

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

На правах рукопису

ІВАНЬКО ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.311.003.13

**ОПЕРАТИВНИЙ КОНТРОЛЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЧИХ
СИСТЕМ НА ОСНОВІ ЙМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНОГО ПІДХОДУ**

Спеціальність 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси

Дисертація
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
доцент Находов Володимир Федорович

Київ – 2017

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. Аналіз методів та підходів до побудови електробалансів та контролю ефективності використання електроенергії в виробничому секторі	12
1.1. Контроль енергоефективності, як складова заходів з підвищення ефективності споживання паливно-енергетичних ресурсів в виробничих системах.....	12
1.2. Електробаланси, як основний інструмент здійснення контролю та аналізу ефективності споживання електроенергії на промислових підприємствах.....	17
1.3. Методи та підходи до побудови електробалансів виробничих об'єктів.....	19
1.4. Методи контролю ефективності використання електроенергії в виробничому секторі.....	27
Висновки до розділу 1.....	39
РОЗДІЛ 2. Методичні основи застосування ймовірнісно-статистичних методів для різних умов та випадків побудови електробалансів виробничих об'єктів	41
2.1. Ієрархічний підхід до побудови балансів споживання електричної енергії із застосуванням ймовірнісно-статистичних методів.....	41
2.2. Побудова електробалансів виробничих об'єктів за відомими загальними обсягами споживання електроенергії на підприємстві.....	46
2.2.1. Визначення гістограм частот можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання на основі методу моментних спостережень.....	48
2.2.2. Визначення гістограм частот появи можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання на основі методів експертного опитування та імітаційного моделювання.....	52
2.2.3. Визначення законів розподілу обсягів електроспоживання за видами продукції та за агрегатами.....	56
2.2.4. Побудова електробалансів за видами продукції та за агрегатами.....	58
2.3. Побудова електробалансів виробничих об'єктів за відомими обсягами споживання електроенергії та виробництва продукції на підприємстві.....	60
2.4. Побудова електробалансів виробничих об'єктів за наявності аналітичних залежностей для розрахунку електроспоживання агрегатів.....	64

2.4.1. Проблема визначення обсягів електроспоживання агрегатів за наявними розрахунково-аналітичними залежностями.....	64
2.4.2. Загальний алгоритм застосування ймовірнісно-статистичного підходу до побудови електробалансів за агрегатами в умовах наявності відповідних розрахунково-аналітичних залежностей.....	67
2.4.3. Моделювання значень нечітко заданих виробничих параметрів	68
2.4.4. Побудова псевдореальних електробалансів за агрегатами....	70
2.4.5. Визначення найбільш ймовірного електробалансу за агрегатами.....	72
2.5. Визначення ділянок схеми електропостачання та агрегатів, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів.....	73
Висновки до розділу 2.....	78
РОЗДІЛ 3. Розвиток методичних засад оперативного контролю та аналізу ефективності використання електричної енергії.....	79
3.1. Комплексний підхід до визначення складу чинників, що впливають на електроспоживання технологічних об'єктів.....	79
3.1.1. Попередній відбір чинників на основі застосування експертних методів.....	81
3.1.2. Оптимізація складу чинників за їх відносною важливістю для побудови адекватних математичних моделей електроспоживання.....	86
3.1.3. Визначення ступеню і характеру впливу чинників на споживання електроенергії методами аналізу багатовимірних даних.....	88
3.2. Математичне моделювання електроспоживання виробничих об'єктів та контроль ефективності використання електричної енергії.....	91
3.2.1. Методи математичного моделювання електроспоживання та критерії оцінки їх адекватності.....	91
3.2.2. Вибір найбільш прийняттого метода математичного моделювання електроспоживання технологічних об'єктів.....	96
3.3. Удосконалення методичних основ встановлення цільових змінних електроспоживання та процедури оперативного контролю і аналізу енергоефективності.....	105
3.3.1. Визначення моментів часу невідповідної зміни рівня енергоефективності виробничих об'єктів.....	109
3.3.2. Методичні основи аналізу причин зміни рівня ефективності використання електроенергії.....	116
Висновки до розділу 3.....	121
РОЗДІЛ 4. Приклади практичного застосування ймовірнісно-статистичних методів до побудови електробалансів та контролю енергоефективності в виробничому секторі.....	123

4.1. Побудова електробалансів виробничих об'єктів за відомими загальними обсягами споживання електроенергії на підприємстві.....	123
4.2. Побудова електробалансів виробничих об'єктів за відомими обсягами споживання електроенергії та виробництва продукції на підприємстві.....	143
4.3 Приклад визначення ділянок схеми електропостачання та агрегатів, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів.....	150
4.4 Приклади застосування ймовірно-статистичних методів для оперативного контролю та аналізу ефективності використання електричної енергії на виробничих об'єктах.....	156
4.4.1. Приклад вибору складу чинників, що впливають на енергоспоживання кожного окремого технологічного об'єкту.....	157
4.4.1.1 Застосування експертного опитування на основі апарату нечіткої логіки для попередньої оцінки впливу чинників на електроспоживання.....	157
4.4.1.2 Визначення кількісних оцінок ступеню впливу чинників на електроспоживання.....	162
4.4.1.3 Приклад оптимізації складу чинників за їх відносною важливістю в умовах обмежених ресурсів на організацію обліку.....	163
4.4.1.4 Приклад оцінки ступеню і характеру впливу чинників на споживання електроенергії методом головних компонент.....	166
4.4.2. Приклад вибору найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення цільових змінних енергоспоживання виробничих об'єктів.....	172
4.4.3. Приклад застосування процедури оперативного контролю та аналізу ефективності енерговикористання	175
Висновки до розділу 4.....	183
ВИСНОВКИ	185
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	187
ДОДАТКИ	209

ВСТУП

Актуальність теми. Застосування науково обґрунтованих методів управління використанням паливно-енергетичних ресурсів в енергетичній системі України з метою підвищення енергоефективності та енергозбереження є одним з необхідних кроків розвитку вітчизняної економіки.

Виробничий сектор є найбільшим споживачем електричної енергії, суттєво впливає на функціонування вітчизняної енергетичної системи та має велике значення в її структурі. Рациональне використання електроенергії на виробничо-господарських об'єктах України дасть змогу скоротити витрати на виробництво вітчизняної продукції, зменшити її собівартість і зробити її більш конкурентоспроможною на зовнішніх ринках. Саме тому важливою функцією управління енергозбереженням є контроль ефективності використання електричної енергії на рівні промислових підприємств.

Найбільш доцільно на промислових підприємствах здійснювати саме оперативний контроль енергоефективності. Контроль ефективності використання електроенергії на промислових підприємствах, у тому числі й оперативний, традиційно здійснюється на основі побудови та аналізу електричних балансів. Єдиної методики побудови та аналізу електричних балансів виробничих об'єктів на сьогодні практично не існує. Питаннями розробки методів побудови та аналізу електробалансів, а також здійснення контролю енергоефективності займалася низка провідних дослідників, зокрема: С.Д. Волобринський, І.В. Гофман, В.І. Вейц, Б.Н. Авідов-Карнаухов, А.В. Праховник, Н.В. Кіреєва, А.В. Грінев, С.І. Випанасенко, В.Ф. Находов, Р. Harris, A. McMullan, N. Edomah та інші.

Як свідчить практика, традиційні методи не дають змогу будувати достатньо достовірні та обґрунтовані електробаланси виробничих об'єктів на підприємствах України, а методи контролю енергоефективності на основі відповідних балансів мають суттєві недоліки і не придатні для здійснення оперативного контролю ефективності енерговикористання. Необхідно додати,

що методи оперативного контролю енергоефективності, що достатньо широко застосовуються у зарубіжній практиці, також не можуть бути досить успішно використані в умовах вітчизняних підприємств.

Таким чином, незважаючи на значну кількість наукових праць з зазначених напрямків, ці проблеми на сьогодні не можна вважати вирішеними на достатньому рівні. Отже, розробка нових підходів до побудови електробалансів виробничих об'єктів та методів оперативного контролю енергоефективності є важливим та актуальним напрямком наукових досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані в дисертаційній роботі дослідження використовувалися під час участі в програмах академічної мобільності “Eurasia” у Telemark Univerisity College, Норвегія, Порсгрунн, 2014 рік та “Erasmus+” у Vilnius Gediminas Technical University, Вільнюс, Литва, 2015-2016 роки. Матеріали дисертаційної роботи також використано під час виконання ініціативної НДР «Підвищення ефективності інноваційних перетворень енергетичного сектора згідно вимог безвуглецевої економіки в умовах клієнторієнтованого енергоринку» (номер державної реєстрації 0114U006362, 2014–2016 рр.), яка виконувалася на кафедрі електропостачання КПП ім. Ігоря Сікорського.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розвиток методичних засад застосування ймовірнісно-статистичного підходу до побудови електробалансів та контролю ефективності використання електроенергії у виробничому секторі.

Для досягнення зазначеної мети дослідження було вирішено наступні завдання:

- розроблено методологію до побудови електробалансів ймовірнісно-статистичним методом для різних умов та випадків вирішення зазначеної задачі;

- створено методичні основи визначення вузлів схем електропостачання, в яких найбільш доцільно здійснювати верифікацію побудованих електробалансів з застосуванням додаткових приладів обліку;
- розроблено наукові засади визначення оптимального складу чинників, що впливають на електроспоживання технологічних об'єктів;
- створено методичні основи до вибору найбільш прийнятних математичних моделей електроспоживання технологічних об'єктів;
- удосконалено теоретичні основи встановлення базових ліній електроспоживання та здійснення оперативного контролю енергоефективності технологічних об'єктів.

Об'єктом дослідження є процеси оперативного контролю енергоефективності у виробничих системах.

Предметом дослідження є методи побудови електробалансів та контролю ефективності використання електроенергії на виробничо-господарських об'єктах.

Методи дослідження. Методичну основу дисертаційного дослідження склав наступний комплекс загальнонаукових методів: методи імітаційного моделювання, методи експертного опитування, статистичний аналіз, методи оптимізації, методи побудови багатофакторних регресійних моделей, кластерний аналіз, методи узгодження даних (Data Reconciliation), методи розрахунку показників адекватності математичних моделей, метод аналізу середовища функціонування (DEA аналіз), методи встановлення довірчих інтервалів, зокрема, бутстреп-метод, методи контролю параметрів виробничих процесів. Застосування відповідних методів для обробки результатів досліджень здійснювалося з використанням програмних продуктів Matlab, Statistica, Python.

Наукова новизна отриманих результатів проведеного в дисертаційній роботі дослідження полягає в наступному:

- вперше створено методичні основи визначення агрегатів або їх груп, що вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів, які

базуються на використанні методів імітаційного моделювання і дають можливість визначати вузли схем електропостачання, в яких найбільш доцільно здійснювати верифікацію розрахункових електробалансів з застосуванням додаткових приладів обліку;

- розроблено методологію побудови електробалансів ймовірно-статистичним методом для різних умов вирішення зазначеної задачі, які у порівнянні з існуючими методами дають змогу будувати більш достовірні та обґрунтовані електробаланси виробничих об'єктів на основі нечітко визначених вихідних даних;

- створено методичні основи до вибору найбільш прийнятних математичних моделей електроспоживання технологічних об'єктів, на основі їх конкурентного відбору за різними критеріями з використанням методу аналізу середовища функціонування (data envelopment analysis, DEA аналіз);

- запропоновано наукові засади визначення оптимального складу чинників, що впливають на електроспоживання технологічних об'єктів, які ґрунтуються на використанні апарата нечіткої логіки та методах аналізу багатовимірних статистичних даних і дають змогу враховувати додаткові обмеження, пов'язані з організацією збору відповідних статистичних даних;

- удосконалено теоретичні основи встановлення базових ліній електроспоживання та здійснення оперативного контролю енергоефективності технологічних об'єктів з застосуванням бутстреп-методу (bootstrap method) та одно- або багатовимірних контрольних карт.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні методичних основ побудови електробалансів виробничо-господарських об'єктів з застосуванням ймовірно-статистичного підходу, які дають можливість більш точно та обґрунтовано визначати структуру витратної частини балансів споживання електроенергії в умовах невизначеності вихідних даних. Розроблені в дисертаційній роботі методичні засади проведення оперативного контролю енергоефективності дають змогу здійснювати систематичний моніторинг та аналіз ефективності використання електроенергії

технологічними об'єктами, що сприяє вирішенню задач енергозбереження на вітчизняних підприємствах.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, експериментально перевірено у командитному товаристві Завод «Високовольтної апаратури», м. Запоріжжя, Україна (акт впровадження від 15.07.2015 року) та «JSC Lietpak», м. Вільнюс, Литва (акт впровадження від 29.02.2016 року), у навчальному процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського при викладанні дисципліни «Методи контролю ефективності енерговикористання» (акт впровадження від 19.10.2016 року). Одержано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір [103].

Особистий внесок здобувача. Основні результати та положення дисертаційної роботи автором отримано самостійно. У друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: аналіз та порівняння різних методів підвищення пропускної спроможності розподільних мереж [39]; аналіз методів стиснення і відновлення графіків електричного навантаження [9]; розробка процедури визначення складу чинників, що є достатніми і необхідними для побудови адекватних «стандартів» енергоспоживання [68]; аналіз та порівняння діючих в Україні та за кордоном методів контролю енергоефективності, формулювання основних напрямків подальшого удосконалення систем оперативного контролю енергоефективності [69, 167, 75]; розробка методики порівняння різних методів математичного моделювання та видів моделей енергоспоживання на основі їх конкурентного відбору з використання кількох критеріїв їх адекватності на основі методу аналізу середовища функціонування [70, 74, 76]; вдосконалення підходу до визначення складу чинників, що впливають на величину енергоспоживання при створенні систем оперативного контролю енергоефективності [71]; розробка підходу до виявлення агрегатів або їх груп, що вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів [72, 169]; аналіз методик визначення обсягів енергоспоживання на котельних [73, 78]; розробка методичного підходу до визначення технологічних об'єктів, для яких системи оперативного контролю енергоефективності мають бути побудовані в

першу чергу [77]; розробка методичних основ застосування ймовірнісно-статистичного підходу до побудови електробалансів за агрегатами в умовах нечітко визначених вихідних даних [4, 133]; аналіз особливостей застосування методу Вальда для здійснення оперативного контролю енергоефективності технологічного обладнання компресорної станції [168]; аналіз нечітко визначених чинників, які входять до розрахунково-аналітичних залежностей, що використовуються при побудові електробалансів на підприємствах теплоенергетики [103].

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення дисертаційної роботи та її окремі результати були оприлюднені на міжнародній науково-практичній та навчально-методичній конференції «Сталий енергетичний розвиток: сучасні тенденції, технології та рішення» (м. Київ 2016 р.), міжнародній науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і студентів «ДВНЗ» ДонНТУ (м. Донецьк, 2013 р.), IV міжнародній науково-практичній конференції «Энергосбережение на дорожном транспорте и промышленности» Д.ДНУЖТ(м. Київ, 2013 р.), на конференції Енергетика. Екологія. Людина. (м. Київ, 2013 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (м. Мінськ, 2015 р.), III міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку «PEMS'16» (м. Київ, 2016 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), eStream» (м. Вільнюс, 2016 р.) міжнародній науково-технічній конференції «Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2015 IEEE 3rd Workshop» (м. Рига, 2015 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2015 IEEE 4rd Workshop» (м. Вільнюс, 2016 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 19 наукових праць, у тому числі вісім статей – у наукових фахових виданнях України, з яких дві статті – у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

даних, а також 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій. Одержано одне свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг роботи складає 246 сторінок тексту, у тому числі 71 рисунок, 43 таблиці, список використаних джерел зі 189 найменувань та вісім додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОБАЛАНСІВ ТА КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ВИРОБНИЧОМУ СЕКТОРІ

1.1 Контроль енергоефективності, як складова заходів з підвищення ефективності споживання паливно-енергетичних ресурсів в виробничих системах

Сучасною тенденцією функціонування світового господарства є інтенсивне зростання темпів випуску продукції, що в свою чергу призводить до підвищення попиту на енергоносії на національних, регіональних та світових рівнях. Внаслідок цього, в індустріально розвинених країнах, у тому числі і в Україні, проблеми в енергетичному секторі набувають все більшої актуальності. Зокрема, до найбільш критичних викликів в енергетичній системі України можна віднести: підвищення цін на енергоресурси, дефіцит маневрених електрогенеруючих потужностей, зростання залежності від країн експортерів енергоресурсів та значний негативний вплив на екологічну ситуацію в державі [47, 158].

Загальновідомо, що, основним споживачем енергетичних ресурсів в більшості європейських країн є промисловий сектор. Зважаючи на це, провідні міжнародні та вітчизняні спеціалісти наголошують на тому, що широке впровадження енергозберігаючих заходів та технологій на промислових підприємствах є одним з важливих кроків у подоланні кризових явищ в енергетиці [90, 158]. Зокрема, відповідна діяльність в області енергозбереження повинна зменшити електричне навантаження енергосистеми, яке створюють промислові підприємства, сприяти збереженню енергоресурсів та коштів на державному рівні. Підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) має позитивний вплив також на функціонування

підприємств. Адже кошти, які сплачуються за споживання паливно-енергетичних ресурсів, як правило, складають значну частку в собівартості виробленої підприємствами продукції [144]. Тому, раціональне використання енергоресурсів дозволяє підприємствам випускати більш дешеву та конкурентоспроможну продукцію.

Розуміючи важливість питання енергозбереження у суспільному виробництві, економічно розвинуті країни, останнім часом все частіше фінансують створення різноманітних міжнародних та регіональних стандартів, проектів та фондів, які сприяють підвищенню ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів в промисловому секторі [145]. Наприклад, відповідно до документу “The Investment Plan for Europe and Energy: making the Energy Union a reality”, затвердженого у 2016 році, кошти, виділенні Європейським Союзом на модернізацію енергетичної інфраструктури, впровадження відновлювальних джерел та енергозберігаючих проектів складають 3.5 мільярда євро. Крім того додаткові 16.9 мільярдів євро планується залучити за рахунок інвесторів [181]. Аналогічні програми існують в багатьох країнах світу [145].

Проблеми енергозбереження у промисловому секторі України розглядаються державою, як пріоритетні. У галузевій програмі [29], затвердженій урядом України, вказується, що енергоємність національної продукції у 2,6 рази перевищує рівень енергоємності продукції розвинених країн світу, а понад 50% загального споживання енергоносіїв зумовлено неефективним їх використанням. Відповідна ситуація негативно впливає на здатність вітчизняних підприємств конкурувати на зовнішніх ринках та на економіку країни в цілому.

Основним документом, який сприяє підвищенню ефективності використання та економії паливно-енергетичних ресурсів на вітчизняних підприємствах є Закон України “Про енергозбереження” [42]. Крім даного закону, питання реалізації енергозберігаючих технологій та проектів, а також їх

фінансування, розглядається в різних положеннях, галузевих програмах, стандартах та інших нормативних актах України [43, 66, 67, 87, 97, 98].

В світовій практиці, під енергозбереженням розуміють не просто скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів, а підвищення ефективності їх використання, що свідчить про необхідність здійснення об'єктивної кількісної оцінки показників енергоефективності та систематичного контролю підтримання заданого її рівня. Досягнення вагомих практичних результатів у сфері енергозбереження вимагає постійного, систематичного управління енергоефективністю. Однією з важливих функцій такого управління є контроль ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів у виробничому секторі [69]. При цьому, як показує практика, найбільш доцільно здійснювати на промислових підприємствах оперативний контроль енергоефективності [89].

Без об'єктивної кількісної оцінки та контролю енергоефективності не може бути вирішена ціла низка важливих задач у сфері енергозбереження, зокрема [69]:

- визначення потенціалу енергозбереження промислових об'єктів та пріоритетності впровадження енергозберігаючих проектів;
- здійснення систематичного управління використанням ПЕР;
- створення дієвих інструментів економічного стимулювання з метою ефективного використання ПЕР в промисловому секторі;
- створення і функціонування дієвих механізмів залучення інвестицій у сферу енергозбереження тощо.

На необхідності контролю енергоефективності, як складової будь-якої програми з енергозбереження, наголошується в документі [176], який активно використовується в країнах Європейського Союзу та починає застосовуватися в інших держах, зокрема, і в Україні. На думку багатьох авторів, ключовим елементом забезпечення енергоефективності на рівні технологічних об'єктів є підходи, спрямовані на створення систем управління енергоспоживанням [158]. При чому, для успішного функціонування таких систем необхідно обов'язково

оцінювати і контролювати існуючий рівень енергоефективності на об'єктах, використовуючи для цього спеціальні кількісні показники.

Іншим міжнародним документом, який починає впроваджуватись на промислових підприємствах України є “ДСТУ ISO 50001:2014 Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2011, IDT)” [38]. В одному з пунктів відповідного документу наголошується, що підприємство, яке працює згідно ISO 50001, повинно забезпечити через заплановані інтервали часу проведення моніторингу, вимірювання та аналізу показників енергоефективності основних технологічних операцій виробництва продукції. Для здійснення моніторингу енергоефективності пропонується порівнювати фактичні показники енергоспоживання з деякою базовою лінією, яка являє собою «еталон» споживання палива або енергії для відповідного виробничо-господарського об'єкту. Проте конкретних рекомендацій, яким чином визначати зазначені базові лінії для різного обладнання, в ISO 50001 не міститься, лише зазначається, що вони можуть бути представлені у вигляді деякої числової величини, або математичної моделі.

Фактично на сьогоднішній день оцінка та контроль енергоефективності на промислових підприємствах України здійснюється на основі нормування питомих витрат палива та енергії, яке, у свою чергу, базується на побудові та аналізі енергетичних балансів виробничо-господарських об'єктів [66, 87, 97]. У зарубіжній практиці основою для встановлення показників енергоефективності також є енергетичні баланси, зокрема в ISO 50001 вони фігурують під назвою енергетичні профілі.

В “Основних положеннях з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві”, які використовуються для організації та проведення контролю енергоефективності на вітчизняних підприємствах наголошується, що норми питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів повинні відповідати наступним вимогам [66]:

- враховувати конкретні умови виробництва та бути орієнтованими на прогресивні показники енерговикористання;
- систематично переглядатися з урахуванням досягнутих показників ефективності використання ПЕР та об'єктивних змін умов виробництва;
- враховувати результати енергетичних обстежень.

На практиці наведені вище вимоги, здебільшого, не можуть бути виконанні через низку недоліків, існуючих в методиках побудови балансів енергоспоживання, визначення показників енергоефективності та здійснення її контролю [80]. Більшість галузевих методик побудови енергобалансів фактично дублюють одна одну, пропонуючи використовувати розрахунково-аналітичний метод, який має ряд суттєвих недоліків [80], і застосування якого у більшості випадків не дозволяє визначати реальну структуру балансів споживання палива та енергії, зокрема, електричної. Очевидно, що визначені на основі недостовірних енергобалансів показники енергоефективності, у свою чергу, не дають змогу об'єктивно оцінювати рівень енергоефективності на підприємстві.

Іншим важливим питанням, яке на сьогодні не вирішено не тільки в Україні, але і в зарубіжній практиці, є визначення кількісних показників ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів та подальше здійснення на їх основі контролю енергоефективності. На сьогодні, не існує універсальної методики розрахунку показників енергоефективності [27, 130, 162]. В різних країнах використовують принципово відмінні підходи до вирішення даного питання, які мають як певні переваги, так і недоліки. Зокрема, як зазначалося, система нормування питомих витрат ПЕР, яка діє в Україні, має низку суттєвих недоліків і потребує удосконалення [90]. Таке удосконалення повинно здійснюватися у напрямках розробки методичних підходів до побудови достовірних та обґрунтованих енергобалансів, вдосконалення методів визначення кількісних показників енергоефективності, а також створення чітких, об'єктивних процедур контролю ефективності енерговикористання на виробничо-господарських об'єктах.

1.2 Електробаланси, як основний інструмент здійснення контролю та аналізу ефективності використання електроенергії на промислових підприємствах

Для того, щоб цілеспрямовано обирати та впроваджувати найбільш доцільні заходи з енергозбереження, перш за все, необхідно періодично виявляти, яким обладнанням, в якому обсязі та на які потреби споживається електрична енергія на кожному конкретному підприємстві [80]. Тому основою для контролю та аналізу електроспоживання на промислових підприємствах є побудова та аналіз електробалансів відповідних виробничих об'єктів [28]. Зокрема, методика [66], що застосовується на підприємствах України, наголошує на тому, що одним з перших кроків при оцінці енергоефективності є побудова енергетичних балансів для всіх видів енергії, що споживаються на підприємстві.

Під електричними балансами розуміють систему взаємозв'язаних показників, які відображають кількісну відповідність між надходженням і використанням електричної енергії на тому чи іншому виробничому чи технологічному об'єкті [29].

Об'єктами побудови електробалансів, можуть бути як технологічні об'єкти: окремі машини, агрегати, установки, технологічні процеси, так і виробничі (виробничо-господарські) об'єкти: дільниці, цехи, інші виробничі та допоміжні підрозділи, а також підприємства в цілому. Побудова та аналіз електробалансів дозволяє вирішувати цілу низку важливих питань в енергетичному господарстві будь-якого підприємства, в тому числі [1, 19, 20, 28]:

- виявляти нераціональні витрати та втрати електроенергії і планувати заходи щодо їх усунення;
- обґрунтовувати обсяги та режими електроспоживання;
- виявляти об'єкти з найбільшим потенціалом економії електричної енергії;

– встановлювати технічно обґрунтовані показники ефективності енерговикористання тощо.

Зокрема, норми питомої витрати електроенергії, які на сьогоднішній день застосовуються в Україні для організації періодичного контролю ефективності використання електроенергії на промислових підприємствах і слугують державним механізмом боротьби з її нераціональним споживанням [98], фактично визначаються на основі електричних балансів виробничих об'єктів.

Інше призначення енергетичних балансів наведено в [67]. Зокрема, в цьому документі йде мова про те, що побудова енергобалансів на підприємствах слугує основою для створення статистичних баз даних і їх подальшого аналізу з метою визначення енергетичної ситуації на національному і міжнародному рівнях, та оцінки сучасного стану енергетики держави.

На основі побудови електробалансів та використання функціонуючих на підприємствах систем контролю якості продукції (FMEA) може здійснюватись також оцінка ризиків впровадження енергозберігаючих проектів [130].

Одним з напрямків реалізації державної політики з енергозбереження є сприяння проведенню енергетичних аудитів на різних рівнях суспільного господарювання. В енергетичних аудитах традиційно рішення щодо впровадження тих чи інших заходів з підвищення рівня ефективності використання електричної енергії приймаються шляхом аналізу електробалансів відповідних об'єктів. Низка нормативних документів, в тому числі [42, 43], які регулюють проведення енергетичних аудитів на вітчизняних підприємствах, вказують, що побудова електричних балансів є одним з основних кроків проведення будь-якого енергетичного аудиту. Таким чином проведення успішного енергетичного аудиту залежить значною мірою від застосування коректних та об'єктивних методів побудови електричних балансів [80].

Останнім часом підприємства України приділяють все більше уваги питанням енергоощадного виробництва. Зокрема, використовуючи зарубіжний досвід, вітчизняні підприємства починають впроваджувати системи

енергетичного менеджменту [91]. Основними функціями таких систем є систематичне вимірювання показників енергоспоживання, контроль ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів та пошук шляхів раціоналізації їх споживання. Стандарт ISO 50001 [38], який визначає основні положення впровадження сучасних систем енергетичного менеджменту, наголошує на доцільності та необхідності побудови балансів енергоспоживання, як інструменту, який дозволяє детально розглядати структуру споживання ПЕР на підприємстві та слугує основою для подальшого управління енергоефективністю.

Таким чином, як вітчизняний, так і зарубіжний досвід свідчить, що електричні баланси є основою для визначення кількісних показників енергоефективності та аналізу споживання електроенергії на будь-якому виробничому об'єкті.

1.3 Методи та підходи до побудови електробалансів виробничих об'єктів

Єдиної методики побудови та аналізу фактичних електричних балансів, а також оцінки і нормалізації корисних витрат та втрат енергії на сьогодні практично не існує. Найбільш достовірну інформацію для побудови електробалансів можна отримати за допомогою наявних приладів обліку. Саме тому можливість та доцільність застосування тих чи інших методів побудови електробалансів в першу чергу залежить від рівня охоплення підприємства приладами обліку.

На підприємствах з сучасними та розгалуженими системами обліку енергоспоживання, побудова достовірних енергобалансів та подальший контроль енергоефективності може виконуватися автоматично, при чому з будь-якою періодичністю. На необхідності встановлення автоматизованих систем, які дозволяють виконувати повний, точний і оперативний облік, а також

управляти енергоспоживанням технологічних агрегатів в диспетчерському режимі наголошується, зокрема, в [102].

В роботі [184] розглядається питання систем автоматизованої побудови балансів, моніторингу та аналізу енергоспоживання технологічного обладнання на сучасних підприємствах методами обробки потоків подій з двома компонентами: стандарту для збору та обміну даними (MT. Connect SM.) та Комплексу Обробки Подій для обробки даних. Недоліком зазначеної, а також подібних їй систем, є необхідність наявності значної кількості сучасних приладів обліку та складність організації та синхронізації збору даних.

Визначенню статей електробалансів на рівні підприємства, на рівні його підрозділів та окремих агрегатів за допомогою сучасних приладів обліку присвячена робота [159]. Автори проводять аналіз перешкод, що виникають при організації такого обліку. Зокрема, основною перешкодою для широкого впровадження відповідних високоточних вимірювальних комплексів автори вважають їх високу вартість.

Для зменшення вартості визначення величин енергоспоживання технологічного обладнання в провідних країнах світу прийнято, ще на стадії його виробництва оснащувати таке обладнання відносно дешевими вимірювальними засобами (сенсорами, датчиками). Основна ідея такого підходу наводиться в роботі [153]. Для визначення параметрів споживання електроенергії автори використовують сенсори, встановлені безпосередньо у електродвигунах технологічного обладнання. Шляхом подальшої обробки інформації, отриманої від таких сенсорів, за емпіричними формулами визначається обсяги споживання електроенергії агрегатами, на основі яких будуються електробаланси відповідних виробничих об'єктів та здійснюється подальший контроль їх енергоефективності.

На більшості промислових підприємств України прилади та системи обліку електроспоживання встановлені лише на межі балансової належності електричних мереж підприємства та електропередавальної організації і виконують функції комерційного обліку. Таким чином, на вітчизняних

підприємствах, здебільшого, наявною є достовірна інформація лише про загальні обсяги електроспоживання на цьому виробничому об'єкті, але яким чином сумарний об'єм споживання електроенергії розподіляється між підрозділами підприємства та між кінцевими споживачами (агрегатами, машинами, установками) фактично є невідомим. Зважаючи на це, визначення витратної структури енергобалансів здійснюється іншими, менш об'єктивними методами.

Засновниками існуючої на Україні теорії побудови енергобалансів та подальшого нормування енергоспоживання, є такі видатні вчені, як А.А. Тайц [110], І.В. Гофман [28], Б.Н. Авілова-Карнаухов [1], Волобринский С.Д. [20]. В їх роботах закладені основні принципи побудови електробалансів, їх аналізу та оптимізації за допомогою математичних методів.

Згідно з нормативними документами [35, 36, 66, 87] методами, які традиційно застосовуються для побудови електробалансів є: експериментальний, розрахунково-аналітичний та комбінований.

При використанні експериментального методу статті електробалансів визначаються за допомогою тимчасово встановлених вимірювальних приладів при характерних режимах роботи обладнання [28]. Як правило, відповідні вимірювання здійснюються нетривалий час. Крім того, виконання експериментальних вимірювань може потребувати зміни режимів роботи обладнання, що в свою чергу може негативно впливати на виробничий процес.

Автори [132] пропонують визначати величини, необхідні для розрахунку електричних балансів з характерних профілів навантаження обладнання отриманих шляхом короткострокових вимірювань.

Для визначення статей електробалансів в [126] запропоновано використовувати метод вимірювання непрямих величин, а саме струму і коефіцієнту використання.

Не зважаючи на широке застосування експериментального методу побудови балансів, конкретної методики яка б описувала, яким чином необхідно виконувати відповідні вимірювання, в літературних джерелах не

наводиться. Не є винятком і методичні положення [67], які використовуються в вітчизняній практиці, та [156], розроблені за кордоном. Зокрема, під час застосуванні експериментального методу побудови електробалансів залишається низка невизначених питань, а саме:

- 1) Яким чином необхідно організовувати проведення експериментів при великій кількості технологічного обладнання на підприємстві;
- 2) Якою повинна бути тривалість експериментальних вимірювань;
- 3) Як потрібно оцінювати похибки вимірювань;
- 4) Яким чином необхідно коригувати в електробалансі експериментальні дані, отримані в різні періоди часу.

Зрозуміло, що при значній кількості технологічного обладнання на підприємстві використання експериментального методу побудови балансів потребує невиправдано великих витрат часу та ресурсів. Таким чином зазначений підхід далеко не завжди дозволяє отримати електробаланси виробничо-господарських об'єктів і тому на практиці використовується досить рідко.

При застосуванні розрахунково-аналітичного способу побудови електричних балансів, електроспоживання технологічних агрегатів визначається на основі аналітичних або емпіричних залежностей [28]. Відповідні залежності відображають взаємозв'язок між споживанням електричної енергії та технологічними параметрами роботи агрегатів. Необхідні для розрахунків залежності можуть бути знайдені для кожного окремого виду обладнання у довідковій літературі, інструкціях з експлуатації, паспортах обладнання або визначенні на основі експериментів, статистичних даних тощо. Проблеми побудови електричних балансів з використанням емпіричних залежностей, на конкретному виробничому підприємстві описані в роботі [182].

Першочерговою проблемою при використанні розрахунково-аналітичного методу є пошук та вибір аналітичних залежностей для кожного виду обладнання. На великих підприємствах з великою кількістю технологічного

обладнання пошук залежностей, як правило потребує значної дослідницької роботи. Для деяких видів обладнання аналітичні залежності є добре відомими і наводяться в довідковій літературі. Однак також існують агрегати для яких пошук в загальнодоступних джерелах може не дати бажаних результатів.

Необхідно також звернути увагу, що в більшості емпіричних залежностей фігурують певні коефіцієнти, що наводяться в вигляді ряду можливих значень або певних інтервалів. Наприклад в [66] зазначається, що згідно ДСТУ 3886-99 мінімальна величина коефіцієнта завантаження електродвигунів у режимі роботи S1 для розрахунку статей електробалансів може прийматися 0,4 ... 0,5. Як показує практика обране значення коефіцієнту (наприклад, максимальне або мінімальне) суттєво впливає на кінцевий результат. Крім того, коефіцієнти, наведені у літературних джерелах, були визначені експериментальним шляхом для певного обладнання. Відповідні дослідження проводилися багато років тому. Зважаючи на зміну технічних характеристик агрегатів в процесі експлуатації, впровадження у виробничий процес нових марок обладнання, довідникові коефіцієнти в емпіричних залежностях не завжди дозволяють адекватно відтворити величину споживання електроенергії агрегатами.

В Україні для побудови електричних балансів в більшості галузевих методик пропонується використовувати спрощений розрахунково-аналітичний метод [90]. Використання даного методу передбачає визначення споживання електроенергії кожним конкретним видом обладнання за наступною формулою:

$$W_i = P_{\text{вст.}i} k_{3,i} T_i, \quad (1.1)$$

де $P_{\text{вст.}i}$ — встановлена потужність i -го виду обладнання; $k_{3,i}$ — середній коефіцієнт завантаження обладнання; T_i — тривалість роботи цього обладнання протягом відповідного періоду.

Для того щоб отримати об'єктивний електричний баланс в такий спосіб, необхідно знати точні значення $k_{3,i}$ та T_i . Проте на більшості підприємств облік цих показників не ведеться. Тому в зазначених умовах побудова балансів здійснюється з використанням довідкової літератури, де відповідні параметри наведені в вигляді широких інтервалів можливих їх значень [109]. Практичних рекомендацій, які саме значення цих величин необхідно приймати, не існує. В залежності від обраних числових значень відповідних показників на одному й тому ж об'єкті можна отримати принципово відмінні електробаланси. Зважаючи на це, електричні баланси, побудовані із застосуванням спрощеного розрахунково-аналітичного методу, здебільшого не можна вважати достатньо достовірними та точними.

Комбінований підхід поєднує експериментальний та розрахунково-аналітичний методи. У разі їх застосування статті електробалансів отримані за допомогою одного методу доповнюються або уточнюються шляхом використання іншого [28]. Зрозуміло, що такий метод має ряд очевидних переваг. Однак, в літературних джерелах не має точної інформації стосовно того, де і яким чином необхідно виконувати уточнення отриманих результатів змішаним методом. Крім того, у випадку коли два методи дають принципово різні результати, визначити той, результати застосування якого є більш достовірними, буває досить складно.

В роботі [3] розглянуто ймовірнісний підхід до побудова енергетичних балансів. При цьому автор наголошує, що процеси енергоспоживання на більшості підприємств не є детермінованими і їх необхідно розглядати як випадкові. Особливу увагу в роботі приділено математичному опису енергоспоживання, в вигляді безперервних в часі марковських процесів.

Запропонований в [83] ймовірнісно-статистичний підхід дозволяє будувати електробаланси, враховуючи змінний та випадковий характер споживання електроенергії та інших вихідних параметрів. Даний підхід базується на застосуванні експертних методів, методів теорії ймовірності та математичної статистики. Ймовірнісно-статистичних метод побудови балансів

споживання електричної енергії дозволяє визначати більш достовірні та обґрунтовані електробаланси, ніж спрощений розрахунково-аналітичний метод [84]. Однак, не зважаючи на переваги ймовірно-статистичного підходу, він має і певні недоліки які потребують усунення. Зокрема, основними недоліками відомих методик використання такого підходу є:

- Застосування спрощених методів визначення найбільш ймовірної структури витратної частини електробалансів;
- Недостатня технічна та технологічна обґрунтованість побудованих електробалансів.

Застосування математичного апарату нечіткої логіки з метою зменшення невизначеності структури енергоспоживання в виробничих системах розглянуто в роботі [164].

У роботі [151] запропоновано використовувати методи дискретного моделювання подій (Discrete Event Simulation (DES)) з метою визначення енергоспоживання технологічного обладнання та енергетичної ефективності.

Методологію сегментації технологічних процесів на блоки зі специфічним споживанням електроенергії запропоновано в [186]. Відповідні блоки описують енергоспоживання певного режиму роботи обладнання для виконання конкретної виробничої задачі. Енергоспоживання кожного блоку описується часовими рядами. Таким чином автор пропонує отримувати певні планові значення статей енергобалансів.

Питання визначення споживання електроенергії основним обладнанням з сумарного графіку навантаження, тобто визначення статей електробалансу, досліджували автори роботи [146]. Зазначену задачу автори вирішують шляхом визначення профілів споживання електроенергії технологічного обладнання методами розпізнавання образів з використанням генетичних алгоритмів. Формування різноманітних профілів споживання електроенергії обладнання здійснюється за допомогою інформації, отриманої з сенсорів.

При виборі методу, що буде застосовуватися для визначення структури витратної частини електробалансів виробничих об'єктів в першу чергу повинні

бути враховані особливості відповідного промислового підприємства. Зокрема, здебільшого, вітчизняним підприємствам притаманні наступні особливості, що значно ускладнюють задачу побудови електробалансів:

- багаторівневі та розгалужені системи електропостачання;
- велика кількість різноманітного технологічного обладнання, яке використовується в різних режимах;
- виробництво продукції широкого та нестійкого асортименту;
- вплив різноманітних факторів на обсяги електроспоживання технологічних об'єктів;
- випадковий характер обсягів електроспоживання і чинників, що на нього впливають;
- недостатня кількість приладів обліку та статистичних даних про електроспоживання;
- неповні та нечіткі вихідні дані про виробничі показники та технічні характеристики обладнання.

Зважаючи на зазначені особливості вітчизняних підприємств та наведені вище недоліки традиційних методів побудови електричних балансів, можна стверджувати, що їх засновування не дозволяє будувати достатньо обґрунтовані та достовірні електробаланси виробничих об'єктів. Таким чином, існує необхідність в подальшому удосконаленні методів побудови електробалансів та пошуку нових більш достовірних підходів вирішення зазначеної задачі. Зокрема, достовірність та обґрунтованість електричних балансів, що складаються на вітчизняних підприємствах з використанням існуючих методів, може бути досягнута шляхом удосконалення та подальшого розвитку методичних засад побудови електробалансів з застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу, яких дозволяє значним чином враховувати особливості вітчизняних підприємств і має низку суттєвих переваг у порівнянні з іншими методами [81].

1.4 Методи контролю ефективності використання електроенергії в виробничому секторі

Однією з основних умов досягнення стабільних результатів в області енергозбереження на будь-якому промисловому підприємстві є організація та здійснення систематичного контролю та аналізу ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів під час виробничо-господарської діяльності. Відповідний контроль повинен дозволяти фіксувати на будь-якому технологічному об'єкті нормальний рівень споживання паливно-енергетичних ресурсів, перевитрату енергії, а також економію енергоресурсів після впровадження певних заходів з енергозбереження.

Загальновідомо, що для оцінки енергоефективності фактичні обсяги енергоспоживання необхідно порівнювати з деякими “еталонними” величинами, які характеризують науково обґрунтовані обсяги витрат енергетичних ресурсів, необхідних и для виконання певних технологічних операцій. Основна різниця в методах та підходах до контролю енергоефективності полягає в тому, яким чином визначаються відповідні “еталони” показники енергоспоживання [179].

Одним зі способів оцінки рівня енергоефективності та величини енергозбереження, який використовується на підприємствах, є порівняння обсягів споживання енергетичних ресурсів, зокрема електроенергії, отриманих за лічильником, до і після впровадження заходів з енергозбереження [163]:

$$\Delta W = W_1 - W_2, \quad (1.2)$$

де W_1, W_2 — споживання електроенергії за лічильником до і після впровадження деякого заходу з енергозбереження або за різні періоди часу, кВт·год.

Зазначений спосіб має суттєві недоліки. Застосуванням формули (1.2) не враховує вплив технологічних параметрів та обсягів виробленої продукції на

обсяг електроспоживання і, тим самим, не дозволяє здійснювати об'єктивний контроль енергоефективності.

Основним підходом до контролю ефективності використання ПЕР, що застосовується в Україні, є встановлення та застосування в якості «еталонних» показників норм питомої витрати палива або енергії [43, 66, 67, 87, 97, 98]. Такий контроль на підприємствах здійснюється окремо для кожного виду чи сорту продукції на підставі даних про обсяги їх виробництва та обсяги споживання паливно-енергетичних ресурсів, зокрема, електроенергії. За звітними даними, зареєстрованими протягом відповідних періодів часу, визначаються середні значення фактичної питомої витрати електричної енергії на одиницю кожного виду продукції, які у подальшому застосовуються при здійсненні контролю енергоефективності.

Враховуючи недоліки, зазначені, зокрема у [80], можна стверджувати, що існуюча в Україні система нормування питомих витрат ПЕР, а відповідно, і система контролю енергоефективності, що на ньому базується, потребують суттєвого удосконалення. До того ж, слід звернути увагу на те, що існуючі методики встановлення норм питомої витрати палива та енергії практично не дозволяють зробити ці показники придатними для здійснення оперативного контролю ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів на виробничих об'єктах.

Робота [161] розкриває різні підходи до кількісної оцінки рівня енергоефективності, зокрема: за абсолютною величиною споживання електроенергії, за енергоємністю продукції, за іншими показниками енергоефективності тощо.

Для аналізу ефективності енерговикористання, виявлення резервів економії ПЕР, крім питомих і узагальнених показників їх витрати, авторами публікації [86] рекомендується розраховувати систему енергоекономічних показників з метою дослідження закономірності розвитку енергогосподарства підприємства.

На доцільності застосування економічних показників, які дозволяють враховувати взаємозв'язок використання енергетичних ресурсів з кінцевими результатами діяльності підприємства, наголошується також в [115]. Зокрема, для оцінки енергоефективності пропонується застосувати індексний метод, в основі якого лежить зіставлення індексів динаміки техніко-економічних показників.

Для зменшення енергоємності продукції підприємств машинобудування автор статті [85] запропонував економіко-математичну модель формування оптимального поєднання енергозберігаючих заходів. Відповідна математична модель ґрунтується на показниках питомих витрат електроенергії до і після впровадження заходів з енергозбереження.

Не зважаючи на широке застосування в деяких державах економічних показників для оцінки рівня енергоефективності, враховуючи швидку зміну цін на енергоносії та значну інфляцію на вітчизняному ринку, можна стверджувати, що такі показники не можуть об'єктивно відображати рівень ефективності використання ПЕР, зокрема електроенергії, на підприємствах України.

Розробці індексів ефективності використання енергоресурсів на основі DEA analysis присвячена робота [187]. Проте, які саме виробничі параметри доцільно враховувати при застосуванні цього методу, в роботі не обґрунтовано.

