,t}, \quad t \in (1;24), \quad (1)$$

де m – кількість ГВВ даного кластеру;

- визначення меж зміни витрати води для кожного моменту часу t шляхом побудови довірчого інтервалу з довірчою імовірністю $p=0,997$ для середнього значення годинної витрати води з мережі:

$$\bar{Q}_t - \frac{s_t}{\sqrt{m}} t \left[1 - \frac{\alpha}{2}, (m-1) \right] < \bar{Q}_t < \bar{Q}_t + \frac{s_t}{\sqrt{m}} t \left[1 - \frac{\alpha}{2}, (m-1) \right], \quad (2)$$

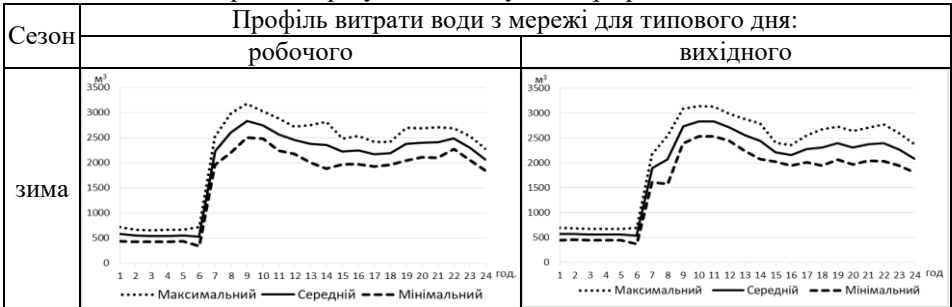
де s_t – вибіркове середньоквадратичне відхилення для моменту часу t , визначене з урахуванням оцінки дисперсії для вибірки спостережень:

$$s_t^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (Q_{j,t} - \bar{Q}_t)^2 \quad (3)$$

- побудова профілю ГВВ для даного кластера.

Результатом запропонованої процедури є отримання профілів для типового дня (робочого та вихідного) кожного сезону (табл. 2).

Таблиця 2 – Фрагмент результатів побудови профілів добових ГВВ



Нерегулярні дні не враховано. Побудовані профілі витрати води з мережі для типового дня є основою для планування ефективного режиму водоподачі.

Для опису отриманих профілів виконано їх трансформацію в діаграму радіального типу та розраховано морфометричні параметри (табл.3).

Таблиця 3 – Фрагмент результатів розрахунку параметрів профілів добових ГВВ

Сезон	Параметр	Значення параметра за середнім профілем для типу дня:	
		робочий	вихідний
Сезон «Зима»	Округлість	0,33	0,36
	Компактність	0,67	0,71
	Видовження	0,51	0,53
	Випуклість	0,86	0,89

Отримані результати є основою для визначення БРЕ НС з урахуванням її фактичних умов роботи протягом конкретного часового інтервалу.

У **третьому розділі** виконано побудову багатофакторної математичної моделі електроспоживання НС водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників, які визначають режим водоподачі та ефективність електроспоживання.

Модель електроспоживання повинна бути диференційованою до режиму водоподачі протягом певної доби, тобто, будуватись для кожного з типових днів кожного сезону на основі даних щодо вхідних змінних, а область її використання обмежується визначеними для кожного сезону межами зміни об'єму поданої в мережу води та запланованим для типового дня режимом роботи НА. Отже:

$$W_{K_{cesi}, K_{on}, j} = a_0^{i,j} + a_1^{i,j} x_1 + a_2^{i,j} x_2 + \dots + a_n^{i,j} x_n, \quad Q_i \in [Q_{\min i}, Q_{\max i}], \quad (4)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – вхідні змінні, що впливають на ефективність електроспоживання; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коефіцієнти рівняння; Q_{\min}, Q_{\max} – мінімальне та максимальне значення водоподачі для відповідного сезону; i – номер кластеру за сезоном, $i = 1, \dots, k$; k – кількість кластерів за сезоном; j – номер кластеру характерного дня $j = 1, \dots, m$; m – кількість кластерів характерних днів.

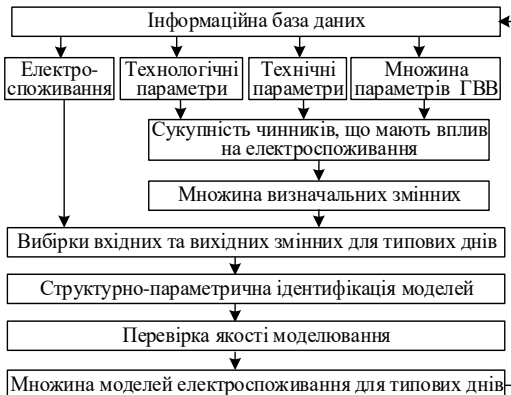


Рисунок 3 – Структурна схема процедури моделювання електроспоживання

За умови організації ефективного режиму водоподачі, передбачається, що в кожен момент часу роботи НС забезпечується ввімкнення мінімально необхідної кількості насосних агрегатів (НА). За умови вдалого підбору типу і кількості НА ККД НС має значення, близькі до максимальних, тобто величина ККД також мало змінна і його теж можна виключити з моделі.

Для НС з фіксованим складом НА, які працюють у експлуатаційному діапазоні згідно попередньо визначеного режиму, коефіцієнт ефективності НС:

$$K_{ef}^{НС} = F(\Delta H_{\Sigma}), \quad (6)$$

де ΔH_{Σ} – сумарний надлишковий напір, створений НС впродовж доби.

Коефіцієнт енергоефективності режиму водоподачі, що враховує нераціональні витрати електроенергії за рахунок регулювання водоподачі засувками або байпасуванням у випадку нерегульованих НА (ННА):

Необхідним є (рис. 3): формування множини визначальних змінних; наборів експериментальних даних; вибір структури моделі; перевірка якості моделювання.