Різні індикатори енергоефективності на основі кількості виробленої натуральної продукції чи її грошового еквіваленту, в тому числі і питомі витрати енергоресурсів, проаналізовано в роботах [166, 180]. Автори наголошують на численних недоліках відповідних індикаторів.

В роботах [58, 59, 95, 96, 108, 117, 127] описано методи розрахунку норм енергоспоживання за спеціальними розрахунковими формулами. При цьому автори публікації [96] зазначають, що нормування витрат палива чи енергії для будь-якого технологічного процесу необхідно починати з аналізу організаційно-технологічної структури виробництва з подальшою оцінкою техніко-економічних показників і встановленням для конкретного виробничого

підрозділу планових показників на основі існуючих методик розрахунків режимів роботи відповідного обладнання.

Враховувати режими роботи електроприймачів при нормуванні пропонується в робота [95].

В публікації [117] наголошується, що багато виробничих параметрів роботи технологічного обладнання не можуть бути виміряні, тому перевага в розробленій авторами методиці нормування надається застосуванню емпіричних формул.

В джерелі [127] наведено методики визначення показників ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів за допомогою спеціально розроблених номограм для деяких енергоємних технологічних процесів.

У статті [58] наведено результати комплексного дослідження методів нормування електроспоживання. Автори наголошують на необхідності розробки сучасних методів нормування, які б дозволили враховувати технічний стан обладнання та поточні параметри технологічного процесу.

Для нормування та аналізу наскрізних (комплексних) витрат палива та енергії на кінцеву продукцію, а також виявлення внутрішніх резервів їх економії автори публікації [56] застосовує матричні моделі, які представляють систему рівнянь виробництва і споживання ресурсів даним технологічним комплексом.

Для оцінки рівня енергоефективності і розробки рекомендацій з її підвищення в [57] використовують n -мірні графіки споживання електроспоживання. Ці графіки представляють візуальну картину залежності обсягу електроспоживання або питомої витрати енергії від двох інших змінних (технологічних чинників). Аналіз трьохвимірних графіків автор здійснює за графіками "карти ліній рівня", які являють собою проекцію тривимірної поверхні на двовимірну площину.

Визначенню енергетичних характеристик з метою контролю енергоефективності присвячені роботи [25, 26]. Для більшої деталізації отриманих характеристик автор вводить поняття енергетичні профілі

електрообладнання, які являють собою перелік обладнання, необхідного для виконання виробничого завдання. В роботі [26] наведено алгоритм побудови енергетичних характеристик для різних енергетичних профілів.

Виконувати контроль споживання ПЕР на основі вирішення оптимізаційної задачі з однією із цільових функцій: мінімум експлуатаційних витрат, мінімум енергоспоживання та мінімум викидів шкідливих речовин запропоновано в [129]. При цьому, ефективність використання електроенергії визначається на основі порівняння фактичних значень статей електробалансів і величин, отриманих при вирішенні відповідної оптимізаційної задачі.

Автори роботи [106] вважають, що в основу створення системи управління енергоспоживанням та енергоефективністю має бути закладено принцип поєднання системного, процесно-орієнтованого та об'єктно-цільового підходів.

Методи системної динаміки було запропоновано використати для контролю енергоефективності в роботі [119]. Відповідні методи досліджують поведінку складних систем, спираючись на комп'ютерні моделі системних елементів і зв'язків між ними. Автори наголошують, що, якщо розглядати вирішення задач енергозбереження для певних об'єктів в контексті методів системної динаміки, то завдання зводиться до розпізнавання образу певного еталону за набором показників деякого числа параметрів одного класу. Рішення даної задачі є функцією зв'язку між однорідними об'єктами, що дозволяє здійснювати нормування споживання енергетичних ресурсів.

У праці [109] для реалізації проектів з енергозбереження пропонується застосовувати програмно-цільовий метод, а прийняття управлінських рішень з енергозберігаючих заходів реалізувати на основі комплексного аналізу основних економічних показників самого виробництва і виробленої продукції.

Автори [34] досліджують проблему врахування внутрішніх та зовнішніх протиріч відповідно до прийнятих критеріїв ефективності (енерготехнологічних, енергетичних, техніко-економічних) в задачі раціоналізації та підвищення ефективності енерговикористання. З цією метою застосовано метод аналізу ієрархій та багатокритеріальні функції корисності.

На основі підходу до декомпозиції системи управління енергоспоживанням підприємств, автор [46] розглянув питання побудови нормативних графіків активного навантаження, які запропоновано визначати шляхом усереднення ансамблів реалізацій активних навантажень за споживачами електроенергії за минулі періоди. При чому, якщо вихідний ансамбль знаходяться вище нормативного, то приймається, що режим електроспоживання є нераціональним.

Розвитку основних положень концепції формування єдиної системи класифікації та кодування інформації в енергетиці присвячена робота [64]. Такий підхід є інструментом створення бази нормативно-довідкової інформації, яка на думку авторів є необхідною для визначення показників енергоефективності.

Дослідження залежності рівня енергоефективності металообробного обладнання від навантажувальних характеристик відповідних технологічних процесів виконано в [41]. Автор цієї статті [41] запропонував оригінальні алгоритми і методики автоматизованого управління споживанням електричної енергії за допомогою програмованих контролерів, які адаптуються до реальних навантажувальних характеристик технологічних процесів.

На думку авторів робіт [2, 8] систему оцінки та нормування енергоспоживання підприємства доцільно представити у вигляді складної інформаційної системи. У такій системі повинна бути наявною база даних статистично визначених нормативів і норм витрат електроенергії різними компонентами технологічних процесів. Для вирішення цієї задачі пропонується застосовувати один з програмний продукт Pwin, який виконує функції аналізу, моделювання та проектування великих інформаційних систем [8].

Підвищення ефективності використання ПЕР на промислових підприємствах в роботі [114] пропонується досягти шляхом використання сучасних комп'ютеризованих АСУТП дворівневого типу ієрархії та динамічного функціонування, які будуються на основі адаптивних (самоналагоджувальних) алгоритмах синтезу та відповідному математичному

забезпеченні. Метою адаптивного управління в АСУТП є максимізація ефективності використання енергоресурсів при невизначеності і мінливості умов роботи відповідного обладнання.

Дослідження наявних комплексів технічних і програмних засобів, які можна було б використати, як інструмент для регулярного та ефективного локального моніторингу споживання паливно-енергетичних ресурсів, а також для вирішення завдань енергоменеджменту проведено у [113]. При цьому автор наголошує на недосконалоості існуючих програмних продуктів.

У [23, 24, 40, 45, 55, 116] для оцінки рівня ефективності використання ПЕР пропонується застосовувати ценологічний підхід. При використанні такого підходу енергетичне господарство підприємства розглядається як єдине ціле, яке функціонує за певними, характерними для нього законами.

Зокрема, автор [23] пропонує відмовитись від методології «розрахувати все» і перейти до ценологічної оцінки територіальних одиниць та організації обов'язкового інструментального обліку витрати енергоресурсів.

Оцінку ефективності процесу енергозбереження на об'єктах техноценозу в [40] запропоновано виконувати за результатами моделювання та зіставлення інтегральних показників, один з яких характеризує позитивний ефект, а другий витрати. Автор пропонує здійснювати управління електроспоживанням за допомогою процедур інтервального оцінювання, прогнозування та нормування.

У роботі [116] запропоновано методику розрахунку електроспоживання промислових об'єктів яку створено на основі концепції геометричної моделі техноценозу. В рамках роботи автор здійснює моделювання електроспоживання методами лінійного регресійного аналізу на основі якого пропонується розробляти норми енергоспоживання. Для збільшення діапазону даних виконано моделювання в програмному середовищі Simulink (Matlab).

Автором [55] запропоновано розглядати структуру електроспоживання підприємства як ценологічний об'єкт, що складається з окремих елементів, які формують електричний баланс, та визначати ці елементи шляхом їх ранжирування за параметром електроспоживання. З метою нормування

споживання електроенергії сформовані статистичні моделі питомої витрати енергії на підприємстві в цілому та на окремих об'єктах обліку як змінних часових рядів даних.

Для оцінки зміни питомих витрат електроенергії після пуску енергоємного обладнання автор [45] використав ценологічний підхід. Структура підприємства в роботі була описана ранговим Н-розподілом. Класифікація однорідних підприємств виконана за допомогою методів кластерного аналізу. Автор пропонує встановлювати норми електроспоживання всередині кожного з кластерів методами кореляційно-регресійного аналізу.

В якості методу вирішення завдань оптимального управління енергоспоживанням автор [24] пропонує використовувати техноценозний підхід на основі рангового аналізу. Рангові розподіли отримують за результатами апроксимації ранжируваних експериментальних даних за обсягами електроспоживання об'єктів техноценозу. Виявлення точок з аномальним енергоспоживанням автор пропонує здійснювати інтервальним оцінюванням емпіричного рангового параметричного розподілу.

У цілій низці зарубіжних і відчизняних робіт для контролю енергоефективності пропонується застосовувати ідеологію бенчмаркінгу [100, 118, 147, 183]. Відповідний підхід передбачає порівняння подібних технологічних процесів, технологій та обладнання, що використовується на одному й тому ж або різних підприємствах, з метою контролю енергоефективності та пошуку найкращих способів її підвищення [100].

Автор статті [100] наголошує, що бенчмаркінг є потужним інструментом, який доцільно використовувати в енергоменеджменті, енергоаудиті та при визначенні рівня енергоефективності з метою планування споживання енергетичних ресурсів і обґрунтування вибору об'єктів, для яких необхідно впроваджувати заходи з енергозбереження. Для порівняння ефективності споживання енергетичних ресурсів автором було запропоновано скористатися методикою ранжирування за правилом Борда. У [100] також проаналізовано основні перепони до застосування бенчмаркінгу та шляхи їх усунення.

У публікації [118] для проведення контролю енергоефективності однорідних об'єктів запропоновано використовувати коефіцієнт енергетичної ефективності.

Автори [147] вказують, що обрані індикатори енергоефективності при порівнянні технологічних об'єктів методами бенчмаркінгу повинні враховувати фактори, що впливають на споживання енергії, необхідної для виробництва конкретних товарів або послуг. Для того, щоб описати енергоспоживання деякого технологічного об'єкту пропонується застосовувати лінійну модель. У якості індикатора енергоефективності в роботі використовується різниця між фактичним обсягом енергоспоживання та його значенням, отриманим за допомогою відповідної математичної моделі.

Використанню методів бенчмаркінгу з метою оцінки енергозберігаючих проектів присвячена робота [183].

Літературні джерела наголошують на певних недоліках бенчмаркінгу [100, 118, 147, 183], які на даний момент не дозволяють використовувати його для контролю енергоефективностей умовах відчизняних підприємств.

Порівняння та аналіз енергоефективності різних однорідних об'єктів на основі визначених експертами числових значень критеріїв енергоефективності з урахуванням індивідуальних вагових коефіцієнтів для кожного критерію запропоновано здійснювати в роботах [65, 172].

З метою встановлення норм енергоспоживання у цілій низці робіт пропонується підхід, який базується на побудові регресійної математичної моделі питомої витрати електроенергії в залежності від параметрів технологічного процесу [18, 54, 94, 111]. Однак в зазначених роботах не наводяться рекомендації щодо того, яким чином необхідно обирати форму математичної моделі електроспоживання, з використанням якої у подальшому буде здійснюватись контроль енергоефективності.

В [94, 54, 18] автори пропонують використовувати з цією метою лінійну математичну модель.

Для вдосконалення системи нормування автор [54] пропонує виділяти змінну і постійну технологічну норми витрати енергетичних ресурсів на одиницю обладнання. Визначення змінних технологічних норм здійснюється регресійним аналізом, при цьому у вибірку статистичних даних автор включає тільки ті значення, які відповідають технології експлуатації обладнання. Норми електроспоживання для обслуговуючих операцій в залежності від виду обладнання пропонується визначати, перемножуючи питомі витрати енергоресурсів на час роботи обладнання.

Спираючись на аналіз різних методів розробки норм питомих витрат електроенергії, автори [18] зазначають, що в умовах постійної зміни технологічних факторів доцільно використовувати метод, заснований на побудові залежностей зміни питомої витрати енергетичних ресурсів від факторів, що впливають на її величину. Для цих цілей в роботі запропоновано використовувати гіперболічну модель питомої витрати електроенергії.

З метою врахування динамічності зміни норм питомої витрати електроенергії та забезпечення результатів в режимі «реального часу» автор роботи [111] пропонує застосовувати нейро-нечітке моделювання. При цьому формування правил нечіткої бази знань і налаштування параметрів здійснюється шляхом екстракції їх значень із наявної вибірки експериментальних даних.

Визначення прогнозних питомих витрат електроенергії за допомогою середньоквадратичної апроксимуючої експоненціальної залежності фактичних питомих витрат енергії від об'ємів випуску продукції досліджено у роботі [125].

Рекомендації щодо визначення норм питомої витрати електроенергії на основі методу планування експерименту описані в [92]. У цій роботі запропонована математична модель з цільовою функцією, що мінімізує питомі витрати електроенергії. За такою моделлю були отримані мінімально можливі значення питомих витрати електроенергії обладнання з урахуванням його продуктивності, приєднаної потужності та коефіцієнту завантаження. З метою

підтримання норм питомої витрати електроенергії авторами запропоновано спеціально розроблені номограми.

Комбінований метод контролю енергоефективності запропоновано в роботі [175]. В зазначеному методі пропонується використовувати Statistically Adjusted Engineering (SAE) метод, тобто дані, отримані з емпіричних формул, як вихідні у статистичних моделях енергоспоживання.

У джерелах [52, 53] завдання нормування питомих витрат енергії пропонується вирішувати на основі кластеризації відповідних експериментальних даних. На попередньому етапі автори здійснюють кластеризацію експериментальних даних для розбиття їх на дві групи: регулярні дані та аномальні викиди. Далі на регулярних даних методом найменших квадратів визначається допустима межа питомого енергоспоживання. На регулярних даних, що свідчать про допустимі і номінальні витрати, автори пропонують будувати експоненційну залежність питомої витрати енергії від кількості виробленої продукції.

Таким чином, слід зазначити, що, не дивлячись на значну кількість наукових розробок у цьому напрямку, існуючі в Україні підходи та методи контролю енергоефективності потребують удосконалення та подальшого розвитку. В тому числі, це стосується і діючої в Україні системи нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів.

Перспективним напрямком розвитку систем контролю енергоспоживання та управління енергоефективністю є теорія і практика створення на виробничих об'єктах систем енергетичного менеджменту, яка широко застосовується у економічно розвинених країнах світу. Зокрема, однією зі складових систем енергоменеджменту є системи контролю і планування енергоспоживання (системи КіП), відомі також під назвою Monitoring and Targeting Systems [93, 138, 139, 157, 173].

Такі системи створюють для локальних виробничих об'єктів: окремих установок, агрегатів, технологічних процесів тощо [37]. Основним призначенням цих систем є здійснення оперативного контролю ефективності

використання ПЕР на зазначених об'єктах. Системи КіП дозволяють контролювати безпосередньо абсолютні (а не питомі) витрати енергоносіїв, а цільові змінні («еталонні» значення) обсягів споживання палива чи енергії на об'єкті встановлюються на основі математичної моделі, що відображає залежність цих обсягів від чинників, що характеризують результати та умови протікання виробничого процесу [128, 143, 185].

Робота систем контролю і планування енергоспоживання має циклічний характер і забезпечує виконання наступних функцій [149, 154, 168]:

- Облік фактичних обсягів споживання палива або енергії, результатів виробничої діяльності, а також чинників, що впливають на величину споживання ПЕР на об'єкті контролю.
- Визначення цільових змінних споживання палива або енергії.
- Контроль виконання встановлених цільових змінних, тобто їх порівняння з фактичними обсягами енергоспоживання;
- Виявлення та усунення причин, що призводять до перевитрати енергоресурсів, тобто до перевищення відповідних цільових змінних енергоспоживання.
- Розробка і періодичне впровадження заходів з підвищення енергоефективності.

Ідеологія створення та функціонування систем КіП є цілком прийнятною для здійснення оперативного контролю енергоефективності, в тому числі, і на українських виробничо-господарських об'єктах. Однак, через наявність певних суттєвих недоліків безпосереднє застосування існуючих методик побудови і використання таких систем на вітчизняних підприємствах не видається можливим та доцільним [68, 70, 71, 77, 148].

Зокрема, в традиційних системах КіП існують певні методологічні недоліки та невирішені питання, що не дозволяють при практичному застосуванні таких систем одержувати достатньо об'єктивні результати оперативного контролю енергоефективності та аналізувати причини їх виникнення. А саме, в методиках побудови традиційних систем КіП [74, 75]:

1. Відсутні рекомендації щодо вибору об'єктів контролю, тобто визначення окремих технологічних агрегатів чи їх груп для яких технічно та економічно доцільно створювати такі системи контролю.

2. Не наводиться рекомендацій щодо визначення складу чинників, що суттєво впливають на енергоспоживання різних технологічних об'єктів.

3. Відсутня методика, яка дозволяла б обирати найбільш прийнятний метод побудови та вигляд математичної моделі електроспоживання, виходячи з особливостей кожного конкретного об'єкту контролю.

4. Відсутня чітка та об'єктивна процедура контролю виконання встановлених цільових змінних електроспоживання, що дозволяла б виявляти моменти часу, в які відбуваються невідповідності рівня енергоефективності виробничого об'єкту.

1. Не передбачено конкретних методів та способів, які б надавали можливість виявлення та аналізу причини, що призводять до перевитрат або економії електричної енергії на відповідному об'єкті контролю енергоефективності.

Таким чином, методологію побудови та застосування традиційних систем КІП доцільно використати в якості прототипу для створення більш досконалих систем оперативного контролю ефективності використання електричної енергії на виробничих об'єктах. І вирішення цієї задачі, в першу чергу, має бути направлено на усунення наведених вище недоліків традиційних систем контролю і планування енергоспоживання.

Висновки до розділу 1

1. Для досягнення вагомих практичних результатів в області енергозбереження необхідне постійне, систематичне управління енергоефективністю. Однією з важливих функцій такого управління є контроль ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, зокрема електроенергії, у виробничому секторі.

2. Традиційно контроль енергоефективності на промислових підприємствах, здійснюється на основі побудови та аналізу електробалансів. Зокрема, нормування питомих витрат електричної енергії, що використовується для контролю енергоефективності на вітчизняних підприємствах, також базується на побудові та аналізі енергетичних балансів виробничих об'єктів.

3. Єдиної методики складення та аналізу електричних балансів на сьогодні не існує, а традиційні методи їх побудови, зважаючи на особливості вітчизняних підприємств, не дозволяють одержувати достатньо достовірні та обгрунтовані електробаланси виробничих об'єктів. У зв'язку з цим існуючі методи побудови електричних балансів потребують удосконалення.

4. Одним з перспективних напрямків отримання більш достовірних та обгрунтованих балансів споживання електричної енергії на виробничо-господарських об'єктах є удосконалення та подальший розвиток методичних засад застосування ймовірісно-статистичного підходу до побудови електробалансів.

5. Існуючі в Україні підходи та методи не дозволяють здійснювати оперативний контроль ефективності використання електроенергії у виробництві та одержувати достатньо об'єктивні його результати і тому потребують удосконалення та подальшого розвитку.

6. Перспективним напрямком розвитку систем оперативного контролю енергоефективності є застосування теорії та практики створення на виробничих об'єктах систем енергетичного менеджменту, зокрема, побудови систем контролю і планування енергоспоживання (систем КіП).

7. Методологія побудови та застосування традиційних систем КіП має низку суттєвих недоліків та невирішених питань і з цієї причини може бути прийнята лише в якості прототипу для створення більш досконалих систем оперативного контролю ефективності використання електричної енергії на виробничих об'єктах. Створення таких, більш досконалих систем, в першу чергу, має базуватись на усуненні недоліків традиційних систем контролю і планування енергоспоживання.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЙМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ РІЗНИХ УМОВ ТА ВИПАДКІВ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОБАЛАНСІВ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Ієрархічний підхід до побудови балансів споживання електричної енергії із застосуванням ймовірно-статистичних методів

Можливість та доцільність застосування тих чи інших методів побудови електробалансів виробничих об'єктів насамперед залежить від рівня охоплення підприємства приладами обліку електроспоживання. Беручи до уваги можливі рівні оснащення підприємств приладами обліку, задача побудови витратної частини електробалансів може вирішуватись в умовах, які відповідають одній з трьох основних ситуацій, наведених на рис. 2.1.

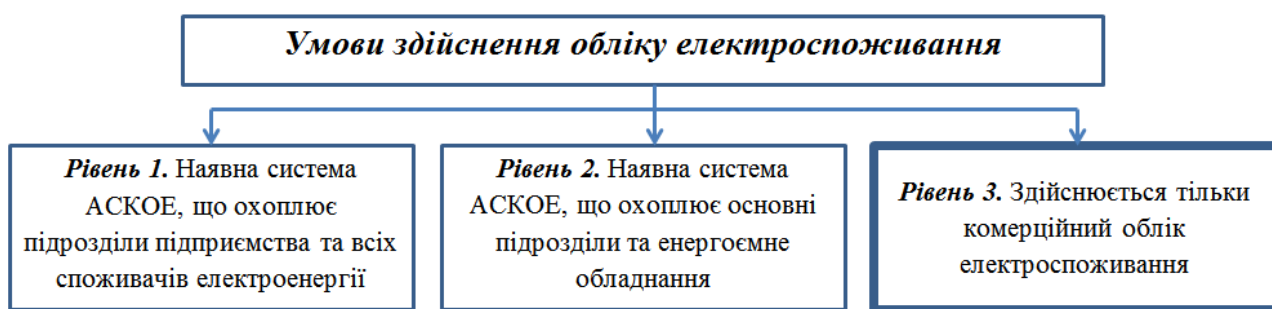


Рис.2.1. Умови, в яких може здійснюватись побудова електробалансів

На підприємствах із сучасними та розгалуженими автоматизованими системами обліку енергоспоживання (Рівень 1, рис 2.1), побудова фактичних електробалансів та подальший контроль ефективності використання електроенергії на їх основі може здійснюватись автоматично (з застосуванням спеціальних програмних засобів обробки даних обліку) і з будь-якою періодичністю [9]. Однак, на практиці на більшості вітчизняних підприємств такі розгалужені системи обліку, оснащені відповідними засобами обробки даних, відсутні. Таким чином, можна стверджувати, що характерними для підприємств України є здійснення обліку на рівнях 2 та 3 (рис. 2.1).

При наявності обліку на рівні 2 (рис. 2.1) відомими даними для побудови електробалансів є фактичні обсяги споживання електроенергії підприємством в цілому, а також окремими його підрозділами та енергоємними агрегатами, оснащеними приладами технічного обліку. Проте електроспоживання більшої частини технологічного обладнання на таких підприємствах не охоплене автоматизованим обліком. Отже вирішення задачі на рівні 2 (рис. 2.1) у порівнянні з рівнем 1 (рис. 2.1) є значно більш складною з точки зору побудови електробалансів, оскільки тільки частина вихідних даних може бути отримана з будь якою періодичністю за допомогою приладів комерційного та технічного обліку, а фактичні обсяги електроспоживання більшості агрегатів залишаються невідомими.

Рівень 3 (рис. 2.1) передбачає наявність на підприємстві лише приладів комерційного обліку за якими здійснюється сплата рахунків за споживання електроенергії. Такий випадок є найбільш складним для визначення витратної частини електробалансів, тим не менше, вона є найбільш розповсюдженою на підприємствах України. Побудова електробалансів в зазначеному випадку здійснюється в умовах невизначеності вихідних даних, зокрема, фактичних обсягів споживання електроенергії підрозділами підприємства, а також окремо кожною одиницею технологічного обладнання.

Тим не менше, для зазначених умов існує спосіб, який дозволяє досить успішно вирішувати задачу побудови електробалансів: так званий ймовірнісно-статистичний підхід [81]. Зокрема, цей підхід дозволяє будувати електробаланси в умовах недостатньої та нечіткої вихідної інформації, а також враховувати випадковий характер обсягів електроспоживання та чинників, що на нього впливають. Він базується на застосуванні експертних методів, а також методів теорії ймовірності та математичної статистики.

Однак, не зважаючи на очевидні переваги ймовірнісно-статистичного підходу до побудови електробалансів, існуючі методичні основи його застосування мають певні недоліки, що потребують усунення. Зокрема, основними з них є [133]:

- застосування спрощених методів визначення найбільш ймовірної структури витратної частини електробалансів;
- недостатня технічна та технологічна обґрунтованість побудови електробалансів.

Під час побудови електробалансів ймовірісно-статистичними методами необхідно враховувати багаторівневість системи постачання електроенергії та індивідуальні особливості виробничих процесів на кожному окремому промисловому підприємстві. Промислові підприємства України характеризуються складною розгалуженою виробничою структурою, яку можна представити у вигляді впорядкованої сукупності основних, допоміжних і обслуговуючих виробничих підрозділів [39]. У кожному з виробничих підрозділів використовується значна кількість технологічного обладнання, яке формує специфічний взаємозв'язок процесів виробництва продукції та споживання енергоресурсів, зокрема, електричної енергії [99]. Крім того, для здійснення виробничої діяльності зазначене обладнання працює в різних режимах споживання електроенергії. Ця особливість підприємств значно ускладнює процедуру побудови електробалансів відповідних об'єктів [50,52, 62]. Тому з метою спрощення даної задачі у роботі запропоновано використати ієрархічний підхід до побудови електробалансів із застосуванням ймовірісно-статистичних методів (рис. 2.2).

Згідно рисунку 2.2, побудову електробалансів, а також їх подальший аналіз, пропонується здійснювати на двох рівнях: спочатку за видами продукції, що виробляється на підприємстві, що розглядається, а потім – за агрегатами, задіяними у процесі виробництва кожного окремого виду чи сорту продукції. Такий підхід дозволяє значною мірою врахувати особливості кожного підприємства, спростити розмірність задачі та отримувати більш обґрунтовані електробаланси у зручнішому вигляді для подальшого контролю та аналізу енергоефективності.

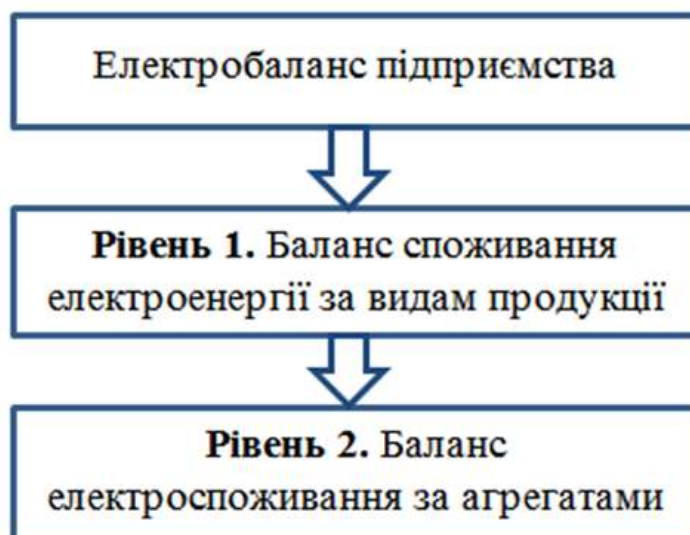


Рис. 2.2. Ієрархічний підхід до побудови електробалансів промислових підприємств

Побудову електробалансів на першому рівні необхідно починати з визначення основних видів продукції, що виробляється на відповідному підприємстві. Кожен з зазначених видів продукції має бути врахований в окремій статті електробалансу, що складається на цьому рівні.

Побудова та аналіз електробалансів за видами продукції дають змогу здійснювати контроль ефективності використання електроенергії на рівні підприємства в цілому або його підрозділів шляхом визначення традиційних показників, наприклад, питомих витрат енергії. Однак, відповідні показники є занадто укрупненими і не дозволяють здійснювати детальний і, що не менш важливо, – оперативний аналіз ефективності використання енергії на підприємстві. Тому завжди існує необхідність побудови балансів на 2-му рівні (рис. 2.2), тобто балансів споживання енергії за агрегатами, які задіяні у процесах виробництва кожного окремого виду продукції. Необхідно зазначити, що саме електробаланси за агрегатами дають можливість здійснювати контроль енергоефективності, в тому числі і оперативний, локальних технологічних об'єктів (установок, агрегатів, технологічних процесів тощо).

Побудову електробалансів на другому рівні слід починати з ознайомлення з технологічними схемами виробництва продукції. Технологічні

схеми дозволяють визначити склад обладнання, яке застосовується для виробництва того чи іншого виду продукції, а також слугують основою для формування структури електробалансів за агрегатами, задіяними у процесі виробництва кожного окремого виду продукції.

Подальше визначення кількісних значень статей електробалансів на кожному рівні їх побудови на основі застосування ймовірісно-статистичних методів цілком залежить від наявності на підприємстві і повноти вихідних даних про виробничі показники та технічні характеристики обладнання.

Відомо, що обладнання, яке використовується на українських підприємствах, значною мірою було виготовлене ще за радянських часів і є технічно застарілим. Для такого обладнання, як правило, було виконано значну кількість капітальних ремонтів та робіт з модернізації. Зважаючи на це, реальні технічні характеристики такого обладнання, які мають бути використані для побудови електробалансів, здебільшого, не відповідають паспортним даним і дуже часто взагалі не є достовірно відомими.

Важливу додаткову інформацію для побудови електробалансів на кожному з зазначених рівнів, в принципі, можна отримати на основі статистичних даних про певні виробничі показники, зокрема, про обсяги виробленої продукції. Однак на практиці облік необхідних виробничих та технологічних параметрів здійснюється далеко не на всіх підприємствах. Крім того, досить часто обсяг наявних статистичних даних про відповідні виробничі показники не є достатнім для застосування тих чи інших методів побудови електробалансів.

Виходячи з зазначеного, з метою побудови якомога більш об'єктивних та обґрунтованих електробалансів в умовах наявності різних наборів вихідних даних в дисертаційній роботі розроблено декілька підходів до вирішення зазначеної задачі. Надалі характерні умови, в яких здійснюється побудова електробалансів, у роботі називатимуться Ситуації (рис. 2.3). Спільною рисою розроблених підходів є застосування ймовірісно-статистичних методів, які

дозволяють одержувати достовірні результати побудови електробалансів навіть у випадках недостатньої та нечіткої вихідної інформації.



Рис. 2.3. Умови побудови електробалансів

Подальший розвиток ймовірно-статистичного підходу до побудови балансів споживання електричної енергії на виробничих об'єктах найбільш доцільно продемонструвати насамперед для найскладнішого випадку, тобто для підприємств, які мають лише прилади комерційного обліку електроспоживання (рис. 2.1, Рівень 3).

2.2 Побудова електробалансів виробничих об'єктів за відомими загальними обсягами споживання електроенергії на підприємстві

На сьогодні на підприємствах України використовується значна кількість технологічного обладнання, для якого облік технологічних параметрів, обсягів виробленої продукції, а також обсягів споживання електричної енергії не здійснюється. Відповідно, такі умови побудови електробалансів виробничих об'єктів є найбільш складними. Фактично єдиною вихідною інформацією для вирішення даної задачі в цьому випадку є обсяги споживання електроенергії підприємством в цілому, за якими здійснюється оплата рахунків за використану

електроенергію (рис. 2.3, Ситуація 1). Однак і в цих умовах на будь-якому підприємстві, як правило, можуть бути отримані також певні додаткові дані, необхідні для складення електробалансів, зокрема, на підставі технологічних схем виробництва продукції, які дозволяють визначати, яке саме обладнання є задіяним у виробництві того чи іншого її виду [4, 133].

Традиційно, у даному випадку на вітчизняних підприємствах застосовується спрощений розрахунковий метод побудови електробалансів. Він передбачає знаходження обсягів електроспоживання окремих агрегатів як добутку встановленої електричної потужності кожної одиниці обладнання, середнього коефіцієнту його завантаження та тривалості роботи цього обладнання протягом відповідного періоду (1.1). Однак, облік числових значень останніх двох параметрів у формулі 1.1 на більшості підприємств не здійснюється. Деякі, доволі широкі інтервали можливих значень необхідних для розрахунку коефіцієнтів завантаження виробничого обладнання можна знайти у довідковій літературі [109]. Що ж стосується тривалості роботи, то для більшості видів обладнання вона взагалі є достеменно невідомою. Очевидно, що вибрати достатньо близькі до фактичних значення коефіцієнтів завантаження з наведених в довідниковій літературі інтервалів їх можливих величин, а тим більше визначити тривалість роботи кожної одиниці обладнання, не виконуючи ніяких додаткових спостережень чи вимірювань, практично неможливо. Таким чином на практиці знаходження числових значень статей електробалансів з використанням спрощеного розрахункового методу, здебільшого, здійснюється в умовах невизначеності вихідних даних, що суттєво знижує об'єктивність та обґрунтованість отриманих результатів. Тим не менше, в зазначених умовах застосування цього методу залишається єдиним способом побудови електробалансів відповідних виробничих об'єктів.

Суттєво покращити результати вирішення цієї задачі на основі розрахункового способу можна, поєднуючи його з ймовірнісно-статистичними методами. Основною метою застосування ймовірнісно-статистичного підходу до побудови електробалансів у цьому випадку є знаходження найбільш

ймовірних, максимально наближених до реальних числових значень коефіцієнтів завантаження виробничого обладнання та тривалості його роботи.

З цією метою зазначені параметри слід розглядати як випадкові величини, для яких на основі відповідних додаткових даних необхідно побудувати гістограми частот появи тих чи інших їх можливих значень. На підставі таких гістограм можуть бути визначені закони розподілу розрахункових обсягів електроспоживання відповідного обладнання, які є основою для побудови електробалансів виробничих об'єктів з застосуванням ймовірнісно-статистичних методів.

Гістограми частот можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання можуть бути визначені двома шляхами:

- 1) На основі статистичних даних, отриманих за допомогою вибіркового вимірювання реальних величин зазначених параметрів;
- 2) На основі псевдореальних даних, отриманих з застосування методів експертного опитування та методів імітаційного моделювання.

2.2.1 Визначення гістограм частот можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання на основі методу моментних спостережень

Однією з головних умов побудови експериментальним шляхом об'єктивних електричних балансів є узгодженість у часі вимірювання обсягів енергоспоживання всіх агрегатів, які враховуються в витратній частині електробалансів. Рекомендацій щодо того, яким чином необхідно здійснювати одночасні вимірювання величин електроспоживання значної кількості технологічних агрегатів, щоб задовольнити відповідну вимогу, у літературних джерелах, присвячених проблемам побудови електробалансів, не наводиться [63]. Організувати ж одночасне вимірювання обсягів споживання електроенергії численними агрегатами за допомогою тимчасово встановлених

систем обліку в реальних виробничих умовах є практично нездійсненою задачею.

Виходом з цієї ситуації є періодичне проведення вибірових вимірювань числових значень відповідних виробничих параметрів, зокрема, коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи технологічного обладнання, за якими у подальшому можуть бути розраховані обсяги його електроспоживання.

Як відомо, вибірові вимірювання технологічних параметрів з метою подальшого визначення величин енергоспоживання, доволі часто рекомендується застосовувати під час проведення енергетичних обстежень виробничо-господарських об'єктів. Однак, чіткі рекомендації, які вказують, де необхідно здійснювати відповідні вимірювання, яким чином та протягом якого періоду часу вони мають виконуватись для отримання об'єктивних результатів, у методиках проведення енергетичних обстежень, у тому числі, і енергоаудитів, також відсутні.

Численні дослідження свідчать, що дисперсія реальних значень параметрів технологічних процесів, у тому числі коефіцієнтів завантаження обладнання та тривалості його роботи, може бути значною. У цій ситуації певна сукупність числових значень виробничих параметрів, отримана шляхом вибірових вимірювань, може не відповідати вимозі її репрезентативності (подібності до генеральної сукупності). До того ж, для побудови достатньо об'єктивних електробалансів необхідно практично одночасно виконувати вимірювання зазначених показників функціонування великої кількості територіально розосереджених агрегатів.

Виходячи з зазначеного, у дисертаційній роботі пропонується здійснювати періодичні вимірювання необхідних виробничих показників з застосуванням так званого методу моментних спостережень, який традиційно використовується для вирішення задач в області організації виробництва [22].

Метод моментних спостережень полягає в тому, що спеціально призначений спостерігач з метою вимірювання необхідних технологічних параметрів здійснює періодичні обходи певної групи агрегатів за заздалегідь

встановленим маршрутом через заплановані проміжки часу. Виміряні під час обходів параметри заносяться до відповідних бланків чи журналів, формуючи таким чином статистичні дані, необхідні для побудови електробалансів.

Отримані з застосуванням зазначеного методу реальні статистичні дані щодо показників функціонування агрегатів, зокрема, можуть бути використані для побудови достовірних гістограм частот появи можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи технологічного обладнання.

Організація вимірювань за допомогою методу моментних спостережень базується на теорії ймовірності і математичній статистиці. Необхідний для одержання достатньо достовірних результатів обсяг вибірок значень відповідних технологічних параметрів, тобто потрібна кількість спостережень n розраховується за формулою [22]:

$$n = \frac{t^2 p(1-p)}{\Delta^2}, \quad (2.1)$$

де t – коефіцієнт довіри (при довірчій ймовірності 0,95 $t = 2$); p – очікувана частка часу роботи обладнання у загальній тривалості періоду спостереження; Δ – гранична похибка результатів вибіркового дослідження у порівнянні з результатами, отриманими за генеральною сукупністю значень відповідних виробничих параметрів.

Величина граничної похибки Δ приймається в залежності від необхідної довірчої ймовірності, з якою має здійснюватись побудова гістограм частот появи можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи технологічного обладнання. На практиці прийнятною є величина похибки 10%.

Параметр p може прийматися на основі попереднього досвіду експлуатації обладнання, даних попередніх обстежень або оцінок експертів, які безпосередньо контролюють роботу відповідних агрегатів.

Число обходів за зміну β при застосуванні методу моментних спостережень визначається за наступною формулою:

$$\beta = \frac{n}{NC}, \quad (2.2)$$

де N – кількість агрегатів; C – кількість змін, протягом яких планується проведення вибірових вимірювань.

Тривалість одного обходу визначається за відповідною умовою:

$$t_{\text{обх}} \leq \frac{T_{\text{зм}}}{k\beta}, \quad (2.3)$$

де $T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни; k – коефіцієнт, що враховує розбіжність в часі обходів (при приблизно однаковій тривалості обходів $k = 1$); β – число обходів за зміну.

Чим ближче k до одиниці, тим більше величина моментного спостереження наближається до суцільного.

Як зазначалося, на основі отриманих методом моментних спостережень статистичних даних про тривалість роботи обладнання та коефіцієнти його завантаження можуть бути побудовані гістограми частот появи можливих значень відповідних параметрів. Далі, скориставшись формулою (1.1) на основі кількісних значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання отриманих з гістограм частот відповідних параметрів, можна перейти до гістограм частот можливих значень обсягів споживання електроенергії окремих агрегатів.

2.2.2 Визначення гістограм частот появи можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання на основі методів експертного опитування та імітаційного моделювання

Очевидно, що застосування методів математичної статистики та теорії ймовірності для вирішення задачі побудови електробалансів потребує наявності значної кількості статистичних даних. На практиці, на підприємствах не завжди існує матеріально-технічна база для вимірювання технологічних параметрів, в тому числі і за допомогою методу моментних спостережень. У цьому випадку для побудови гістограм частот появи можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання пропонується використовувати псевдореальні статистичні дані, отримані на основі експертного опитування та методів імітаційного моделювання. Відомо, що методи імітаційного моделювання дозволяють отримувати псевдореальні статистичні дані при відсутності апріорної інформації про числові значення певних величин [12]. Однак, необхідно звернути увагу, що отримані імітаційними методами псевдореальні гістограми частот появи можливих значень зазначених вище виробничих показників є менш об'єктивними та обґрунтованими ніж побудовані на основі реальних статистичних даних, отриманих, зокрема, шляхом застосування методу моментних спостережень.

Першим кроком до побудови псевдореальних гістограм частот появи можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання є застосування методів експертного опитування. У якості експертів з питання, що розглядається, в першу чергу, доцільно залучати таких фахівців, як енергетики, технологи, лінійні менеджери, оператори відповідних установок. Метою експертного опитування є встановлення інтервалів можливих значень кожного з нечітких виробничих параметрів, що аналізуються, а також оцінка ймовірності знаходження (частоти появи) окремих їх значень у відповідних інтервалах. До початку проведення опитування експертів, необхідно попередньо визначити діапазони теоретично можливих числових значень

зазначених нечітких параметрів, які, по можливості, мають бути максимально наближеними до реальних їх величин, що можуть спостерігатися за тих чи інших конкретних умов виробництва. Встановити діапазони теоретично можливих значень нечітких параметрів можна в тому числі і на підставі методичної та довідкової літератури.

Опитування спеціалістів-експертів здійснюється за допомогою анкет, у яких кожному експерту пропонується на спеціальній шкалі позначити вертикальними та горизонтальними лініями інтервали, в яких можуть знаходитись фактичні величини тривалості роботи та коефіцієнтів завантаження того чи іншого виду обладнання, а також частоту, з якою дійсні значення даних параметрів можуть спостерігатися в межах цих інтервалів.

Для оцінки частоти знаходження фактичних значень тривалості роботи та коефіцієнтів завантаження обладнання у відповідних інтервалах експертам у найпростішому випадку можуть бути запропоновані три лінгвістичні рівні, характеристика яких наведена в таблиці 2.1.

На рисунку 2.3 наведено приклад оцінки коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи окремого агрегату одним із експертів.

Для того, щоб на підставі отриманих експертним шляхом оцінок можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи сформувати псевдореальні статистичні вибірки їх величин необхідно застосувати імітаційне моделювання. З цією метою у кожному з встановлених експертами інтервалів можливих значень виробничих параметрів, що розглядаються, виходячи з оцінки експертами рівня частоти їх появи («часто», «досить часто», «рідко»), з застосуванням, наприклад, методу Монте-Карло має бути згенерована відповідна кількість псевдореальних величин тривалості роботи та коефіцієнтів завантаження обладнання. Основні методичні положення застосування методу Монте-Карло наведено в [104].

Очевидно, що при формуванні вибірок псевдореальних статистичних даних коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання необхідно враховувати визначені у ході експертного опитування суб'єктивні частоти, з

якими реальні величини зазначених параметрів можуть знаходитись в межах тих чи інших інтервалів можливих їх значень. Для цього в процесі формування вибірок зазначених псевдореальних даних для кожного інтервалу, у якому може знаходитись невідоме фактичне значення відповідного виробничого параметру, необхідно випадковим чином згенерувати певну кількість псевдореальних його значень N , пропорційну відомій з експертного опитування частоті їх появи. Наприклад, в процесі генерування для деякого виду обладнання N псевдореальних значень кожного з виробничих параметрів, що розглядаються, $0.5 N$ можливих значень тривалості роботи або коефіцієнта завантаження цього обладнання мають знаходитись у інтервалі, що характеризується рівнем «часто», $0.35 N$ – в інтервалі з рівнем «досить часто» та $0.15 N$ – в інтервалі з рівнем «рідко» (рис. 2.4).

Узагальнення думок кількох експертів при застосуванні такого підходу здійснюється автоматично шляхом виділення для кожного експерта певної кількості імітацій можливих значень виробничих параметрів, яка дорівнює:

$$n = \frac{N}{m}, \quad (2.4)$$

де N – необхідна загальна кількість імітацій числових значень кожного з параметрів, що розглядаються; m – кількість експертів.

Генерування псевдореальних значень параметрів здійснюється до тих пір, поки не буде отримана необхідна для побудови електробалансів кількість статистичних даних. Чим більшою є кількість згенерованих можливих значень виробничих параметрів, тим більш точними та достовірними будуть результати вирішення поставленої задачі.

Таблиця 2.1

Рівні, що характеризують частоту знаходження фактичних обсягів електроспоживання кожного виду обладнання у відповідних інтервалах

Рівень	Характеристика рівня
Рідко	Фактичний обсяг електроспоживання обладнання знаходиться у відповідному інтервалі не частіше, ніж у 20 % випадків
Досить часто	Фактичний обсяг електроспоживання обладнання знаходиться у відповідному інтервалі у 20...50 % випадків
Часто	Фактичний обсяг електроспоживання обладнання знаходиться у відповідному інтервалі частіше, ніж у 50 % випадків

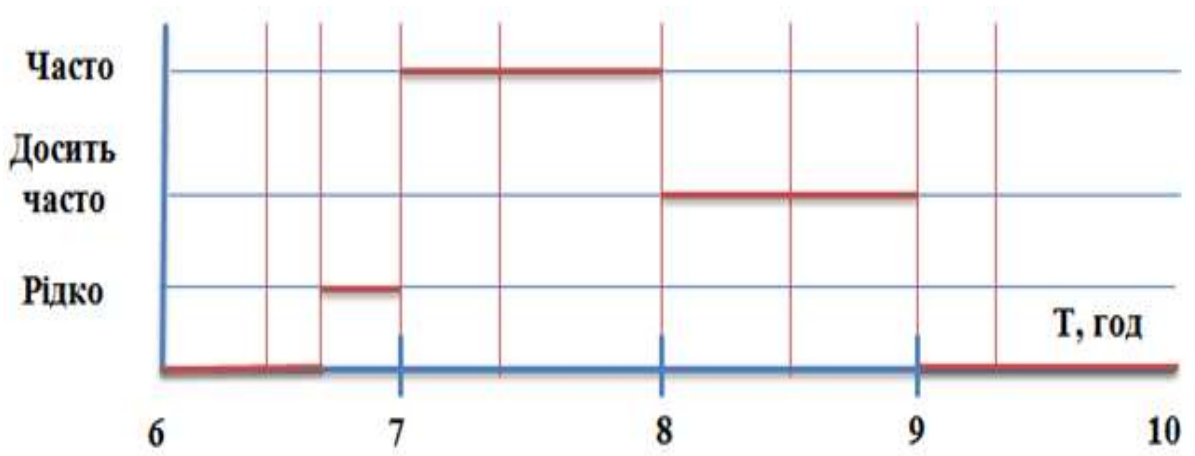
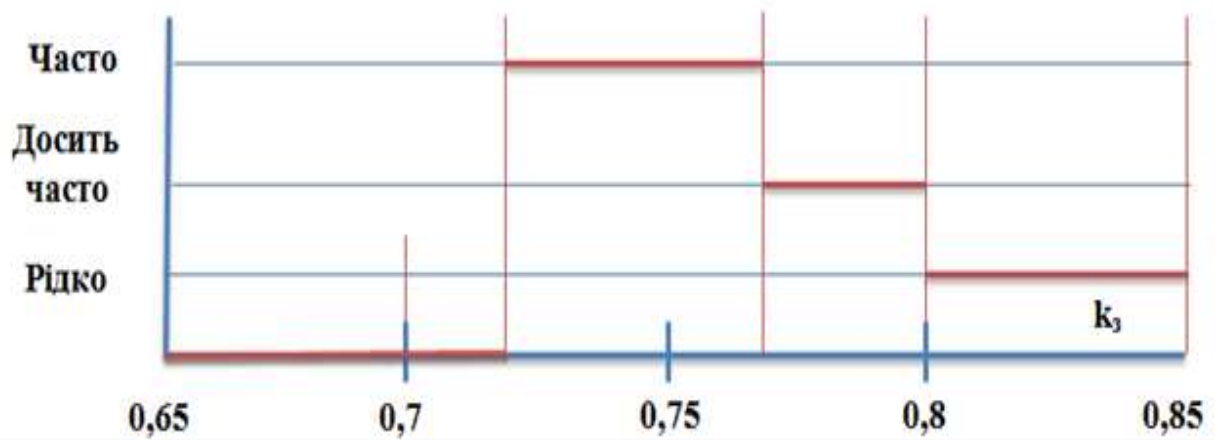


Рис. 2.4. Приклад експертної оцінки коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи окремого агрегату.

Кількість необхідних імітацій з застосуванням методу Монте-Карло може бути визначена за наступною формулою [104]:

$$N = \frac{t_{\alpha}(1-d)}{\Delta^2 d}, \quad (2.5)$$

де d – незміщена статистична ймовірність появи відповідного виробничого параметра; t_{α} – табличне значення розподілу Стюдента; Δ – відносна похибка статистичної оцінки.

Таким чином, результатом застосування імітаційного моделювання є формування достатньо великих за обсягом вибірок псевдореальних значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання. На основі вибірок псевдореальних значень відповідних параметрів можуть бути побудовані гістограми частот появи можливих їх значень, а також в результаті виконання розрахунків за формулою (1.1) – гістограми частот появи можливих значень обсягів споживання електроенергії окремих агрегатів.

2.2.3 Визначення законів розподілу обсягів електроспоживання за видами продукції та за агрегатами

На основі отриманих гістограм частот можливих значень обсягів споживання електроенергії окремих агрегатів, можуть бути визначені їх закони розподілу. Існує досить велика кількість теоретичних законів розподілу випадкових величин. Найбільш поширеними серед них є нормальний, логнормальний, біноміальний, бета, рівномірний, Фішера та Стюдента.

Зрозуміло, що процеси електроспоживання різних видів обладнання мають свої особливості і відрізняються між собою. Тому очевидно, що обсяги споживання електричної енергії різними технологічними агрегатами, які значною мірою є випадковими величинами, можуть описуватись різними законами розподілу. Для визначення закону розподілу електроспоживання

деякого агрегату може бути використана гістограма частот появи реальних або псевдореальних значень цього показника, методичні основи побудови якої наведено у підрозділах 2.2.1 та 2.2.2. За виглядом цієї гістограми підбирається теоретична крива закону розподілу. Перевірка того, наскільки добре вибіркові дані електроспоживання описуються теоретичним законом, здійснюється за критеріями згоди.

Зокрема, для перевірки відповідності обраного закону розподілу теоретичному доцільно застосовувати критерій Колмогорова [30]. При використанні цього критерію потрібно знайти максимальну за модулем різницю між вибірковою (дослідною, емпіричною, експериментальною) функцією розподілу $\overline{F}_x(x)$ і теоретичної (генеральною, підбраною) функцією $F_x(x)$:

$$D = \max_{\nabla_x} |F_x(x) - \overline{F}_x(x)|, \quad (2.6)$$

За величиною цієї різниці визначається параметр $\lambda = D\sqrt{n}$, який порівнюється з квантилем λ -розподілу Колмогорова, що є граничною величиною. Якщо розрахункова величина λ не перевищує квантиля λ_p , то з довірчою ймовірністю p статистична гіпотеза про відповідність вибраного теоретичного закону розподілу може бути прийнята. Якщо ж $\lambda > \lambda_p$, то теоретичний закон розподілу підбрано невірно.

На основі вибраних таким чином законів розподілу обсягів електроспоживання окремих агрегатів можуть бути визначені закони розподілу обсягів споживання електроенергії за видами продукції. Вони визначаються шляхом об'єднання законів розподілу обсягів електроспоживання окремих агрегатів, що задіяні у процесі виробництва кожного з видів продукції. Об'єднання декількох законів розподілу може бути здійснено за допомогою спеціальних емпіричних залежностей або за допомогою методів імітаційного моделювання [104].

2.2.4 Побудова електробалансів за видами продукції та за агрегатами

Задача визначення невідомої структури електробалансу за видами продукції полягає в знаходженні найбільш ймовірних величин витрат електроенергії на виробництво кожного з них [11]. Пошук таких значень пропонується здійснювати шляхом вирішення оптимізаційної задачі з відповідною цільовою функцією:

$$z = \prod_{i=1}^n f_i(W_i^{\text{np}}) \rightarrow \max, \quad (2.7)$$

де $f_i(W_i^{\text{np}})$ – ймовірність появи певного значення електроспоживання на виробництво i -го виду продукції, визначена за кривою розподілу можливих обсягів споживання електроенергії, встановленою для відповідного виду продукції (підрозділ 2.2.3).

При вирішенні зазначеної оптимізаційної задачі на числові значення всіх змінних W_i^{np} накладаються такі обмеження:

$$W_{i\min}^{\text{np}} \leq W_i^{\text{np}} \leq W_{i\max}^{\text{np}}, \quad \sum_{i=1}^n W_i^{\text{np}} = W^{\text{під}}, \quad (2.8)$$

де W_i^{np} – обсяг споживання електроенергії на виробництво i -го виду продукції, що визначається в процесі оптимізації; $W^{\text{під}}$ – загальний обсяг споживання електричної енергії на випуск всіх видів продукції; n – кількість видів продукції, що виробляються на підприємстві.

Для вирішення відповідної оптимізаційної задачі з обмеженнями можуть використовуватись різні алгоритми та методи. Зокрема, одним з широко відомих методів, який було використано в даній роботі, є Interior-Point Algorithm, відомий у вітчизняній літературі, як Метод Внутрішніх Точок. Алгоритм Методу Внутрішніх Точок наведено в [5].

Побудова електробалансів за агрегатами задіяними в випуску кожного окремого виду продукції також здійснюється шляхом вирішення подібної до наведеної вище оптимізаційної задачі (рівняння 2.7 та 2.8).

За відомими законами розподілу обсягів електроспоживання агрегатів (підрозділ 2.2.3) витратну частину електробалансів за агрегатами пропонується визначати шляхом вирішення відповідної оптимізаційної задачі:

$$z = \prod_{i=1}^n f_i(W_i^{az}) \rightarrow \max, \quad (2.9)$$

де $f_i(W_i^{az})$ – ймовірність появи певного значення обсягу електроспоживання i -го агрегату визначена, за відповідною кривою розподілу можливих обсягів споживання електроенергії, встановленою для відповідного агрегату (підрозділ 2.2.3).

При вирішенні зазначеної оптимізаційної задачі на числові значення всіх змінних W_i^{az} накладаються наступні обмеження:

$$W_{i\min}^{az} \leq W_i^{az} \leq W_{i\max}^{az}, \quad \sum_{i=1}^n W_i^{az} = W^{np}, \quad (2.10)$$

де W_i^{az} – обсяг споживання електроенергії i -м агрегатом, що визначається в процесі оптимізації; W^{np} – загальний обсяг споживання електричної енергії на виробництво даного виду продукції; n – кількість агрегатів, що задіяні у процесі виробництва відповідного виду продукції.

Для вирішення даної оптимізаційної задачі може бути використано також Interior-Point Algorithm (Метод Внутрішніх Точок) [5].

Таким чином, наведений вище підхід до вирішення задачі побудови електробалансів виробничих об'єктів у Ситуації 1 (рис. 2.1) дозволяє на основі застосування ймовірнісно-статистичних методів в умовах невизначеності вихідних даних одержувати достовірні, досить близькі до реальних

електробаланси за видами продукції та за агрегатами, які задіяні в випуску окремо кожного з видів продукції. Однак такі електробаланси не можна вважати достатньо об'єктивними та обґрунтованими, оскільки вони значною мірою базуються на даних вибірових спостережень або на досить суб'єктивних результатах опитування експертів. Тим не менше, запропонований підхід до вирішення задачі, що розглядається, в зазначеній Ситуації 1 дає змогу будувати значно кращі електробаланси виробничих об'єктів, ніж ті, які можуть бути одержані шляхом використання спрощеного розрахункового методу. Приклад практичного застосування розробленого підходу побудови електробалансів для Ситуації 1 наведено в розділі 4.1.

2.3 Побудова електробалансів виробничих об'єктів за відомими обсягами споживання електроенергії та виробництва продукції на підприємстві

Основною метою функціонування будь-якого промислового підприємства є здійснення виробничої діяльності, тобто випуск продукції та виконання певних робіт. Численні літературні джерела наголошують, що процеси споживання енергоресурсів та випуску продукції на виробничих об'єктах нерозривно пов'язані між собою [91, 109].

На будь-якому підприємстві кількість виробленої продукції є параметром, від величини якого залежить практично вся його діяльність, в тому числі і фінансові розрахунки [121, 101]. Саме тому на вітчизняних підприємствах, здебільшого, здійснюється достатньо об'єктивний облік таких параметрів, як обсяги виробництва продукції. При цьому статистичні дані про величини відповідних параметрів можуть бути наявні не тільки для підприємства в цілому чи його підрозділів, які виробляють основну продукцію, але інколи і за окремими агрегатами, які виконують проміжні операції. В зазначених умовах для побудови більш обґрунтованих електробалансів, крім обсягів споживання електроенергії на підприємстві, доцільно використовувати також наявні

статистичні дані про обсяги виробленої на ньому продукції (рис. 2.3, Ситуація 2).

Статистичні дані про обсяги виробництва продукції та споживання електроенергії на підприємстві в цілому дають можливість, застосовуючи відповідні ймовірісно-статистичні методи, будувати баланси споживання електричної енергії за видами продукції. Зв'язок між обсягами споживання електроенергії (залежна змінна) і обсягами випуску продукції (незалежні змінні) в загальному вигляді можна представити у вигляді лінійної багатофакторної математичної моделі:

$$W = b_1 Q_1 + b_2 Q_2 + \dots + b_n Q_n, \quad (2.11)$$

де W – сумарне електроспоживання підприємства за відповідний період часу, отримане за допомогою приладів комерційного обліку; $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ – обсяги виробленої продукції за кожним з її видів за той же період; $b_1, b_2, \dots, b_n$ – коефіцієнти (параметри) рівняння регресії.

Коефіцієнти $b_1, b_2, \dots, b_n$ у зазначеній моделі мають фізичний зміст і відповідають середнім питомим витратам електроенергії на виробництво кожного виду продукції. А отже добутки цих коефіцієнтів на відповідні обсяги виробництва продукції визначають структуру витратної частини балансу споживання електричної енергії за видами продукції.

При визначенні параметрів наведеної вище багатофакторної лінійної регресійної моделі (2.11) доцільно встановлювати для них довірчі інтервали, фізичним змістом яких є діапазони можливих значень питомих витрат електроенергії на виробництво кожного виду продукції. Наприклад, для i -го параметру багатофакторної лінійної регресійної межі таких довірчих інтервалів ($d_{i,\min}$ та $d_{i,\max}$) визначаються за наступним виразом:

$$[d_{i,\min} = d_i - t(\alpha, n - m)s_{d_i}; d_{i,\max} = d_i + t(\alpha, n - m)s_{d_i}], \quad (2.12)$$

де d_i – розрахункове значення i -го коефіцієнту регресійної моделі; $t(\alpha, n-m)$ – коефіцієнт розподілу Стюдента за двосторонньої імовірності α і кількості ступенів свободи $n-m-1$; n – кількість даних у вибірці; m – кількість незалежних змінних в математичній моделі; s_{d_i} – середньоквадратичне відхилення відповідного коефіцієнта регресії.

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії дорівнює:

$$s_{d_i} = s \sqrt{[(X^T X)^{-1}]_{i,i}}, \quad (2.13)$$

де s^2 – незміщена оцінка дисперсії σ^2 результатів моделювання залежної змінної (обсягів електроспоживання підприємства); $[(X^T X)^{-1}]_{i,i}$ – діагональний елемент матриці $(X^T X)^{-1}$; X – матриця значень незалежних змінних (обсягів виробництва різних видів продукції), які враховуються у математичній моделі.

Для визначення незміщеної оцінки дисперсії σ^2 потрібно скористатися наступним виразом:

$$s^2 = \frac{1}{(n-m-1)} \sum_{i=1}^n e_i^2, \quad (2.14)$$

де e_i – нев'язка i -го фактичного значення залежної змінної (обсягів електроспоживання) та отриманого за допомогою математичної моделі (2.11).

Побудову електробалансу за видами продукції та агрегатами в зазначених умовах пропонується виконувати за загальним алгоритмом, представленим в розділі 2.2. Однак в умовах, що розглядаються, на відміну від попереднього випадку, вирішення задачі починається безпосередньо з побудови електробалансів підприємства за видами продукції.

Як зазначалося у розділі 2.2, для побудови таких електробалансів вирішується оптимізаційна задача, цільова функція якої представлена рівнянням 2.7. При цьому, на основі довірчих інтервалів (2.12) до лінійних багатофакторних моделей (2.11), що відображають взаємозв'язок між споживанням електроенергії на підприємстві та обсягами виробленої продукції, пропонується додатково уточнювати та обґрунтовувати обмеження можливих обсягів електроспоживання (2.8), які використовуються при вирішенні зазначеної оптимізаційної задачі.

Що ж стосується побудови електробалансів за агрегатами, що задіяні у процесі виробництва кожного з видів продукції підприємства, то вона здійснюється так само, як і у попередньому випадку (підрозділ 2.2.4).

Таким чином, наявність статистичних даних про асортимент і обсяги виробництва продукції та їх врахування при вирішенні задачі побудови балансів споживання електроенергії з застосуванням ймовірісно-статистичних методів дає змогу одержувати значно більш об'єктивні та обґрунтовані електробаланси виробничих об'єктів, ніж у випадку використання даних лише про обсяги споживання електричної енергії на підприємстві.

При цьому, однак, необхідно зазначити, що обов'язковою умовою одержання достовірних та обґрунтованих результатів вирішення задачі, що розглядається, є побудова адекватних багатофакторних лінійних регресійних моделей залежності обсягів електроспоживання підприємства від обсягів виробленої на ньому продукції, що вимагає наявності достатньо великих об'ємів відповідних статистичних даних.

Особливості побудови багатофакторної лінійної регресійної залежності обсягів електроспоживання підприємства від обсягів виробленої продукції з метою побудови достовірних електробалансів наведено в додатку А.

Приклад побудови електробалансів виробничих об'єктів за відомими обсягами споживання електроенергії та виробництва продукції наведено в розділі 4.2.

2.4 Побудова електробалансів виробничих об'єктів за наявності аналітичних залежностей для розрахунку електроспоживання агрегатів

2.4.1 Проблема визначення обсягів електроспоживання агрегатів за наявними розрахунково-аналітичними залежностями

На підприємствах, як правило, існують виробничі процеси для яких є відомими аналітичні залежності між обсягами енергоспоживання та відповідними технологічними параметрами (рис. 2.3, Ситуація 3). Зокрема такі залежності наводяться в численних методиках, розроблених для різних галузей суспільного виробництва. В принципі, наявність відповідних залежностей вже сама по собі може бути основою для побудови достатньо достовірних та обґрунтованих електробалансів з застосуванням розрахунково-аналітичного методу.

Однак, на практиці використання емпіричних та аналітичних залежностей, наведених у численних галузевих методиках, не завжди дозволяє отримати достовірні електробаланси виробничо-господарських об'єктів. Насамперед, це пов'язано з наявними в зазначених методиках недоліками.

Характерним недоліком побудови електробалансів за розрахунковими залежностями, представленими в більшості галузевих методик, є те, що значна частина параметрів, необхідних для розрахунку статей балансів споживання електроенергії не є чітко визначеними величинами, а представлені у вигляді деяких інтервальних значень.

Як приклад наявності такої проблеми може бути розглянута діюча методика розрахунку електробалансів на підприємствах теплоенергетики. Зокрема, розрахунки статей електробалансів на підприємствах теплоенергетики проводиться за спеціальними аналітичними та емпіричними залежностями згідно "Порядку розрахунку нормативних витрат електроенергії підприємствами теплоенергетики при виробництві, транспортуванні та постачанні (розподілі) теплової енергії" (далі Порядок), який затверджено

Наказом Міністерства з питань житлово-комунального господарства України. Головну увагу в Порядку приділено питанням розрахунку статей електробалансів котельних, основними споживачами електроенергії яких є асинхронні електродвигуни технологічного обладнання (насоси, димососи, вентилятори тощо).

У процесі визначення практично всіх розрахункових показників роботи обладнання, зокрема, середньої продуктивності тяго-дутьового та насосного обладнання котельних, середньої електричної потужності, що споживається обладнанням тощо, згідно Порядку виникає потреба у виборі числових значень низки нормативно-довідкових величин. Запропоновані для використання таких величин, наведені у методичній та довідковій літературі, зокрема, у самому Порядку, є середньостатистичними і далеко не завжди відповідають конкретним виробничим умовам роботи об'єктів теплоенергетики, для яких проводяться розрахунки. До того ж, зазначені величини, здебільшого, наведені у Порядку та іншій довідковій літературі у вигляді досить широкого діапазону можливих їх значень. Наприклад, у таблиці 2.2 наведено перелік окремих нечітко заданих величин, що використовуються для розрахунку споживання електроенергії обладнанням котельних. До переліку довідкових показників, наведених в таблиці 2.2, доцільно додати також експлуатаційні коефіцієнти корисної дії обладнання, електродвигунів та механічної передачі, які відіграють важливу роль у розрахунках споживання електричної енергії на теплоенергетичних об'єктах.

Не зважаючи на значний вплив зазначених параметрів на результати розрахунків статей електробалансів, спосіб встановлення конкретних їх числових значень в Порядку не визначено. Так само і інші існуючі методичні матеріали не містять достатньо чітких рекомендацій, методів чи способів вибору конкретних числових значень таких показників [103].

Очевидно, що вибір тих чи інших числових значень нормативно-довідкових величин суттєво впливає на точність розрахунку статей електробалансів і, відповідно, на результати подальшого контролю

енергоефективності, що здійснюється на їх основі. Не зважаючи на це, числові значення більшості нормативно-довідкових величин, що використовуються у розрахунках, не можуть бути конкретизовані і, здебільшого, ніколи спеціально не уточнюються.

Таблиця 2.2

Нечітко визначені в Порядку нормативно-довідкові величини, які використовуються для розрахунку електробалансів котельних

Умовне позначення	Назва	Значення
Тяго–дутьове обладнання		
$\alpha_{d.g}$	коефіцієнт надлишку повітря в димових газах	1,2÷1,6 – мазут, природний газ; 1,55÷1,7 – тверде паливо
α_m	коефіцієнт надлишку повітря в топці	1,05÷1,1 – мазут, природний газ; 1,2÷1,25 – тверде паливо
$t_{d.g}$	температура димових газів, °C	150÷180 – природний газ 180÷230 – мазут; 170÷200 – кам'яне вугілля; 180÷210 – буре вугілля
$t_{х.л}$	температура «холодного» повітря, °C	25÷30
Насоси		
$H_{рец}$	тиск рециркуляційних насосів, м в. ст.	15÷25 – для котлів продуктивністю до 10 Гкал/год.; 25÷35 – для котлів продуктивністю 10– 50 Гкал/год.
$H_{меж}$	тиск мережевих насосів, м в. ст.	15...150
$H_{підж}$	тиск насосів підживлення теплової мережі, м в. ст.	10...40
$H_{с.в.}$	тиск насосів сирі води, м в. ст.	25...30
k	коефіцієнт, що враховує втрати сирі води на внутрішні потреби котельної, %	1...2
k_n	коефіцієнт використання встановленої електричної потужності обладнання	0,7÷0,8 – насоси ХВО; 0,7÷0,9 – вакуумні насоси; 0,65÷0,75 – вентилятори

Прийняття рішення щодо вибору певних числових значень довідкових величин з достатньо широкого діапазону їх нормативних значень значною мірою має суб'єктивний характер, а самі ці величини слід вважати нечіткими вихідними показниками, на підставі яких мають проводитися подальші

розрахунки обсягів споживання електричної енергії технологічним обладнанням. Таким чином, навіть за умови наявності теоретично обґрунтованих аналітичних або емпіричних залежностей між обсягами електроспоживання агрегатів та технологічними параметрами їх роботи, існує необхідність розробки методичних основ побудови електробалансів виробничих об'єктів з застосуванням розрахунково-аналітичного методу, однак за умови нечітко заданих вихідних даних. Як зазначалося у попередніх розділах, в такій ситуації найбільш доцільним є використання ймовірнісно-статистичного підходу до побудови електробалансів. Однак в умовах, що розглядаються, реалізація цього підходу суттєво відрізняється від загального алгоритму, наведеного у підрозділі 2.2.

2.4.2 Загальний алгоритм застосування ймовірнісно-статистичного підходу до побудови електробалансів за агрегатами в умовах наявності відповідних розрахунково-аналітичних залежностей

Для підвищення об'єктивності та обґрунтованості балансів електроспоживання виробничих об'єктів, одержаних з застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу, доцільно використовувати існуючі аналітичні або емпіричні залежності між обсягами виробництва продукції, параметрами технологічних процесів та споживанням електричної енергії.

На рисунку 2.5 представлено розроблений в дисертаційній роботі алгоритм побудови електробалансів за агрегатами із застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу в умовах наявності зазначених аналітичних залежностей [72, 169].

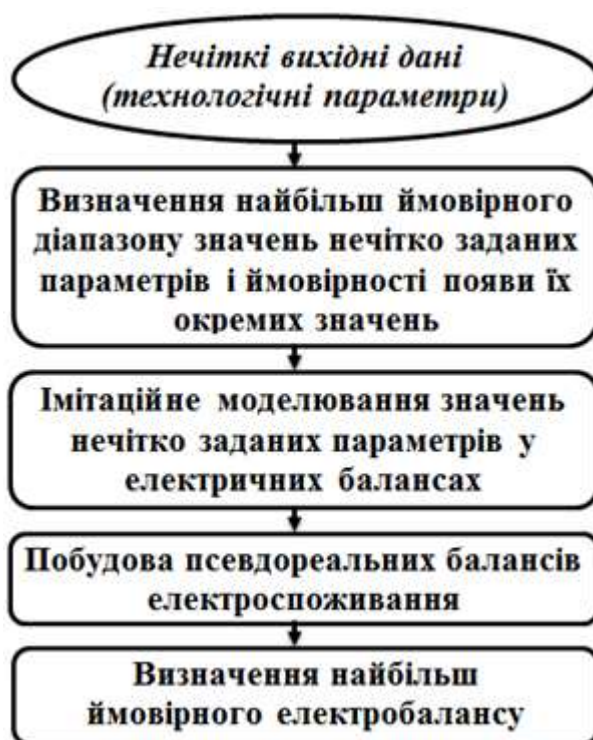


Рис.2.5. Загальний алгоритм побудови електробалансів за агрегатами з застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу в умовах наявності відповідних розрахунково-аналітичних залежностей

Наведений вище алгоритм дозволяє в умовах невизначеності вихідних даних одержувати технічно та технологічно обґрунтовані баланси електроспоживання виробничих об'єктів, структура витратної частини яких є найбільш ймовірною.

2.4.3 Моделювання значень нечітко заданих виробничих параметрів

Однією з умов одержання найбільш достовірних та обґрунтованих електробалансів є зменшення невизначеності вихідних даних, які застосовуються в наявних аналітичних або емпіричних залежностях, за якими розраховуються обсяги електроспоживання виробничого обладнання. Для різних видів обладнання склад нечітко заданих виробничих параметрів є суттєво різним, а загальна кількість таких параметрів, що використовуються при побудові електробалансів є досить великою.

Зважаючи на значну кількість та різноманітність нечітко заданих параметрів, уточнення їх числових значень шляхом додаткових вимірювань є практично нереальним, оскільки вимагає використання великої кількості приладів обліку, а також потребує значних витрат робочого часу. Тому, для визначення найбільш ймовірних значень нечітко заданих виробничих параметрів, аналогічно до того, як це здійснювалось у розділі 2.1, пропонується будувати гістограми частот появи тих чи інших числових величин технологічних параметрів, а також відповідні їм функції розподілу, застосовуючи один зі способів, наведених в підрозділах 2.1.1 - 2.1.3.

Таким чином в результаті виконання відповідних дій, зазначених у розділі 2.1, для кожного з нечітко визначених технологічних параметрів можуть бути одержані гістограми ймовірності появи можливих їх значень. Приклад такої гістограми, побудованої для одного з нечітких вихідних параметрів у вигляді ступінчастої діаграми, наведено на рис. 2.6.

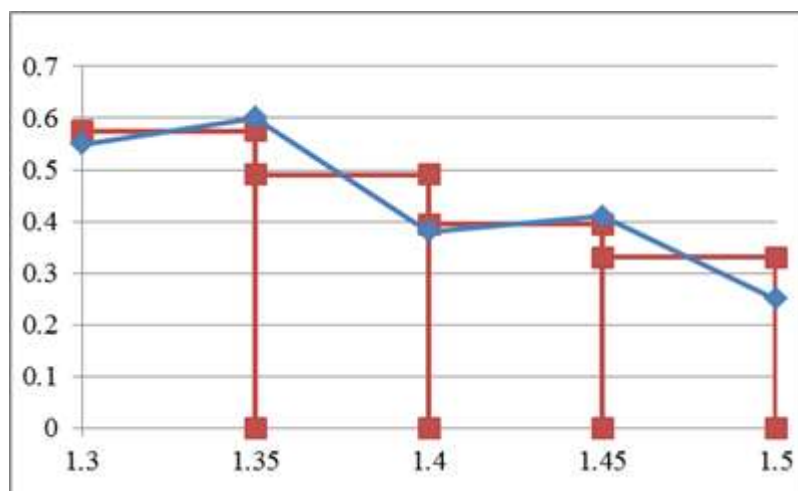


Рис. 2.6. Діаграма суб'єктивної ймовірності появи можливих значень одного з нечітких виробничих параметрів

Кожному стовбцю діаграми відповідає певна ймовірність, яка у подальшому буде враховуватись при генеруванні необхідної кількості можливих значень відповідного нечіткого параметру.

Далі, на основі отриманих гістограм суб'єктивних ймовірностей появи можливих значень нечітко визначених виробничих параметрів методом Монте-

Карло здійснюється імітаційне моделювання числових значень цих параметрів. Основні методичні положення застосування методу Монте-Карло наведені в [104].

Результатом застосування імітаційного моделювання є формування достатньо великих за обсягом вибірок псевдореальних значень всіх нечітких виробничих параметрів, які у подальшому будуть використані для визначення розрахунковим методом обсягів енергоспоживання окремих видів обладнання, тобто числових значень відповідних статей електробалансів за агрегатами.

2.4.4 Побудова псевдореальних електробалансів балансів за агрегатами

Наступним кроком побудови електробалансів за агрегатами в умовах наявності аналітичних залежностей між обсягами їх електроспоживання і відповідними виробничими параметрами є формування достатньо великої кількості псевдореальних балансів споживання електричної енергії. Формування таких електробалансів являє собою ітеративну процедуру.

На початку виконання цієї процедури на основі сформованих раніше вибірок псевдореальних величин нечітких технологічних параметрів здійснюється генерування можливих комбінацій їх числових значень.

Комбінації можливих значень нечітких параметрів генеруються випадковим чином, а їх варіанти не повторюються. На практиці може бути використана кількість випадкових комбінацій, що дорівнює кількості згенерованих методом Монте-Карло псевдореальних значень даних параметрів визначених за формулою (2.5).

Кожна з одержаних таким чином комбінацій псевдореальних значень нечітких виробничих параметрів являє собою окремий набір чітко визначених вихідних даних, за якими може бути визначений один з можливих варіантів електробалансу за агрегатами.

Кожний такий псевдореальний баланс являє собою результат одноразового застосування алгоритму визначення статей електробалансу на основі відомих розрахунково-аналітичних залежностей (наприклад, алгоритму побудови електробалансів за зазначеним вище Порядком), який відповідає одній із можливих комбінацій значень нечітких вихідних параметрів. За результатами відповідних розрахунків для кожного отриманого таким чином псевдореального електробалансу має бути визначено загальний (сумарний) обсяг витрати електричної енергії по всьому виробничому об'єкту (W).

Результати формування множини псевдореальних електробалансів за агрегатами, а також визначення загальних обсягів споживання електроенергії, кожен з яких відповідає певній комбінації можливих значень нечітких вихідних параметрів, може бути представлений у вигляді деякої загальної таблиці, фрагмент якої наведено нижче (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3

Фрагмент загальної таблиці результатів формування множини псевдореальних електробалансів за агрегатами

№ комбінації	W , кВт·год	P
1	W_1	P_1
...	...	...
n	W_n	P_n

Як вже зазначалося у розділі 2.2, кожному з можливих значень будь-якого з нечітких виробничих показників відповідає певна ймовірність його появи, визначена заздалегідь за відповідною гістограмою (підрозділ 2.4.3). На підставі таких, «індивідуальних» ймовірностей появи окремих числових величин нечітких вихідних параметрів може бути визначена «сумарна» ймовірність появи кожної з можливих комбінацій значень всіх нечітких виробничих параметрів, що використовуються для побудови балансів електроспоживання. Така «сумарна» ймовірність (P) появи кожної з комбінацій можливих значень нечітких виробничих показників розраховується як добуток відповідних «індивідуальних» ймовірностей. Результати розрахунку числових величин

зазначеної «сумарної» ймовірності для кожної зі згенерованих комбінацій значень нечітких виробничих параметрів також заносяться до загальної таблиці (таблиця 2.3). Приклад побудови електробалансів виробничих об'єктів за наявності аналітичних залежностей для розрахунку електроспоживання агрегатів наведено в додатку Ж.

2.4.5 Визначення найбільш ймовірного електробалансу за агрегатами

Кожен з отриманих шляхом імітаційного моделювання псевдореальних електробалансів, перш за все, необхідно оцінити з точки зору його правдоподібності. З цією метою, загальний розрахунковий обсяг споживання електроенергії на виробничому об'єкті, який відповідає тому чи іншому можливому варіанту його електробалансу, порівнюється з фактичними даними обліку витрат електроенергії на цьому ж об'єкті за відповідний період і перевіряється, чи знаходиться різниця між цими величинами у межах певної, заздалегідь прийнятої припустимої похибки:

$$(1-a)W_{\text{л}} \leq W \leq (1+a)W_{\text{л}}, \quad (2.15)$$

де $W_{\text{л}}$ – фактичні дані обліку витрат електроенергії; W – загальний розрахунковий обсяг споживання електроенергії на виробничо-господарському об'єкті; a – припустима похибка.

Якщо зазначена вище умова (2.15) не виконується, то змодельований псевдореальний електробаланс відкидається як неправдоподібний. Якщо ж ця умова виконується, то можна вважати, що побудований електробаланс є правдоподібним і може використовуватись для подальшого аналізу.

Отже, результатом виконання кожної ітерації процедури формування псевдореальних електробалансів є одержання одного з правдоподібних варіантів їх витратної частини. Кожен з таких варіантів розрахункового

електробалансу відповідає конкретній комбінації можливих значень нечітких виробничих параметрів, для якої відомою також є ймовірність її появи, зазначена в таблиці 2.3.

Наведена вище процедура побудови псевдореальних балансів електроспоживання повторюється до тих пір, доки не буде отримана необхідна, достатньо велика кількість правдоподібних варіантів таких балансів. Чим більшою буде кількість таких варіантів, тим більш достовірними будуть результати вирішення поставленої задачі.

Останнім етапом застосування ймовірнісно-статистичного підходу до побудови балансів споживання електричної енергії на виробничих об'єктах є порівняння всіх одержаних правдоподібних варіантів цих електробалансів за величиною «сумарної» ймовірності появи кожного з них. При цьому, найбільш достовірним слід вважати той варіант витратної частини балансу споживання електроенергії за агрегатами, «сумарна» ймовірність появи якого є найбільшою.

2.5. Визначення ділянок схеми електропостачання та агрегатів, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів

Одним з важливих кроків у напрямку удосконалення методики побудови електробалансів виробничих об'єктів є розробка рекомендацій щодо перевірки їх адекватності, тобто верифікації отриманих результатів. Для цього традиційно рекомендується порівнювати значення статей електробалансів отриманих різними шляхами, наприклад експериментальним і розрахунковим. У випадку, коли різні методи дають достатньо близький результат, це свідчить, що баланс відповідає дійсності [29]. Проте, щоб виконати таке порівняння для великої кількості одиниць обладнання, що використовується на підприємстві, необхідно виконати роботу з проведення додаткових вимірювань, яка вимагає значних витрат робочого часу та матеріальних ресурсів. При цьому практично не існує рекомендацій, які б давали відповідь на питання, де та яким чином необхідно здійснювати такі вибіркові контрольні вимірювання.

Таким чином виникає задача визначення найбільш «проблемних» ділянок відповідної схеми електропостачання або окремих агрегатів, для яких такі контрольні вимірювання необхідно проводити в першу чергу. Вирішення такої задачі дозволить виявляти такі ділянки схеми електропостачання чи агрегати, які створюють найбільшу невизначеність при побудові електробалансів, і приділяти основну увагу таким об'єктам. Зокрема, у подальшому на таких ділянках доцільно встановлювати постійні прилади обліку [72, 169].

Визначення найбільш «проблемних» ділянок при побудові електричних балансів на промислових підприємствах може здійснюватись з застосуванням методів імітаційного моделювання, зокрема рандомізації, бутстреп-методу і методу Монте-Карло [142]. Такі методи передбачають багаторазову обробку різних фрагментів вихідної вибірки даних. Це дозволяє розглядати численні можливі варіанти поведінки об'єкта, що розглядається, та здійснювати порівняння отриманих результатів. Такі варіанти поведінки об'єкта формуються за певною ймовірнісною моделлю. Наприклад, коли з наявної вибірки даних випадковим шляхом вибирається якісно однорідний набір досліджуваних величин. При цьому кожна з можливих комбінацій даних величин може бути вибрана з певною ймовірністю [138].

Для оцінки ступеню невизначеності, яку створюють окремі технологічні об'єкти при побудові балансів споживання електричної енергії, в дисертаційній роботі розроблено відповідний алгоритм, що базується на використанні методів імітаційного моделювання. Згідно цього алгоритму першим етапом вирішення задачі є визначення законів розподілу можливих обсягів електроспоживання відповідного обладнання. Для вирішення даної проблеми може бути застосована методика, наведена у розділі 2.2.

Наступним кроком вирішення задачі є генерування деякої, достатньо великої кількості m псевдореальних електробалансів побудованих на основі визначених на першому етапі законів розподілу можливих обсягів споживання електричної енергії кожним з видів виробничого обладнання, що розглядаються.

Будь-який псевдореальний електробаланс визначається шляхом багаторазової генерації вибірок можливих обсягів електроспоживання кожного виду виробничого обладнання, яка здійснюється на базі наявних законів розподілу, що характеризують цю випадкову величину.

З кожної з одержаних таким чином вибірок випадковим шляхом вибирається псевдореальна величина електроспоживання відповідного виду обладнання. Таким чином визначаються псевдореальні величини обсягів споживання електроенергії всіма видами обладнання, що розглядаються, після чого розраховується сума одержаних псевдореальних значень електроспоживання:

$$W_{\sum n.p_j} = \sum_{i=1}^n W_{n.p_{i,j}}, \quad (2.16)$$

де $W_{n.p_{i,j}}$ – псевдореальний обсяг електроспоживання деякого i -го виду виробничого обладнання для j -го варіанту витратної частини електробалансу підрозділу; n – загальна кількість видів обладнання, що розглядаються;

Далі перевіряється, чи знаходиться сумарне псевдореальне електроспоживання у межах відомих за даними обліку фактичних обсягів споживання електричної енергії на виробничому об'єкті, для якого будується електробаланс, тобто перевіряється умова:

$$W_{\sum \min} \leq W_{\sum n.p_j} \leq W_{\sum \max}, \quad (2.17)$$

де $W_{\sum \min}, W_{\sum \max}$ – відповідно мінімальний та максимальний можливі обсяги споживання електричної енергії на виробничому об'єкті.

Якщо ця умова не виконується, то одержаний таким чином псевдореальний електробаланс відкидається як нереальний, після чого починається генерування нового можливого варіанту балансу споживання

електроенергії на даному об'єкті. Якщо ж умова (2.17) виконується, то можна вважати, що побудований псевдореальний електробаланс є правдоподібним і може використовуватись для подальшого аналізу. Процес генерування псевдореальних балансів споживання електроенергії повторюються, доки не буде отримана необхідна їх кількість m . Величина m суттєво впливає на результати вирішення поставленої задачі. У літературних джерелах зазначається, що для виробничих об'єктів, де кількість обладнання є меншою, ніж 100 одиниць, прийнятною точністю достатньо прийняти $m=5000$ [138].

З метою визначення ділянок схеми електропостачання або об'єктів, які створюють найбільшу невизначеність при побудові балансів споживання електричної енергії, необхідно припустити, що для одного з видів обладнання, що розглядаються, встановлено прилад обліку його електроспоживання.

Числові значення обсягів споживання електроенергії цим видом обладнання, як зазначалося, визначаються на підставі згенерованих псевдореальних електробалансів відповідного виробничого об'єкту. Однак при цьому приймається, що ці псевдореальні обсяги споживання електроенергії були одержані за даними обліку і тому можуть вважатися дійсними. Величини ж електроспоживання всіх інших видів обладнання, що розглядаються, вважаються невідомими і, як зазначалося у розділі 2.2, визначаються шляхом вирішення оптимізаційної задачі 2.9 з наступними обмеженнями:

$$W_{imin} \leq W_i \leq W_{imax}, W_i > 0, \sum_{i=1}^n W_i = W_{np} \quad (2.18)$$

де n – загальна кількість видів обладнання, що розглядаються; W_{imin}, W_{imax} – мінімальні і максимальні можливі значення обсягів електроспоживання того чи іншого (i -го) виду обладнання; W_{np} – псевдореальний обсяг споживання електроенергії в місці установки додатково лічильника, що розглядається.

Зазначені вище припущення приймаються і для подальших аналогічних розрахунків, що виконуються послідовно для кожного з вузлів схеми

електропостачання та агрегатів, для яких може бути встановлено додатковий прилад обліку електроспоживання.

У результаті таких розрахунків формуються таблиці розрахункових електробалансів для всіх можливих варіантів місця встановлення додаткового приладу обліку споживання електричної енергії.

Визначення найбільш «проблемної» ділянки схеми електропостачання чи виду обладнання, які створюють найбільшу невизначеність при побудові балансів споживання електроенергії, може базуватися на розрахунку показника, який в зарубіжній практиці має назву Performance index of data reconciliation results (*IRR*). Застосування показника *IRR* було запропоновано в науковому напрямку Data Reconciliation, де він довів свою ефективність [190]. Величина *IRR* для будь-якого виду обладнання чи ділянки схеми електропостачання, що розглядаються, визначається за наступною формулою:

$$IRR = \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (W_{i,j} - W_{n.p_{i,j}})^2 \right), \quad (2.19)$$

де n – кількість агрегатів, що формують електробаланс виробничого підрозділу; m – кількість можливих варіантів витратної частини електробалансу підрозділу; $W_{n.p_{i,j}}$ – псевдореальні значення електроспоживання агрегатів, одержані з застосуванням імітаційного моделювання; $W_{i,j}$ – значення електроспоживання агрегатів, одержані з застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу окремо для кожного з варіантів місця встановлення додаткового приладу обліку

Чим меншим є числове значення показника *IRR*, тим більшу невизначеність при побудові балансів споживання електричної енергії створює відповідна ділянка схеми електропостачання або відповідний вид обладнання. Тобто саме на цій ділянці або для цього виду обладнання в першу чергу необхідно здійснювати верифікацію побудованого електробалансу. Приклад

визначення ділянок схеми електропостачання та агрегатів, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів наведено в розділі 4.3.

Висновки до розділу 2

1. Ймовірно-статистичний підхід дозволяє враховувати випадковий характер як обсягів електроспоживання, так і чинників, що на нього впливають, а також будувати достатньо достовірні електробаланси виробничих об'єктів в умовах неповних та нечітких вихідних даних.

2. При побудові електробалансів промислових підприємств доцільно застосовувати ієрархічний підхід, який передбачає послідовне вирішення цієї задачі спочатку за видами продукції, а потім за агрегатами, що задіяні у процесі виробництва кожного з її видів.

4. Розроблені в дисертаційній роботі методичні основи складання електробалансів з застосуванням ймовірно-статистичного підходу для різних умов та випадків їх побудови у порівнянні з іншими методами дозволяють одержувати більш обґрунтовані та достовірні електробаланси виробничих об'єктів.

5. Для підвищення достовірності побудови електробалансів є доцільною верифікація їх окремих статей з застосуванням додаткових приладів обліку. Запропоновані в дисертаційній роботі методичні підходи дозволяють визначати вузли схем електропостачання та агрегати для яких відповідні додаткові вимірювання необхідно здійснювати в першу чергу.

6. Одержані з застосування ймовірно-статистичних методів електробаланси за агрегатами дозволяють у подальшому організувати оперативний контроль ефективності використання електроенергії відповідними технологічними об'єктами. У першу чергу такий контроль доцільно здійснювати для найбільш енергоємних агрегатів, а також для агрегатів на яких заплановано впроваджувати енергозберігаючі заходи.

РОЗДІЛ 3

РОЗВИТОК МЕТОДИЧНИХ ЗАСАД ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ТА АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

3.1 Комплексний підхід до визначення складу чинників, що впливають на електроспоживання технологічних об'єктів

В системах контролю і планування енергоспоживання (системах КІП), які широко використовуються в зарубіжній практиці і можуть послужити прототипом для створення більш досконалих систем, процес контролю ефективності використання, зокрема, електричної енергії на будь-якому об'єкті полягає у порівнянні фактичних обсягів її споживання з деякими цільовими змінними, встановленими на основі математичних моделей, які відображають взаємозв'язок між обсягами споживання електроенергії та чинниками, що впливають на них [136, 176].

Склад цих чинників, характер їх впливу один на одного, а також на величину електроспоживання для кожного конкретного виробничого обладнання є різним [112]. Тобто, не можливо визначити якийсь один оптимальний їх склад, який би дозволив коректно встановлювати цільові змінні електроспоживання на будь яких виробничих об'єктах, навіть однорідних за призначенням. Об'єктивність та придатність до застосування встановлених цільових змінних електроспоживання напряду залежить від врахування при їх визначенні основних чинників, що впливають на обсяги споживання електроенергії зазначеним технологічним об'єктом [160]. Тому, визначення складу чинників, які необхідно враховувати при побудові математичних моделей електроспоживання є чи не найпершим питанням, яке необхідно вирішити при впровадженні систем контролю енергоефективності на будь якому об'єкті [69, 167, 75].