Період дискретизації для збору інформації – одна доба.

Сумарні витрати електроенергії НС залежать від обсягу води Q , що перекачується, створюваного напору $H_{нс}$ та ККД $\eta_{нс}$, тобто:

$$W_{нс} = f\{Q, H_{нс}, \eta_{нс}\} \quad (5)$$

Середньодобовий тиск НС не змінюється, або змінюється незначно, що дозволяє виключити його

$$K_{ef}^{HHA} = \frac{Q_{факт}}{\sum_{i=1}^n Q_{ном.i} \cdot T_{факт.i}} \quad (7)$$

де $Q_{факт}$ - фактична продуктивність (подача) насосної станції; $Q_{ном.i}$ - номінальна продуктивність i -го насосу; $T_{факт.i}$ - фактичний час роботи i -го насосу протягом доби; n - кількість працюючих насосів.

З урахуванням викладених міркувань, електроспоживання НС з ННА:

$$W_{nc} = f\{Q, K_{ef}^{HHA}, \Delta H_{\Sigma}\} \quad (8)$$

Електроспоживання НС з ННА та регульованими НА (РНА):

$$W_{nc} = W_{HHA} + W_{PNA} \quad (9)$$

Оскільки РНА забезпечує покриття зумовлених нерівномірністю та випадковим характером водоспоживання миттєвих відхилень об'ємів витрати води від їх значень згідно запланованого режиму водоподачі, то для спрощення моделювання електроспоживання НС з комбінованим регулюванням (з n ННА і m РНА) запропоновано враховувати морфометричні показники нерівномірності ГВВ:

$$W_{nc} = f\{Q, K_{ef}^{HHA}, \Delta H_{\Sigma}, M_1, M_2, M_3, M_4\}, \quad (10)$$

де M_1 - округлість; M_2 - компактність; M_3 - видовження; M_4 - випуклість.

Передумовою моделювання електроспоживання є створення БД про електроспоживання та технологічні параметри режиму роботи НС і формування вибірок ретроспективних даних для електроспоживання та визначальних змінних для вихідних та робочих днів кожного сезону (з урахуванням результатів кластеризації). Для оцінки взаємозв'язку між змінними використано кореляційний аналіз. Виявлено: для всіх вибірок є наявним зв'язок між вихідною та вхідними змінними, проте ступінь тісноти зв'язку є різним; найбільший вплив на електроспоживання мають змінні подача та надлишковий тиск; коефіцієнт енергоефективності режиму водоподачі корелює з подачею, тому його виключено з розгляду.

Оскільки механізм взаємодії відібраних змінних є невідомим, то як засіб моделювання електроспоживання за експериментальними даними вибрано метод групового урахування аргументів. Застосовано комбінаторний алгоритм. Пошук моделей оптимальної складності виконувався в таких класах опорних функцій:

1) моделі лінійного опису:
- клас №1

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_i$$

2) моделі лінійного опису з ефектом взаємодії:
- клас №2

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

3) моделі нелінійного опису:
- клас №3: $p=2$
- клас №5: $p=3$

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

4) моделі нелінійного опису з ефектом взаємодії:
- клас №4: $p=2$
- клас №6: $p=3$

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

Моделювання електроспоживання виконано в ПП GMDH Shell DS 3.8.2. Отримано сукупність моделей-кандидатів для типових днів кожного сезону (табл. 4), кожна з яких є оптимальною та забезпечує мінімум внутрішнього критерію $\Delta^2(A)$, критерію регулярності $\Delta^2(B)$, незміщеності n_{zc} та похибки прогнозу δ^2 , а також максимум коефіцієнта кореляції R у своєму класі опорних функцій.

Для вибору кращої структури моделі електроспоживання на основі критеріїв її адекватності (регулярності, мінімуму зсуву, Шварца, коефіцієнту детермінації) та точності прогнозу сформовано цільові функції багатокритерійного вибору:

$$\begin{aligned} \Delta^2(B) &\rightarrow \min; & n_{zc} &\rightarrow \min; \\ R^2 &\rightarrow \max; & BIC &\rightarrow \min; & \Delta^2(C) &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналіз результатів не дав однозначної відповіді щодо кращої структури моделі, тому було застосовано морфологічний критерій вибору (табл.5). Для цього сукупність критеріїв якості моделі та точності прогнозу представлено у вигляді діаграми радарного типу та розраховано площу утвореної фігури. Кращою є модель з найменшою площею фігури. В результаті було відібрано кращі структури моделей електроспоживання для кожного типового дня кожного сезону (табл.6).