Необхідно звернути увагу, що врахування в математичній моделі чинників, які мають незначний вплив або зовсім не впливають на обсяги споживання електроенергії, може не тільки ускладнити процедуру встановлення цільових змінних електроспоживання та інтерпретації результатів контролю, але й призвести до значних перевитрат фінансових та трудових ресурсів [165]. Зокрема, врахування впливу кожного додаткового параметра при контролі енергоефективності вимагає застосування додаткових вимірювальних приладів та значних витрат часу на збір та обробку відповідних статистичних даних. Проте, якщо на об'єкті вже здійснюється вимірювання певних параметрів, а обробка їх результатів не потребує значних витрат, тоді може бути доцільно періодично оцінювати вплив таких чинників на обсяги споживання електроенергії і, за необхідності, враховувати їх у відповідних математичних моделях. Крім того, особливу увагу необхідно приділяти тим чинникам на які в майбутньому планується впливати, впроваджуючи певні заходи з енергозбереження.

В літературних джерелах присвячених “класичним” системам КІП, наводиться лише орієнтовний перелік рекомендованих параметрів, що можуть суттєво впливати на величину електроспоживання для окремих галузей виробництва, але не наводяться методи, які б дозволяли обирати склад таких чинників для кожного конкретного об'єкту контролю та відсіювати ті з них, використання яких є недоцільним.

Отже розробка методології вибору чинників, що суттєво впливають на обсяги електроспоживання є важливою задачею для побудови та коректного функціонування систем оперативного контролю ефективності використання електричної енергії [68]. Тому, в дисертаційній роботі запропоновано комплексну процедуру визначення складу таких чинників, структурна схема якої наведена на рис.3.1.



Рис. 3.1. Схема реалізації комплексного підходу до визначення складу чинників, які необхідно враховувати при встановленні цільових змінних електроспоживання

Здійснення вибору чинників в декілька етапів (рис. 3.1) за різними критеріями оцінювання, дозволяє будувати математичні моделі електроспоживання, таким чином, щоб уникнути зайвих витрат коштів та максимально врахувати вплив усіх параметрів та результатів технологічного процесу на обсяги споживання електричної енергії на відповідних виробничих об'єктах.

3.1.1 Попередній відбір чинників на основі застосування експертних методів

Значною проблемою при побудові систем оперативного контролю ефективності використання електричної енергії є відсутність інформації про вплив режимів та умов роботи виробничого обладнання на обсяги його електроспоживання. Отримати зазначену інформацію, як правило, не дозволяє навіть використання довідкової літератури. В зазначеному випадку єдиним варіантом вибору чинників, які необхідно використовувати для побудови математичних моделей електроспоживання, є проведення експертного опитування [7]. При цьому, до складу експертної групи доцільно залучати

кваліфікованих працівників підприємства, які безпосередньо займаються експлуатацією відповідного технологічного обладнання [71].

При використанні даного підходу, на початку опитування групі експертів надається анкета з певною кількістю попередньо зазначених чинників, які на думку дослідника можуть суттєво впливати на величину електроспоживання того чи іншого агрегату, що розглядається. При цьому експертам пропонується додати назви інших, попередньо не врахованих в анкеті чинників, або скоротити наведений їх перелік, виходячи зі свого уявлення стосовно ступеню впливу відповідних чинників на обсяги споживання на даному об'єкті електричної енергії. Таке коригування складу чинників, попередньо наведених в анкеті, найбільш доцільно здійснювати з застосуванням методів колективного експертного опитування, наприклад, методами експертних комісій з відкритим обговоренням [10]. Такий підхід дозволяє уникнути одразу декількох проблем, зокрема:

- необхідності проведення додаткового етапу опитування експертів з визначення складу чинників, що можуть суттєво впливати на електроспоживання;
- дублювання назв чинників, тлумачення яких може відрізняється для спеціалістів різного профілю.

Після остаточного визначення складу чинників, кожному з експертів пропонується самостійно (незалежно від думок інших експертів) оцінити вплив цих чинників на обсяг електроспоживання відповідного технологічного об'єкту, що розглядається. З цією метою найбільш доцільно поєднувати експертне опитування з використанням апарату нечіткої логіки.

3.1.1.1 Оцінка експертами ступеню впливу чинників на електроспоживання з застосуванням апарату нечіткої логіки

Особливістю застосування даного методу експертного опитування є те що оцінювання впливу чинників на споживання електроенергії здійснюється із

застосуванням так званих лінгвістичних змінних, які на відміну від бальних оцінок, що застосовуються в традиційних методах, є більш зручними і зрозумілими для експертів [79]. Зокрема, для оцінювання ступеню впливу чинників на енергоспоживання може бути використана наступна п'ятирівнева шкала (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1

Лінгвістична оцінка впливу чинників на величину енергоспоживання

Рівень впливу	Опис
Дуже слабкий	Вплив даного чинника на обсяг електроспоживання незначний або відсутній
Слабкий	Вплив даного чинника на обсяг електроспоживання слабо помітний або майже відсутній
Середній	Даний чинник впливає на обсяг електроспоживання
Сильний	Чинник, що розглядається істотно впливає на обсяг електроспоживання
Дуже сильний	Даний чинник має переважаючий вплив на обсяг електроспоживання

Експерт не завжди може оцінити, до якого з рівнів слід віднести вплив на обсяг споживання електроенергії того чи іншого чинника, однак він достатньо точно може вказати, між якими двома рівнями знаходиться ступінь впливу цього чинника [88]. З метою врахування цієї особливості оцінки експертів для їх опитування пропонується використовувати спеціальну інтервальну шкалу, що має вигляд лінійки з відповідними лінгвістичними позначками (рис.3.2). При цьому анкета, яку отримує експерт, повинна містити таку кількість зазначених інтервальних шкал, яка відповідає числу чинників, вплив яких на електроспоживання відповідного технологічного об'єкта досліджується. На кожній з таких шкал кожному експерту окремо (не залежно від інших експертів) пропонується позначити вертикальною лінією рівень впливу відповідного чинника на обсяг споживання електроенергії технологічним об'єктом, що розглядається (рис.3.2).



Рис.3.2. Інтервальна шкала та приклад оцінки експертом рівня впливу одного з чинників на обсяг електроспоживання

Отримані таким чином оцінки експертів мають суб'єктивний характер, тому результати їх опитування потребують обробки. У разі використання в процесі опитування апарату нечіткої логіки така обробка має здійснюватись на основі побудови так званих функцій приналежності лінгвістичних оцінок. При цьому для обробки результатів опитування експертів можуть бути використані різні функції приналежності, наприклад, кусково-лінійна, трикутна, гаусова, трапецеїдальна тощо.

Отже, основним питанням, яке виникає перед дослідником при обробці лінгвістичних експертних оцінок, є вибір форми функції належності нечіткого параметра. В літературних джерелах, присвячених математичному апарату нечіткої логіки, не дається точних рекомендацій щодо вибору в тих чи інших конкретних умовах форми функції належності нечітких параметрів. Тому в більшості публікацій зазначене питання вирішується експериментальним шляхом. В дисертаційній роботі обробка результатів експертного оцінювання з досліджуваного питання виконувалася з використанням дев'яти різних форм функції належності. Результати обробки відповідних лінгвістичних експертних оцінок наведені в додатку Б. Як свідчать проведені експериментальні розрахунки, форма функції належності практично не впливає на одержувані результати обробки думок експертів, оскільки в процесі цієї обробки необхідно визначити ступінь відповідності оцінок експертів кожному з встановлених нечітких лінгвістичних термів, а не кількісні значення (чи співвідношення) рівнів впливу чинників, що розглядаються, на обсяги електроспоживання того чи іншого виробничого об'єкту.

Виходячи з зазначеного, з метою спрощення розрахунків для обробки результатів опитування експертів пропонується застосовувати сімейство з п'яти кусково-лінійних функцій приналежності лінгвістичних оцінок впливу відповідних чинників (рис.3.3).

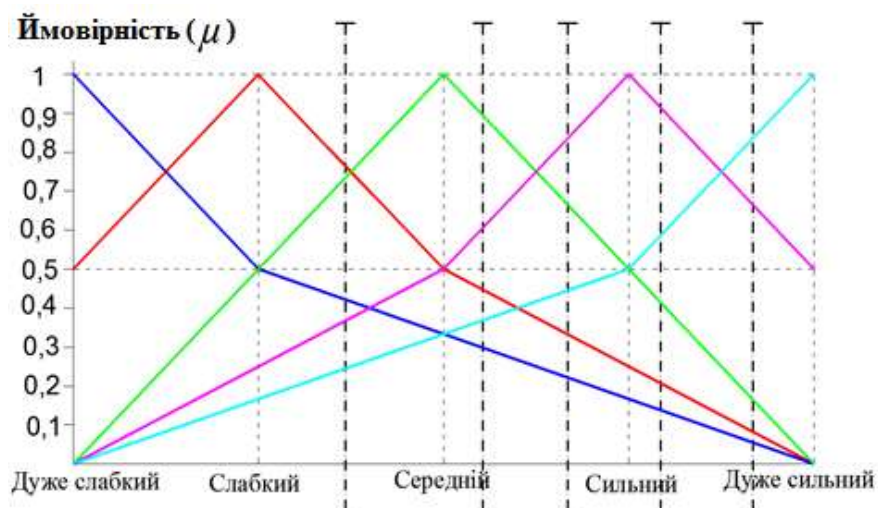


Рис. 3.3. Приклад обробки експертних оцінок (вертикальні лінії) рівня впливу одного з чинників на обсяг електроспоживання з використанням п'яти кусково-лінійних функцій належності нечіткого параметра

За спеціальними формулами [88] визначається ймовірність $p_{i,j}^k$ збігу суб'єктивної оцінки кожним експертом рівня впливу кожного з чинників, що досліджуються, кожному з можливих дійсних рівнів його впливу на електроспоживання відповідного технологічного об'єкту. У наведеному вище позначенні цієї ймовірності: k – умовний номер експерта, i – умовний номер чинника, а j – умовний номер можливого рівня впливу чинника. Величина зазначеної ймовірності $p_{i,j}^k$ може бути визначена також графічним способом (рис.3.3) як ординати точок перетину вертикальної прямої, що відповідає оцінці експерта, з кожною функцією приналежності нечіткого параметра (точки $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$). На підставі визначених одним з наведених вище способів числових значень ймовірностей $p_{i,j}^k$ розраховується середня ймовірність збігу суб'єктивних оцінок рівня впливу кожного (i -го) чинника на електроспоживання відповідного технологічного об'єкту, зроблених всіма експертами, кожному з можливих дійсних рівнів цього впливу:

$$p_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{i,j}^k \quad (3.1)$$

де N – кількість експертів, які приймали участь в опитуванні.

Максимальне з одержаних таким чином значень $\max [p_{i,j}]_{j=0,\dots,4}$ відповідає узагальненій експертній оцінці найбільш ймовірного рівня впливу кожного (i -го) чинника, що розглядається, на електроспоживання даного технологічного об'єкту.

При цьому чинники, вплив яких на обсяг електроспоживання того чи іншого технологічного об'єкту є дуже слабким або слабким, доцільно не враховувати в математичних моделях споживання електроенергії, що у подальшому мають бути побудовані для цього об'єкту. Приклад застосування експертного опитування на основі апарату нечіткої логіки для попередньої оцінки впливу чинників на електроспоживання наведено в розділі 4.4.1.1.

3.1.2 Оптимізація складу чинників за їх відносною важливістю для побудови адекватних математичних моделей електроспоживання

Врахування великої кількості чинників при побудові математичних моделей електроспоживання виробничих об'єктів вимагає значних витрат на додаткові вимірювальні прилади та на організацію збору відповідних статистичних даних. Як правило, фінансові ресурси, які виділяються на створення систем оперативного контролю енергоефективності є обмеженими, що в свою чергу, не дозволяє будувати математичні моделі обсягу споживання електроенергії технологічними об'єктами в залежності від значної кількості чинників, що на нього впливають. Тобто виникає проблема вибору при деяких обмеженнях (наприклад фінансових) певного оптимального складу чинників, врахування яких у відповідних математичних моделях дозволить максимально об'єктивно встановлювати цільові змінні, необхідні для здійснення контролю енергоефективності. Для вирішення цього питання в дисертаційній роботі

пропонується застосовувати методи комбінаторної оптимізації, одним з яких, зокрема, є задача про ранець для випадку, коли кожен «предмет» можна вибирати тільки один раз [50].

Загальний алгоритм вирішення такої задачі є наступним. Методом експертного опитування попередньо було визначено набір з N чинників, які впливають на енергоспоживання даного технологічного об'єкту (розділ 3.1.1). Для кожного з цих чинників на основі оцінок експертів визначаються величини коефіцієнтів їх відносної важливості $k_i, i = (1, 2, \dots, N)$. Алгоритм визначення коефіцієнтів відносної важливості зазначених чинників шляхом поєднання методів нечіткої логіки та попарного порівняння наведено в додатку В.

Далі потрібно визначити склад вимірювальних приладів, необхідних для створення системи контролю ефективності електровикористання, та витрати Z_i на придбання, монтаж, експлуатацію кожного з цих приладів, а також на організацію обліку та обробку статистичних даних стосовно числових значень відповідного чинника. Якщо при цьому на створення деякої системи контролю енергоефективності була запланована певна загальна сума коштів C , то в процесі вирішення задачі, що розглядається, потрібно визначити такий набір чинників, який дозволить якомога повніше враховувати вплив найбільш важливих чинників на обсяг споживання електроенергії на даному об'єкті, не перевищуючи при цьому зазначену загальну суму запланованих витрат C .

Тобто, для вирішення цієї задачі необхідно максимізувати цільову функцію $\sum_{i=1}^N k_i x_i$ при обмеженні $\sum_{i=1}^N Z_i x_i \leq C$. В обох цих виразах величини x_i є змінним оптимізації, які можуть приймати такі значення: $x_i = 1$, якщо відповідний чинник враховується, або $x_i = 0$, якщо цей чинник не враховується.

Вирішення такої оптимізаційної задачі можна отримати за допомогою наступних математичних методів: динамічного програмування, повного перебору, методу гілок та меж тощо. Зважаючи на невелику розмірність задачі, застосування кожного з зазначених методів вимагатиме незначних витрат часу

при практично однаковій точності рішень, тобто кожен з них є придатним для вирішення задачі, що розглядається. Приклад оптимізації складу чинників за їх відносною важливістю в умовах обмежених ресурсів на організацію обліку наведено в розділі 4.4.1.3

3.1.3 Визначення ступеню і характеру впливу чинників на споживання електроенергії методами аналізу багатовимірних даних

Необхідність врахування в математичних моделях електроспоживання виробничих об'єктів того чи іншого набору чинників, визначеного з застосуванням методів, наведених у розділах 3.1.1 та 3.1.2, повинна бути додатково підтверджена за допомогою ймовірісно-статистичних процедур, які дозволяють виявити та оцінити тісноту та характер зв'язків між електроспоживанням та певним набором чинників, а також між самими чинниками. Тобто, після проведення попередніх двох етапів (розділи 3.1.1 та 3.1.2?), ступінь впливу відібраних чинників на величину електроспоживання повинен бути перевірений кількісно, на основі зібраних статистичних даних. Останні можуть бути отримані, як за допомогою стаціонарних, так і тимчасово встановлених приладів обліку. В окремих випадках, при неможливості проведення вимірювань кількісних величин деяких чинників, вони можуть бути отримані розрахунковим шляхом на основі відомих значень інших виробничих параметрів.

Остаточний відбір чинників, які потрібно враховувати при побудові математичних моделей електроспоживання технологічних об'єктів, доцільно здійснювати на основі відповідних статистичних даних з застосуванням методів аналізу багатовимірних даних. В багатьох літературних джерелах даний вид аналізу пов'язують з науковим напрямком статистичного аналізу — хемометрики. Відповідний напрямок дослідження останнім часом набуває все більшої популярності, на що вказують численні публікації та наукові школи по

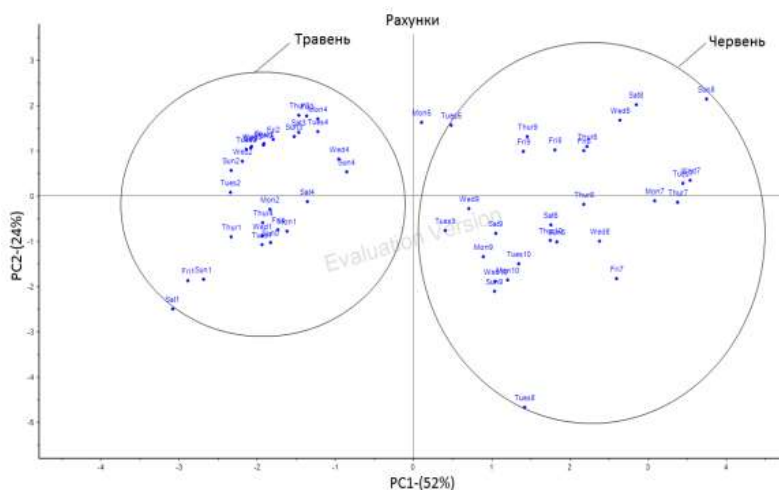
всьому світу [142]. Зокрема, одним із найбільш поширених та науково обґрунтованих хемометричних методів є Principal Component Analysis (PCA), який в вітчизняних літературних джерелах більш відомий під назвою Метод Головних Компонент (МГК). Застосування МГК дозволяє проводити аналіз великих масивів статистичних даних, виявляти приховані зв'язки між ними та інтерпретувати одержані результати в залежності від мети дослідження. Одним з найбільш поширених способів реалізації МГК є застосування NIPALS алгоритму, який наведено в додатку Г. МГК також реалізовано в багатьох відомих програмних продуктах, таких як Matlab, Statistica, Unscrambler тощо.

Аналіз даних в PCA проводиться за допомогою, так званих графіків рахунків та навантажень. Відповідні графіки будуються на основі матриць рахунків та навантажень, які є результатом застосування NIPALS алгоритму.

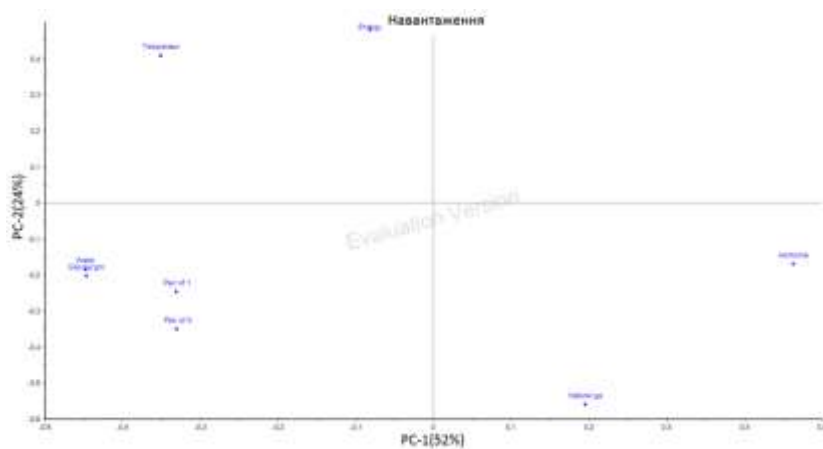
Матриця рахунків T представляє собою проекції вихідних даних X , що аналізуються, на простір головних компонент, де рядки матриці – це координати значень вихідних даних в новій системі координат, а стовпці – проекції всіх точок на одну нову координатну вісь [142]. Використання графіків рахунків дозволяє зрозуміти, яким чином пов'язані між собою масиви вихідних даних, що досліджуються. На такому графіку кожен вектор числових значень всіх вихідних параметрів для якогось моменту часу зображується в координатах (t_i, t_j) , що позначаються PC1 і PC2, відповідно для першої і другої головної компоненти (рис. 3.4). Якщо дві точки розташовані близько одна від одної, це свідчить про позитивний кореляційний зв'язок між ними. Точки, розташовані під прямим кутом одна до одної, не пов'язані між собою, тобто є некорельованими, а розташовані діаметрально протилежно – мають від'ємну кореляцію.

Матриця навантажень P – матриця переходу від системи координат, які описували вихідні змінні, до простору головних компонент. Рядки матриці P зв'язують числові значення змінних в початковій системі координат X зі значеннями цих змінних в новій системі координат. Кожен стовпець матриці P представляє собою проекцію відповідної змінної на нову систему координат.

Використання графіку навантажень дозволяє проводити дослідження взаємозв'язків між змінними. На цьому графіку змінні відображаються точкою в координатах (p_i, p_j) . Аналіз графіку навантажень проводиться таким же чином, що й графіку рахунків. Використовуючи даний графік можна зробити висновки, які змінні пов'язані між собою, а які ні.



а)



б)

Рис.3.4. Графіки рахунків та навантажень для першої та другої головної компоненти, де а) графік рахунків, б) графік навантажень

Керуючись зазначеними вище правилами інтерпретації графіків навантажень можна оцінювати ступінь впливу різних чинників на обсяги споживання електроенергії. Графіки рахунків дозволяють отримати додаткову інформацію про взаємозв'язок між параметрами технологічного процесу в різні періоди часу. **Приклад оцінки ступеню і характеру впливу чинників на**

споживання електроенергії методом головних компонент наведено в розділі 4.4.1.4.

Отже, застосування методу головних компонент для аналізу попередньо відібраних чинників, що впливають на обсяг споживання електричної енергії виробничих об'єктів, дозволяє виявляти та оцінювати тісноту і характер статистичного зв'язку між обсягом електроспоживання та кожним з чинників, що розглядаються, а також між самими чинниками. Одержані результати такого аналізу дають змогу остаточно вибрати склад чинників, які необхідно та доцільно враховувати при побудові математичних моделей електроспоживання відповідних об'єктів. При цьому до зазначених моделей слід включати тільки ті чинники, які здійснюють найбільш сильний вплив на обсяги споживання електроенергії і не є пов'язаними між собою.

3.2 Математичне моделювання електроспоживання виробничих об'єктів та контроль ефективності використання електричної енергії

3.2.1 Методи математичного моделювання електроспоживання та критерії оцінки їх адекватності

Як зазначалося, в традиційних системах КіП рівень ефективності використання палива чи енергії на будь-якому виробничому об'єкті визначається шляхом порівняння фактичних обсягів споживання відповідного енергоресурсу з так званими цільовими змінами енергоспоживання [150]. При цьому в якості цільових змін енергоспоживання використовують результати моделювання обсягів споживання палива або енергії, одержані на основі відповідної математичної моделі. Така модель будується для того чи іншого виробничого об'єкту в залежності від одного або кількох чинників, які суттєво впливають на величину витрати енергоресурсу, що розглядається, на виконання відповідних технологічних процесів [17].

В зарубіжній практиці цільові змінні енергоспоживання для будь-яких об'єктів контролю ефективності використання ПЕР здебільшого визначають за спрощеними математичними моделями, які можуть мати вигляд:

— деякої константи, тобто постійної максимально допустимої величини витрат палива або енергії на об'єкті;

— рівняння однофакторної лінійної регресії між витратами енергії на об'єкті і значеннями деякого чинника, який найбільш суттєво впливає на величину цих витрат.

Інколи для цієї мети застосовують більш складні, багатofакторні лінійні математичні моделі [105]. При цьому в таких моделях рекомендується враховувати не більше трьох незалежних змінних [138, 154].

Звісно, таке спрощення робить процедуру встановлення цільових змінних енергоспоживання досить простою але, з іншого боку, математичні моделі, побудовані таким чином, здебільшого, недостатньо адекватно описують відповідні процеси, оскільки не враховують вплив багатьох важливих чинників на споживання енергетичних ресурсів в конкретних умовах. Зокрема, до таких чинників необхідно віднести технічний стан і режими роботи обладнання, параметри, що характеризують технологію і організацію відповідних виробничих процесів, а також кліматичні або інші «зовнішні» умови виробництва. При цьому, як свідчить практика, вплив більшості з цих чинників на обсяги енергоспоживання має нелінійний характер.

На сьогодні існують і можуть бути застосовані для встановлення цільових змінних енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності різні методи математичного моделювання, які дозволяють одержувати лінійні або нелінійні, однофакторні або багатofакторні математичні моделі витрати ПЕР на виробничих об'єктах. Для більшості з них створені і активно використовуються готові програмні пакети, деякі з яких знаходяться в вільному доступі.

Класичними методами побудови лінійних і нелінійних математичних моделей електроspоживання (тобто визначення їх параметрів) є метод

найменших квадратів та метод максимальної правдоподібності [14-17]. Метод найменших квадратів (МНК) заснований на мінімізації суми квадратів деяких функцій від шуканих змінних. Метод максимальної правдоподібності (ММП) це метод оцінювання невідомих параметрів математичних моделей шляхом максимізації функції правдоподібності. Використанню таких класичних методів регресійного аналізу присвячено багато книг, зокрема [33].

Популярним способом моделювання виробничих процесів є застосування методу проєкцій на латентні структури (PLS), який базується на аналізі вихідних даних з застосуванням методу головних компонент. Метод PLS дозволяє будувати достатньо точні лінійні математичні моделі при великій кількості незалежних змінних і відносно невеликій кількості наявних експериментальних даних. Використання цього методу також дозволяє уникнути «переоцінки» (тобто переускладнення) моделі при великій кількості незалежних змінних шляхом переходу до простору головних компонент.

В роботі [131] розглядалася можливість застосування для контролю енергоспоживання технологічних об'єктів одного з найпростіших методів моделювання часових рядів, а саме – методу ковзаючого середнього (англ. Moving Average – MA). Однак точніші результати моделювання енергоспоживання можуть бути отримані з застосуванням більш складних методів, наприклад, моделей Бокса-Дженкінса (ARIMA), сингулярного спектрального аналізу (SSA) тощо.

Існують методи, які дозволяють отримати математичну модель в вигляді певних інтервалів. Зокрема в роботі [174] з цією ж метою використовують метод простого інтервального оцінювання (ПІО).

Одним з відомих методів побудови складних багатофакторних моделей є метод групового урахування аргументів (МГУА), який базується на застосуванні теорії самоорганізації математичних моделей [44, 110, 155]. При цьому для одержання математичних моделей оптимальної складності необхідно розглядати достатньо складні базові функції, зокрема такі, що мають вигляд поліномів, експонент, рядів Фур'є тощо.

Протягом кількох останніх десятиліть у різних сферах діяльності все більшої популярності набувають методи математичного моделювання на основі нейронних мереж. Нейронні мережі є одним з методів імітації процесів та явищ, який дозволяє відтворювати складні залежності. Ідея розробки нейронних мереж полягала у імітації роботи головного мозку та нервової системи людини, що складається з безлічі однорідних елементів – нейронів. Використання знань щодо будови та функціонування нейронів допомогло створити адаптивні та здатні до навчання системи – нейронні мережі, які дозволяють вирішувати низку проблем у різних галузях науки [60]. Зокрема, так звані радіальні базисні нейронні мережі GRNN (Generalized Regression Neural Network) дозволяють при незначних витратах часу будувати математичні моделі високої складності, які демонструють хороші результати моделювання в умовах нелінійного впливу чинників на відповідні залежні змінні [32, 135].

Зважаючи на індивідуальні особливості процесів енергоспоживання, виробничих умов, складу та характеру впливу чинників, що визначають обсяг споживання енергетичних ресурсів, цілком очевидним є, що неможливо заздалегідь визначити деякий метод математичного моделювання чи вид математичної моделі, який був би найбільш придатним для встановлення цільових змінних енергоспоживання на будь-якому технологічному об'єкті.

Тобто вибір методу моделювання енергоспоживання повинен здійснюватись індивідуально для кожного об'єкту контролю з урахуванням його особливостей. Відомо, що якою б точною не була математична модель, з часом її характеристики погіршуються. Тому, для одного й того ж самого об'єкту контролю може бути потрібно періодично здійснювати коригування попередньо отриманої моделі у зв'язку зі змінами, які відбуваються на самому об'єкті або в умовах його функціонування. Такі дії з покращення математичної моделі називають контролем або супроводом моделі.

Вибір методу математичного моделювання може бути здійснено на основі так званої "конкурентної оцінки моделей" [121]. Така оцінка виконується шляхом порівняння декількох моделей, побудованих на одному й тому ж наборі

вихідних даних, за різними їх характеристиками з метою визначення найкращої з них. Порівняння між собою різних моделей проводиться перш за все, за допомогою певних критеріїв їх адекватності, які дозволяють враховувати відповідні «кількісні» характеристики математичних моделей.

На сьогодні існує досить широкий набір критеріїв, які дозволяють робити висновки про адекватність тих чи інших математичних моделей відповідним процесам, які вони описують. Основні критерії, які традиційно використовуються для оцінки адекватності математичних моделей наведені в додатку Д.

Численні розрахунки свідчать, що застосування окремих критеріїв може призводити до отримання неоднозначних результатів вибору моделі чи методу моделювання енергоспоживання [13]. Тому в багатьох літературних джерелах оцінку адекватності математичних моделей рекомендується здійснювати не за одним, а за кількома критеріями одночасно [6]. При цьому, очевидно, що процедура вибору найбільш доцільного методу математичного моделювання також являє собою певну багатокритеріальну задачу [22].

Існує багато критеріїв адекватності, які фактично дублюють один одного та оцінюють одні і ті ж властивості математичної моделі. Використання таких «однорідних» критеріїв не лише не дозволяє всебічно оцінювати відповідні «кількісні» характеристики математичних моделей, але й призводить до необхідності виконання зайвих розрахунків. При цьому застосування кількох «однорідних» критеріїв при вирішенні багатокритеріальної задачі може призвести до одержання суперечливих результатів і, врешті, до вибору далеко не найкращого методу математичного моделювання.

Іншими словами, використання різних наборів критеріїв адекватності математичних моделей досить часто призводить до різних результатів вибору найбільш прийнятної з них. Отже, коректне вирішення задачі визначення доцільного складу критеріїв адекватності математичних моделей, які застосовуються для встановлення цільових змін енергоспоживання, є

принципово важливим питанням при побудові та подальшому функціонуванні систем оперативного контролю енергоефективності.

Необхідно звернути увагу, що для більш точної і всебічної оцінки математичних моделей деякі критерії оперують не однією статистичною вибіркою, а двома – навчальною та перевіркою. Дані з першої вибірки використовуються для побудови математичної моделі (тобто для визначення її параметрів), друга ж вибірка даних застосовується для знаходження критеріїв адекватності моделі. Використання двох наборів даних, перш за все, пов'язано з можливістю переоцінки моделі. Тобто в такому разі можна отримати математичну модель, яка буде показувати гарні результати на навчальній вибірці, але її прогнозувальна здатність буде поганою, на що вказуватиме перевірна вибірка. Можливим також є інший підхід до вирішення задачі, що розглядається: вибір збалансованої математичної моделі, яка демонструватиме прийнятні результати на обох вибірках. Така модель може бути визначена шляхом порівняння числових значень критеріїв адекватності, отриманих як на розрахунковій, так і на перевірочній вибірках [44].

Деякі критерії, наприклад критерій прогнозуючої здатності, потребують для визначення їх значень, крім навчальної та контрольної, наявності ще й додаткової, екзаменаційної вибірки. Однак, зважаючи на недостатній обсяг статистичних даних, особливо на початковому етапі побудови математичних моделей і встановлення цільових змінних електроспоживання, використання критеріїв адекватності, які оперують трьома вибірками, далеко не завжди є можливим.

3.2.2 Вибір найбільш прийняттого метода математичного моделювання електроспоживання технологічних об'єктів

Як свідчить додаток Д, критерії адекватності математичних моделей за їх змістом можна умовно поділити на два класи. Застосування критеріїв, що входять до першого класу, базується на порівнянні їх розрахункових значень з

табличними. За результатами цього порівняння робиться висновок про принципову придатність даної моделі за тою чи іншою її ознакою. До таких критеріїв, зокрема, можна віднести тест Чоу на стабільність моделі, а також критерії Фішера, Стюдента, Дарбина-Уотсона [33]. Ці критерії, як правило, можуть бути використані лише для попереднього відбору математичних моделей, які в подальшому будуть порівнюватись між собою за іншими ознаками з метою вибору кращої з них.

До другого класу можна віднести всі інші критерії, тобто ті, що дозволяють порівнювати математичні моделі за їх точністю та вибирати найкращу з них. Таких критеріїв існує досить велика кількість, однак, як вже зазначалося, одночасне використання всіх цих критеріїв навряд чи є доцільним. Тому при вирішенні задачі вибору найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення цільових змінних електроспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності, перш за все, потрібно виокремити певний мінімально необхідний склад критеріїв, які б дозволяли здійснювати всебічну оцінку адекватності математичних моделей, уникаючи при цьому зайвих розрахунків та можливості одержання суперечливих результатів. Тому, з метою вибору їх мінімально необхідного складу, критерії адекватності моделей (додаток Є) в залежності від певної ознаки, яку вони характеризують, умовно можуть бути розділені на три групи:

- 1) критерії, що характеризують точність математичної моделі:
 $ESS, D_{\text{зал}}, SEE, R^2, R_{\text{Adj}}^2, \bar{A}, MAE, RSME, \Delta^2(B);$
- 2) критерії, що характеризують одночасно точність і складність моделі: $AIC, BIC;$
- 3) критерії, що характеризують стійкість моделі, тобто можливість її застосування на нових даних: $n_{\text{зм}}.$

Як вже зазначалося, критерії адекватності математичних моделей, що входять до однієї і тієї ж групи, слід перевірити на «однорідність», тобто

пересвідчитись, що вони не дублюють один одного за своїм змістом і співвідношенням числових значень одержаних для різних моделей.

Зокрема, в дисертаційній роботі виконана експериментальна перевірка на «однорідність» критеріїв адекватності на основі визначення коефіцієнтів парної кореляції між числовими значеннями відповідних критеріїв. Результати здійснення такої перевірки наведено в додатку Е.

Додаток Е свідчить, що коефіцієнти кореляції між всіма наведеними критеріями (крім R^2 та R_{Adj}^2 , які є модифікацією одного і того ж критерію) є дуже високими. Такі значення коефіцієнтів кореляції свідчать про наявність дуже тісного статистичного зв'язку між числовими значеннями практично всіх критеріїв, які характеризують точність математичних моделей, а отже, про «однорідність» цих критеріїв. Таким чином, з першої групи критеріїв адекватності математичних моделей одночасно доцільно використовувати лише два з них, наприклад критерій $\Delta^2(B)$ (або $ESS, D_{\text{зал}}, SEE, R^2, R_{Adj}^2, \bar{A}, MAE, RSME$) та критерій R_{Adj}^2 (або R^2).

Коефіцієнт кореляції між критеріями AIC та BIC дорівнює 1, що свідчить про практично повне їх дублювання. При цьому, зважаючи на те, що критерій Шварца (BIC) більшою мірою, ніж критерій Акаїке (AIC), «штрафує» за зайву складність математичної моделі, використання критерію BIC є більш доцільним. Необхідно також звернути увагу на те, що критерії Шварца та Акаїке, крім складності моделі, також певною мірою оцінюють і її точність. Тому з метою усунення дублювання критеріїв адекватності, які були віднесені до групи 1 та 2, доцільно розраховувати одні з них на навчальній вибірці, а інші на перевіірочній, що в свою чергу допоможе отримати максимально збалансовану модель.

Однак слід зазначити, що наведені в додатку Е критерії за своїм змістом є кількісними показниками і характеризують математичні моделі дещо однобічно, переважно відображаючи їх адекватність відповідним процесам. Тому для більш повної оцінки математичних моделей електроспоживання, крім

наведених вище критеріїв адекватності, доцільно застосовувати також деякі «якісні» критерії, які пов'язані з іншими властивостями моделей, що розглядаються.

При цьому під іншими властивостями моделі слід розуміти сукупність деяких її додаткових характеристик (крім показників адекватності), які повинні задовольняти певним вимогам дослідника. Наприклад, у якості таких додаткових характеристик можуть розглядатися витрати різних ресурсів на побудову відповідної математичної моделі. Наприклад, до них можна віднести витрати часу, трудових ресурсів, фінансові витрати на побудову моделі тощо.

Необхідно звернути увагу також на те, що числові значення та склад «якісних» критеріїв, які доцільно враховувати при застосуванні такого підходу, можуть бути суттєво різними для кожного конкретного виробничого об'єкту і будуть відображати індивідуальний характер виробничих умов та конкретні цілі, поставлені перед системами оперативного контролю енергоефективності.

Отже в кожному конкретному випадку необхідно вирішувати, які саме додаткові «якісні» критерії вибору найбільш прийнятної математичної моделі електроспоживання необхідно враховувати для того чи іншого виробничого об'єкту, що досліджується.

Для визначення потрібного набору таких «якісних» критеріїв вибору математичних моделей можна застосовувати методи експертного опитування та нечіткої логіки [79]. Необхідно зазначити, що експерти, які прийматимуть участь в опитуванні з метою визначення «якісних» характеристик математичних моделей, повинні бути добре обізнаними як з особливостями функціонування виробничого об'єкту, електроспоживання якого моделюється, так і з методикою здійснення контролю енергоефективності. При цьому процедура опитування експертів з даного питання та обробка одержаних результатів може бути аналогічною наведеному в розділі 3.1.1 процесу визначення попереднього складу чинників, що впливають на електроспоживання виробничих об'єктів.

Крім знаходження складу додаткових «якісних» критеріїв вибору найбільш прийнятної математичної моделі електроспоживання, виникає також потреба визначення допустимих числових значень таких критеріїв. Можливий спосіб вирішення цієї задачі можна проілюструвати на прикладі однієї з додаткових характеристик математичних моделей, зокрема витрат часу на їх побудову.

Очевидно, що для кожного конкретного виробничого об'єкта припустимі витрати часу на побудову математичної моделі електроспоживання можуть бути різними в залежності від прийнятого періоду контролю енергоефективності, кількості одиниць обладнання, яке має бути охоплене контролем, від кваліфікації фахівців, які здійснюватимуть контроль ефективності використання електроенергії тощо.

З іншого боку, використання різних методів побудови математичних моделей, на основі яких у подальшому будуть встановлюватись цільові змінні електроспоживання, потребує різних фактичних витрат часу (T_{Φ}), необхідних для виявлення складу чинників, що суттєво впливають на обсяг споживання електричної енергії на конкретному виробничому об'єкті, збору потрібних статистичних даних, для побудови відповідних моделей, а також безпосередньо для їх використання в процесі контролю енергоефективності. При цьому визначення величини T_{Φ} для кожного виду математичних моделей енергоспоживання чи методу їх побудови може здійснюватись як експериментальним шляхом, так і на підставі попереднього досвіду вирішення подібних задач на інших об'єктах.

Для знаходження допустимого часу (T_D), який є прийнятним для побудови математичної моделі енергоспоживання конкретного виробничого об'єкту, що розглядається, найбільш доцільно скористатися знаннями та досвідом тих самих експертів, які приймали участь у визначенні складу додаткових «якісних» критеріїв вибору найбільш прийнятної математичної моделі.

Вирішити це питання можна, зокрема, використовуючи розглянутий вище метод експертного опитування (розділ 3.1.1.1). Однак в даному випадку кожному з експертів пропонується на спеціальній шкалі (рис. 3.5) позначити ризикою орієнтовне допустиме значення T_d , яке на його думку є прийнятним для побудови математичної моделі електроспоживання виробничого об'єкту, що розглядається. При цьому на зазначеній шкалі (рис 3.5) попередньо мають бути позначені найменше з можливих фактичних значень витрат часу на побудову моделі електроспоживання, з використанням математичних методів, що розглядаються $T_{\phi.min}$, а також період здійснення контролю енергоефективності, прийнятий на даному об'єкті T_k .

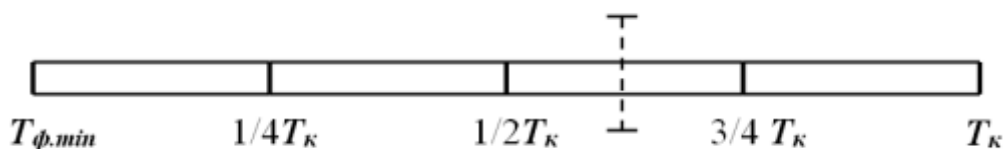


Рис. 3.5. Інтервальна шкала для експертного оцінювання допустимих витрат часу на побудову математичної моделі електроспоживання виробничого об'єкту

Обробка результатів експертного опитування здійснюється за допомогою наведеного раніше методу термів (розділ 3.1.1.1). Отримане таким чином найбільш ймовірне значення допустимих витрат часу на побудову моделі електроспоживання споживання надалі можна розглядати, як чітко визначену величину. При цьому всі методи побудови математичних моделей, при застосуванні яких вирішення цієї задачі вимагатиме витрат часу, більших ніж T_d , повинні бути виключені з подальшого розгляду.

Для подальшого врахування розглянутої “якісної” характеристики, в процесі вибору найбільш прийнятної математичної моделі електроспоживання деякого виробничого об'єкту для кожного виду моделі та методу її побудови доцільно визначати відносну величину зазначеного додаткового критерію за наступною формулою:

$$T_i = \frac{T_{\Phi.i}}{T_{\Delta}}, \quad (3.2)$$

де i – умовний номер виду математичної моделі чи методу моделювання електроспоживання; T_{Φ} - фактичні витрати часу на побудову математичної моделі i -го виду чи з застосуванням i -го методу.

Такі ж відносні значення слід визначати і для всіх інших «якісних» критеріїв, які необхідно враховувати, вибираючи найбільш прийнятну математичну модель електроспоживання виробничого об'єкту, що розглядається. Враховуючи, що найбільш прийнятну математичну модель необхідно знаходити за кількома критеріями, така задача є достатньо складною. Тому для вирішення цієї задачі в дисертаційній роботі пропонується застосувати DEA аналіз (Data Envelopment Analysis). У відчизняних публікаціях він є відомим під назвою методу аналізу середовища функціонування [82].

При використанні цього методу узагальнений критерій ефективності (доцільності) деяких рішень або дій формується на основі співставлення показників якості досягнутих результатів (вихідних характеристик Y_i об'єкту, що розглядається) і обсягів відповідних ресурсів X_j , витрачених для одержання цих результатів. Знаходження найкращого рішення за узагальненим критерієм ефективності для будь-якого багатовимірною об'єкта, що має численні внутрішні зв'язки, згідно методу DEA здійснюється шляхом максимізації наведеного нижче функціоналу при відповідних обмеженнях [188]:

$$f_k = \max_{u_i, v_j \in G} \frac{u_1 Y_1 + u_2 Y_2 + \dots + u_n Y_n}{v_1 X_1 + v_2 X_2 + \dots + v_m X_m}; \quad (3.4)$$

$$\frac{u_1 Y_1 + u_2 Y_2 + \dots + u_n Y_n}{v_1 X_1 + v_2 X_2 + \dots + v_m X_m} \leq 1. \quad (3.5)$$

Система співвідношень (3.4) і (3.5) визначає задачу нелінійного програмування. Рішенням такої задачі для кожного (наприклад, k -ого) об'єкта є значення узагальненого показника «ефективності» f_k і відповідні йому вагові коефіцієнти $u_i = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ і $v_i = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, які максимізують функціонал (3.4).

Отже, при застосуванні методу DEA визначення “ефективної” (найбільш прийнятної) математичної моделі електроспоживання являє собою задачу вибору однієї з множини N моделей, кожна з яких має n входів і m виходів, що відповідають складу кількісних та «якісних» показників, які характеризують адекватність побудованої математичної моделі, а також інші її переваги чи недоліки. При цьому, необхідно звернути увагу на те, що окремі критерії вибору математичних моделей, перш ніж вони будуть включені до виразів (3.4) і (3.5), можуть потребувати певних перетворень, оскільки для одних критеріїв кращій моделі відповідає більше їх числове значення, а для інших критеріїв – навпаки, менше їх числове значення.

Отже, остаточний вибір найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення цільових змінних електроспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності слід здійснювати на основі вирішення багатокритеріальної оптимізаційної задачі [76]. Очевидно, що найбільш прийнятною для того чи іншого конкретного виробничого об'єкту слід вважати ту з математичних моделей, для якої числове значення узагальненого показника ефективності f_k є найбільшим. Як свідчить досвід, застосування методу DEA для вирішення зазначеної задачі має низку суттєвих переваг, зокрема [188]:

- дає змогу одночасно враховувати багато критеріїв вибору найбільш прийнятної математичної моделі електроспоживання, кожен з яких при цьому може мати різні одиниці вимірювання;
- не вимагає апріорного знання вагових коефіцієнтів для змінних, що відповідають вхідним і вихідним параметрам при вирішенні оптимізаційної задачі;

- однак, за необхідності, дозволяє врахувати думки експертів стосовно важливості тих чи інших вхідних або вихідних змінних;
- дає змогу визначати один узагальнюючий показник ефективності (доцільності) використання кожного виду математичної моделі та кожного методу математичного моделювання, що розглядаються.

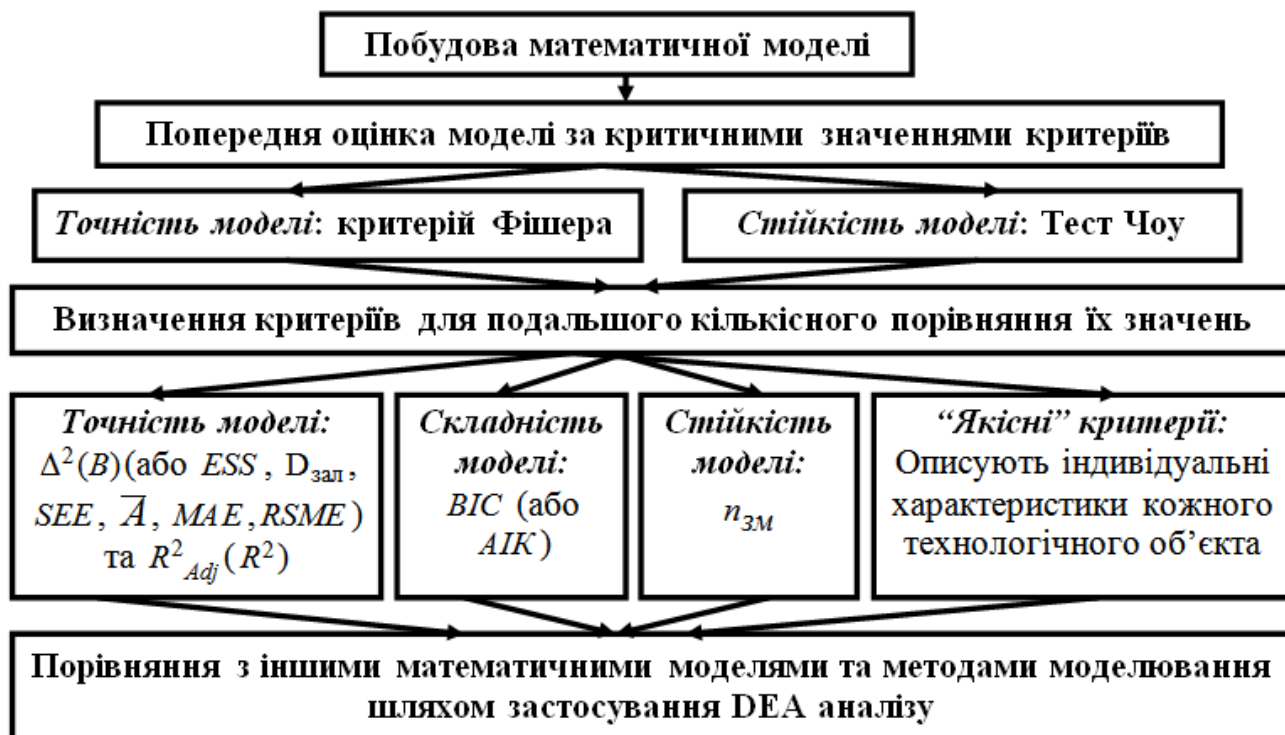


Рис. 3.6. Універсальна процедура вибору найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення цільових змінних електроспоживання

Таким чином, приймаючи до уваги все зазначене вище, розроблена в дисертаційній роботі універсальна процедура вибору найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення цільових змінних електроспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності виробничих об’єктів може бути представлена у вигляді схеми, наведеної на рис. 3.6.

Для практичного застосування зазначеної процедури у подальшому є доцільним створення спеціального програмного продукту для персональних комп’ютерів, який дасть змогу фахівцям-практикам в реальних виробничих умовах успішно здійснювати оперативний контроль та аналіз ефективності використання електричної енергії різними технологічними об’єктами [70, 74].

Приклад вибору найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення цільових змінних енергоспоживання виробничих об'єктів наведено в розділі 4.4.2.

3.3 Удосконалення методичних основ встановлення цільових змінних електроспоживання та процедури оперативного контролю і аналізу енергоефективності

Як зазначалось у попередніх розділах, основна функція систем КІП полягає в оперативному контролі виконання встановлених цільових змінних енергоспоживання. Тобто, після побудови математичної моделі споживання енергетичних ресурсів в залежності від чинників, що впливають на його величину, необхідно періодично виконувати певну процедуру контролю, яка дозволить оцінювати та аналізувати рівень енергоефективності на будь якому виробничому об'єкті.

З цією метою в традиційних системах КіП використовується два підходи: контроль шляхом простого порівняння фактичних значень енергоспоживання та відповідних цільових змінних (рис.3.7) або шляхом побудови графіка кумулятивних сум (CUSUM) (рис.3.8).

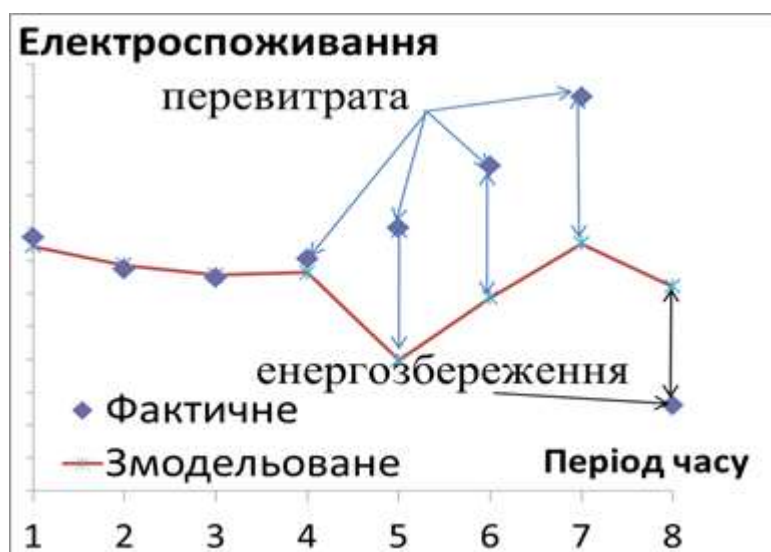


Рис.3.7 Контроль енергоефективності шляхом простого порівняння фактичних обсягів електроспоживання з відповідними цільовими змінними

При застосуванні першого підходу (рис.3.7) контроль енергоефективності здійснюється для кожного періоду часу окремо. При цьому, якщо величина фактичного енергоспоживання знаходиться вище відповідної цільової змінної, то це свідчить про перевитрату енергії, якщо ж нижче – то про економію. У випадку, коли фактичні значення енергоспоживання і отримані з використанням математичної моделі співпадають, то робиться висновок, що ефективність використання енергії на об'єкті, що розглядається, відповідає запланованому її рівню.

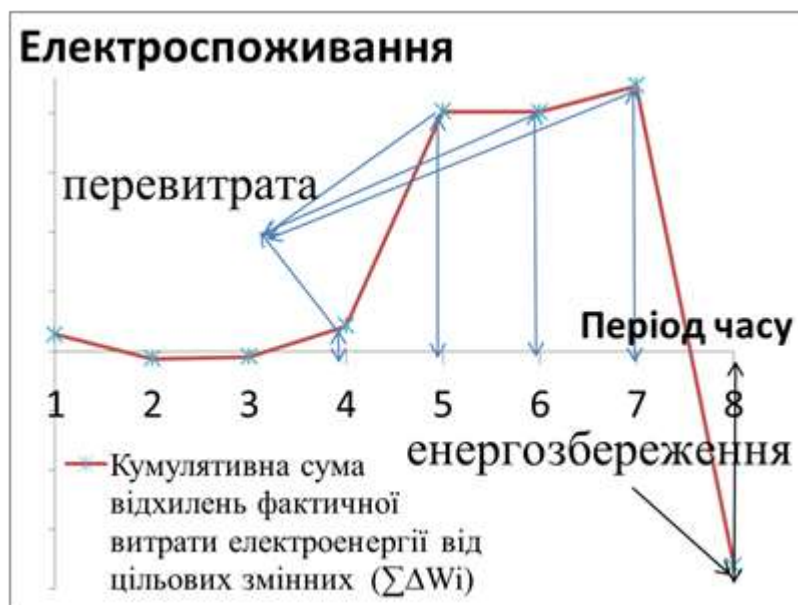


Рис.3.8 Контроль енергоефективності шляхом побудови графіка CUSUM

Використання графіків CUSUM вперше було запропоновано в University of Cambridge з метою моніторингу змін, які відбуваються в процесах. На таких графіках відображаються значення кумулятивної (накопиченої) суми відхилень фактичних значень деякого показника від його значень, отриманих на основі відповідних математичних моделей.

Отже при застосуванні другого підходу (рис.3.8) не тільки оцінюється рівень ефективності енерговикористання окремо для кожного періоду часу, але й одночасно визначається «сумарна» (накопичена) зміна ефективності використання електричної енергії, що спостерігалася на всьому відрізку часу,

протягом якого здійснювався контроль енергоефективності на даному виробничому об'єкті [149].

При цьому величина відхилення фактичного обсягу споживання електроенергії відносно встановлених цільових змінних для деякого i -го етапу контролю визначається:

$$\Delta W_i = W_{\text{факт.}i} - W_{\text{пр.}i}, \quad (3.6)$$

де $W_{\text{факт.}i}$ – фактичний обсяг споживання електроенергії за даний період часу; $W_{\text{пр.}i}$ – величина електроспоживання, визначена на підставі відповідної математичної моделі, тобто цільова змінна, встановлена для цього ж періоду.

Значення кумулятивної суми відхилень фактичної витрати електроенергії після завершення деякого k -го етапу контролю виконання встановлених цільових змінних електроспоживання $\Delta W_{\Sigma k}$ розраховується за формулою [152]:

$$\Delta W_{\Sigma k} = \sum_{i=1}^k \Delta W_i = \Delta W_{\Sigma k-1} + \Delta W_k, \quad (3.7)$$

де $\Delta W_{\Sigma k-1}$ – кумулятивна сума відхилень фактичних обсягів споживання електроенергії від відповідних значень цільових змінних, визначена за результатами всіх попередніх $(k-1)$ етапів контролю; ΔW_k – відхилення фактичного електроспоживання від значення цільової змінної, встановленої для k -го етапу контролю.

При цьому від'ємне значення величин ΔW_i , розрахованих на кожному окремому етапі контролю, свідчать про те, що на даному виробничому об'єкті протягом відповідного періоду спостерігалась економія електроенергії, а додатне – про її перевитрату.

Що ж стосується контролю «сумарної» (накопиченої) зміни ефективності використання електричної енергії, що спостерігалася на даному виробничому

об'єкті протягом виконання всіх завершених етапів контролю енергоефективності, то в класичних системах КіП він здійснюється тільки візуально, виходячи з загальної тенденції зміни графіка CUSUM.

Наведені вище процедури контролю не дозволяють об'єктивно оцінювати рівень енергоефективності на будь якому об'єкті через низку суттєвих недоліків. Зокрема, графік CUSUM, як зазначалося, лише відображає деяку тенденцію зміни напрямку та величини відхилення фактичного електроспоживання від відповідних значень цільових змінних. Проте при його використанні неможливо визначати причини, що призвели до невиконання встановлених цільових змінних. А без виявлення цих причин приймати правильні управлінські рішення з підвищення рівня енергоефективності виробничого об'єкту, що розглядається, практично неможливо.

З іншого боку, будь яка математична модель не може ідеально (абсолютно точно) описувати зміну обсягів споживання електричної енергії на відповідному об'єкті. Тобто відхилення фактичного електроспоживання деякого технологічного об'єкту від встановлених для нього цільових змінних тією чи іншою мірою може бути спричинена неточністю математичної моделі, а не іншими обставинами, що призводить до одержання необ'єктивних результатів контролю енергоефективності. Вирішенню цієї проблеми в традиційних системах КіП зовсім не приділяється увага.

До того ж, невиконання цільових змінних електроспоживання може носити випадковий характер. Тобто на виробничому об'єкті, що розглядається, протягом тривалого часу можуть спостерігатися лише окремі факти перевитрати або економії електроенергії, що очевидно, не дозволяє говорити про певні системні, не випадкові зміни рівня ефективності її використання. Цю обставину існуючі системи КіП також не враховують.

Таким чином, зважаючи на зазначене вище, можна стверджувати, що в традиційних системах КіП практично відсутня чітка та об'єктивна процедура контролю ефективності енерговикористання, не кажучи вже про аналіз

одержаних результатів контролю. Отже для усунення зазначених методичних недоліків існуючих систем КІП необхідним є вирішення наступних двох задач:

- розробка об'єктивної процедури контролю, яка дозволить виявляти не випадкові відхилення фактичних обсягів споживання електричної енергії від встановлених цільових змінних, тобто відслідковувати не випадкові тенденції зміни рівня енергоефективності відповідного об'єкту;
- створення методичних основ аналізу причин, які призводять до зміни рівня ефективності використання електроенергії.

3.3.1 Визначення моментів часу не випадкової зміни рівня енергоефективності виробничих об'єктів

Значно підвищити об'єктивність визначення моментів часу, в які відхилення фактичних обсягів споживання електричної енергії від цільових змінних мають не випадковий характер можна, якщо в якості основи для встановлення таких змінних використовувати не саму математичну модель електроспоживання, а побудовані для цієї моделі межі довірчого інтервалу, який дозволяє врахувати залишкову похибку моделювання та недосконалість моделі з точки зору опису нових даних (невизначеність прогнозу) [21].

При такому підході до встановлення цільових змінних про неефективне споживання (перевитрату) електричної енергії можна стверджувати лише за умови, якщо фактичний обсяг електроспоживання перевищує верхнє граничне значення відповідного довірчого інтервалу, а про підвищення рівня енергоефективності – тільки у випадку, якщо фактична величина споживання електроенергії є меншою від нижнього граничного значення цього довірчого інтервалу (рис.3.9).

Для лінійної багатфакторної математичної моделі зазначені довірчі інтервали визначаються за наступним рівнянням:

$$W(p) = W_{\text{розн}}(p) \pm T\left(\frac{\alpha}{2}, f_e\right) S_e \sqrt{X_p (XX^T)^{-1} X_p^T}, \quad (3.8)$$

де p – момент часу, для якого встановлюються межі довірчого інтервалу; $W_{\text{розн}}(p)$ – обсяг витрати електроенергії, розрахований за відповідною математичною моделлю; $T(\frac{\alpha}{2}, f_e)$ – коефіцієнт розподілу Стюдента за двосторонньої імовірності α і числі ступенів свободи f_e ; S_e – середньоквадратичне відхилення індивідуальних значень фактичних витрат електроенергії від результатів моделювання за допомогою визначеного рівняння регресії (залишкова похибка моделювання); X_p – матриця значень незалежних змінних для моменту часу p ; X_p^T – транспонована матриця X_p ; XX^T – коваріаційно-дисперсійна матриця значень параметрів (констант) рівняння математичної моделі.

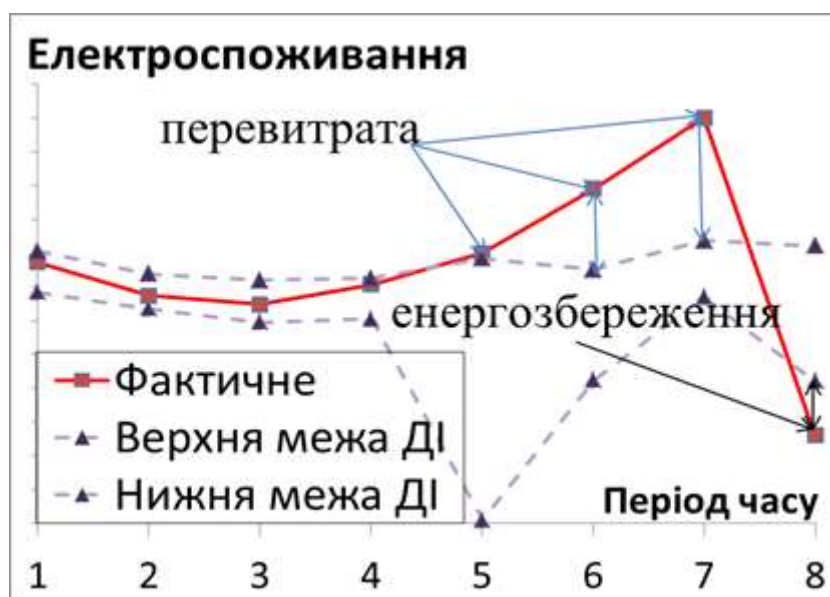


Рис.3.9 Здійснення контролю енергоефективності на основі меж довірчого інтервалу (ДІ) до математичної моделі електроспоживання

Визначення меж довірчих інтервалів для нелінійних багатofакторних математичних моделей являє собою більш складну задачу [178]. Існує декілька підходів до її вирішення.

Одним з найбільш поширених методів побудови довірчих інтервалів до рівнянь нелінійної регресії є їх лінеаризація (L-метод), який полягає у приведенні нелінійної регресійної моделі до лінійного вигляду шляхом відповідного перетворення незалежних змінних. Після такого приведення межі довірчого інтервалу визначаються вже для лінійної математичної моделі за формулою (3.8). Не зважаючи на широку розповсюдженість такого підходу, при практичному вирішенні задач в багатьох літературних джерелах він піддається гострій критиці, особливо в разі суттєвої нелінійності математичної моделі, що приводиться до лінійного вигляду [171].

В роботі [31] межі довірчих інтервалів для нелінійної регресії пропонується визначати за тим же рівнянням, що й для лінійної, але при цьому коваріаційно-дисперсійна матриця значень параметрів рівняння регресії визначається наступним чином:

$$\text{cov}(p) = XX^T - \sum_{i=1}^n e_i H_i(p), \quad (3.9)$$

де p – момент часу, для якого встановлюються межі довірчого інтервалу; $H_i(p)$ – матриця значень других похідних нелінійної функції, тобто гессіан $f(W)$, визначена в i -й точці; e_i – різниця між фактичним і змодельованими значення енергоспоживання в момент часу p .

Коваріаційно-дисперсійна матриця, побудована на основі гессіана суми квадратів відхилень (формула 3.9) дозволяє враховувати нелінійність рівняння регресії, яка відображається значеннями відповідних других похідних $H_i(p)$ [31].

Іншим підходом до вирішення задачі, що розглядається, є застосування так званих імітаційних методів побудови довірчих інтервалів. Такі методи використовують ідею "числового ресамплінгу" – моделювання емпіричного розподілу даних шляхом генерування повторних вибірок, що робить цю ідею

універсальним інструментом, який може застосовуватися незалежно від закону розподілу вихідних даних. Зміст такого підходу є наступним. Маючи n точок в реальній вибірці, шляхом їх «перемішування» сформувати з неї будь-яку кількість розмножених вибірок («псевдовибірок»), за допомогою яких можна отримати необхідні для подальшого аналізу даних їх характеристики: математичні очікування, дисперсії, довірчі інтервали тощо. Якщо багаторазово отримувати з генеральної сукупності результатів спостережень різні вибірки з n пар значень (x, y) , де x – незалежні змінні, а y – залежні, і будувати на їх основі регресійні моделі, то за межі отриманої таким чином "довірчої зони" може вийти тільки $a\%$ таких ліній (зазвичай приймається $a = 5\%$) [141]. В залежності від способу відбору точок при генеруванні «псевдовибірок» використовують методи Монте Карло, Bootstrap, Jackknife тощо. Побудова довірчих інтервалів таким способом є придатною для будь-яких методів математичного моделювання, не залежно від вигляду рівняння регресії та його наявності. Проте використання цього способу вимагає наявності достатньо потужної ЕОМ та відповідного програмного забезпечення, що на сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки не являє собою значної проблеми [137].

Для прикладу наведемо алгоритм побудови довірчих інтервалів бутстреп-методом [123]:

а) виділяємо m опорних значень, рівномірно розподілених за шкалою y , щодо яких будуть розраховуватися величини довірчих інтервалів;

б) робимо випадкову вибірку з поверненнями з порядкових номерів рядків вихідної таблиці (бутстреп-метод). Тобто з m опорних значень вихідної вибірки випадковим чином виймаємо одне значення (x_i, y_i) і розміщуємо його в новій вибірці, таким чином робимо m разів. За цією новою вибіркою розраховуємо модель регресії;

в) з моделі отриманої в пункті б) виконуємо розрахунок m опорних значень залежної змінної;

г) пункти б-в) повторюємо k разів, де k кількість імітацій, яка може бути визначена за формулою 2.5, або на основі рекомендацій наведених в літературних джерелах. Після чого для кожної з опорних точок x обчислюємо по k розрахункових значень $\bar{y}$, тобто відтворюємо розподіл прогнозу відгуку в цих точках;

д) для кожної з опорних точок y знаходимо значення квантилів при $p=1-\alpha/2$ і $p=\alpha/2$ і обчислюємо основні довірчі інтервали за формулою:

$$\left[2\bar{y}_{boot} - q_{(1-\alpha)}^*; 2\bar{y}_{boot} - q_{\alpha}^* \right], \quad (3.10)$$

де $\bar{y}_{boot}$ – значення отримане з розподіл прогнозу відгуку, $q_{(1-\alpha)}^*$; q_{α}^* – процентилі значення упорядкованого варіаційного ряду статистичних величин $\bar{y}$ тобто при $p=0.95 - 0,025k$ і $0.975k$ значення упорядкованого варіаційного ряду статистичних величин.

Детальний опис основних імітаційних методів побудови довірчих інтервалів (методу стохастичної апроксимації (S-метод), імітаційного моделювання (М-метод), Bootstrap-методу (В-метод), зв'язаного моделювання (А-метод), вільного моделювання (F-метод)) наведено в роботі [171].

Як правило, використання будь-якого з цих методів, зокрема бутстреп-методу, дає можливість отримати досить точні значення довірчих інтервалів, навіть для складних нелінійних математичних моделей.

Такий чином, приймаючи до уваги зазначене вище, можна стверджувати, що для побудови довірчих інтервалів до багатофакторних нелінійних математичних моделей, на основі яких у подальшому мають встановлюватись цільові змінні електроспоживання, найбільш доцільним є застосування імітаційних методів, зокрема бутстреп-методу.

Однак, якщо цільові змінні електроспоживання потрібно встановлювати на основі дуже складних нелінійних математичних моделей, а застосування імітаційних методів, зокрема бустреп-методу, наприклад через відсутність спеціальних програмних засобів є неможливим, в окремих випадках для контролю енергоефективності можна скористатися менш досконалими способами, зокрема, методами статистичного контролю процесів (SPC). Основним інструментом SPC є спеціальні контрольні карти, за допомогою яких контроль та аналіз змін в будь-яких процесах. Такі контрольні карти на честь їх розробника називають Контрольними Картами Шухарта (ККШ). При застосуванні контрольних карт варіабельність будь-яких параметрів в технологічних процесах, розглядається як така, що викликана як “випадковими”, так і “спеціальними” причинами, тобто впливом певних чинників. Контрольні карти Шухарта дозволяють виявляти ці складові. Вони являють собою графік ходу самого процесу, на який нанесено верхню та нижню контрольну межу можливих значень відповідного параметра.

При використанні таких карт ознаками порушення технологічного процесу, зокрема, є ситуації, коли [140]:

- 1) Одне або кілька фактичних значень параметра знаходяться поза контрольними межами;
- 2) Сім послідовних значень параметра знаходяться по один бік від центральної лінії, яка відповідає його середній величині;
- 3) Більше шести значень параметра монотонно зростають або зменшуються.

В випадку контролю енергоефективності можна стверджувати, що процес вважається статистично керованим, якщо відхилення фактичного обсягу споживання електроенергії відносно встановлених цільових змінних, отриманих на навчальній вибірці (на якій було побудовано математичну модель), і відповідні відхилення безпосередньо в процесі оперативного контролю мають однакові статистичні властивості [170].

Контрольні межі карт Шухарта для середніх значень відхилення фактичного обсягу споживання електроенергії відносно встановлених цільових змінних ΔW_i визначаються за наступною формулою [48]:

$$UCL(LCL) = \Delta W_{\text{сеп}} \pm \sigma_{\Delta W} A_t, \quad (3.11)$$

де $\Delta W_{\text{сеп}}$ – середнє значення ΔW_i , визначене на навчальній вибірці; $\sigma_{\Delta W}$ – стандартне відхилення величин ΔW_i , визначене на навчальній вибірці; A_t – табличне значення, яке залежить від кількості точок в навчальній вибірці.

Контрольні карти дозволяють контролювати величину відхилення фактичного обсягу споживання електроенергії відносно встановлених цільових змінних, ΔW_i (рис. 3.10.).

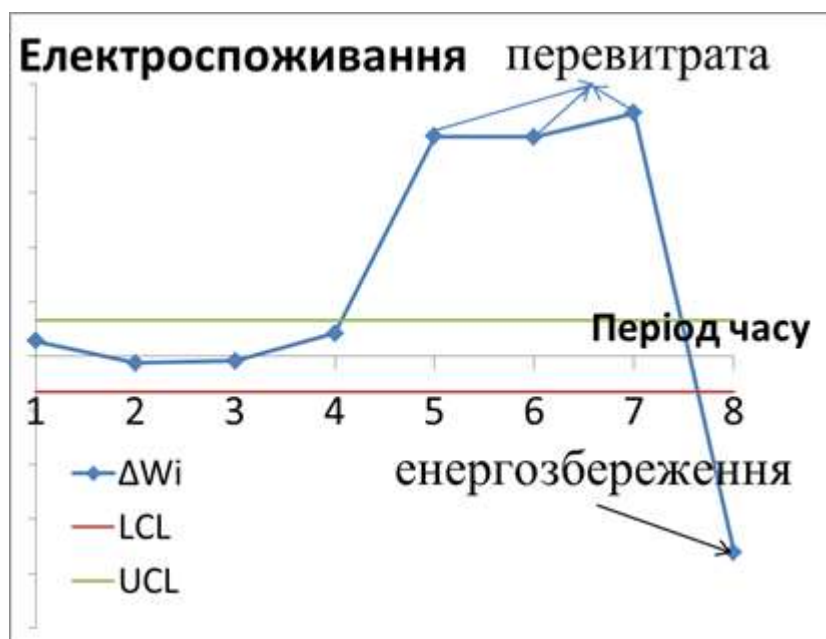


Рис.3.10 Здійснення контролю енергоефективності на основі контрольних карт Шухарта

Таким чином, використання контрольних карт Шухарта, як і побудова математичних моделей електроспоживання та довірчих інтервалів до них, дозволяє не лише відслідковувати тенденцію зміни обсягів споживання електричної енергії на виробничому об'єкті, що розглядається, але й визначити

певні «критичні» моменти часу, у які відбулися суттєві зміни рівня ефективності використання електроенергії. При цьому можна стверджувати, що вихід фактичних обсягів електроспоживання за межі контрольних границь стався не випадково, а під впливом певних чинників. Однак слід зазначити, що при використанні карт Шухарта контрольні границі, на відміну від довірчих інтервалів до математичних моделей електроспоживання, встановлюються у вигляді констант, що робить їх менш гнучким «інструментом» для контролю енергоефективності [123]. Отже визначення моментів часу, в які відбуваються невідповідності зміни рівня ефективності використання електричної енергії виробничих об'єктів найбільш доцільно здійснювати, використовуючи цільові змінні електроспоживання, встановлені на основі довірчих інтервалів до відповідних математичних моделей. І тільки в разі неможливості побудови зазначених довірчих інтервалів для вирішення задачі, що розглядається, можуть бути застосовані контрольні карти середніх значень відхилення фактичних обсягів споживання електроенергії відносно встановлених цільових змінних.

3.3.2 Методичні основи аналізу причин зміни рівня ефективності використання електроенергії

Після того, як в процесі контролю визначено моменти часу, в які фактичні обсяги електроспоживання суттєво і невідповідно відрізнялися від встановлених цільових змінних, необхідно проаналізувати причини, що призвели до цього.

Одним із можливих способів проведення такого аналізу є застосування зазначених вище карт Шухарта для середніх значень параметрів, що контролюються. Однак в цьому випадку, на відміну від вирішення наведеної у попередньому розділі задачі знаходження моментів часу невідповідності зміни рівня енергоефективності, будувати контрольні карти Шухарта необхідно окремо для кожної з незалежних змінних, які враховано у відповідних математичних моделях електроспоживання. Використовуючи такі контрольні

карти можна відслідковувати суттєві і не випадкові зміни числових значень технологічних параметрів, що впливають на обсяги споживання електричної енергії на виробничих об'єктах, що розглядаються. Такі зміни виробничих параметрів, як правило, і є причиною суттєвого відхилення фактичних обсягів електроспоживання від встановлених цільових змінних.

Для контролю не випадкових змін значень одночасно кількох чинників, що впливають на обсяг електроспоживання виробничих об'єктів, можуть бути використані контрольні карти Хоттелінга [134]. Застосування таких багатовимірних контрольних карт дозволяє певним чином враховувати існуючі взаємозв'язки між параметрами технологічного процесу. З цією метою розраховується узагальнена статистика Хоттелінга (T_i^2) [48]:

$$T_i^2 = m(\bar{X}_i - X_{\text{сер}})^T S^{-1} (\bar{X}_i - X_{\text{сер}})^T, \quad (3.12)$$

де m – кількість значень кожного окремого параметра в миттєвій вибірці (для карт індивідуальних значень параметрів m дорівнює 1); T_i^2 – розрахункове значення критерію Хоттелінга; $\bar{X}_i$ – вектор фактичних середніх значень параметрів, що аналізуються, для деякого i -го моменту часу; $X_{\text{сер}}$ – вектор середніх значень чинників, що впливають на електроспоживання, визначених за відповідною передісторією; S – оцінка коваріаційної матриці незалежних змінних.

Критичне значення узагальненої статистики контрольної карти Хоттелінга оцінюють за таблицею квантилів розподілу χ^2 :

$$T_{\text{кр}}^2 = \chi_{1-\alpha}^2(p), \quad (3.13)$$

де p – кількість виробничих параметрів, які контролюються; α – рівень значимості χ^2 .

Використання багатовимірних контрольних карт Хоттелінга дає можливість не тільки встановлювати, чи були зміни числових значень певного набору технологічних параметрів, що розглядаються, причиною не випадкових змін рівня енергоефективності того чи іншого виробничого об'єкту, але також дозволяє виявляти безпосередню причину такого результату, тобто той з чинників, під впливом якого фактичні обсяги споживання електроенергії суттєво відрізнялись від встановлених цільових змінних. З цією метою окремо для кожного з виробничих параметрів, врахованих у відповідній математичній моделі електроспоживання, визначаються часткові статистики Хоттелінга [48]:

$$T_j^2 = m \left[c_j^T (\bar{X}_{t0} - X_{\text{сер}})^2 \right] / \left[c_j^T S c_j \right], \quad (3.14)$$

де m – кількість значень кожного окремого параметра в миттєвій вибірці (для карт індивідуальних значень параметрів m дорівнює 1); c_j – вектор стовбець з нулями в усіх рядках, крім j -го, який відповідає умовному номеру виробничого параметра, що розглядається (в цьому рядку міститься значення 1); $\bar{X}_{t0}$ – матриця поточних значень технологічних параметрів, що розглядаються, в i -й момент часу; $X_{\text{сер}}$ – вектор середніх значень чинників, що впливають на електроспоживання, визначених за відповідною передісторією.

Розрахунок часткових статистик Хоттелінга дозволяє здійснювати аналіз причин не випадкових змін рівня енергоефективності виробничих об'єктів за кожним чинником окремо. Приклад побудови контрольної карти Хоттелінга для трьох виробничих параметрів наведено на рис. 3.11.

На рис. 3.11 зображено чотири лінії, що характеризують динаміку зміни числових значень часткових статистик Хоттелінга для кожного з трьох чинників, що розглядаються, а також критичну границю контрольної карти. Розташування значень часткових статистик Хоттелінга по відношенню до критичної границі дає можливість виявляти, які саме чинники могли призвести

до не випадкової зміни рівня енергоефективності відповідного виробничого об'єкту.

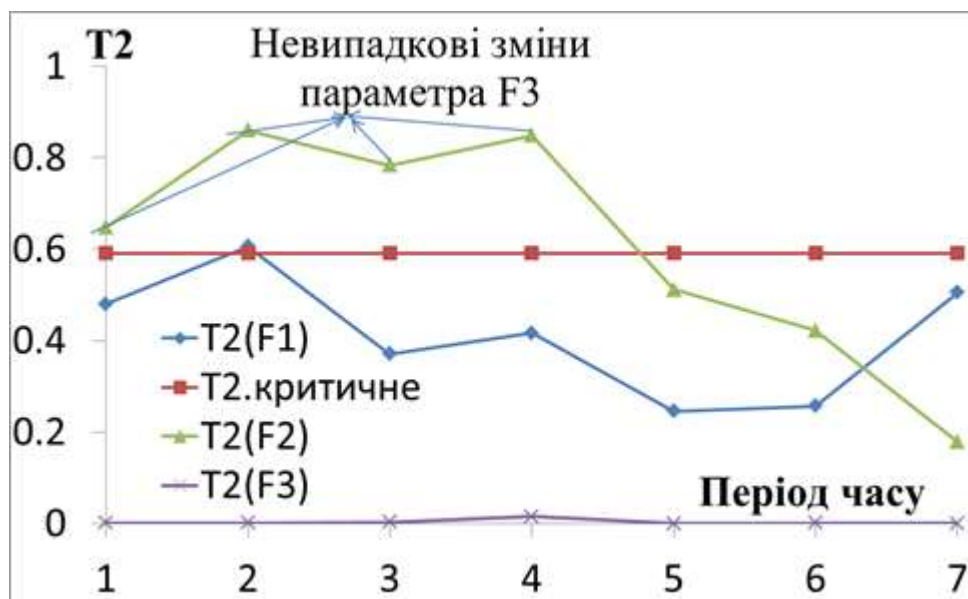


Рис. 3.11. Приклад контрольної карти Хотелінга, побудована для трьох незалежних змінних $F1, F2, F3$

Отже, застосування контрольних карт Шухарта або Хотелінга дозволяє проаналізувати, чи зміни рівня ефективності використання електричної енергії на деякому об'єкті були спричиненні зміною числових значень технологічних параметрів, що враховані у математичній моделі електроспоживання, чи енергоефективність об'єкту змінилася під впливом деяких невідомих чинників, визначення і врахування яких у подальшому може бути доцільним.

Таким чином, на кожному етапі контролю ефективності використання електричної енергії на тому чи іншому виробничому об'єкті повинна виконуватись така процедура. Перш за все, на кожний момент проведення контролю мають бути визначені та проаналізовані показники адекватності математичної моделі електроспоживання (розділ 3.2.2), на основі якої були встановлені відповідні цільові змінні. При цьому, якщо показники адекватності моделі вийшли за межі їх допустимих значень, перш ніж здійснювати контроль енергоефективності, необхідно скоригувати побудовану раніше модель

електроспоживання. Якщо ж математична модель є адекватною, то процедура контролю продовжується далі.

В результаті виконання подальших дій з контролю енергоефективності, які на кожному його етапі полягають у побудові довірчих інтервалів до математичної моделі електроспоживання та встановленні відповідних цільових змінних (розділ 3.3.1), а також у застосуванні контрольних карт Шухарта або Хоттелінга, може скластися одна з наступних ситуацій:

Ситуація 1. Фактичний обсяг споживання електричної енергії на даному виробничому об'єкті знаходиться в межах довірчого інтервалу, побудованого до математичної моделі електроспоживання (тобто встановлені цільові змінні виконуються). В такій ситуації робиться висновок, що рівень енергоефективності на об'єкті відповідає запланованому. Після чого контроль ефективності використання електроенергії на об'єкті продовжується.

Ситуація 2. Фактичний обсяг споживання електроенергії знаходиться поза межами довірчого інтервалу до математичної моделі електроспоживання (встановлені цільові змінні не виконуються). В цьому випадку потрібно, застосовуючи контрольні карти Шухарта або Хоттелінга, проаналізувати зміну фактичних числових значень чинників, що впливають на обсяг споживання електричної енергії. Після виконання такого аналізу можуть бути одержані наступні результати:

Результат 1. Фактичні числові значення технологічних параметрів виходять за межі граничних величин, позначених на контрольних картах, що певною мірою пояснює відповідну зміну обсягу енергоспоживання. При цьому, однак, необхідно додатково проаналізувати, чи зміна значень технологічних параметрів відбулася з причин, незалежних від дій персоналу об'єкта, ці зміни сталися з причин, залежних від його дій. Якщо зміни відбулися з причин, залежних від дій персоналу, констатується факт перевитрати електроенергії або її економії. В іншому випадку слід вважати, що рівень енергоефективності змінився з об'єктивних причин, після чого процес контролю необхідно продовжити.

Результат 2. Числові значення технологічних параметрів знаходяться в межах їх граничних значень, позначених на відповідних контрольних картах, а фактичний обсяг витрат електроенергії виходить за межі довірчого інтервалу, побудованого до математичної моделі електроспоживання (встановлені цільові змінні не виконуються). В цьому випадку слід провести додатковий аналіз причин, що могли викликати зміну обсягів електроспоживання на відповідному технологічному об'єкті. Такий аналіз, може бути виконано з використання наведених вище експертних методів та відповідних процедур обробки їх результатів (розділ 3.1), які дозволять виявити додаткові чинники, що впливають на обсяг споживання електроенергії. З урахуванням зазначених додаткових чинників має бути скоригована математична модель електроспоживання та раніше встановлені цільові змінні. Після чого з урахуванням результатів цього коригування процедуру контролю енергоефективності слід повторити. Якщо ж додаткові чинники, що впливають на обсяг електроспоживання визначити не вдається, чи неможливим є збір відповідних статистичних даних, то факт перевитрати або економії енергії на об'єкті слід вважати випадковим. Після чого контроль ефективності використання електроенергії на об'єкті продовжується.

Таким чином, запропонована в дисертаційній роботі процедура оперативного контролю та аналізу енергоефективності, що базується на застосуванні одно або багатовимірних контрольних карт, дає змогу об'єктивно визначати моменти невідповідності зміни рівня ефективності використання електричної енергії на виробничих об'єктах, а також аналізувати причини їх виникнення. Приклад застосування процедури оперативного контролю та аналізу ефективності енерговикористання наведено в розділі 4.4.3.

Висновки до розділу 3

1. В якості прототипу для розробки більш досконалих методів оперативного контролю ефективності використання електричної енергії у

виробництві можуть бути прийняті традиційні методики створення і використання систем контролю і планування енергоспоживання (систем КіП).

2. Основними недоліками традиційних методик побудови систем оперативного контролю енергоефективності у виробництві є спрощене встановлення цільових змінних електроспоживання, а також відсутність чіткої та об'єктивної процедури контролю їх виконання.

3. Створена в дисертаційній роботі комплексна процедура, що ґрунтується на використанні апарату нечіткої логіки та методів аналізу багатовимірних статистичних даних дозволяє з урахуванням додаткових обмежень визначати оптимальний склад чинників, які необхідно враховувати при побудові математичних моделей електроспоживання виробничих об'єктів.

4. Запропонований в дисертаційній роботі універсальний підхід, дає можливість вибору найбільш прийняттого виду математичних моделей електроспоживання виробничих об'єктів та методу їх побудови, на основі конкурентного відбору за багатьма критеріями з використанням методу Аналізу Середовища Функціонування (DEA-аналізу).

5. Обґрунтовані цільові зміни для оперативного контролю енергоефективності найбільш доцільно визначати на основі довірчих інтервалів, що встановлюються з застосуванням бутстреп-методу до математичних моделей електроспоживання виробничих об'єктів.

6. Удосконалена в дисертаційній роботі процедура контролю та аналізу енергоефективності, що базується на застосуванні одно або багатовимірних контрольних карт, дає змогу об'єктивно визначати моменти не випадкової зміни рівня ефективності використання електричної енергії на виробничих об'єктах, а також аналізувати причини їх виникнення.

РОЗДІЛ 4

ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЙМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДО ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОБАЛАНСІВ ТА КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ВИРОБНИЧОМУ СЕКТОРІ

4.1 Побудова електробалансів виробничих об'єктів за відомими загальними обсягами споживання електроенергії на підприємстві

Застосування ймовірнісно-статистичного підходу до побудови електробалансів на двох рівнях: за видами продукції та за агрегатами, представленого в розділі 2.2, може бути проілюстровано на прикладі окремих підрозділів промислового підприємства, яке спеціалізується на виробництві кабельної продукції, а також алюмінієвих і мідних сплавів.

На зазначеному підприємстві функціонує система обліку, яка фіксує загальні обсяги споживання електроенергії у трьох виробничих підрозділах, що спеціалізуються на виробництві мідних анодів, мідних катодів та підготовці мідного лому (рис 4.1).

Для кожного з виробничих підрозділів, зазначених на рис 4.1, відомими є технологічні схеми виробництва продукції, склад обладнання, що використовується, а також встановлена електрична потужність кожної одиниці цього обладнання. Схеми технологічного процесу виробництва мідних анодів, катодів та процесу підготовки мідного лому наведені на рисунках 4.2.- 4.4.

З метою виробництва мідних анодів, мідних катодів та мідного лому на зазначеному підприємстві використовується технологічне обладнання, склад якого наведено в таблицях 4.1-4.3.

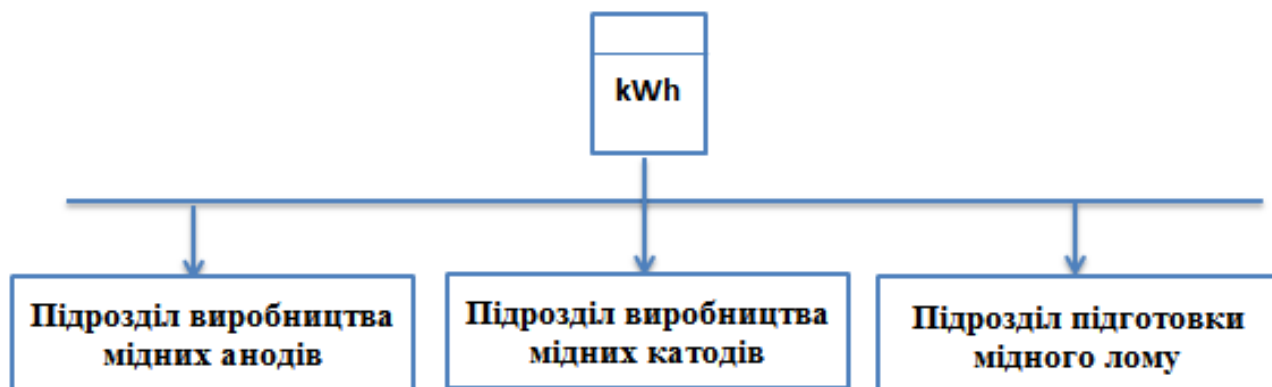


Рис. 4.1. Схема здійснення обліку електроспоживання підрозділів підприємства.