Таблиця 4 – Фрагмент результатів моделювання електроспоживання

Клас опорної функції	Математична модель
	Номер кластеру за сезоном - 2 (зима)
	Номер кластеру за типом дня - 1 (робочий)
№1	$W = 19,175 + Q * 0,031 + \Delta H * 3,027 + M_1 * (-0,628) + M_2 * (-1,99) + M_3 * (-0,194) + M_4 * 4,622$
№2	$W = 13,87 + Q * 0,546 + Q * \Delta H * 0,161 + Q * M_1 * 0,511 + \Delta H * M_2 * (-1,723) + \Delta H * M_4 * 3,94 + M_1 * M_3 * 5,569 + M_1 * M_4 * 24,226 + M_2 * M_3 * 34,535 + M_3 * 54,08 + M_3 * M_4 * (-91,948)$
№3	$W = 0,71 + Q^2 * 0,021 + \Delta H^2 * 0,123 + M_1^2 * (-1,775) + M_2^2 * (-1,711) + M_4^2 * 3,782$
№4	$W = 15,469 + Q * \Delta H * 0,019 + Q * M_3 * (-0,358) + \Delta H * M_1 * (-0,556) + \Delta H * M_2 * (-1,478) + \Delta H * M_4 * 3,794 + M_1^2 * 8,653 + M_2 * M_3 * 29,577 + M_3 * 60,42 + M_3 * M_4 * (-75,857) + M_3^2 * 1,998$
№5	$W = 7,744 + Q^3 * 0,001 + \Delta H^3 * 0,006 + M_1^3 * (-5,434) + M_3^3 * 0,242 + M_4^3 * 2,394$
№6	$W = 17,392 + Q * \Delta H^2 * 0,003 + \Delta H * M_4 * 4,451 + \Delta H^2 * M_2 * (-0,074) + \Delta H^3 * 0,0006 + M_1 * (-344,907) + M_1 * M_2 * 16,015 + M_1 * M_2^2 * (-90,73) + M_1 * M_3 * 5,164 + M_1 * M_3^2 * 2,133 + M_1 * M_4^2 * (-61,85) + M_1^2 * (-29,485) + M_1^2 * M_2 * 48,85 + M_1^3 * 19,217 + M_2 * (-14,142) + M_3 * M_4 * (-69,758) + M_3 * M_4^2 * 39,39$

Таблиця 5 – Фрагмент результатів розрахунку критеріїв адекватності

Номер кластеру за сезоном	Номер кластеру за типом дня	Клас функції	$\Delta^2(B)$	n_{zc}	R^2	BIC	$\Delta^2(C)$	Площа ДРТ
2 (зима)	1 - робочий	№1	0,0037	0,0009	0,9942	13,577	0,0037	0,0443
		№2	0,0083	0	0,995	11,9161	0,0083	0,036
		№3	0,0453	0,0014	0,9902	21,8934	0,0437	0,202
		№4	0,0072	0,0182	0,9952	11,5524	0,0072	0,0807
		№5	0,1777	0,0488	0,9791	46,5646	0,1726	2,3777
		№6	0,0533	0,0225	0,9952	11,1761	0,0505	0,2174

Таблиця 6 – Математичні моделі електроспоживання для типових днів

Кластер за сезоном	Кластер за типом дня	Модель електроспоживання
1 (Літо)	1 робочий	$W = 8.205 + Q*(0.516) + Q*\Delta H*(0.333) + Q*M_4*0.492 + \Delta H*2.394 + M_1*(-4.559) + M_1*M_3*9.527 + M_2*M_3*(-5.892) + M_2*M_4*6.920 + M_4*(-30.210)$
	2 вихідний	$W = 14.684 + Q*(0.646) + Q*M_2*(0.218) + \Delta H*M_4*1.221 + M_3*1.238 + M_1*M_3*(4.439) + M_4*(-14.776)$
2 (Зима)	1 робочий	$W = 13.8727 + Q*(0.546) + Q*\Delta H*0.161 + Q*M_1*(0.511) + \Delta H*M_2*(-1.724) + \Delta H*M_4*3.94 + M_1*M_3*5.57 + M_1*M_4*24.226 + M_2*M_3*34.535 + M_3*54.08 + M_3*M_4*(-91.948)$
	2 вихідний	$W = 23.342 + Q*(0.446) + Q*M_2*0.185 + Q*M_3*(-0.135) + Q^2*0.004 + \Delta H*2.577 + \Delta H^2*0.018 + M_1*1.884 + M_1*M_2*(-5.378) + M_1*M_3*(-4.044) + M_1^2*5.873 + M_2*M_3*(-10.959) + M_2*M_4*41.373 + M_2^2*(-28.438) + M_3*(-6.611) + M_3*M_4*20.997 + M_3^2*2.728 + M_4*(-55.145) + M_4^2*9.957$
3 (Весна-літо-осінь)	1 робочий	$W = 10.867 + Q*(0.454) + Q*\Delta H*(-0.263) + \Delta H*2.108 + \Delta H*M_2*(-0.396) + \Delta H*M_4*0.19 + M_2*7.386 + M_2*M_4*(-3.5)$
	2 вихідний	$W = 34.635 + Q*(0.358) + Q*\Delta H*(0.558) + Q*M_2*0.101 + \Delta H*4.235 + \Delta H*M_2*1.434 + \Delta H*M_4*(-3.351) + M_1*M_2*3.011 + M_1*M_3*(-3.777) + M_2*(-24.646) + M_3*1.073 + M_4*43.894$

Усі відібрані моделі належать до класу моделей з ефектом взаємодії.

У **четвертому розділі** запропоновано принципи адаптації функцій моніторингу енергоефективності, зокрема, планування та контролю електроспоживання НС, до впливу сезонних змін зовнішнього середовища та соціальних чинників.

Процедура планування передбачає встановлення цільових змінних з урахуванням фактичних умов функціонування НС. Виконаний в розділі 2 опис режиму водоподачі для типового дня кожного сезону забезпечує формування нормативів для визначальних змінних: середніх значень кожної змінної, які розглядаються як планові значення для визначення БРЕ, а також допустимих меж їх зміни, встановлених як довірчий інтервал з довірчою імовірністю $p=0,997$.



Рисунок 4 – Визначення БРЕ

Планування електроспоживання - визначення (на основі моделі електроспоживання та даних щодо вхідних змінних для даного типу дня) БРЕ (рис. 4), точніше його довірчого інтервалу, характерного для запланованого з урахуванням профілю ГВВ режиму водоподачі протягом даної доби.