Рис. 4.2. Технологічна схема процесу виробництва мідних анодів

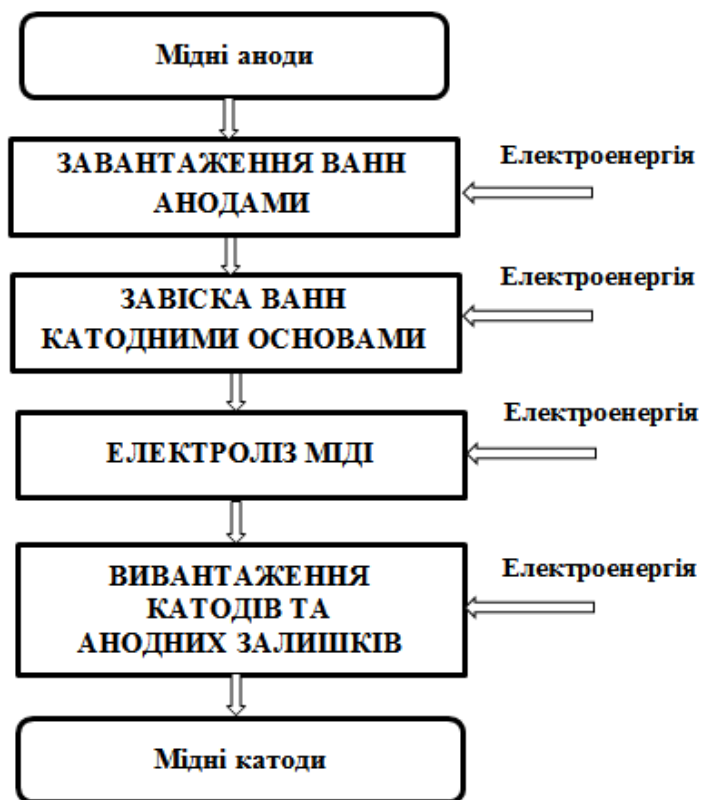


Рис. 4.3. Технологічна схема процесу виробництва мідних катодів

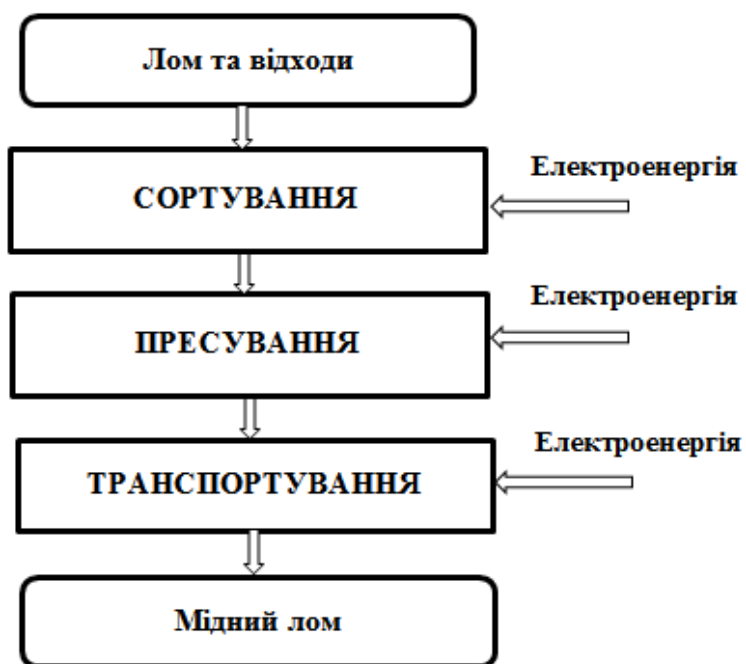


Рис. 4.4. Технологічна схема процесу підготовки лому

Таблиця 4.1

Склад технологічного обладнання, задіяного в виробництва мідних анодів

№ обладнання	Найменування енергоспоживаючого обладнання	Встановлена потужність одиниці обладнання, кВт
1	Прес пакетувальний № 4,5, 6	22
2	Ножиці гільйотинні	30
3	Кран-балка Q=2т. №4	3
4	Кран-балка Q=5т. №5	4
5	Освітлення ЛД	0,16
6	Привод нахилу печі вогневого раф.	3,6
7	Привод шторки печі	3,6
8	Насос подачі холодної води №1,2	4
9	Димосос № 1,2	80
10	Повітродувка №1	18
11	Повітродувка №2	7,5
12	Градирня №1,2	3
13	Насос охолодження	1,1
14	Кран-балка №41 Q=2т.	3
15	Кран-балка №42,58 Q=3,2т.	4
16	Нагрівач калорифера	45
17	Електродвигун калорифера	1,1
18	Припливна вентиляція	7,5
19	Шнек газоочистки №1,2	1,1
20	Дозатор №1,2	1,1
21	Система управління регенерацією	0,25
22	Тельфер №45 Q=2т.	3
23	Лампи ДРЛ	0,4
24	Лампи розжарювання	0,5
25	Освітлення газоочистки	0,5

Таблиця 4.2

Склад технологічного обладнання, задіяного в виробництва мідних катодів

№ обладнання	Найменування енергоспоживаючого обладнання	Встановлена потужність одиниці обладнання, кВт
1	Секція випрямляча	130
2	Фільтр-прес	3
3	Терморегулятор	0,05
4	Насос бака реактора	16,5
5	Ножиці обробки матриць	18
6	Прес	5
7	Наждак	4
8	Насос циркуляційний №1, №2	30
9	Насос конденсатний №1, №2	4
10	Насос виводу електроліту	11
11	Шламосбірник	11
12	Насос зумпф-баків №1, №2	7,5
13	Насос душ-ванн №1, №2	15
14	Насос приготування електроліту	4
15	Насос перистальтичний	7,5
16	Дозатор	1
17	Кран, що управляється з підлоги №59,60	25
18	Вентилятор №1, №2	75
19	Вентилятор №3, №4	55
20	Кран-балка №46	4
21	Лампи ДРЛ	0,4
22	Лампи розжарювання	0,16

Таблиця 4.3

Склад технологічного обладнання, задіяного в виробництва мідного лому

№ обладнання	Найменування енергоспоживаючого обладнання	Встановлена потужність одиниці обладнання, кВт
1	Прес пакетувальний №2,3	22
2	Прес пакетувальний	18
3	Подрібнювач	132
4	Вібросито	2,2
5	Транспортер стрічковий	2,2
6	Освітлення	0,4
7	Кран-балка №19	4

Необхідною умовою застосування ймовірісно-статистичного підходу побудови електробалансів є наявність законів розподілу обсягів електроспоживання кожного з агрегатів, задіяних в процесах виробництва продукції. Для визначення відповідних законів розподілу необхідно провести вимірювання кількісних значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи обладнання. Організація та виконання вимірювань може здійснюватись за допомогою методу моментних спостережень. Згідно цього методу вимірювання мають виконуватись для кожної з зазначених в таблицях 4.1-4.3 одиниць обладнання, обхід яких здійснюється послідовно за певним маршрутом через заплановані проміжки часу. Мінімальна необхідна кількість спостережень, визначена за формулою 2.1:

$$n = \frac{t^2 p(1-p)}{\Delta^2} = \frac{2^2 \cdot 0,95(1-0,95)}{0,01^2} = 1900 \text{ спостережень}$$

Тоді, відповідно до формули 2.2 число обходів за зміну дорівнює:

$$\beta = \frac{n}{N \cdot C} = \frac{1900}{54 \cdot 2} \approx 18 \text{ обходів}$$

При цьому тривалість одного обходу за формулою 2.3 складає:

$$t_{\text{обх}} \leq \frac{T_{\text{зм}}}{k\beta} = \frac{8 \cdot 60}{5 \cdot 0,95} = 90 \text{ хвилин}$$

В результаті виконання відповідних вимірювань з застосуванням методу моментних спостережень протягом 5 діб отримані статистичні дані щодо числових значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи для кожного з агрегатів, що задіяні в процесах виробництва мідних анодів, мідних катодів та підготовці мідного лому.

Наприклад, для пакетувальних пресів № 4,5,6, задіяних в процесах виробництва мідних анодів (табл. 4.1), одержані статистичні дані наведено в таблиці 4.4. Гістограми частот можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи зазначених пакетувальних пресів наведено на рис. 4.5 та 4.6.

На основі можливих значень коефіцієнтів завантаження та тривалості роботи пакетувальних пресів № 4,5,6 за формулою 1.1 можуть бути визначені числові значення обсягів споживання електроенергії відповідним обладнанням, а також побудовані гістограми частот їх появи (рис. 4.7). Аналогічні гістограми частот були отримані для обсягів електроспоживання всіх інших видів технологічного обладнання виробничих підрозділів, що розглядаються.

Виходячи з форми побудованих гістограм, може бути прийнята гіпотеза, що закон розподілу можливих обсягів споживання електроенергії кожного з видів обладнання є близьким до нормального. Для перевірки відповідності одержаних гістограм обсягів споживання електроенергії кожним з видів обладнання, що розглядаються, нормальному закону розподілу застосовано тест Колгоморова. Необхідні розрахунки здійснювались з застосуванням пакету програм Statistica.

Наприклад, для пакетувальних пресів розрахункове значення критерію Колгоморова складає $D_p = 0,136$. Результат його порівняння з відповідним табличним значенням ($D_t = 0,215$) свідчить про можливість застосування нормального закону розподілу для опису можливих значень обсягу електроспоживання цього виду обладнання. Аналогічні розрахунки, проведені для всіх інших агрегатів, задіяних у процесах виробництва мідних анодів, мідних катодів та підготовці мідного лому, підтверджують, що такий самий висновок є справедливим і для всіх інших видів обладнання, що розглядаються.

Таким чином, параметри законів розподілу можливих обсягів споживання електроенергії обладнанням, задіяним в виробництві мідних анодів, мідних катодів та підготовці мідного лому, визначені на підставі зробленого висновку, наведено в таблицях 4.5 - 4.7.

Таблиця 4.4

Статистичні дані обсягів електроспоживання пакетувальних пресів № 4,5,6,

№ Виміру	Коефіцієнт завантаження	Тривалості роботи, годин	Обсяг електроспоживання, кВт·год
1	0,71	10	469,84
2	0,71	10	469,90
3	0,66	8	349,02
4	0,65	9	388,72
5	0,62	9	367,31
6	0,68	10	446,83
7	0,72	10	473,67
8	0,65	9	388,01
9	0,69	9	407,98
10	0,59	8	311,44
11	0,60	9	358,18
12	0,62	9	367,50
13	0,62	9	368,20
14	0,66	10	436,79
15	0,51	8	270,01
16	0,65	8	342,61
17	0,61	9	361,36
18	0,62	9	369,17
19	0,67	9	400,16
20	0,68	9	402,39
21	0,71	10	469,84
22	0,71	10	469,90
23	0,66	8	349,02
24	0,65	9	388,72
25	0,62	9	367,31
26	0,68	10	446,83
27	0,72	10	473,67
28	0,65	9	388,01
29	0,69	9	407,98
30	0,59	8	311,44
31	0,60	9	358,18
32	0,62	9	367,50
33	0,62	9	368,20
34	0,66	10	436,79
35	0,51	8	270,01
36	0,65	8	342,61
37	0,61	9	361,36
38	0,62	9	369,17
39	0,67	9	400,16
40	0,68	9	402,39

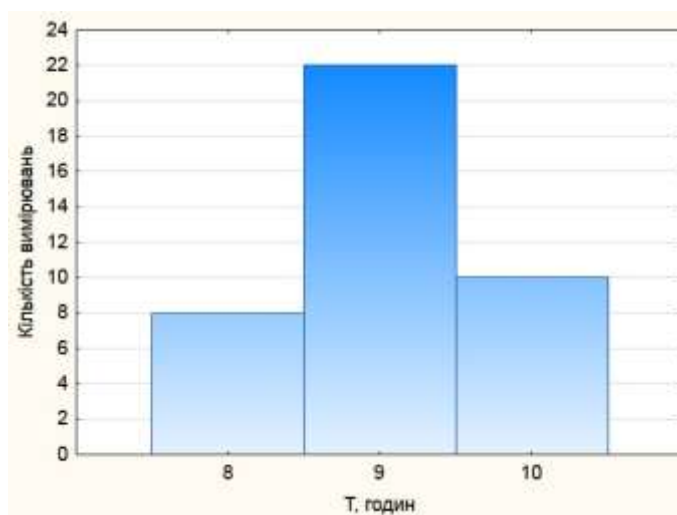


Рис. 4.5. Гістограма частот можливих значень тривалості роботи пакетувальних пресів.

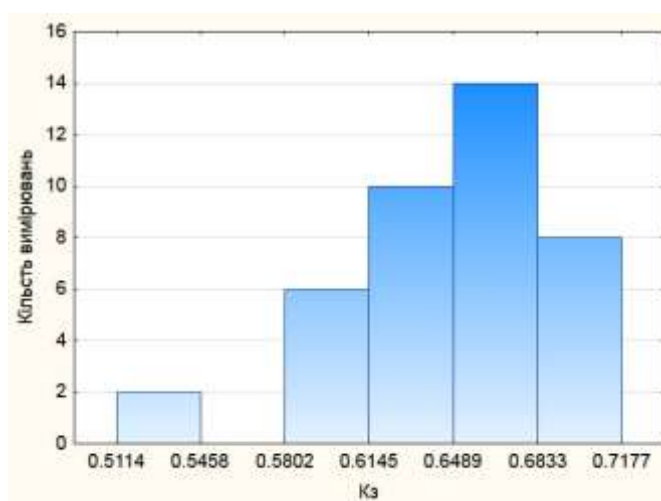


Рис. 4.6. Гістограма частот можливих значень коефіцієнтів завантаження пакетувальних пресів.

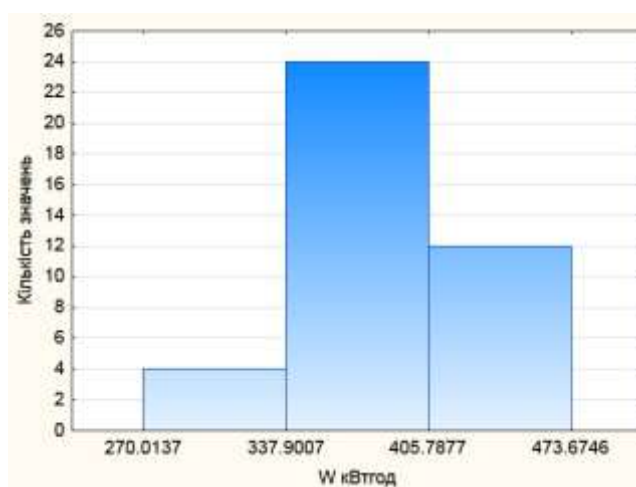


Рис. 4.7. Гістограма частот можливих обсягів електроспоживання пакетувальних пресів.

Таблиця 4.5

Параметри законів розподілу можливих обсягів електроспоживання агрегатів,
здіяаних в процесі виробництва мідних анодів

№ обладнання (таблиця 4.1)	Параметри законів розподілу			
	μ_{W_i}	σ_{W_i}	$W_{\min}$	$W_{\max}$
1	387,46	51,91	270,01	473,67
2	216,76	29,04	151,06	264,99
3	2,03	0,27	1,42	2,48
4	2,71	0,36	1,89	3,31
5	145,66	19,52	101,51	178,08
6	9,97	1,34	6,95	12,19
7	9,97	1,34	6,95	12,19
8	44,32	5,94	30,88	54,18
9	974,95	130,62	679,43	1191,90
10	159,54	21,37	111,18	195,04
11	66,47	8,91	46,32	81,27
12	33,24	4,45	23,16	40,63
13	1,22	0,16	0,85	1,49
14	2,49	0,33	1,74	3,05
15	6,65	0,89	4,63	8,13
16	21,32	2,86	14,85	26,06
17	0,33	0,04	0,23	0,40
18	41,55	5,57	28,95	50,79
19	0,54	0,07	0,38	0,66
20	0,45	0,06	0,31	0,55
21	4,43	0,59	3,09	5,42
22	2,49	0,33	1,74	3,05
23	120,44	16,14	83,94	147,25
24	24,00	3,22	16,73	29,35
25	76,81	10,29	53,53	93,91

Таблиця 4.6

Параметри законів розподілу можливих обсягів електроспоживання агрегатів,
здіяних в процесі виробництва мідних катодів

№ обладнання (таблиця 4.2)	μ_{W_i}	σ_{W_i}	$W_{\min}$	$W_{\max}$
1	5112,44	414,81	3769,55	5820,67
2	26,04	2,11	19,20	29,64
3	0,98	0,08	0,72	1,11
4	116,35	9,44	85,79	132,47
5	249,95	20,28	184,29	284,57
6	23,50	1,91	17,33	26,76
7	23,14	1,88	17,06	26,35
8	423,09	34,33	311,96	481,70
9	56,41	4,58	41,59	64,23
10	38,78	3,15	28,60	44,16
11	111,38	9,04	82,12	126,81
12	75,94	6,16	55,99	86,46
13	423,09	34,33	311,96	481,70
14	25,31	2,05	18,66	28,82
15	56,95	4,62	41,99	64,84
16	10,85	0,88	8,00	12,35
17	81,36	6,60	59,99	92,63
18	1952,71	158,44	1439,79	2223,22
19	1431,99	116,19	1055,85	1630,36
20	13,02	1,06	9,60	14,82
21	274,84	22,30	202,65	312,91
22	25,39	2,06	18,72	28,90

Таблиця 4.7

Параметри законів розподілу можливих обсягів електроспоживання агрегатів,
здіяних в процесі підготовки мідного лому

№ обладнання (таблиця 4.3)	μ_{W_i}	σ_{W_i}	$W_{\min}$	$W_{\max}$
1	7197,44	1154,3	4026,58	8681,95
2	258,16	41,4	144,43	311,41
3	2972,85	476,78	1663,15	3586,02
4	53,98	8,6574	30,19	65,11
5	54,76	8,78	30,63	66,05
6	88,01	14,11	49,23	106,16
7	89,7	14,38	50,18	108,2

Після того, як для кожного з агрегатів, що розглядаються, встановлено закони розподілу обсягів їх електроспоживання, стає можливим визначення законів розподілу обсягів споживання електроенергії за видами продукції (мідні аноди, мідні катоди та підготовка мідного лому). Вони визначаються шляхом об'єднання законів розподілу електроспоживання окремих агрегатів, задіяних в процесах виробництва відповідної продукції. Об'єднання зазначених законів розподілу здійснюється з застосуванням пакету програм Matlab. Результати вирішення цієї задачі наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

Параметри законів розподілу можливих обсягів споживання електроенергії на виробництво окремих видів продукції

Вид продукції	μ_{w_i}	σ_{w_i}	$W_{\min}$	$W_{\max}$
Мідні аноди (продукція 1)	2311,59	315,62	1641,73	2880,02
Мідні катоди (продукція 2)	10472,08	856,29	7781,41	12015,48
Підготовка мідного лому (продукція 3)	10352,56	1718,47	5994,42	12924,94

Визначення кількісних значень статей витратної частини електробалансу за зазначеними видами продукції та за агрегатами може бути продемонстровано на прикладі побудови відповідних добових балансів споживання електроенергії у трьох виробничих підрозділах, що розглядаються. Загальний фактичний обсяг споживання електричної енергії цими підрозділами протягом однієї з діб роботи підприємства, визначений за приладами обліку, дорівнює $w^{\text{під}} = 24513,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Як зазначалося у розділі 2.2, задача визначення невідомої структури електробалансу за видами продукції здійснюється шляхом вирішення оптимізаційної задачі з цільовою функцією та обмеженнями:

$$z = \prod_{i=1}^3 \left(\frac{1}{315,62\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w_1-2311,59)^2}{2 \cdot 315,62^2}} \cdot \dots \cdot \frac{1}{1718,47\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w_3-10352,56)^2}{2 \cdot 1718,47^2}} \right) \rightarrow \max$$

$$1641,73 \leq w_1^{\text{пп}} \leq 2880,02$$

$$7781,41 \leq w_2^{\text{пр}} \leq 12015,48$$

$$5994,42 \leq w_3^{\text{пр}} \leq 12924,94$$

$$\sum_{i=1}^3 w_i^{\text{пр}} = 24513,7$$

Вирішення наведеної вище оптимізаційної задачі, як і усіх інших схожих задач, що розглядаються у відповідній главі, здійснювалося в програмному продукті Matlab.

Таким чином, отриманий шляхом застосування ймовірнісно-статистичного підходу баланс споживання електроенергії за видами продукції для відповідної доби наведено на рис. 4.8.

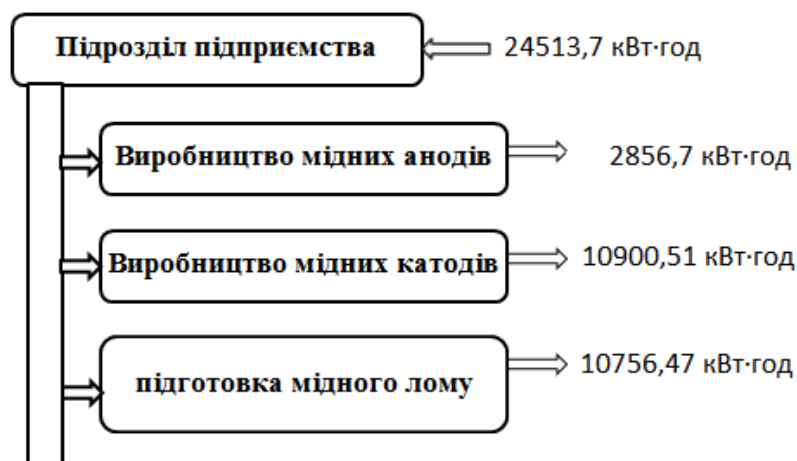


Рис. 4.8. Добовий баланс споживання електроенергії за видами продукції

На основі визначеної витратної частини електробалансу за видами продукції можуть бути побудовані баланси споживання електроенергії за агрегатами. Побудова електробалансів за агрегатами, задіяними у процесі виробництва кожного окремого виду продукції, здійснюється шляхом послідовного вирішення трьох оптимізаційних задач, кожна з яких є подібною до наведеної вище.

Наприклад, задача визначення невідомої структури витратної частини електробалансу за агрегатами, задіяними у виробництві мідних анодів, здійснюється шляхом вирішення наступної оптимізаційної задачі:

$$z = \prod_{i=1}^{25} \left(\frac{1}{51,91\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(W_1-387,46)^2}{2 \cdot 51,91}} \cdot \dots \cdot \frac{1}{10,29\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(W_{25}-76,81)^2}{2 \cdot 10,29}} \right) \rightarrow \max$$

$$270,01 \leq w_1^{\text{ар}} \leq 473,67$$

...

$$53,53 \leq w_{25}^{\text{ар}} \leq 93,91$$

$$\sum_{i=1}^{25} w_i^{\text{ар}} = 2856,7$$

Отриманий шляхом вирішення зазначеної оптимізаційної задачі добовий електробаланс за агрегатами, задіяними в процесі виробництва мідних анодів, наведено на рис. 4.9.

Визначення невідомої структури витратної частини електробалансу за агрегатами, задіяними в виробництві мідних катодів, здійснюється шляхом вирішення відповідної оптимізаційної задачі:

$$z = \prod_{i=1}^{22} \left(\frac{1}{414,81\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(W_1-5112,44)^2}{2 \cdot 414,81}} \cdot \dots \cdot \frac{1}{2,06\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(W_{22}-25,39)^2}{2 \cdot 2,06}} \right) \rightarrow \max$$

$$3769,55 \leq w_1^{\text{ар}} \leq 5820,67$$

...

$$18,72 \leq w_{22}^{\text{ар}} \leq 28,90$$

$$\sum_{i=1}^{22} w_i^{\text{ар}} = 10900,51$$

Результати побудови добового балансу споживання електроенергії за агрегатами, задіяними в процесі виробництва мідних катодів, наведено на рис. 4.10.

З метою визначення невідомої структури витратної частини електробалансу за агрегатами, задіяними в підготовці мідного лому, вирішується наступна оптимізаційна задача:

$$z = \prod_{i=1}^7 \left(\frac{1}{1154.333\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w_1-7197.44)^2}{2 \cdot 1154.333}} \cdot \dots \cdot \frac{1}{14.38\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w_7-89.7)^2}{2 \cdot 14.38}} \right) \rightarrow \max$$

$$4026.58 \leq w_1^{\text{ар}} \leq 8681.95$$

...

$$50.18 \leq w_7^{\text{ар}} \leq 108.2$$

$$\sum_{i=1}^7 w_i^{\text{ар}} = 10756.47$$

Структура отриманого з застосуванням ймовірнісно-статистичних методів добового електробалансу за агрегатами, задіяними в процесі підготовки мідного лому, представлена на рис. 4.11.

Порівняння результатів визначення числових значень статей електробалансів за агрегатами, отриманих з застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу, та розрахунково-аналітичного методів наведено в таблицях 4.9-4.11. Максимальна похибка окремих статей електробалансів визначених ймовірнісно-статистичним і розрахунково-аналітичним методами за агрегатами підприємства складала 17%.

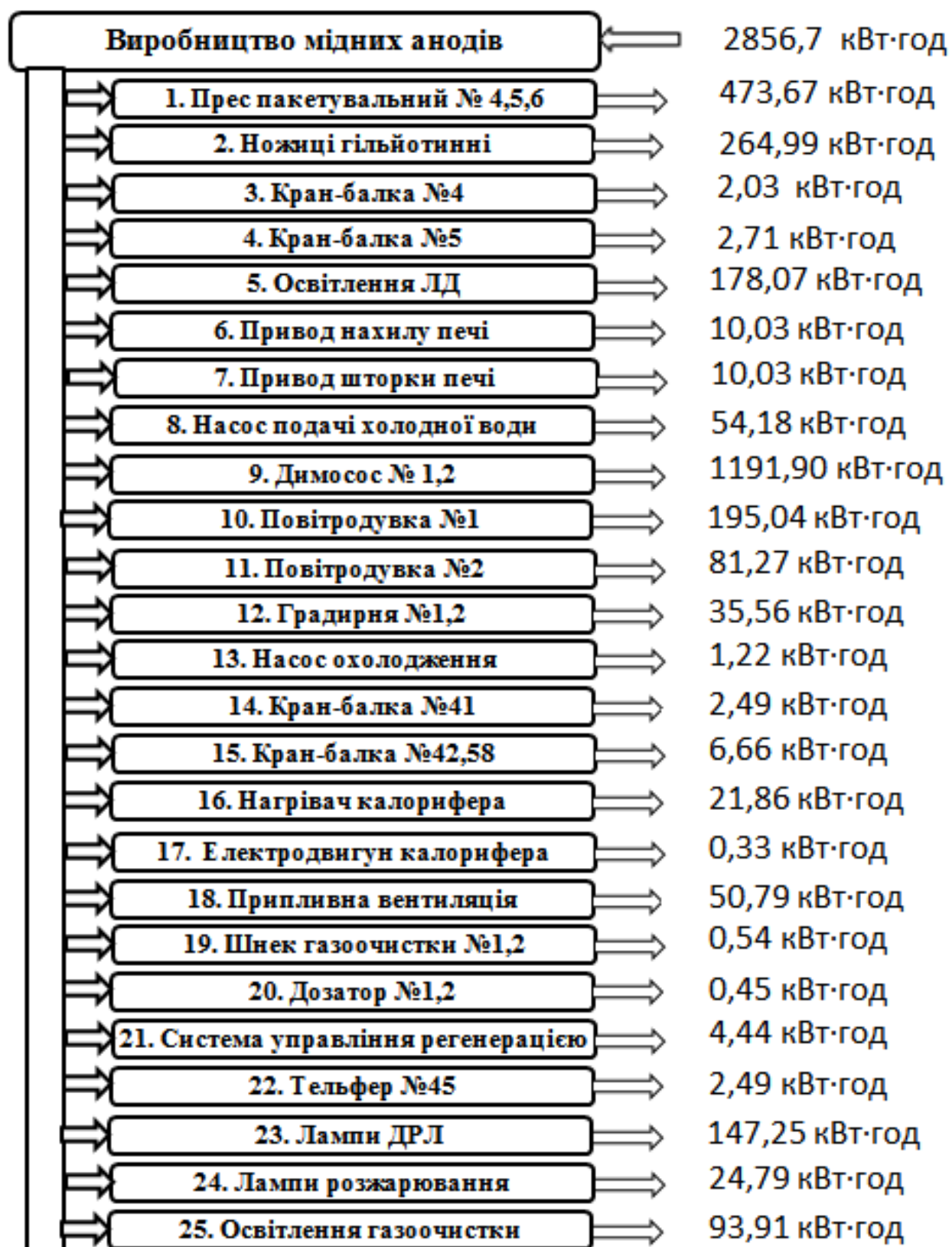


Рис. 4.9. Добовий баланс споживання електроенергії за агрегатами, задіяними в процесі виробництва мідних анодів

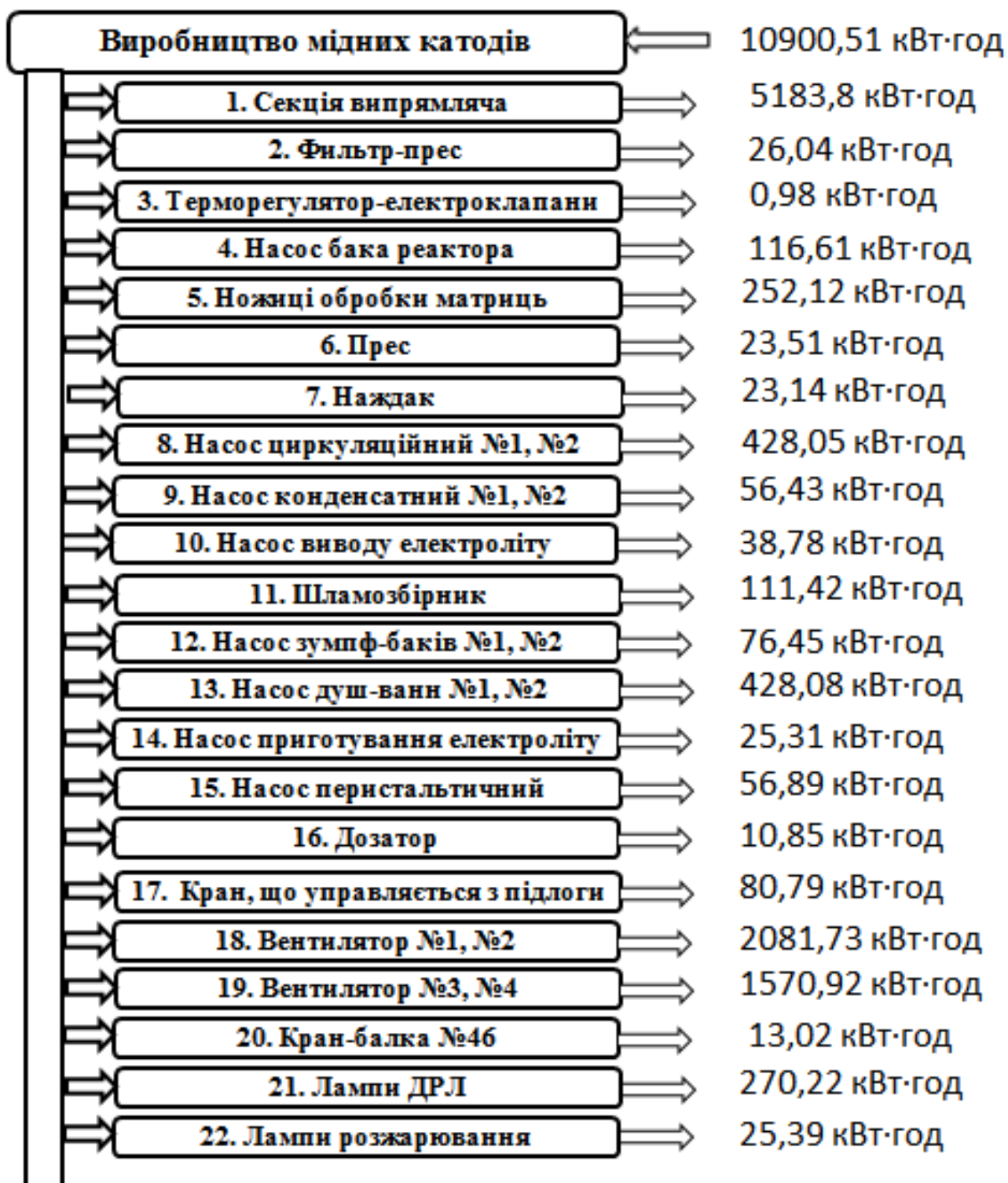


Рис. 4.10. Добовий баланс споживання електроенергії за агрегатами, задіяними в процесі виробництва мідних катодів



Рис. 4.11. Добовий баланс споживання електроенергії за агрегатами, задіяними в процесі підготовки мідного лому

Таблиця 4.9

Витратна частина добового електробалансу за агрегатами, задіяними в процесі підготовки мідного лому, отримана з застосуванням ймовірісно-статистичних методів та розрахунково-аналітичних методів

№ обладнання (таблиця 4.3)	W _{m1} , кВт·год (Ймовірісно-статистичний підхід)	W _{m2} , кВт·год (Розрахунково-аналітичний метод)	Похибка, %
1	7236,27	7225,35	0,15
2	258,17	259,17	0,39
3	2975,57	2984,38	0,30
4	53,98	54,19	0,39
5	54,76	54,98	0,40
6	88,01	88,35	0,38
7	89,70	90,05	0,39

Таблиця 4.10

Витратна частина добового електробалансу за агрегатами, задіяними в процесі виробництва мідних анодів, отримана з застосуванням ймовірно-статистичних методів та розрахунково-аналітичним методів

№ обладнання (таблиця 4.1)	W _{m1} , кВт·год (Ймовірно-статистичний підхід)	W _{m2} ,кВт·год (Розрахунково-аналітичний метод)	Похибка, %
1	473,67	469,84	0,82
2	264,99	262,85	0,81
3	2,03	2,46	17,48
4	2,71	3,29	17,63
5	178,07	176,63	0,82
6	10,03	12,09	17,04
7	10,03	12,09	17,04
8	54,18	53,74	0,82
9	1191,90	1182,25	0,82
10	195,04	193,46	0,82
11	81,27	80,61	0,82
12	35,56	40,30	11,76
13	1,22	1,48	17,57
14	2,49	3,02	17,55
15	6,66	8,06	17,37
16	21,86	25,85	15,44
17	0,33	0,39	15,38
18	50,79	50,38	0,81
19	0,54	0,65	16,92
20	0,45	0,54	16,67
21	4,44	5,37	17,32
22	2,49	3,02	17,55
23	147,25	146,05	0,82
24	24,79	29,11	14,84
25	93,91	93,15	0,82

Таблиця 4.11

Витратна частина добового електробалансу за агрегатами, задіяними в процесі виробництва мідних катодів, отримана з застосуванням ймовірнісно-статистичних методів та розрахунково-аналітичним методів

№ обладнання (таблиця 4.2)	W _{m1} , кВт·год (Ймовірнісно-статистичний підхід)	W _{m2} ,кВт·год (Розрахунково-аналітичний метод)	Похибка, %
1	5183,80	5280,54	1,83
2	26,04	26,89	3,16
3	0,98	1,01	2,97
4	116,61	120,17	2,96
5	252,12	258,17	2,34
6	23,51	24,28	3,17
7	23,14	23,90	3,18
8	428,05	437,00	2,05
9	56,43	58,27	3,16
10	38,78	40,06	3,20
11	111,42	115,04	3,15
12	76,45	78,44	2,54
13	428,08	437,00	2,04
14	25,31	26,15	3,21
15	56,89	58,83	3,30
16	10,85	11,21	3,21
17	80,79	84,04	3,87
18	2081,73	2016,92	3,21
19	1570,92	1479,07	6,21
20	13,02	13,45	3,20
21	270,22	283,87	4,81
22	25,39	26,22	3,17

Застосування ймовірісно-статистичних методів дозволяє будувати не менш достовірні електробаланси за видами продукції та за агрегатами, ніж при використанні спрощеного розрахунково-аналітичного методу. Однак при цьому необхідно зазначити, що, у порівнянні з результатами використання розрахунково-аналітичного методу, електробаланси виробничих об'єктів, одержані з застосуванням ймовірісно-статистичного підходу, навіть в умовах, коли відомими є тільки фактичні загальні обсяги споживання електроенергії на підприємстві, слід вважати дещо більш об'єктивними, оскільки вони обґрунтовані принаймні думками фахівців-експертів чи результатами вибіркового спостереження, встановленими законами розподілу відповідних обсягів електроспоживання та знаходженням найбільш ймовірної структури їх витратної частини.

4.2 Побудова електробалансів виробничих об'єктів за відомими обсягами споживання електроенергії та виробництва продукції на підприємстві

Застосування ймовірісно-статистичного підходу до побудови електробалансів за видами продукції в зазначених умовах, представленого в розділі 2.3, може бути проілюстровано на прикладі промислового підприємства, яке спеціалізується на випуску пакувальної продукції.

На зазначеному підприємстві функціонує система обліку, яка фіксує загальний обсяг споживання електроенергії у чотирьох підрозділах, кожен з яких виробляє окремий вид продукції (рис 4.12).

На зазначеному підприємстві відомими є загальні обсяги споживання електроенергії зазначених підрозділів (рис. 4.11), а також обсяги виробленої у них продукції (рис. 4.13-4.17).

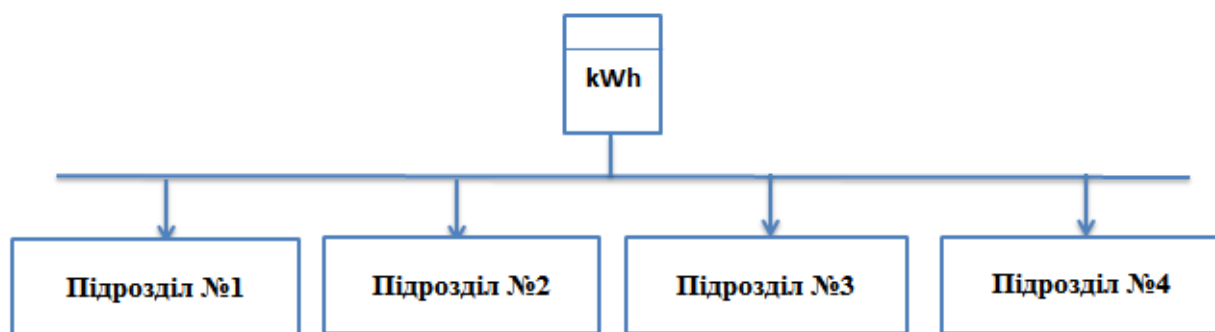


Рис. 4.12. Схема здійснення обліку електроспоживання підрозділів підприємства, яке спеціалізується на випуску пакувальної продукції

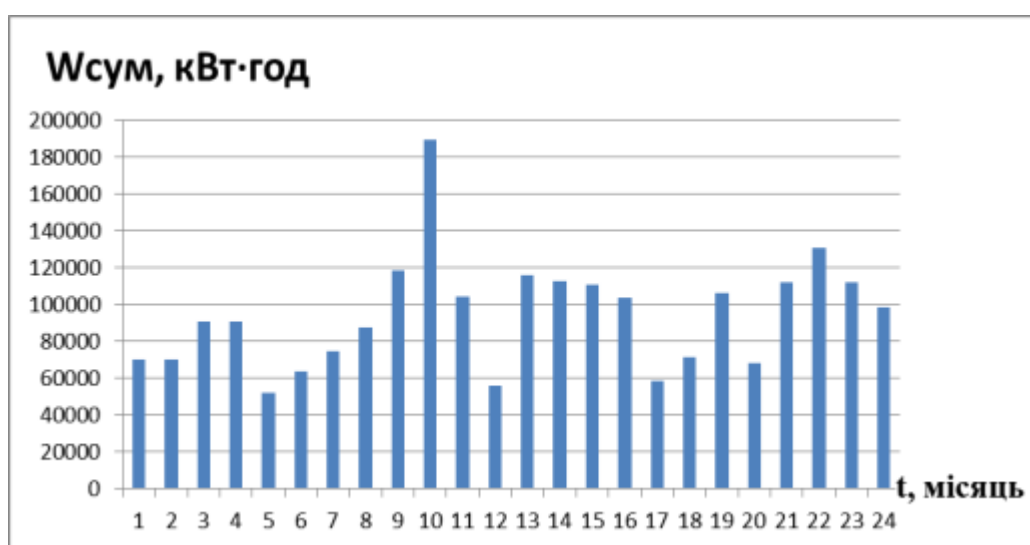


Рис. 4.13. Динаміка зміни загальних обсягів споживання електроенергії у чотирьох виробничих підрозділах підприємства.

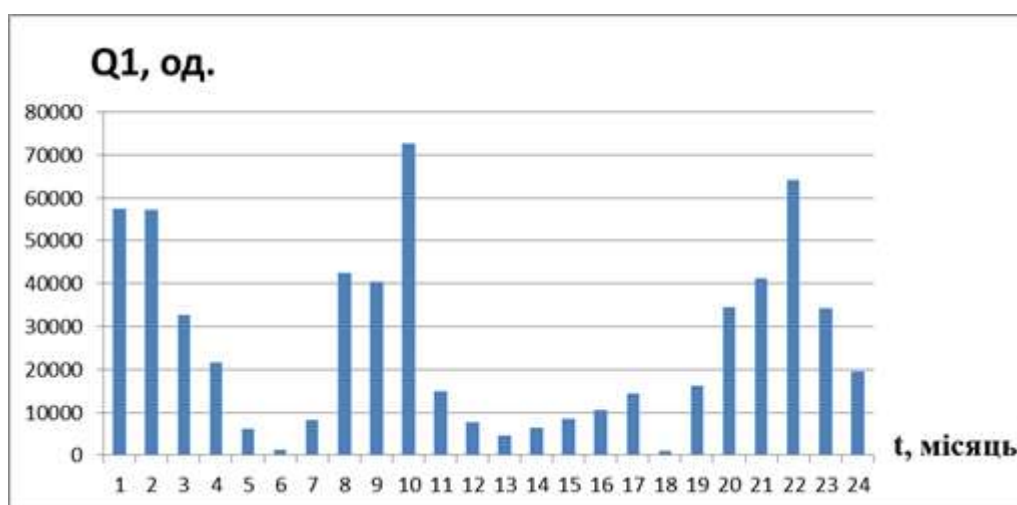


Рис. 4.14. Динаміка зміни обсягу виробництва продукції №1

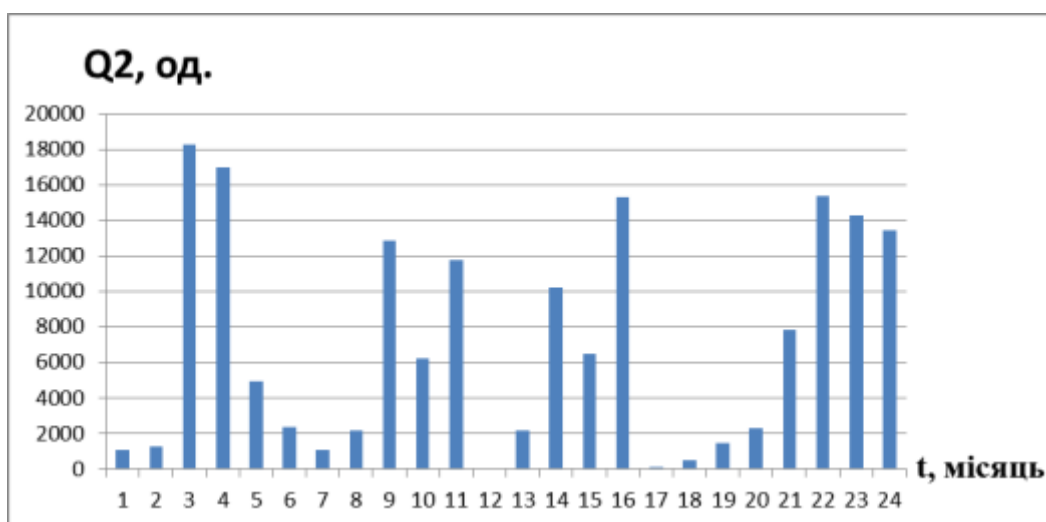


Рис. 4.15. Динаміка зміни обсягу виробництва продукції №2

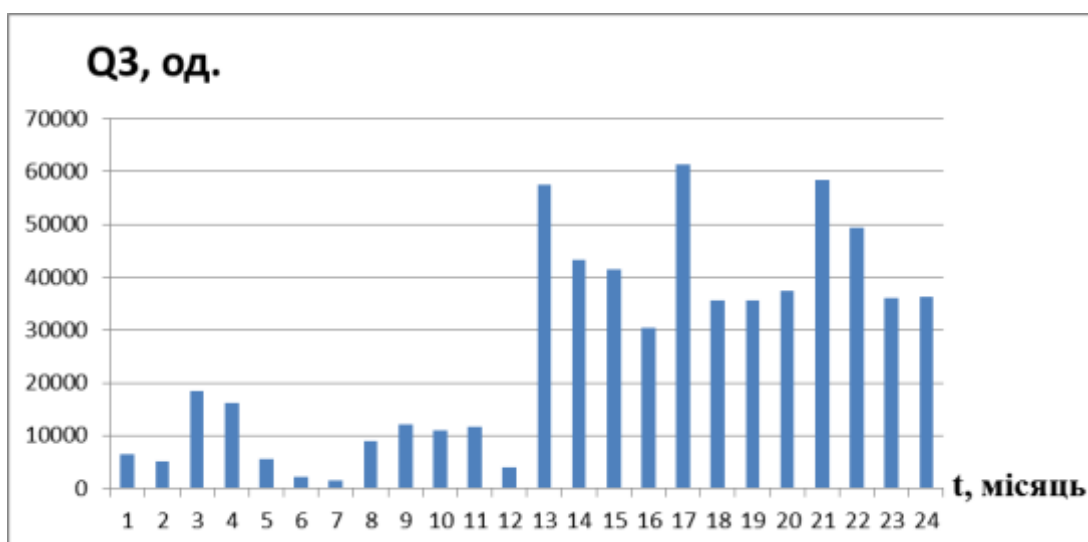


Рис. 4.16. Динаміка зміни обсягу виробництва продукції №3

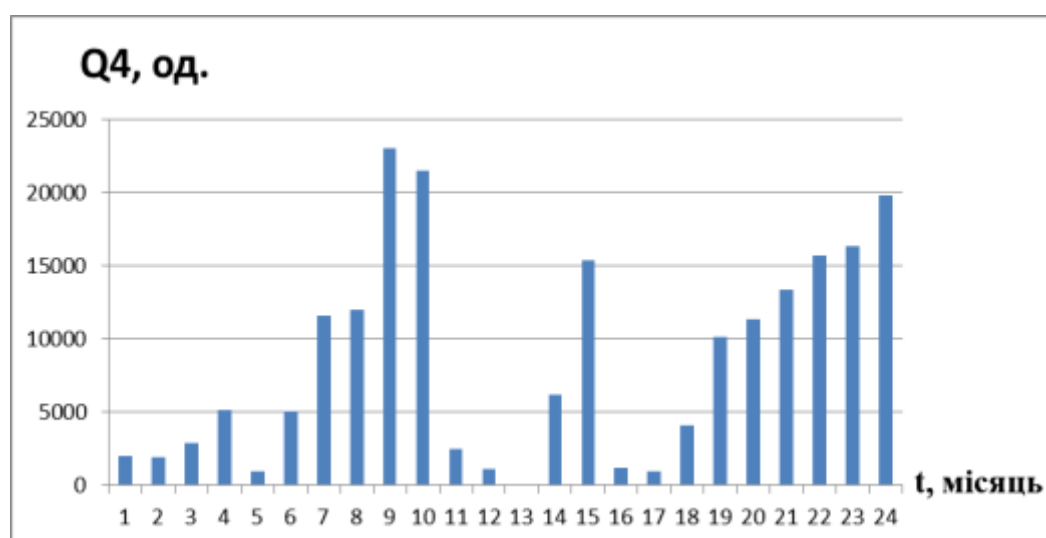


Рис. 4.17. Динаміка зміни обсягу виробництва продукції №4

Числові значення статей витратної частини середньомісячного електробалансу підприємства за видами продукції можуть бути визначені на основі зазначених статистичних даних шляхом побудови багатofакторної лінійної регресійної моделі, що відображає залежність між загальним обсягом споживання електроенергії чотирма підрозділами, що розглядаються, та обсягами виробництва відповідної продукції:

$$W_{\text{сум}} = 6,06Q_1 + 0,59Q_2 + 1,37Q_3 + 1,42Q_4$$

За фізичним змістом коефіцієнти побудованої математичної моделі являють собою середньомісячні величини питомої витрати електричної енергії на виробництво кожного з видів продукції.

Для розрахунку констант рівняння регресії використовувався Scikit-learn, який є модулем програмного продукту Python. Перевірка вихідної системи рівнянь, на підставі якої визначено параметри (константи) одержаного рівняння регресії, засвідчила, що ця система є добре обумовленою. Зокрема, це підтверджують результати перевірки обумовленості зазначеної системи рівнянь за критеріями, розрахованими згідно методу характеристичних коренів

$$\text{(додаток В): } \alpha = \frac{|\lambda_{\max}|}{|\lambda_{\min}|} = 19,2 < \alpha_{\text{табл}} = 20,3, A = 0,703 > A_{\text{табл}} = 0,68.$$

Перевірка дозволяє стверджувати, що коефіцієнти математичної моделі електроспоживання є достатньо близькими до реальних величин середньомісячних питомих витрат електроенергії на виробництво кожного з чотирьох видів продукції, що розглядаються. Однак константи одержаного рівняння регресії точно не дорівнюють фактичним питомим витратам електроенергії, оскільки завжди існує певна залишкова похибка моделювання.

Для врахування зазначеної залишкової похибки для кожного з коефіцієнтів математичної моделі за формулою 2.31 мають бути визначені довірчі інтервали, фізичним змістом яких є діапазони можливих значень середньомісячних питомих витрат електроенергії на виробництво відповідних

видів продукції. З метою знаходження якомога більш достовірних діапазонів можливих значень питомої витрати електроенергії вся наявна вибірка статистичних даних з використанням методів кластерного аналізу розділена на однорідні групи за обсягами виробництва продукції. Визначення однорідних груп даних здійснювалось з застосуванням пакету програм Statistica.

Для кожної з зазначених однорідних груп даних побудована окрема математична модель, для параметрів (коефіцієнтів) якої встановлювалися свої довірчі інтервали. Результати визначення діапазонів можливих значень питомої витрати електроенергії при різних обсягах виробництва продукції наведено в табл.4.12.

Подальша побудова електробалансу підприємства за видами продукції виконується за алгоритмом наведеним в розділі 2.2. При цьому в процесі вирішення відповідної оптимізаційної задачі на основі довірчих інтервалів, встановлених для коефіцієнтів відповідних лінійних багатофакторних математичних моделей (табл. 4.12), пропонується додатково уточнювати та обґрунтовувати обмеження можливих обсягів споживання електроенергії на виробництво кожного з видів продукції.

Визначення кількісних значень статей витратної частини електробалансу за видами продукції може бути продемонстровано на прикладі одного з місяців роботи підприємства. Загальних обсяг споживання електроенергії чотирма виробничими підрозділами, що розглядаються, визначений за приладами обліку, протягом відповідного місяця дорівнював $W^{\text{під}} = 90658.7$ кВт·год. При цьому обсяги виробленої продукції за той же період відповідно складали: $Q_1 = 32760$ од., $Q_2 = 18300$ од., $Q_3 = 18434$ од., $Q_4 = 2854$ од. Наявні на підприємстві системи обліку електроспоживання дозволили отримати статистичні дані за якими було визначено закони розподілу можливих обсягів електроспоживання за видами продукції (табл. 4.13).

Таблиця 4.12

Діапазони можливих значень питомої витрати електроенергії для однорідних груп статистичних даних за обсягом виробництва продукції

Номер групи	Обсяги виробленої продукції	dmax	dmin
1	Q1=[1000-9000]	13,89474	0
2	Q1=[30000-60000]	1,772718	0,69234
3	Q1=[10000-25000]	10,60256	0
4	Q2=[4000-8000]	21,21651	0
5	Q2=[10000-20000]	8,377193	1,470229
6	Q2=[20-2500]	48,75092	0
7	Q3=[1000-20000]	30,5084	0
8	Q3=[40000-60000]	2,71285	0,205263
9	Q3=[30000-38000]	4,973168	0
10	Q4=[50-5000]	26,8324	0
11	Q4=[16000-2500]	3,254712	3,032235
12	Q4=[16000-25000]	9,813653	2,718329

Таблиця 4.13

Параметри законів розподілу можливих обсягів споживання електроенергії на виробництво окремих видів продукції

Вид продукції	μ_{W_i}	σ_{W_i}	$W_{\min}$	$W_{\max}$
1	31512,05	17229,52	7598,9	66114,5
2	16892,5	19000,33	37,9	90011,9
3	40242,86	22939,8	5252,4	85435,7
4	5893,096	3878,921	221,9	12968,4

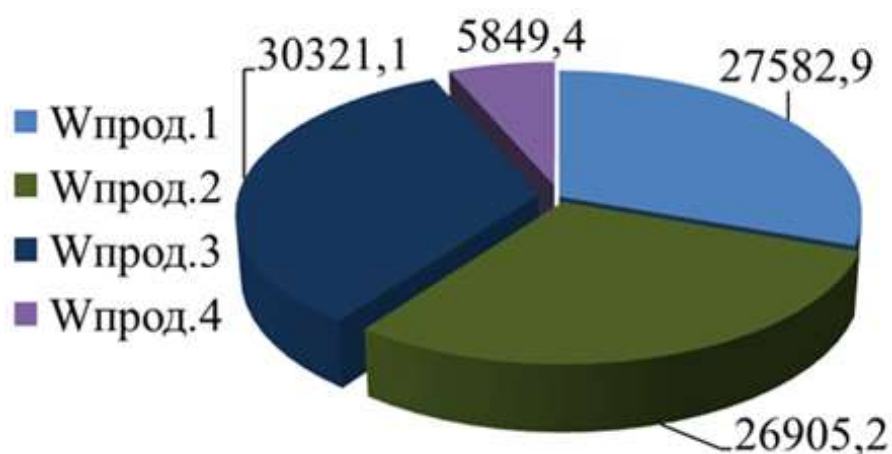


Рис. 4.18. Витратна частина баланс споживання електроенергії за видами продукції

Як зазначалося в розділі 2, задача визначення невідомої структури витратної частини електробалансу за видами продукції здійснюється шляхом вирішення оптимізаційної задачі з відповідною цільовою функцією та уточненими обмеженнями можливих обсягів електроспоживання на виробництво кожного з видів продукції:

$$z = \prod_{i=1}^4 \left(\frac{1}{31512,05\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(W_1-17273,31)^2}{2 \cdot 31512,05}} \cdot \dots \cdot \frac{1}{3878,921\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(W_4-5893,096)^2}{2 \cdot 3878,921}} \right) \rightarrow \max$$

$$32760 \cdot 0,69 \leq W_1^{\text{np}} \leq 32760 \cdot 1,77$$

$$\dots$$

$$0 \leq W_4^{\text{np}} \leq 2854 \cdot 26,8$$

$$\sum_{i=1}^3 W_i^{\text{np}} = 90658,7$$

Отримана в результаті вирішення зазначеної оптимізаційної задачі витратна частина балансу споживання електроенергії за видами продукції наведена на рис. 4.18.

Порівняння розрахованих з застосуванням ймовірісно-статистичного підходу статей електробалансів (рис. 4.18.) чотирьох видів з фактичними значеннями цих параметрів ($W_{\text{прод.1}} = 25468,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, $W_{\text{прод.2}} = 26234,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, $W_{\text{прод.3}} = 32291,2$, $W_{\text{прод.4}} = 5564,1$) дозволило встановити, що максимальна похибка розрахункових статей електробалансу не перевищувала 6,5%.

Таким чином, у порівнянні з результатами використання розрахунково-аналітичного методу, застосування ймовірісно-статистичного підходу в умовах, коли відомими є обсяги споживання електроенергії та виробництва продукції на підприємстві, дозволяє будувати значно більш об'єктивні електробаланси, оскільки вони не тільки мають найбільш ймовірну структуру витратної частини, але й додатково обґрунтовані також фактичними обсягами

продукції, які, здебільшого, найбільш суттєво впливають на витрати електричної енергії у виробничому секторі.

Приклад побудови електробалансів виробничих об'єктів за наявності аналітичних залежностей для розрахунку електроспоживання агрегатів (Ситуація 3, рис. 2.3) наведено в додатку Ж.

4.3 Приклад визначення ділянок схеми електропостачання та агрегатів, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів

Застосування методичних засад визначення найбільш «проблемних» ділянок схеми електропостачання або видів обладнання, які створюють найбільшу невизначеність при побудові балансів споживання електричної енергії (розділ 2.5), може бути проілюстровано на прикладі виробничого підрозділу промислового підприємства, принципова схема електропостачання якого представлена на рис. 4.19. Склад технологічного обладнання підрозділу наведено в таблиці 4.20.

У виробничому підрозділі, що розглядається, проведено опитування спеціалістів-експертів стосовно інтервалів, в яких можуть знаходитись фактичні обсяги споживання електричної енергії кожним з видів обладнання, а також частоти, з якою дійсні значення обсягів електроспоживання цього обладнання можуть спостерігатись в межах відповідних інтервалів.

Опитування експертів та узгодження їх думок з цих питань здійснювалось за методикою, наведеною в розділі 2.2. Наприклад, графічне представлення узгодженої думки експертів стосовно можливих обсягів годинного електроспоживання обладнання номер 1 наведено на рис. 4.20.

Згідно оцінок експертів (рис. 4.20) фактичне електроспоживання транспортера ніколи не знаходиться в інтервалах $6 \dots 6,75$ та $9 \dots 10$ кВт·год; в інтервалі $6,75 \dots 7$ кВт·год дійсне споживання електроенергії цим обладнанням знаходиться *рідко*; в інтервалі $7 \dots 8$ кВт·год – *часто*; а в інтервалі $8 \dots 9$ кВт·год – *досить часто*. Результати опитування експертів стосовно можливих обсягів споживання електричної енергії всіма видами обладнання, що розглядаються, наведено в таблиці 4.14.

Виходячи з принципової схеми електропостачання виробничого підрозділу, наведеної на рис. 4.19, можна визначити, що існує 17 варіантів встановлення одного додаткового приладу обліку електроспоживання. А саме, з використанням цього приладу облік може здійснюватись: окремо для кожного з агрегатів (варіанти з 1-го по 12-й); спільно для агрегатів 6 та 7 (варіант 13); спільно для агрегатів 6, 7 та 8 (варіант 14); спільно для агрегатів 9, 10, 11 та 12 (варіант 15); спільно для агрегатів 10, 11 та 12 (варіант 16); спільно для агрегатів 11 та 12 (варіант 17).

Користуючись лише даними табл. 4.14, зробити однозначні висновки щодо виду обладнання або ділянки схеми електропостачання, обсяг споживання електроенергії яких може вносити найбільшу невизначеність при побудові електробалансів виробничого підрозділу, що розглядається, неможливо. Для одержання відповіді на це питання на основі зазначених в табл. 4.14 експертних даних було згенеровано з застосуванням методу Монте-Карло 5000 варіантів псевдо реальних електробалансів підрозділу, окремі з яких для прикладу наведено в таблиці 4.15.

Таблиця 4.14

Результати опитування експертів стосовно можливих обсягів споживання електричної енергії кожним з видів обладнання підрозділу

№ з/п	Назва обладнання	Частота знаходження фактичного обсягу електроспоживання у відповідному інтервалі					
		Часто		Досить часто		Рідко	
		Межі інтервалів можливих обсягів електроспоживання					
		Pn	Pv	Pn	Pv	Pn	Pv
1	Транспортер	7	8	8	9	6,75	7
2	Млин шаровий	35	40	31,5	35	40	40,5
3	Міксер	1,4	1,5	1,6	1,65	1,65	1,7
4	Електронасос	6	6,3	5,5	6	5,4	5,5
5	Басейн з двома мішалками	17	17,5	17,5	18	15	16
6	Басейн для збору води	4,5	5,5	5,5	5,8	5,8	6
7	Прес гідравлічний	50,5	52,8	50	50,5	48	50
8	Сушарка	30	35	37	38,5	35	37
9	Конвеєрна лінія	5,852	6	5,852	6	6	6,16
10	Двохярусна піч	80	83,7	76	80	74,25	76
11	Вентилятор	6,2	6,25	6,25	6,3	6	6,1
12	Компресор	24	24,5	23	24	23	23,1

Таблиця 4.15

Окремі варіанти псевдо реальних електробалансів виробничого підрозділу

№ з/п	Назва обладнання	Умовний номер варіанту електробалансу			
		1	2	...	5000
		Обсяг споживання електроенергії			
1	Транспортер	7.92	8.64	...	9.00
2	Млин шаровий	36.68	31.66	...	37.15
3	Міксер	1.61	1.48	...	1.64
4	Електронасос	6.13	6.01	...	5.69
5	Басейн з двома мішалками	17.13	17.80	...	17.21
6	Басейн для збору води	5.76	5.53	...	5.43
7	Прес гідравлічний	50.38	50.04	...	52.44
8	Сушарка	30.98	37.19	...	30.01
9	Конвеєрна лінія	5.89	5.91	...	6.01
10	Двохярусна піч	77.69	81.52	...	75.28
11	Вентилятор	6.22	6.22	...	6.25
12	Компресор	24.10	24.03	...	23.05
13	$W_{\Sigma n.p_j}$	270.50	276.03	...	269.14

Якщо з метою верифікації електробалансів підрозділу додатковий лічильник споживання електроенергії буде встановлено безпосередньо біля агрегату №1 (перший з зазначених вище варіантів можливого місця його встановлення), то приймається, що обсяги електроспоживання цього обладнання, наведені в табл. 4.15, є дійсними, фактичними.

Виходячи з цього припущення, розрахункові обсяги споживання електричної енергії для всіх інших видів обладнання (крім агрегату №1) окремо для кожного з 5000 варіантів псевдо реальних електробалансів виробничого підрозділу визначаються шляхом вирішення наведеної у розділі 2.2 оптимізаційної задачі. Окремі результати цих розрахунків для прикладу наведено в таблиці 4.26.

В результаті виконання аналогічних розрахунків мають бути побудовані 17 таблиць розрахункових енергобалансів виробничого підрозділу, подібних до таблиці 4.16, для всіх можливих варіантів місця встановлення додаткового приладу обліку споживання електричної енергії.

На підставі даних кожної з таких таблиць за формулою (2.61) визначаються числові значення показника *IRR* для всіх варіантів встановлення додаткового лічильника. Наприклад, для варіанту, коли додатковий прилад обліку електроспоживання буде встановлено безпосередньо біля агрегату №1, числове значення цього показника дорівнює:

$$IRR_{n1} = \frac{1}{5000} \sum ((7,92 - 7,92)^2 + \dots + (9 - 9)^2) + \dots + \\ + \frac{1}{5000} \sum ((24,1 - 23,26)^2 + \dots + (23,05 - 23,1)^2) = 63,821$$

Розраховані подібним чином значення показника *IRR* для інших варіантів місця встановлення додаткового лічильника електроспоживання наведено в таблиці 4.17.

Таблиця 4.16

Окремі варіанти розрахункових електробалансів підрозділу при встановленні додаткового лічильника безпосередньо біля агрегату №1

№ з/п	Назва обладнання	Умовний номер варіанту електробалансу			
		1	2	...	5000
		Обсяг споживання електроенергії			
1	Транспортер	7,92	8,64	...	8,99
2	Млин шаровий	40,26	40,50	...	39,98
3	Міксер	1,70	1,70	...	1,63
4	Електронасос	5,66	6,30	...	5,4
5	Басейн з двома мішалками	15,26	16,04	...	15
6	Басейн для збору води	6,00	6,00	...	5,78
7	Прес гідравлічний	48,26	49,04	...	48
8	Сушарка	35,26	36,04	...	34,98
9	Конвеєрна лінія	6,16	6,16	...	5,98
10	Двохярусна піч	74,51	75,29	...	74,25
11	Вентилятор	6,26	6,30	...	6
12	Компресор	23,26	24,04	...	23,1
13	$W_{\Sigma n.p_j}$	270,50	276,03	...	269,14

Таблиця 4.17

Розрахункові значення коефіцієнту *IRR*

Варіант встановлення додаткового приладу обліку	Ділянка схеми або назва обладнання	<i>IRR</i>
2	Агрегат 2	36,80
16	Агрегати 10,11,12	36,95
15	Агрегати 9,10,11,12	37
10	Агрегат 10	37,81
8	Агрегат 8	51,83
14	Агрегати 6,7,8	57,63
13	Агрегати 6,7	61,59
7	Агрегат 7	62
1	Агрегат 1	63,82
6	Агрегат 6	63,92
5	Агрегат 5	64
17	Агрегати 11,12	64,36
12	Агрегат 12	64,63
3	Агрегат 3	64,93
4	Агрегат 4	65
9	Агрегат 9	65,31
11	Агрегат 11	65,55

Дані таблиці 4.17 свідчать, що найбільша невизначеність при побудові електробалансів даного виробничого підрозділу виникає у вузлі схеми електропостачання, до якого приєднане обладнання №2 (показник IRR для цих вузлів схеми має найменшу величину). Розрахунки показали, що верифікація в відповідному вузлі схеми має скоригувати числові значення статей балансу в середньому на 6%. Також на цій ділянці схеми електропостачання у подальшому доцільно встановити постійні прилади обліку, які є необхідними для систематичного контролю обсягів електроспоживання та ефективності використання електричної енергії.

4.4 Приклади застосування ймовірно-статистичних методів для оперативного контролю та аналізу ефективності використання електричної енергії на виробничих об'єктах

Застосування ймовірно-статистичних методів для оперативного контролю та аналізу ефективності використання електричної енергії може бути продемонстровано на прикладі підприємства хімічної промисловості, одним з основних видів продукції якого є аміак. Технологічна схема виробництва аміаку наведена на рис. 4.21.

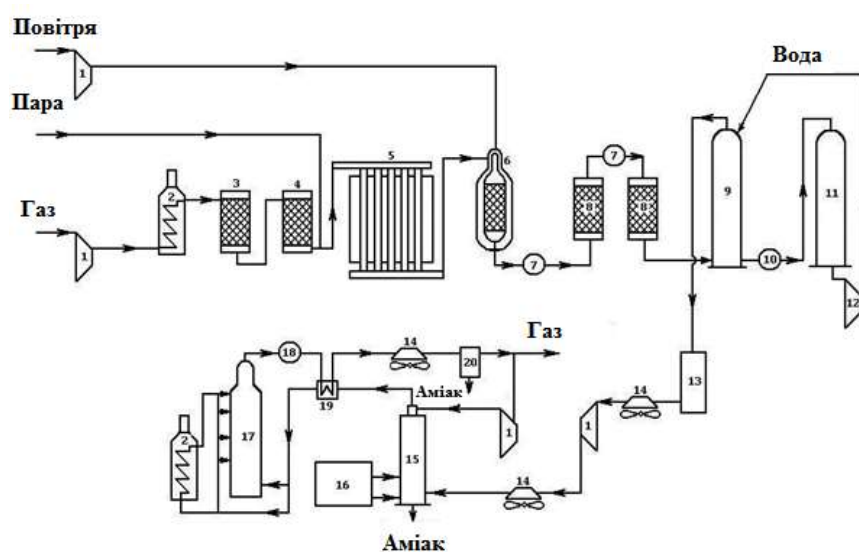


Рис. 4.21. Технологічна схема процесу виробництва аміаку.

На рис. 4.21 зображене наступне технологічне обладнання: 1 – компресор, 2 – підігрівачі, 3 – апарат для гідрування сірковоорганічних з'єднань, 4 – абсорбер H_2S , 5 – трубчаста піч, 6 – шахтний конвертор, 7 – парові котли, 8 – конвертори CO , 9 – абсорбер CO_2 , 10 – кип'ятильник, 11 – регенератор розчину моноетаноламіна, 12 – насос, 13 – апарат для гідрування CO та CO_2 , 14 – повітряні холодильники, 15 – конденсаційна колона, 16 – випарник рідкого NH_3 , 17 – колона синтезу NH_3 , 18 – водопідігрівач, 19 – теплообмінник, 20 – сепаратор.

4.4.1 Приклад вибору складу чинників, що впливають на обсяги електроспоживання технологічних об'єктів

4.4.1.1 Застосування експертного опитування на основі апарату нечіткої логіки для попередньої оцінки впливу чинників на електроспоживання

Для вирішення цієї задачі на зазначеному підприємстві було сформовано групу з п'яти експертів, до якої увійшли головний енергетик, технолог, інженер метрологічної служби та два оператори установок. Експертам було запропоновано, використовуючи метод «мозкового штурму», визначити попередній склад чинників, які можуть впливати на електроспоживання технологічного процесу, що розглядається. В результаті обговорення експертами було запропоновано наступний склад таких чинників: обсяг виробництва аміаку, обсяг виробництва пари з тиском 30 атм., обсяг виробництва пари з тиском 16 атм., обсяг постачання продувних газів на УСВ "Monsanto" та температура навколишнього середовища.

Після цього кожному з експертів окремо було запропоновано, виходячи з їх думок щодо можливого рівня впливу кожного з наведених вище чинників на обсяг електроспоживання, у спеціальних анкетах зробити позначку на

інтервальній шкалі з відповідними лінгвістичними оцінками. Кількість інтервальних шкал у кожній анкеті дорівнювала кількості визначених чинників.

Обробка заповнених експертами анкет здійснювалась з використанням математичного апарату нечіткої логіки. Для обробки результатів опитування експертів було використано сімейство з п'яти кусково-лінійних функцій приналежності лінгвістичних оцінок впливу кожного з чинників на обсяг електроспоживання. Приклад побудови таких функцій приналежності з позначеними експертами лінгвістичними оцінками ступеню впливу на електроспоживання кожного з чинників, що розглядаються, наведено на рис. 4.22 – 4.26. Обробка результатів опитування експертів здійснювалась за методикою, наведеною в розділі 3.1.1.3. Визначені шляхом відповідної обробки заповнених експертами анкет найбільш ймовірні рівні впливу кожного з чинників на обсяг електроспоживання наведено в табл. 4.18 - 4.22.

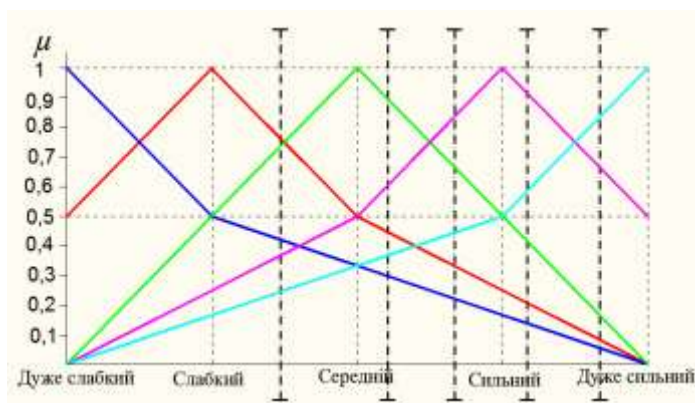


Рис. 4.22. Функції приналежності лінгвістичних оцінок ступеню впливу на електроспоживання обсягу виробництва аміаку

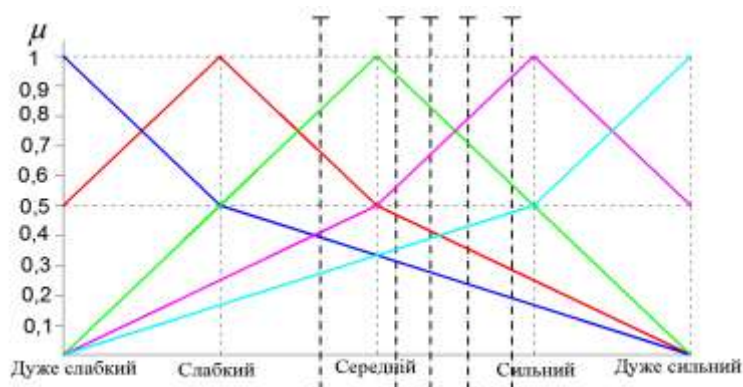


Рис. 4.23. Функції приналежності лінгвістичних оцінок ступеню впливу на електроспоживання обсягу постачання промислових газів на УСВ "Monsanto"

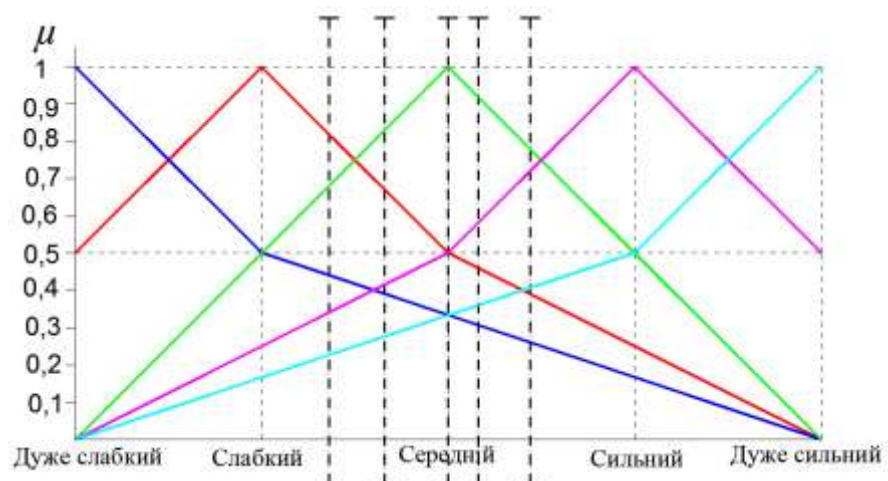


Рис. 4.24. Функції приналежності лінгвістичних оцінок ступеню впливу на електроспоживання обсягу виробництва пари з тиском 30 атм.

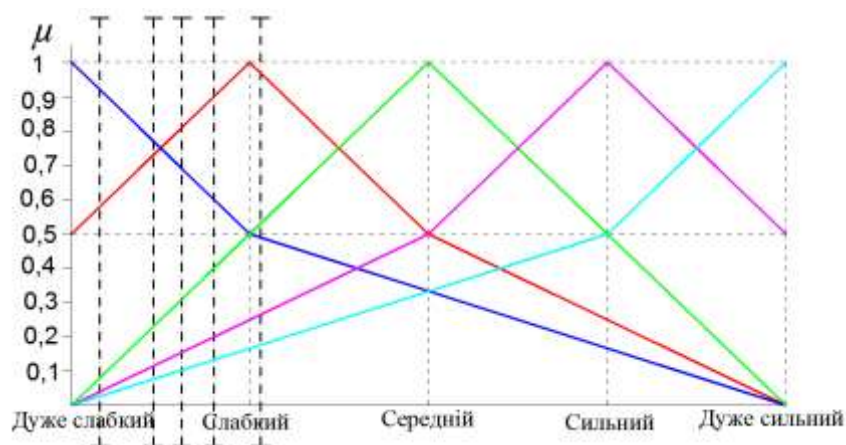


Рис. 4.25. Функції приналежності лінгвістичних оцінок ступеню впливу на електроспоживання обсягу виробництва пари з тиском 15 атм.

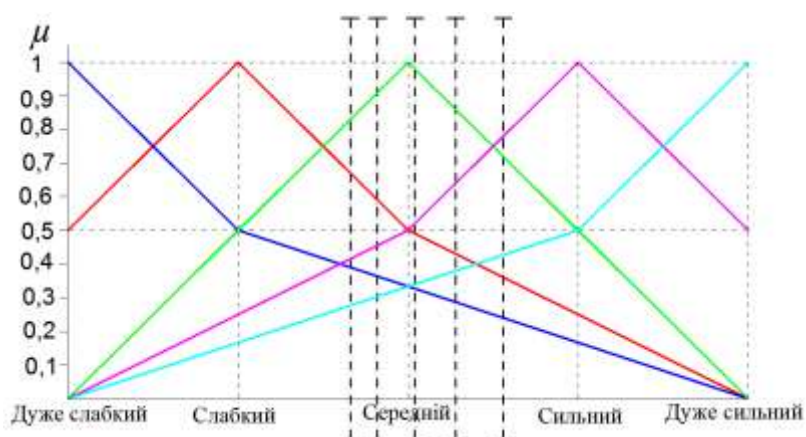


Рис. 4.26. Функції приналежності лінгвістичних оцінок ступеню впливу на електроспоживання температури навколишнього середовища.

Таблиця 4.18

Визначення найбільш ймовірного рівня впливу на електроспоживання обсягу виробництва аміаку

Оцінка впливу	Ймовірність збігу оцінки експерта з відповідним фактичним рівнем впливу					
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Середнє значення
Дуже слабкий	0,421	0,298	0,221	0,138	0,055	0,226
Слабкий	0,764	0,447	0,332	0,208	0,082	0,366
Середній	0,735	0,895	0,665	0,415	0,165	0,575
Сильний	0,368	0,605	0,835	0,915	0,665	0,677
Дуже сильний	0,245	0,368	0,445	0,585	0,835	0,495

Таблиця 4.19

Визначення найбільш ймовірного рівня впливу на електроспоживання обсягу постачання продувних газів на УСВ "Monsanto"

Оцінка впливу	Ймовірність збігу оцінки експерта з відповідним фактичним рівнем впливу					
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Середнє значення
Дуже слабкий	0,393	0,313	0,277	0,237	0,19	0,282
Слабкий	0,679	0,47	0,415	0,355	0,285	0,441
Середній	0,82	0,94	0,83	0,71	0,57	0,774
Сильний	0,41	0,56	0,67	0,79	0,93	0,672
Дуже сильний	0,273	0,353	0,39	0,43	0,476	0,384

Таблиця 4.20

Визначення найбільш ймовірного рівня впливу на електроспоживання обсягу виробництва пари з тиском 30 атм.

Оцінка впливу	Ймовірність збігу оцінки експерта з відповідним фактичним рівнем впливу					
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Середнє значення
Дуже слабкий	0,44	0,39	0,333	0,307	0,26	0,346
Слабкий	0,819	0,669	0,5	0,46	0,39	0,568
Середній	0,68	0,83	1	0,92	0,78	0,842
Сильний	0,34	0,415	0,5	0,58	0,72	0,511
Дуже сильний	0,227	0,277	0,333	0,36	0,407	0,321

Таблиця 4.21

Визначення найбільш ймовірного рівня впливу на електроспоживання обсягу виробництва пари з тиском 16 атм.

Оцінка впливу	Ймовірність збігу оцінки експерта з відповідним фактичним рівнем впливу					
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Середнє значення
Дуже слабкий	0,916	0,769	0,689	0,599	0,49	0,693
Слабкий	0,58	0,721	0,809	0,895	0,965	0,794
Середній	0,075	0,308	0,305	0,399	0,527	0,321
Сильний	0,037	0,115	0,155	0,2	0,262	0,154
Дуже сильний	0,027	0,77	0,103	0,133	0,176	0,242

Таблиця 4.22

Визначення найбільш ймовірного рівня впливу на електроспоживання температури навколишнього середовища

Оцінка впливу	Ймовірність збігу оцінки експерта з відповідним фактичним рівнем впливу					
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Експерт 5	Середнє значення
Дуже слабкий	0,39	0,363	0,327	0,289	0,252	0,324
Слабкий	0,669	0,59	0,49	0,43	0,36	0,508
Середній	0,83	0,91	0,98	0,86	0,72	0,86
Сильний	0,415	0,455	0,52	0,64	0,78	0,562
Дуже сильний	0,273	0,277	0,34	0,38	0,427	0,339

Спираючись на отримані результати (табл. 4.18-4.22) обробки лінгвістичних експертних оцінок впливу всіх чинників, можна зробити висновок, що найбільш ймовірно на обсяг споживання електричної енергії у технологічному процесі, що розглядаються, сильний вплив має обсяг виробництва аміаку, середній вплив здійснюють обсяги постачання продувних газів і виробництва пари з тиском 30 атм., а також температура навколишнього середовища. А такий чинник як обсяг виробництва пари з тиском 16 атм. має слабкий вплив і тому його можна рекомендувати до виключення з подальшого розгляду при побудові математичних моделей електроспоживання.

4.4.1.2 Визначення кількісних оцінок ступеню впливу чинників на електроспоживання

Отримати кількісні оцінки ступеню впливу на обсяг електроспоживання всіх чинників, що розглядаються, можна шляхом обробки зроблених експертами лінгвістичних оцінок з використанням методу попарних порівнянь. Процедура застосування цього методу наведена в додатку В.

Для отримання кількісної оцінки ступеню впливу кожного з чинників на електроспоживання, на основі лінгвістичних оцінок експертів була побудована матриця математичних очікувань оцінок рівнів «переваги», встановлених для кожної з відповідних пар чинників (табл. 4.23).

Таблиця 4.23

Математичні очікування оцінок рівнів «переваги» чинників

	Виробництво аміаку	Виробництво продувних газів	Виробництво пари тиском 30 атм.	Виробництво пари тиском 16 атм.	Температура навколишнього середовища
Виробництво аміаку	5/10	8/10	10/10	10/10	8/10
Виробництво продувних газів	2/10	5/10	6/10	10/10	6/10
Виробництво пари тиском 30 атм.	0/10	4/10	5/10	8/10	6/10
Виробництво пари тиском 16 атм.	0/10	0/10	2/10	5/10	4/10
Температура навколишнього середовища	2/10	4/10	4/10	6/10	5/10

Для отримання вектора відносної важливості чинників, що розглядаються, було застосовано ітеративний алгоритм, наведений в додатку Д. Вирішення цієї задачі було здійснено в програмному продукті Python. Одержані в результаті використання розрахунків значення коефіцієнтів відносної важливості кожного з чинників, що розглядаються, наведено в табл. 4.24.

Таблиця 4.24

Нормалізовані значення коефіцієнтів відносної важливості чинників

Виробництво аміаку	Виробництво продувних газів	Виробництво пари тиском 30 атм.	Виробництво пари тиском 16 атм.	Температура навколишнього середовища
0,364	0,227	0,165	0,177	0,364

Визначені значення коефіцієнтів відносної важливості чинників є основою для прийняття рішень, щодо доцільності їх включення до математичних моделей електроспоживання відповідних технологічних об'єктів. Зокрема, результати, наведені в табл. 4.24, свідчать, що вплив обсягу виробництва пари з тиском 16 атм. не обов'язково враховувати при побудові зазначених математичних моделей і встановлення цільових змінних для подальшого контролю енергоефективності.

4.4.1.3 Приклад оптимізації складу чинників за їх відотною важливістю в умовах обмежених ресурсів на організацію обліку

У випадку, коли облік виробничих параметрів, що впливають на енергоспоживання на підприємстві, не здійснюється, виникає задача визначення оптимального їх складу для подальшого врахування при побудові математичних моделей електроспоживання та встановлення цільових змінних, необхідних для здійснення контролю енергоефективності. Очевидно, що така задача виникає в умовах обмежених ресурсів, зокрема фінансових, на організацію обліку відповідних параметрів.

Наприклад, фінансові витрати на придбання та встановлення приладів обліку параметрів, що впливають на обсяг споживання електроенергії в технологічному процесі виробництва аміаку (розділ 4.4.1.2), не повинні перевищувати 20 тис. грн. Коефіцієнти відносної важливості зазначених

параметрів, а також витрати на організацію обліку кожного з них наведено в таблиці 4.25.

Таблиця 4.25

Коефіцієнти відносної важливості технологічних параметрів та витрати на організацію їх обліку

Умовний номер параметру	1	2	3	4
Назва параметру	Виробництво аміаку	Виробництво продувних газів	Виробництво пари тиском 16 атм.	Температура навколишнього середовища
Коефіцієнт відносної важливості, k_i	0,364	0,227	0,165	0,177
Витрати на організацію обліку, z_i тис. грн.	8	6	6,5	3

Як зазначалося в розділі 3.1.2, з метою визначення оптимального складу технологічних параметрів, які у подальшому потрібно враховувати при здійсненні контролю енергоефективності виробничого процесу, що розглядається, необхідно вирішити задачу комбінаторної оптимізації:

$$\sum_{i=1}^N k_i x_i \rightarrow \max$$

$$\sum_{i=1}^N z_i x_i \leq 20$$

де $x_i = 1$, якщо параметр враховується, і $x_i = 0$, якщо не враховується.

Вирішення цієї задачі було здійснено з використанням програмного забезпечення Python. Для більшої наочності на рис 4.27 наведено графічне вирішення зазначеної задачі, де можливі варіанти показані у вигляді відповідної мережі. На цьому рисунку на осі абсцис позначено умовні номери технологічних параметрів (чинників), на лівій осі ординат – витрати на організацію обліку, а на правій осі ординат, в дужках – сума коефіцієнтів відносної важливості чинників на кожному кроці оптимізації.

На кожному кроці вирішення задачі будуються дві лінії. Наприклад, на другому кроці: горизонтальна лінія (чинник з умовним номер 2 не враховано) або похила лінія (чинник з умовним номер 2 враховано). Проекції зазначених ліній на праву вісь ординат відповідають коефіцієнтам відносної важливості чинників, а проекції цих ліній на ліву вісь ординат дорівнюють витратам на організацію обліку чинників.

Таким чином, будь-якому варіанту вирішення задачі відповідає певний шлях у наведеній на рис. 4.27 мережі, а остаточне вирішення задачі зводиться до знаходження шляху з максимальною довжиною.

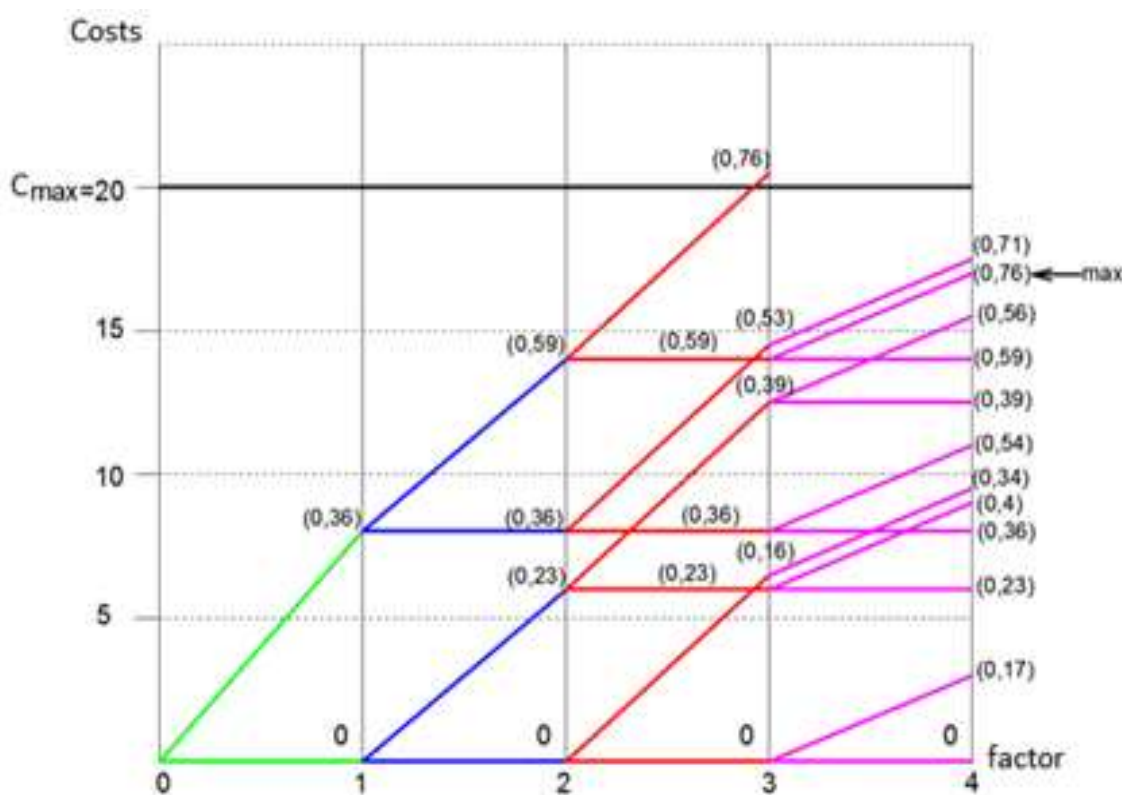


Рис.4.27. Мережа, що ілюструє поетапне вирішення оптимізаційної задачі.

Як свідчить рис. 4.27, максимальна сума коефіцієнтів відносної важливості чинників, яка не виходить за межі загальних допустимих витрат коштів на організацію обліку, досягається у разі врахування першого, другого та четвертого чинників, що відповідає оптимальному варіанту вирішення задачі, що розглядається. Тобто чинник з умовним номером 3 в умовах обмежених фінансових ресурсів на здійснення обліку у подальшому не слід

враховувати при здійсненні контролю енергоефективності технологічного процесу виробництва аміаку.

4.4.1.4 Приклад оцінки ступеню і характеру впливу чинників на споживання електроенергії методом головних компонент

Необхідність врахування в математичній моделі електроспоживання того чи іншого набору чинників повинна бути остаточно підтверджена за допомогою ймовірісно-статистичних методів, які дозволяють виявляти та кількісно оцінювати тісноту зв'язку між електроспоживанням та відповідними чинниками. Для аналізу статистичного зв'язку між електроспоживанням та чинниками, визначеними шляхом експертного опитування (розділ 4.4.1.1), було використано метод головних компонент, відомий в зарубіжній практиці як Principal components analysis (PCA).

На виробничому об'єкті, що розглядається, з метою організації контролю енергоефективності технологічного процесу виробництва аміаку були встановлені додаткові, а також використані наявні прилади обліку, які дозволи отримати необхідні статистичні дані про числові значення наступних параметрів: обсяг споживання електроенергії, температура навколишнього середовища, обсяг виробництва аміаку, обсяг виробництва пари з тиском 16 атм., обсяг виробництва пари з тиском 30 атм., обсяг споживання води, обсяг споживання природного газу, обсяг постачання продувних газів. Відповідні статистичні дані у вигляді графіків наведено на рис. 4.28-4.35.

На основі зазначених вихідних даних за методом головних компонент з використанням програми Statistica були побудовані графіки рахунків та навантажень, які наведено на рис. 4.36-4.37.