Процес моніторингу забезпечує отримання інформації про електроспоживання та технологічні параметри НС та можливість їх співставлення з встановленими нормативами. Розроблено алгоритм контролю (рис.5), що передбачає: перевірку належності фактичного ГВВ до заданого енергоменеджером сезону та типу дня; контроль електроспоживання для виявлення відхилення його значень від запланованих; контроль технологічних параметрів водоподачі для виявлення причин таких відхилень; повідомлення енергоменеджера.

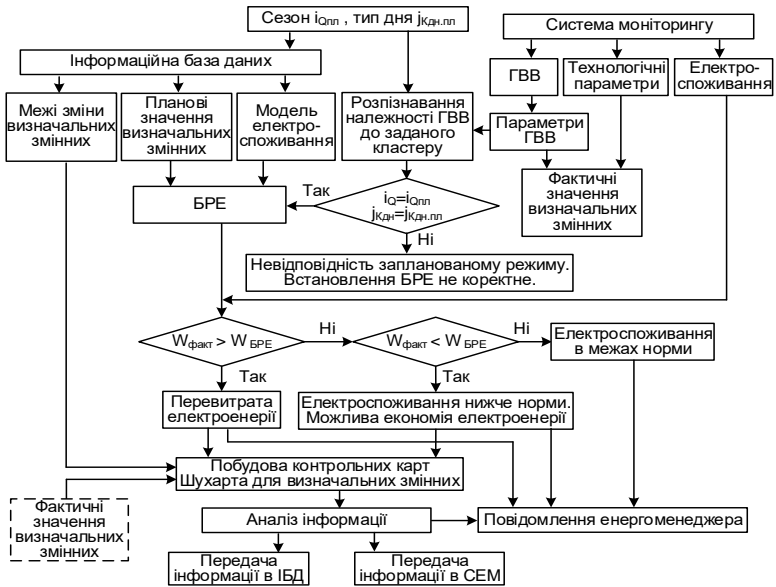


Рисунок 5 - Алгоритм контролю ефективності електроспоживання

Для здійснення контролю електроспоживання НС як спосіб ідентифікації неефективного електроспоживання обрано порівняння фактичних обсягів спожитої електроенергії з запланованим значенням БРЕ, встановленого як довірчий інтервал до відповідної математичної моделі електроспоживання, а для контролю визначальних змінних – контрольні карти Шухарта (X-карти індивідуальних значень). Межі зміни технологічних параметрів прийнято як граничні контрольні (встановлені на відстані $\pm 3\sigma$ від центральної лінії); додатково встановлено попереджувальні межі (на відстані $\pm 2\sigma$ від центральної лінії).

Розглянуто питання повідомлення енергоменеджера про перевищення встановлених нормативів - ідентифікації «тривоги» та налаштування відповідних інструментів сигналізації (алармів). Організація повідомлення про перевищення БРЕ (табл. 7) враховує особливості побудови нормативу, встановленого як довірчий інтервал до очікуваного електроспоживання, межі якого є контрольними.

Таблиця 7 - Опис інструментів сигналізації для електроспоживання

Тип аларму	Значення аларму	Характер тривоги	Тип сигналу
«Hi»	$\bar{x}_i + 2\sigma_i$	Перевитрата електроенергії	Сигналізація
Deviation	$\bar{x}_i \pm \sigma_i$	Електроспоживання в допустимих межах	Повідомлення
«Lo»	$\bar{x}_i - 2\sigma_i$	Економія електроенергії	Повідомлення

Запропонована процедура контролю та аналізу енергоефективності дає змогу об'єктивно визначати періоди часу, у які відбулися невідповідності зміни рівня ефективності електроспоживання, а також аналізувати причини їх виникнення.

На основі даних щодо технологічних параметрів режиму водоподачі та електроспоживання НС II підйому водозабору «Дубнівський» КП «Луцькводоканал» виконано контроль ефективності електроспоживання для робочих днів протягом лютого місяця та аналіз отриманих результатів. Під час ідентифікації належності фактичного ГВВ заданому сезону та типу дня виявлено: ГВВ 04.02, є нерегулярним за сезоном; ГВВ 05.02, є нерегулярним за типом дня. Тому, контроль електроспоживання для даних днів не проводиться. Планові значення електроспоживання встановлено у вигляді довірчого інтервалу до очікуваного електроспоживання, визначеного на основі математичної моделі електроспоживання: сезон – зима, характер дня – робочий. Шляхом співставлення фактичного електроспоживання з плановими (рис. 6) було виявлено моменти зниження (11.02) та можливо-



Рисунок 6 - Контроль ефективності електроспоживання НС на основі встановлення довірчих інтервалів до математичної моделі електроспоживання

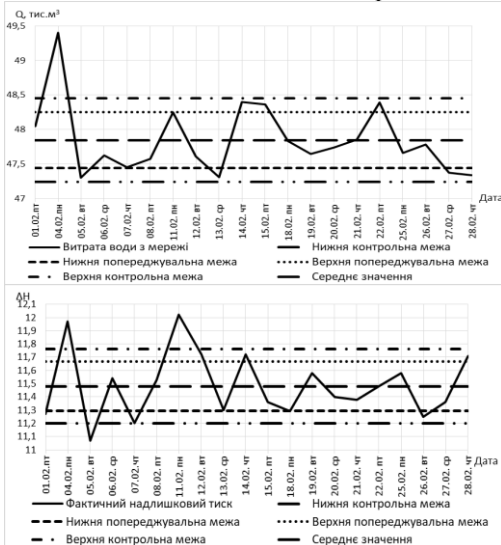


Рисунок 7 - Контрольні X-карти індивідуальних значень технологічних параметрів

го підвищення (13.02. та 26.02.) ефективності електроспоживання. Для виявлення причин, що зумовили дану ситуацію, виконано контроль визначальних змінних шляхом побудови контрольних карт Шухарта (рис. 7). Як контрольні межі прийнято довірчі інтервали визначальних змінних, визначені на основі відповідних вибірок для цих змін-

них для робочих днів зимового сезону. За результатами аналізу контрольних карт Шухарта виявлено: 11.02 збільшення значення надлишкового тиску в диктуючих точках мережі на фоні незначного зростання витрати води з мережі, тобто, причиною перевитрати електроенергії є неефективний режим водоподачі; зниження електроспоживання 13.02. супроводжувалось зниженням витрати води з мережі; зниження електроспоживання 26.02. супроводжувалось зменшенням надлишкового тиску на фоні витрати води з мережі в контрольних межах, тобто, мало місце підвищення ефективності режиму водоподачі, а отже й ефективності електроспоживання. Також було виявлено: 28.02. електроспоживання відповідало встановленому

БРЕ, проте на фоні зниження витрати води з мережі мало місце збільшення зна-

чення надлишкового тиску в диктуючих точках мережі, що свідчить про зниження ефективності режиму водоподачі.

Таблиця 8 – Результати контролю ефективності електроспоживання НС

Дата	Відхилення $W_{\text{факт}}$ від нормативу, %	Вихід технологічних змінних за контрольні / попереджувальні межі		Причина	Повідомлення енергоменеджера
		Q , м ³	ΔH , м		
01.02.	0	0/0	$\frac{0}{-0,02}$		Електроспоживання в межах норми
04.02.	-	$\frac{+951}{+1152,67}$	$\frac{+0,21}{+0,30}$	Зростання Q	Невідповідність ГВВ запланованому режиму водоподачі
05.02.	-	$\frac{0}{-141,67}$	$\frac{-0,13}{-0,22}$	Інші чинники	Невідповідність ГВВ запланованому режиму водоподачі
...
11.02.	+3,2	$\frac{0}{+1,7}$	$\frac{+0,26}{+0,35}$	Зростання ΔH	Перевитрата електроенергії
12.02.	0	0/0	$\frac{0}{+0,05}$		Електроспоживання в межах норми
13.02.	-1,3	$\frac{0}{-131}$	0/0	Зменшення Q	Електроспоживання нижче норми
...
26.02.	-1,5	0/0	$\frac{0}{-0,04}$	Зменшення ΔH	Електроспоживання нижче норми Ефективне електроспоживання
27.02.	0	$\frac{0}{-67,67}$	0/0		Електроспоживання в межах норми
28.02.	0	$\frac{0}{-106,67}$	$\frac{0}{+0,04}$	Зростання ΔH при зменшенні Q	Зниження ефективності режиму водоподачі

Примітка: знак «+» - вище контрольного значення; знак «-» - нижче контрольного значення.

Виходячи із призначення та завдань моніторингу ефективності електроспоживання в СКВ здійснено формалізацію його процедури з використанням об'єктно-орієнтованої технології та побудовано його архітектуру (рис.8), яка передбачає урахування збудуючих впливів чинників зовнішнього середовища та реалізацію його основних функцій, зокрема планування та контролю, не лише для електроспоживання, а й для технологічних параметрів водоподачі.



Рисунок 8 - Архітектура моніторингу енергоефективності в СКВ

Виділено три категорії класів: WEB-service – сукупність класів, об'єднаних процедурою отримання вихідної інформації про об'єкт дослідження; FORMS-

class – сукупність класів, об'єднаних обчислювальними процедурами та моделями; CONTROL-class – сукупність класів, об'єднаних процедурами контролю.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну задачу удосконалення моніторингу ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання шляхом урахуванням фактичних умов їх функціонування, зумовлених впливом чинників зовнішнього середовища. Основні висновки та результати роботи:

1. Виконаний аналіз стану ефективності електроспоживання в СКВ, чинників, що впливають на електроспоживання об'єктів водопостачання, та шляхів підвищення їх рівня енергоефективності показав, що вирішення даної проблеми потребує ефективного управління енергоспоживанням з урахуванням фактичних умов функціонування об'єктів водопостачання шляхом впровадження системи моніторингу витрат електроенергії, технологічних параметрів НС та чинників зовнішнього середовища, а також удосконалення організації її функцій, зокрема, планування та контролю електроспоживання.

2. Встановлено, що зважаючи на значну кількість чинників, в тому числі, й водоспоживання, що має випадковий характер, які впливають на ефективність електроспоживання НС, наявність взаємозв'язку між ними та складність отримання математичних залежностей для його опису, необхідним є використання методів інтелектуального аналізу інформації, накопиченої в ретроспективних базах даних моніторингу, які дозволять виявити основні закономірності режиму водоподачі та електроспоживання з урахуванням впливу чинників зовнішнього середовища (сезонних та соціальних), що визначають витрату води з мережі водопостачання, а отже ефективність режиму водоподачі та електроспоживання.

3. На основі аналізу ГВВ виявлено повторюваність добових ГВВ впродовж тижня та сезонів року. Застосування методів кластерного та дискримінантного аналізу під час дослідження добових ГВВ, нерівномірність яких описана класичними та морфометричними параметрами, забезпечує можливість виявлення прихованих закономірностей витрати води з мережі водопостачання, зумовлених впливом сезонних та соціальних чинників, а також розбиття ГВВ на групи однотипних та побудови правил класифікації для виявлення належності нових спостережених ГВВ до одного з типових класів за сезоном та типом дня.

4. Формування сукупностей однотипних ГВВ на основі виявлення їх подібності дозволяє здійснити формалізований опис режиму водоподачі для отриманих класів, зокрема, сформувані усереднені характеристики витрати води з мережі для кожного сезону та профілі її добових графіків для кожного з типових днів, а також визначити часові діапазони для визначення (спостереження) визначальних змінних та побудови базового рівня електроспоживання, що забезпечує можливість подальшого коректного планування електроспоживання.

5. Відбір визначальних змінних на основі аналізу факторного поля чинників, що впливають на ефективність електроспоживання НС водоподачі, формування вибірок даних щодо їх значень, отриманих для відповідних репрезентативних часових періодів, та здійснення структурно-параметричної ідентифікації ма-

тематичної моделі електроспоживання НС за допомогою комбінаторного алгоритму методу групового урахування аргументів дозволило сформувати сукупність моделей-кандидатів для характерних днів відповідних сезонів, кожна з яких є оптимальною в своєму класі опорних функцій, а оцінка моделей за множиною критеріїв якості моделювання та точності прогнозу з одночасним використанням морфологічного критерію - виконати відбір кращої структури моделі, що забезпечило побудову структурованої математичної моделі електроспоживання, яка дозволяє врахувати фактичні умови функціонування об'єктів водопостачання, зумовлені сезонними змінами та соціальними чинниками.

6. Процедура планування електроспоживання, яка передбачає встановлення на основі формалізованого опису режиму водоподачі для типового дня кожного сезону нормативів для визначальних змінних (зокрема: середніх значень для кожної змінної, які розглядаються як планові значення для визначення БРЕ, а також допустимих меж їх зміни) та визначення на основі математичної моделі електроспоживання типового дня та планових значень визначальних змінних базового рівня електроспоживання, характерного для запланованого режиму водоподачі та адаптованого до впливу чинників зовнішнього середовища (сезонних та соціальних), забезпечує урахування фактичних умов функціонування НС, що є основою коректного контролю електроспоживання.

7. Запропонована процедура контролю енергоефективності, що базується на аналізі дотримання БРЕ, встановленого для заданого сезону та типу дня як довірчий інтервал очікуваного електроспоживання, та контрольних карт Шухарта, побудованих для контрольованих технологічних параметрів, контрольні межі яких встановлено в результаті формалізованого опису режиму водоподачі для типового дня кожного сезону, дає змогу об'єктивно визначати моменти часу, у які відбулися суттєві невіпадкові зміни рівня не лише ефективності електроспоживання, а й ефективності режиму водоподачі, а також аналізувати причини їх виникнення, що дозволяє планувати заходи з підвищення енергоефективності.

8. Достовірність та практичну цінність одержаних результатів підтверджено під час організації системи моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання КП «Луцькводоканал», зокрема, планування та контролю електроспоживання насосних станцій, де запропоновані методи впроваджено в якості складової СЕМ ПВКГ. Очікуване зниження витрат електроенергії 3-5 % в місяць.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Н. В. Давиденко, «Формування кортежу визначальних змінних базового рівня електроспоживання насосної станції водопостачання», *Вісн. ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*, Вип. 187 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», с. 23-25. 2017.
2. Н. В. Давиденко, «Використання морфометричного підходу для моніторингу нерівномірності водоподачі в системі комунального водопостачання», *Вісн. ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*, Вип. 176 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», с. 31-32, 2016.

3. Н. В. Давиденко, «Формалізація урахування чинників впливу на ефективність режиму електроспоживання в системі комунального водопостачання», *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. Вип. 175 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», с. 69-70, 2016.
4. Н. В. Давиденко, «Принципи урахування добової нерівномірності водоспоживання в задачах моніторингу ефективності енерговикористання в системах комунального водопостачання», *Вісн. ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*, Вип. 165 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», с. 28-30, 2015.
5. Н. В. Давиденко, В. П. Розен, та Л. В. Давиденко, «Процедура побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 3 (49), с. 31-37, 2017.
6. Н. В. Давиденко, В. П. Розен, та Л. В. Давиденко, «Структура системи комплексного контролю ефективності енергоспоживання об'єктів комунального водопостачання», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 4 (46), с. 81-88, 2016.
7. Н. В. Давиденко, та В. П. Розен, «Формування множини характеристик фактичного режиму водоспоживання в системах комунального водопостачання», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 3, с. 85-92, 2015.
8. N. Davydenko, L. Davydenko, V. Rozen, and V. Davydenko, «Formalization of Energy Efficiency Control Procedures of Public Water-Supply Facilities», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 543, pp. 196-202, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-48923-0_24
9. N. Davydenko, and L. Davydenko, «Integration of procedures of benchmarking and energy efficiency control in energy management system of municipal water supply enterprise», *Energetica Moldovei-2016: Aspecte regionale de dezvoltare, conferință internațională: Rapoarte*, Chișinău: S. n., Ed. 3. pp.123-131, 2016.
10. Н. В. Давиденко, «Завдання та етапи побудови системи контролю енергоефективності об'єктів комунального водопостачання», *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*, № 1, с. 22-27. 2016.
11. Н. В. Давиденко, «Дослідження нерівномірності добових графіків водоподачі в системі комунального водопостачання», *Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ*. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, с. 83-89, 2016.
12. Н. В. Давиденко, та Л. В. Давиденко, «Завдання та принципи організації комплексного контролю ефективності енерговикористання в системах комунального водопостачання», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*, Вип. 1/2016 (4), с. 201-203, 2016.
13. Н. В. Давиденко, та В. П. Розен, Л. В. Давиденко, «Принципи побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників», на *IV Міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*, Київ, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2017, с. 112-113.

14. Н. В. Давиденко, В. П. Розен, та Л. В. Давиденко, «Система комплексного контролю енергоефективності режимів роботи об'єктів комунального водопостачання», на *III Міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*, Київ, НТУУ «КПІ», 2016, с. 94-95.

15. Н. В. Давиденко, та В. П. Розен, «Формування сукупності характеристик нерівномірності водоспоживання для моніторингу енергоефективності режимів роботи систем комунального водопостачання», на *II Міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*, Київ, НТУУ «КПІ», 2015, с. 73-76.

16. Н. В. Давиденко, та Л. В. Давиденко, «MONITORING AND TARGETING SYSTEMS об'єктів водопостачання: процедура планування ефективного електроспоживання», на *IV Міжнар. наук.-техн. конф. Оптиміальне керування електроустановками*, Вінниця, ВНТУ, 2017. [Електронний ресурс] Доступно: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okeu/okeu/schedConf/presentations>

17. Н. В. Давиденко, «Опис нерівномірності водоподачі для моніторингу ефективності режимів енергоспоживання об'єктів водопостачання», на *VI міжнар. конф. Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*, Луцьк, Луцький НТУ, с. 55-56, 2016.

18. Н. В. Давиденко, «Формування інформаційного поля для моніторингу енергоефективності», на *Всеукраїнській наук.-практ. конф. молодих учених, спеціалістів, аспірантів. Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика*, Маріуполь, ДВНЗ «ПДТУ», 2015, с. 126.

АНОТАЦІЯ

Давиденко Н.В. Моніторинг ефективності електроспоживання насосних станцій системи комунального водопостачання з урахуванням чинників зовнішнього середовища. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2017.

Дисертація присвячена удосконаленню функцій моніторингу енергоефективності в СКВ, зокрема, планування та контролю електроспоживання, шляхом урахування фактичних умов функціонування НС водопостачання, зумовлених впливом чинників зовнішнього середовища.

Для формалізації впливу чинників зовнішнього середовища на електроспоживання НС водопостачання запропоновано підхід, який передбачає пошук подібності у ГВВ з мережі водопостачання, нерівномірність яких описана за допомогою класичних та морфометричних показників, формування груп однотипних ГВВ за сезоном і за типом дня та побудову правил класифікації для виявлення належності нових ГВВ до одного з типових класів. Його реалізація забезпечила можливість формалізованого опису режиму водоподачі, зокрема, визначення усереднених характеристики витрати води з мережі водопостачання для кожного се-

зону та профілів її добових графіків для характерних днів, а також часових діапазонів для визначення (спостереження) визначальних змінних та побудови БРЕ.

Для унормування БРЕ до визначальних змінних, відібраних на основі аналізу факторного поля чинників, що впливають на ефективність електроспоживання НС, за допомогою комбінаторного алгоритму МГУА виконано побудову структурованої багатофакторної моделі електроспоживання, яка адаптована до режиму водоподачі для характерного типу дня відповідного сезону, дозволяє врахувати конкретні умови функціонування НС, зумовлені впливом сезонних та соціальних чинників, та визначити БРЕ, характерний для заданого часового проміжку.

Удосконалено процедуру контролю ефективності електроспоживання, яка передбачає контроль електроспоживання шляхом аналізу дотримання БРЕ, встановленого як довірчий інтервал очікуваного електроспоживання, та технологічних параметрів шляхом побудови контрольних карт Шухарта, що забезпечує можливість комплексного аналізу ефективності електроспоживання, причин відхилення від запланованого значення та ефективності процесу водоподачі НС.

Ключові слова: моніторинг енергоефективності, базовий рівень електроспоживання, планування електроспоживання, контроль ефективності електроспоживання, насосна станція водопостачання.

ABSTRACT

Davydenko N.V. Monitoring of the power consumption efficiency of pumping stations of the public water supply system with the consideration the environment factors. – A manuscript.

A thesis submitted for the PhD degree in technical sciences on the speciality 05.09.03 – «Electrotechnical complexes and systems». – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2017.

The actual task of improvement the energy efficiency monitoring system in the public water supply system (PWSS), in particular, the functions of planning and control the power consumption, taking into consideration the actual conditions of water supply pumping stations (PS) functioning caused by the influence of the external environment factors, has been formed and solved in the thesis. This provides the possibility of identifying hidden reserves of energy saving and energy performance improvement of water supply facilities and the entire PWSS.

The daily water consumption graph (WCG) from the water supply network is a characteristic of the actual water consumption regime. An approach that involves the search for similarity of the daily WCG and the formation of their similar groups first by season, and then by the day type, has been proposed for the formalization of the external factors influence on the pumping station power consumption efficiency. To reveal the similarity of the daily WCG by a season, they are described by means of the absolute characteristics of the water supply regime and the classical indicators of unevenness. The influence of social factors causes the difference in the form of daily WCG for different days, therefore, to detect the similarity of WCG by day type, morphometric indicators are used to describe them. Construction of the appropriate equations of classification functions has been performed to identify the affiliation of new observed

WCG to one of the typical classes by season and the day type. The procedure of identifying the affiliation of the WCG to the appropriate cluster has been proposed. This procedure consists of two stages: 1) identification by a season; 2) identification by day type provided, that WCG is not correspond to the irregular days class. Verification of such condition is necessary for the correct formation of the energy baseline (EB) and for further power consumption control. Formation of the similar WCG groups has been allowed describing the water supply mode, in particular, the definition of averaged characteristics of water consumption from the water supply network for each season as well as the profiles of its daily graphs for the typical days that are the basis of the water supply process planning and its parameters.

Implementation of the proposed approach provides the possibility to identify and take into consideration the cyclic changes of the technological process (according to the requirements of the ISO 50000 standards series), that are caused by the external factors influence, as well as determine the time ranges for defining (observing) relevant variables and construction the EB of water supply pumping station with the consideration of its actual work conditions during the specific time interval.

The set of the relevant variables has been formed based on the analysis of factors that influence on the power consumption efficiency of the water supply pumping station. Structural-parametric identification of the power consumption model of the pumping station has been accomplished using the combinatorial algorithm of the group method of data handling. This has been allowed receiving candidate-models set, each of which is the best in its supporting functions class, for each typical day of each season. The choice of a better structure of the power consumption model has been realized based on the criteria for its adequacy (regularity, translation minimum, Schwartz, determination coefficient) and accuracy of the forecast using the morphological criterion. As a result, a structured multifactor model of power consumption has been constructed. This model is adapted to the water supply regime for a typical day type of the appropriate season, allows taking into consideration the specific conditions of the pumping station functioning caused by the influence of seasonal and social factors, that ensures the possibility to determine the EB that is typical for a specific time interval.

Control procedure of the power consumption efficiency has been proposed. This procedure involves power consumption control by analyzing the accordance of the EB that is established for the given season and the day type as a confidence interval of the expected power consumption, and the technological parameters by constructing the Shewhart control charts. This provides a possibility for a complex analysis of the power consumption efficiency, the reasons for the deviation from the planned value, and the technological process efficiency of the pumping station water supply.

A new solution of the issue of the power consumption planning of the water supply pumping station as a function of monitoring the energy efficiency of public water supply system with the consideration of proposed approach for the formalization of typical fluctuations in the production process caused by the environment factors influence (both seasonal and social), has been got in the paper. This has been ensured the improvement of the power consumption efficiency control procedure, which takes into consideration the actual work conditions of the pumping station during the appropriate

time period. The advantage of the proposed solution: identifying of a similarity in the water consumption graphs from the water supply network has been allowed (in accordance with the requirements of the ISO 50000 standards series) taking into consideration the cyclic changes of the technological process and determine the energy baseline, normalized to the relevant variables, for the typical day of the appropriate season. This has been facilitated the improvement of the monitoring procedure, in particular, the functions of power consumption planning and monitoring of its effectiveness. That is, it has been provided the energy manager with an effective tool for detecting inefficient power consumption during a specific time period, as well as the reasons that caused its.

Accomplished studies have been allowed to obtain the following results:

- the hidden regularities detecting procedure in the daily water consumption graphs from the water supply network and the formation of their similar groups allows to determine the water consumption averaged characteristics and the profile of its daily graph for a typical day of each season with a view to their use for planning an effective water supply and power consumption regimes;

- the developed power consumption models that are adapted to the water supply regime for a typical day of the appropriate season, allow to take into consideration the specific conditions of the pumping station functioning caused by the influence of seasonal and social factors and, in accordance with the requirements of the ISO 50000 standards series, take into consideration the cyclic changes of the technological process and determine the energy baseline, that is characterized for a specific time interval;

- the proposed power consumption control procedure, ensures an opportunity for a complex analysis of the power consumption efficiency, the reasons for the deviation from the planned value, as well as the efficiency of the water supply technological process, which is the basis for making decisions on improvement the technological process and the energy performance improvement the pumping station.

Keywords: energy efficiency monitoring, energy baseline, planning of power consumption, control of power consumption efficiency, water supply pumping station.

АННОТАЦИЯ

Давыденко Н.В. Мониторинг эффективности электропотребления насосных станций системы коммунального водоснабжения с учетом факторов внешней среды. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2017.

Диссертация посвящена совершенствованию функций мониторинга энергоэффективности в СКВ, в частности, планирования и контроля электропотребления, путем учета фактических условий функционирования насосных станций водоснабжения, обусловленных влиянием внешних факторов.

Для формализации влияния факторов внешней среды на электропотребление насосной станции водоснабжения предложен подход, который предусматривает поиск с помощью методов распознавания образов сходства в графиках расхода воды из сети водоснабжения, неравномерность которых описана с помощью классических и морфометрических показателей, формирование групп одноп-

ных ГВВ сначала по сезону, а затем по типу дня и построение правил классификации для выявления принадлежности новых наблюдений графиков расхода воды к одному из типичных классов по сезону и типом дня. Его реализация обеспечила возможность формализованного описания режима водоподачи, в частности, определения усредненных характеристик расхода воды из сети водоснабжения для каждого сезона и профилей ее суточных графиков для характерных дней, а также временных диапазонов для определения (наблюдение) определяющих переменных и построения базового уровня электропотребления.

Для нормализации базового уровня электропотребления к определяющим переменным, отобранных на основе анализа факторного поля факторов, влияющих на эффективность электропотребления НС водоподачи, с помощью комбинаторного алгоритма метода группового учета аргументов выполнено построение структурированной многофакторной модели электропотребления, которая является адаптированной к режиму водоподачи для характерного типа дня соответствующего сезона, позволяет учесть конкретные условия функционирования НС, обусловленные влиянием сезонных и социальных факторов, и определить базовый уровень электропотребления для заданного периода времени.

Усовершенствована процедура контроля эффективности электропотребления, которая предусматривает как контроль электропотребления путем анализа соблюдения базового уровня электропотребления, установленного для данного сезона и типа дня как доверительный интервал ожидаемого электропотребления, так и технологических параметров путем построения контрольных карт Шухарта, что обеспечивает возможность комплексного анализа эффективности электропотребления, причин, обуславливающих отклонения от запланированного значения, а также эффективности технологического процесса водоподачи НС.

Ключевые слова: мониторинг энергоэффективности, базовый уровень электропотребления, планирование электропотребления, контроль эффективности электропотребления, насосная станция водоснабжения.

Підписано до друку 26.02.2018 р. Формат 29.7×42¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2018-054.

Віддруковано в інформаційному редакційно – видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.:65-18-06

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.