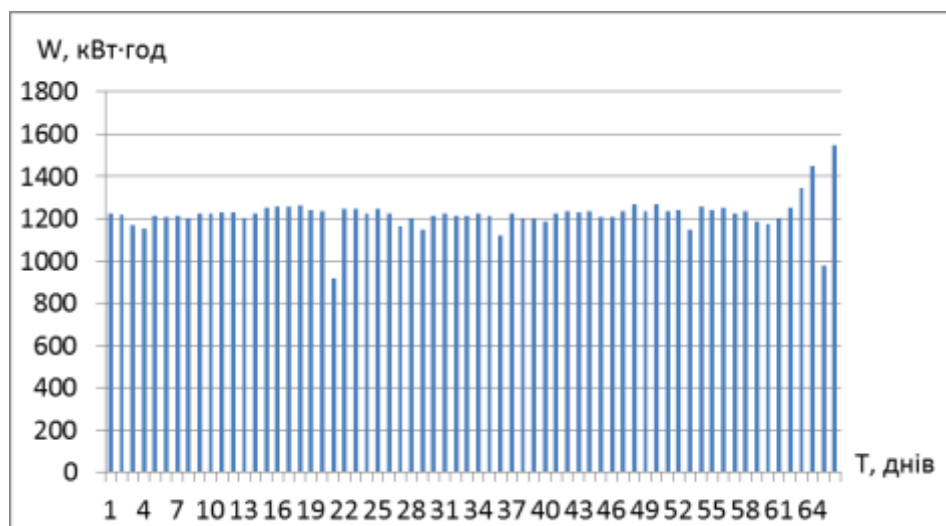


Рис.4.28. Обсяги споживання електроенергії на виробництво аміаку

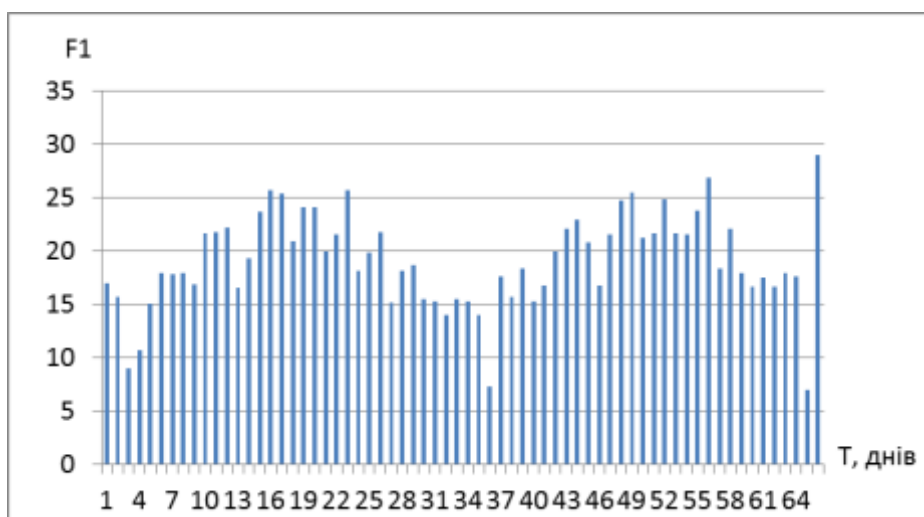


Рис.4.29. Температура навколишнього середовища (градусів Цельсія)

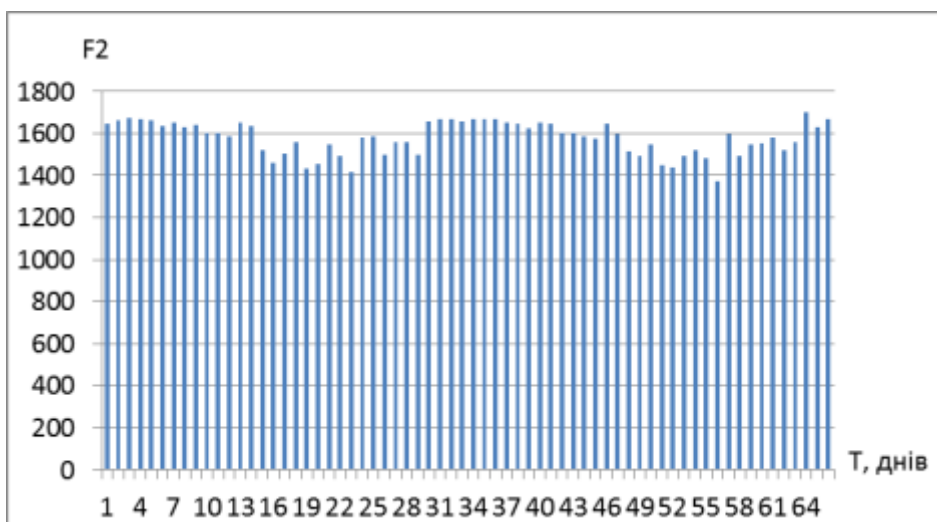


Рис.4.30. Обсяги виробництва аміаку (м³)

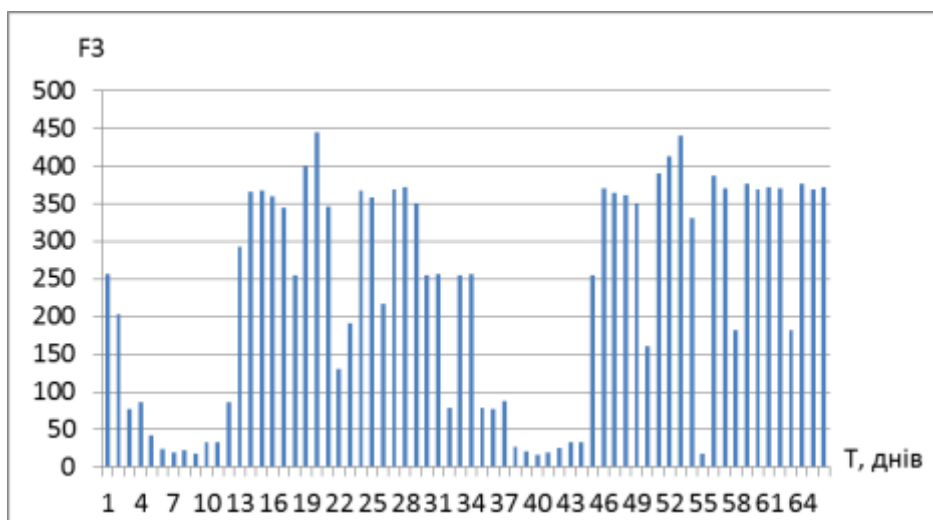


Рис.4.31. Обсяги виробництва пари з тиском 16 атм (т.)

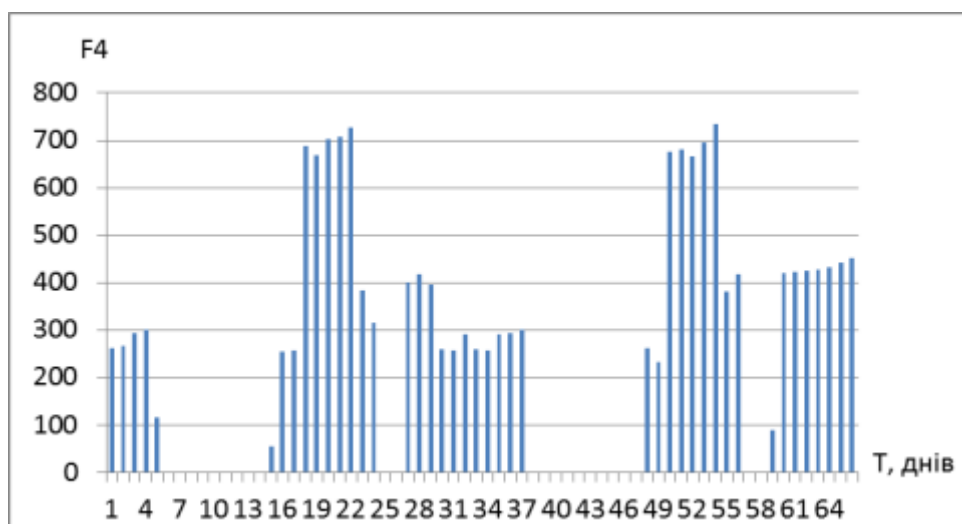


Рис.4.32. Обсяги виробництва пари з тиском 30 атм (т.)

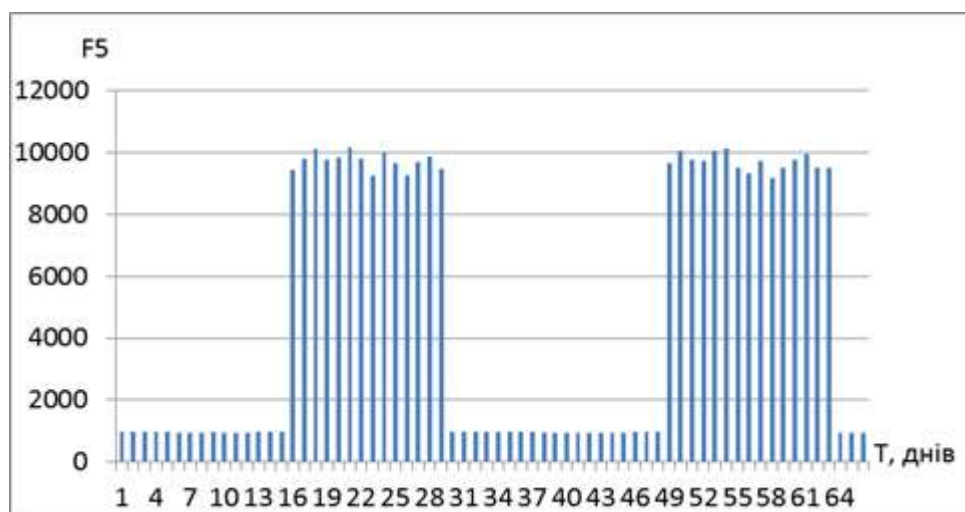


Рис.4.33. Обсяги споживання води (м³)

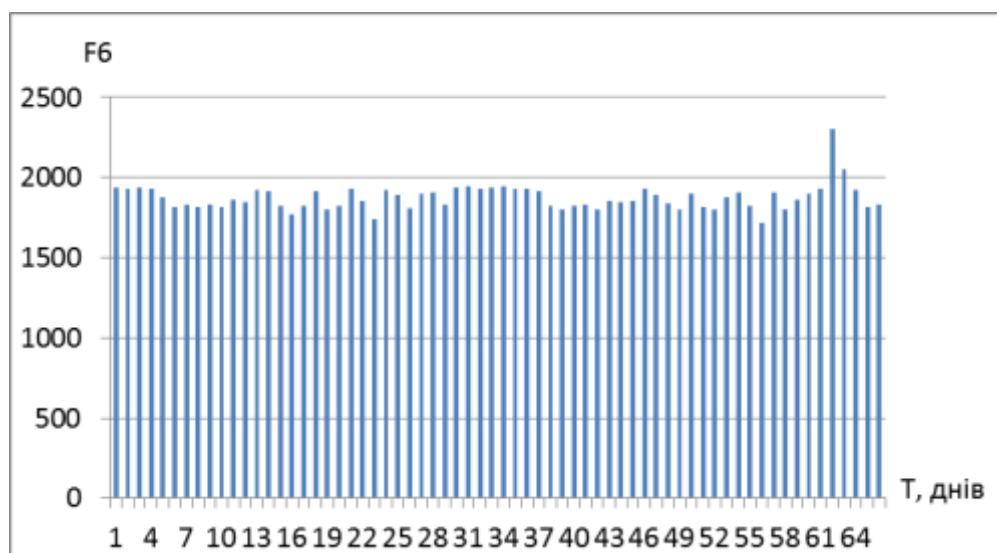


Рис.4.34. Обсяги споживання природного газу (m^3)

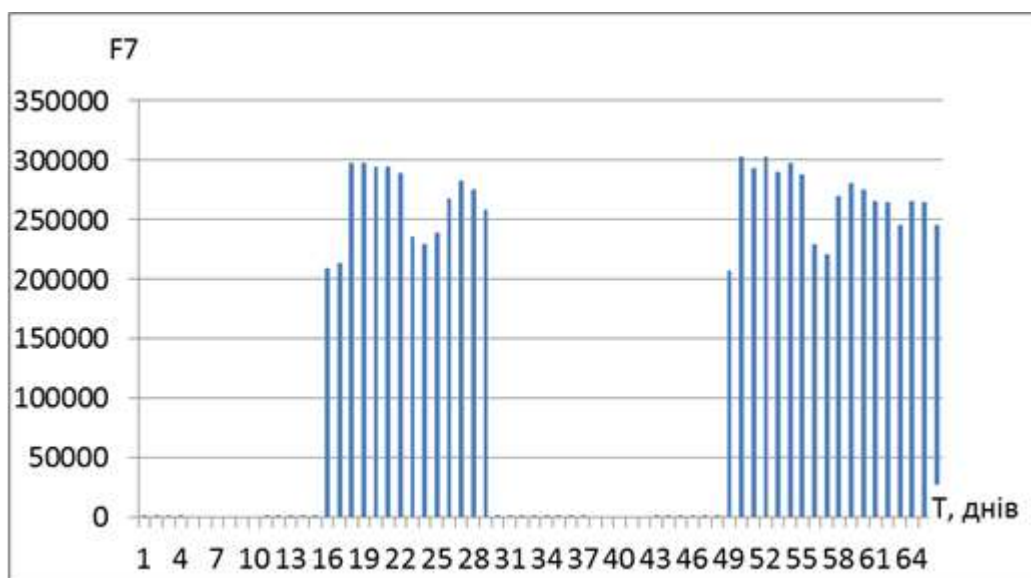


Рис.4.35. Обсяги постачання продувних газів (m^3)

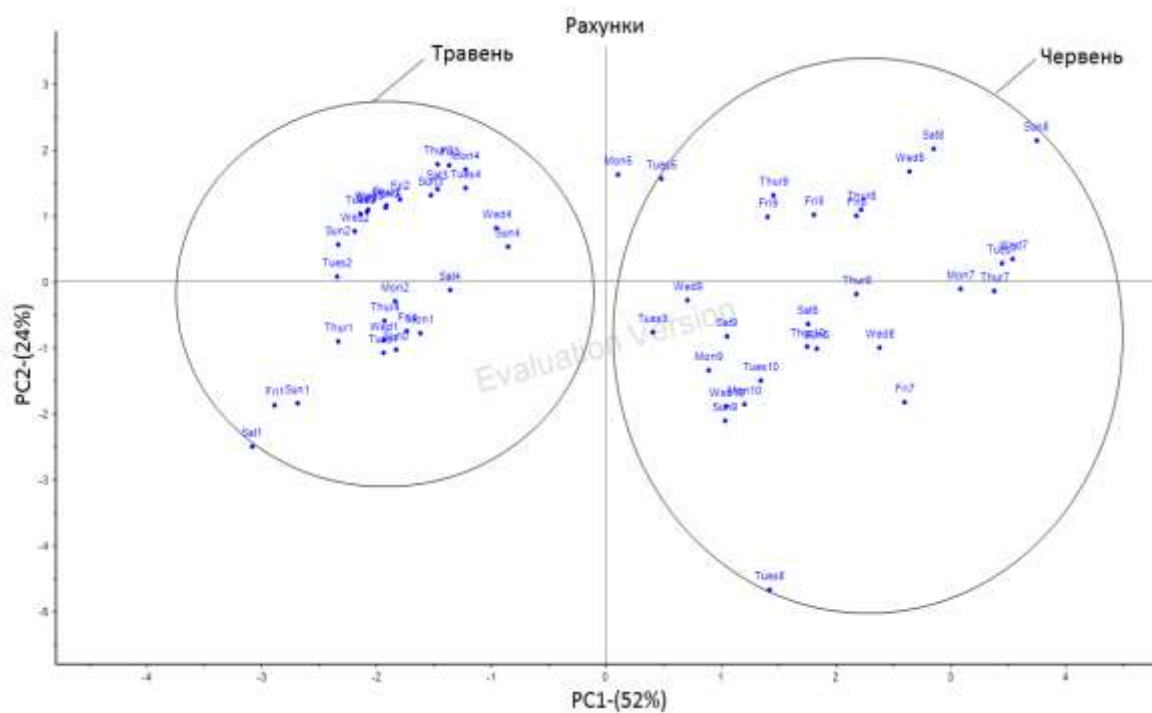


Рис. 4.36. Графік рахунків для першої та другої головних компонент (ГК).

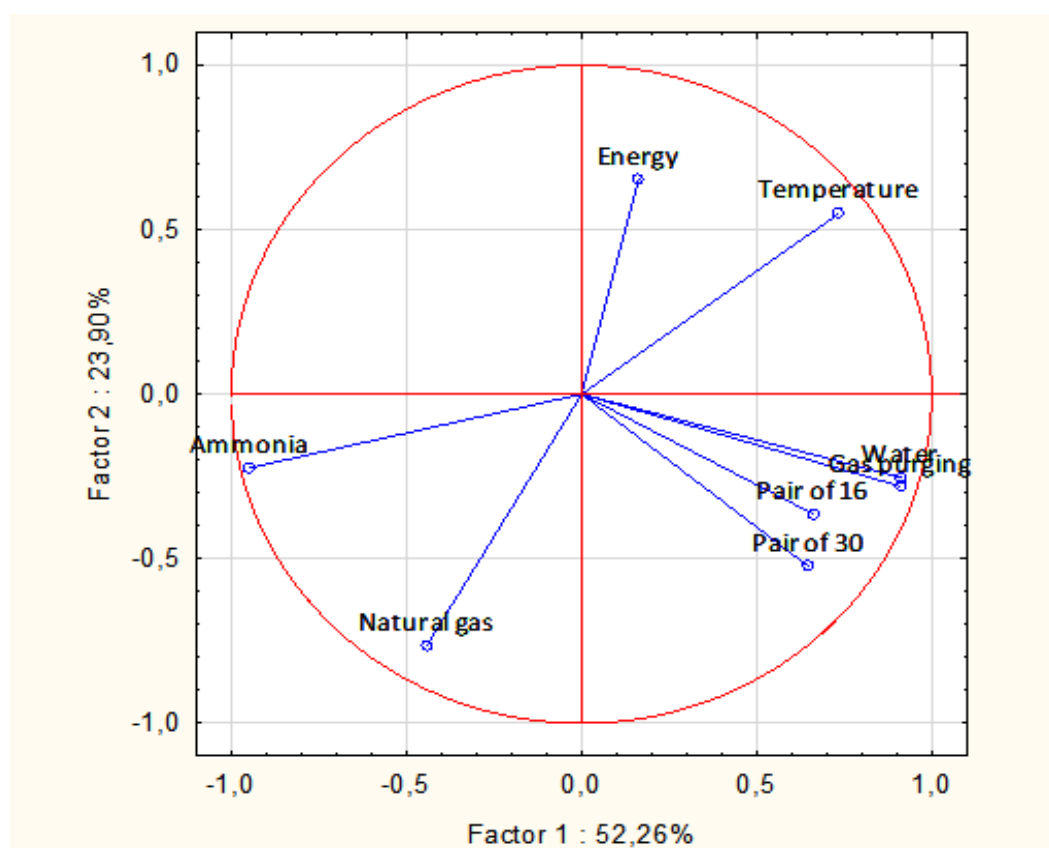


Рис. 4.37. Графіки навантажень для першої та другої головних компонент (ГК).

Керуючись правилами інтерпретації графіків навантажень, можна зробити висновок, що на величину споживання електроенергії у технологічному процесі, що розглядається, впливають: температура навколишнього середовища (позитивний кореляційний зв'язок), обсяг споживання природного газу та обсяг виробництва аміаку (від'ємна кореляція).

Результати PCA демонструють також, що обсяги електроспоживання у процесі виробництва аміаку не є корельованими з обсягами виробництва пари з тиском 15 атм., пари з тиском 30 атм., продувних газів та споживанням води.

Для більшої обґрунтованості цих висновків можуть бути розглянуті графіки навантажень для інших ГК, проте, як показали дослідження, для даного виробничого об'єкту використання додаткових головних компонент не вплинуло на остаточний результат відбору складу чинників.

Графіки рахунків дозволили отримати додаткову інформацію про взаємозв'язок між параметрами технологічного процесу в різні періоди часу. Зокрема, на першій головній компоненті помітно чіткий розподіл вихідних даних на ті, що були отримані у різні місяці (в травні та в червні). Така інформація може свідчити про неоднорідність даних, отриманих протягом зазначених місяців. Керуючись цим, можна зробити висновок, що у подальшому для встановлення цільових змінних електроспоживання мають бути побудовані дві різні математичні моделі обсягу споживання електричної енергії окремо для кожного з зазначених місяців.

Використання методу головних компонент дозволяє також виявляти прихований статистичний зв'язок між технологічними параметрами, що впливають на обсяг споживання електроенергії і, тим самим, створювати основу для побудови більш адекватних математичних моделей електроспоживання.

4.4.2 Приклад вибору найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення цільових змінних енергоспоживання виробничих об'єктів

На основі аналізу статистичних даних, наведених в розділі 4.4.1.4, було встановлено, що при побудові математичних моделей обсягу споживання електричної енергії на виробництво аміаку необхідно враховувати три чинники (технологічні параметри): обсяг споживання природного газу (F_1), обсяг виробництва аміаку (F_2) і температуру навколишнього середовища (F_3).

В ході дослідження з застосуванням різних методів були отримані різні багатофакторні математичні моделі, що відображають взаємозв'язок між обсягом споживання електричної енергії в технологічному процесі, що розглядається. Зокрема, були побудовані: — багатофакторна лінійна модель на основі застосування методу проекції на латентні структури:

$$W = 1080,833 + 6,895F_1 - 0,29F_2 + 0,342F_3;$$

— багатофакторна нелінійна регресійна модель у вигляді поліноміальної функції:

$$W = 21561,79 + 27,12F_1 - 0,01F_1^2 - 84,22F_2 + 0,05F_2^2 - 1,01 \cdot 10^{-5}F_2^3 + 80,22F_3 - 4,82F_3^2 + 0,101F_3^3;$$

— багатофакторна нелінійна регресійна модель у вигляді факторіалу:

$$W = 61494,98 - 32,94F_1 - 36,35F_2 - 2010,5F_3 + 0,019F_1F_2 + 1,08F_1F_3 + 1,2F_2F_3 - 6,5 \cdot 10^{-5}F_1F_2F_3;$$

— багатофакторна нелінійна модель, отримана з застосуванням змішаних функцій:

$$W = -46384,5 + 43,5F_1 - 0,018F_1^2 + 3,57F_2 - 0,009F_2^2 + 463,6F_3 - 2,07F_3^2 + 0,016F_1F_2 - 0,04F_1F_3 - 0,19F_2F_3;$$

— багатофакторна нелінійна модель, отримана на основі застосування методу групового урахування аргументів (МГУА):

$$W = 326,1 + 0,15F_1 + 0,0001F_2F_1 + 0,009F_2F_3;$$

— багатofакторна модель, одержана шляхом побудови радіальної базисної нейронної мережі GRNN (Generalized Regression Neural Network).

Визначення параметрів (констант) зазначених математичних моделей було здійснено на навчальній вибірці, до якої увійшла половина наявних статистичних даних, відібраних через одне значення. Інша частина наявних даних була сформована у тестову вибірку.

Для вибору найбільш адекватної з наведених вище математичних моделей електроспоживання було використано декілька різних за змістом критеріїв, склад яких було наведено в розділі 3.2.2, а їх числові значення визначалися на тестовій вибірці. Розрахункові величини критеріїв адекватності наведених вище математичних моделей зазначено в таблиці 4.26.

Таблиця 4.26

Числові значення показників адекватності математичних моделей електроспоживання

	Багатofакторна лінійна модель	МГУА	GRNN	Поліноміальна функція	Факторіальна функція	Змішана функція
$D_{\text{ЗАЛ}}$	783,53	944,28	1043,59	1061,93	814,34	1465,6
BIC	8,33	9,01	8,44	8,19	8,2	7,944
$n_{\text{зм}}$	651,9	1525,85	496,47	1221,23	1018,08	1729,4
R^2	0,89	0,51	0,76	0,66	0,6	0,47
F	5,59	2,73	4,76	3,52	3,63	2,26
F_{choy}	0,39	0,87	0,04	0,25	0,28	0,09

Результати розрахунків, наведені в таблиці 4.26, свідчать про те, що використання окремо кожного з зазначених критеріїв може призвести до прийняття неузгоджених рішень щодо вибору найбільш адекватної математичної моделі. Цей факт зайвий раз доводить, що вибір найкращого методу побудови математичних моделей електроспоживання виробничих об'єктів повинен здійснюватися одночасно за кількома різними критеріями, тобто являє собою багатокритеріальну задачу.

При цьому для більш повної оцінки математичних моделей, що розглядаються в цьому прикладі, крім наведених вище критеріїв їх

адекватності, було враховано також деякі «якісні» критерії, які характеризують інші особливості цих моделей, зокрема, витрати часу, фінансових та матеріальних ресурсів на їх побудову. Для визначення числових значень цих «якісних» критеріїв вибору моделей були застосовані методи, наведені в розділі 3.2. Результати розрахунку числових величин «якісних» критеріїв наведено в таблиці 4.27.

Таблиця 4.27

Числові значення «якісних» критеріїв оцінки математичних моделей
електроспоживання

	Багатофакторна лінійна модель	МГУА	GRNN	Поліноміальна функція	Факторіальна функція	Змішана функція
Витрати часу, Т	0,2	0,62	0,25	0,34	0,34	0,34
Фінансові витрати, С	0,56	0,67	0,59	0,5	0,5	0,5
Витрати виробничих ресурсів, К	0,55	0,55	0,65	0,5	0,5	0,5

Узагальнення всіх наведених вище критеріїв адекватності, а також «якісних» критеріїв для вибору найбільш прийнятної математичної моделі споживання електроенергії в процесі виробництва аміаку здійснюється шляхом обчислення зваженої суми числових значень цих критеріїв з застосуванням наведеного в розділі 3.3 методу Аналізу Середовища Функціонування, більш відомого як Data Envelopment Analysis (DEA).

Результати застосування даного методу наведено в таблиці 4.28.

Таблиця 4.28

Значення узагальнених показників «ефективності» для різних варіантів математичного моделювання обсягу електроспоживання у технологічному процесі виробництва аміаку

	Багатофакторна лінійна модель	МГУА	GRNN	Поліноміальна функція	Факторіальна функція	Змішана функція
f_n	1,00	0,67	0,94	0,79	0,83	0,72

Числове величина узагальненого показника «ефективності», у випадку побудови багатофакторної лінійної регресійної моделі, в середньому на 21% є кращою від моделей – конкурентів, що свідчить про те, що саме така математична модель і такий метод її побудови є найбільш прийнятними для подальшого встановлення цільових змінних електроспоживання, необхідних для здійснення контролю енергоефективності технологічного процесу виробництва аміаку, що розглядається.

4.4.3 Приклад застосування процедури оперативного контролю та аналізу ефективності енерговикористання

Як зазначалося в розділі 3.4, процес контролю енергоефективності виробничих об'єктів може здійснюватись з використанням різних ймовірнісно-статистичних методів. Застосування таких методів може бути продемонстровано на прикладі підрозділу хімічного підприємства з виробництва аміаку, яке розглядалося у попередніх розділах. Зокрема, в розділі 4.4.1 було встановлено, що на обсяг споживання електричної енергії у зазначеному підрозділі впливають три чинники: обсяг споживання природного газу (F_1), обсяг виробництва аміаку (F_2) і температура навколишнього середовища (F_3).

Виходячи з цього, в розділі 4.4.2 визначено, що найбільш прийнятною математичною моделлю електроспоживання для даного виробничого підрозділу є багатофакторне лінійне рівняння регресії, яке має вигляд:

$$W = 1080,833 + 6,895F_1 - 0,29F_2 + 0,342F_3$$

Параметри (константи) цього рівняння регресії визначено за відповідними статистичними даними зібраними протягом тридцяти двох робочих днів (розділ 4.4.1.4). На основі цієї математичної моделі у подальшому

встановлювались цільові змінні електроспоживання, необхідні для контролю ефективності використання електроенергії в процесі виробництва аміаку.

В цьому прикладі контроль енергоефективності виробничого підрозділу, що розглядається, здійснювався щодобово, починаючи з тридцять третього робочого дня. На рисунках 4.38-4.44 продемонстровано результати контролю ефективності використання електричної енергії в процесі виробництва аміаку з застосуванням графіка CUSUM, шляхом встановлення довірчих інтервалів до математичної моделі електроспоживання, а також з використанням контрольних карт Шухарта та Хоттелінга. Методичні основи здійснення контролю енергоефективності з застосуванням зазначених методів наведено у розділі 3.4.1.

Результати контролю ефективності використання електричної енергії у процесі виробництва аміаку шляхом побудови графіка CUSUM свідчать про те, що у період з 33 до 38, з 50 до 52, а також з 54 до 61 робочого дня у виробничому підрозділі, що розглядається, спостерігалася економія електроенергії, а у період з 40 до 51 та з 62 до 66 робочих днів відбувалася її перевитрата у порівнянні з встановленими цільовими змінними електроспоживання.

Побудова такого графіка за традиційними методиками дає змогу лише реєструвати періоди часу, коли на відповідному об'єкті відбулися зміни рівня енергоефективності, або у кращому випадку спостерігати певну тенденцію таких змін. Однак при цьому неможливо визначити, якою мірою ці зміни є випадковими, наскільки вони суттєві, а також неможливо проаналізувати, з яких причин вони відбулися: через об'єктивні зміни технологічних параметрів, в результаті дії інших, невідомих чинників, чи в наслідок недосконалості самої математичної моделі електроспоживання.

Таким чином, здійснення оперативного контролю енергоефективності виробничих об'єктів на основі використання традиційних графіків CUSUM не можна вважати доцільним.

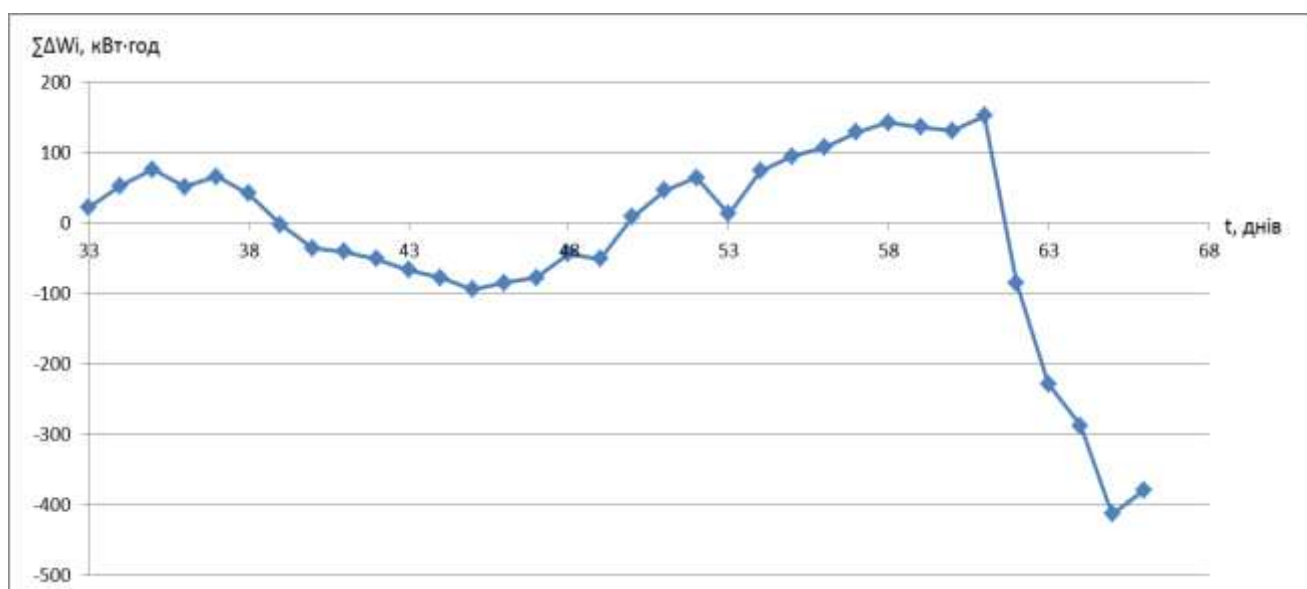


Рис. 4.38. Результати контролю енергоефективності з використанням графіка CUSUM

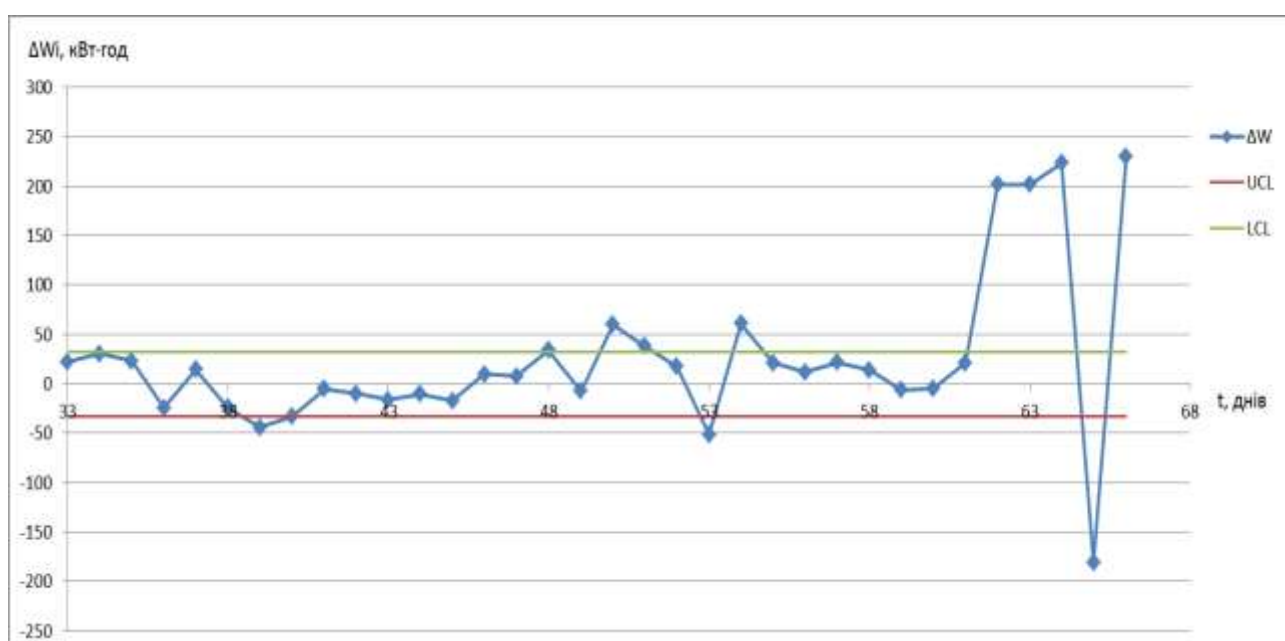


Рис 4.39. Контрольна карта Шухарта для середніх значень відхилення фактичних обсягів споживання електроенергії від встановлених цільових змінних

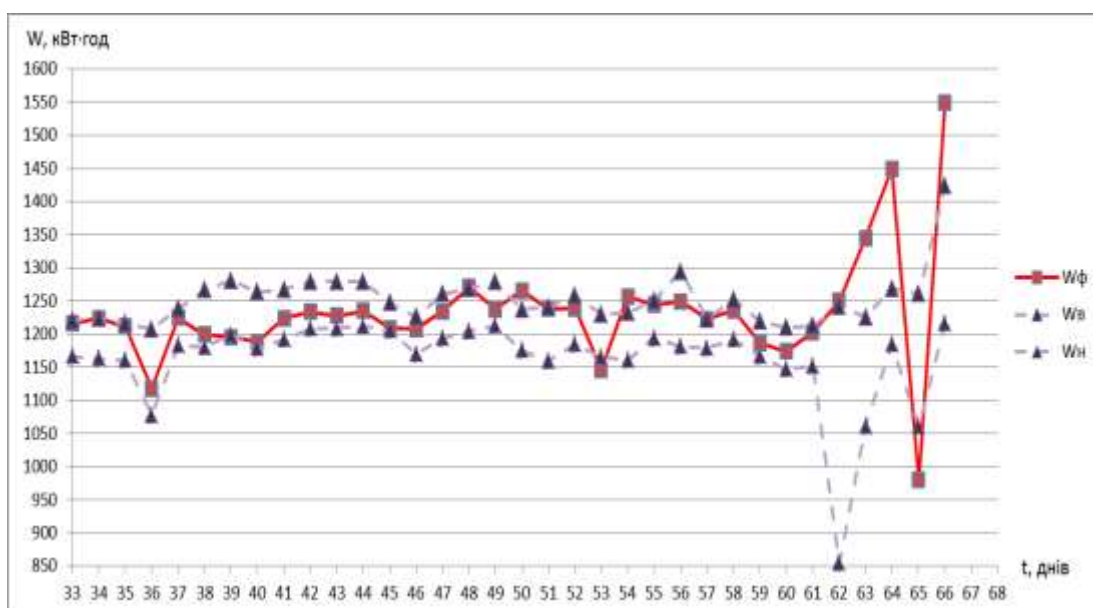


Рис. 4.40. Контроль енергоефективності на основі встановлення довірчих інтервалів до математичної моделі електроспоживання.

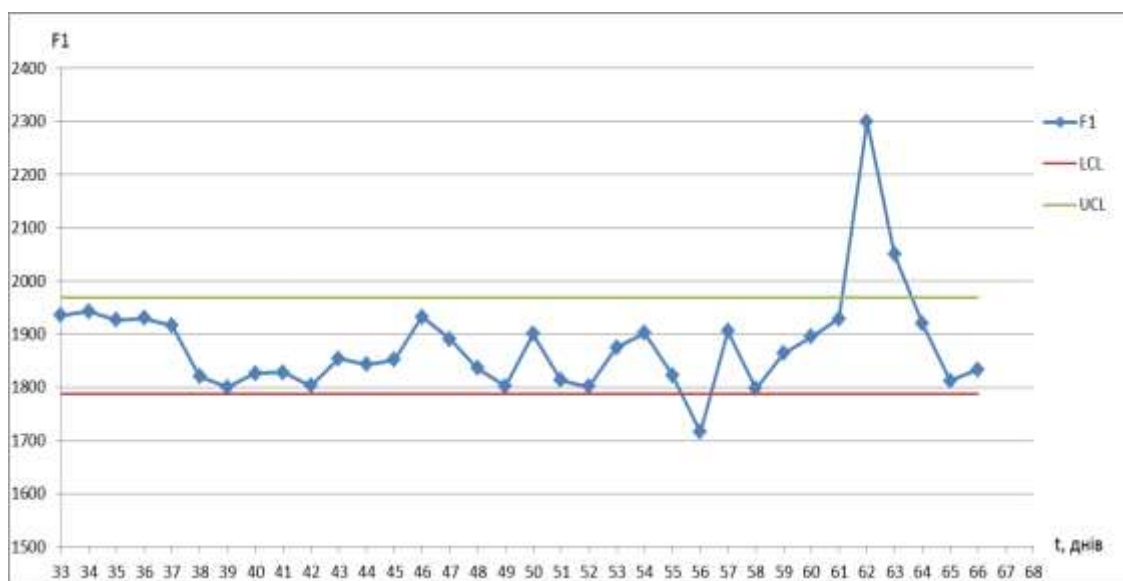


Рис.4.41. Контрольна карта для середніх значень незалежної змінної $F1$



Рис 4.42. Контрольна карта для середніх значень незалежної змінної $F2$

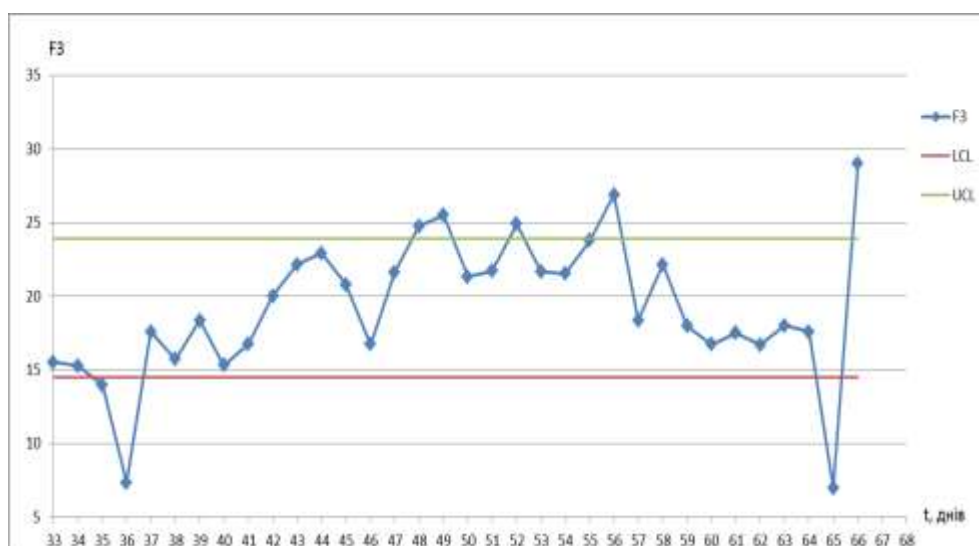


Рис 4.43. Контрольна карта для середніх значень незалежної змінної $F3$

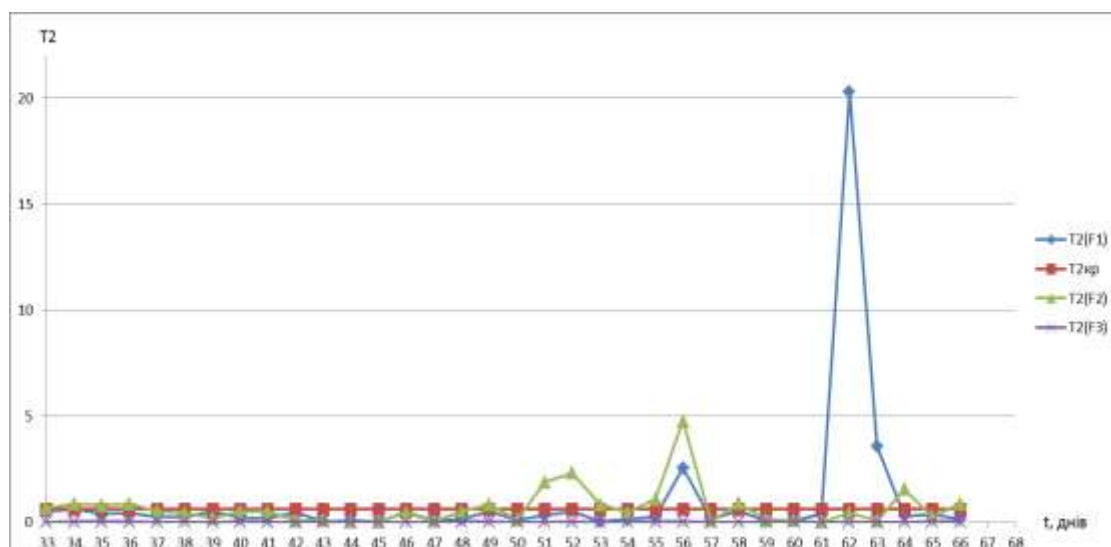


Рис.4.44. Контрольна карта Хотелінга, побудована для незалежних змінних $F1$, $F2$, $F3$

Застосування для оперативного контролю енергоефективності карт Шухарта та меж довірчих інтервалів до математичної моделі електроспоживання (рис. 4.39 та 4.40), на відміну від графіка CUSUM, дає можливість не лише спостерігати ту чи іншу тенденцію зміни рівня ефективності використання електроенергії, але й визначати певні періоди часу, відносно яких можна зробити висновок про те, що зміни рівня енергоефективності у ці періоди є суттєвими і відбулися не випадково.

Для виробничого об'єкту, що розглядається у цьому прикладі, використання обох зазначених методів контролю привело до одержання практично однакових результатів: фактичні обсяги споживання електроенергії на виробництво азоту виходили за межі верхньої границі карти Шухарта або довірчого інтервалу до математичної моделі електроспоживання у робочі дні з умовними номерами 34, 48, 53, 54, 62, 63, 64 та 66 або за межі відповідної нижньої границі у робочі дні номер 39, 53 та 65.

Однак при використанні карт Шухарта, на відміну від довірчих інтервалів до математичної моделі електроспоживання, контрольні границі встановлюються у вигляді констант, до того ж, не для індивідуальних, а для середніх значень відхилення фактичних обсягів споживання електроенергії від цільових змінних, що дозволяє вважати карти Шухарта менш чутливим та гнучким «інструментом» контролю.

Таким чином, можна зробити висновок, що серед трьох способів контролю, що розглядаються, найбільш доцільним для здійснення контролю енергоефективності виробничих об'єктів слід вважати безпосереднє порівняння фактичних обсягів споживання електричної енергії з цільовими змінними, встановленими на підставі довірчих інтервалів до відповідної математичної моделі електроспоживання. Застосування ж з цією метою контрольних карт Шухарта є доцільним лише у разі, якщо побудова довірчих інтервалів до математичних моделей споживання електроенергії з тієї чи іншої причини є неможливою.

Після того, як періоди часу, протягом яких встановлені цільові змінні електроспоживання не виконувалися, було знайдено, необхідно виявити та проаналізувати причини, що призвели до цього. Одним із можливих способів здійснення такого аналізу є застосування карт Шухарта, однак при цьому необхідно контролювати не показники електроспоживання, а середні значення незалежних змінних, тобто чинників, що впливають на обсяг споживання електричної енергії на відповідному виробничому об'єкті.

Для виявлення причин, що призвели до перевитрати або економії електроенергії, слід будувати контрольні карти Шухарта для середніх значень всіх незалежних змінних, які було включено до математичної моделі електроспоживання. За допомогою таких контрольних карт можна відслідковувати невинні суттєві зміни числових значень технологічних параметрів, що впливають на обсяги електроспоживання. Як зазначалося у розділі 3.4.2, такі зміни значень технологічних параметрів, як правило, є причиною відхилення фактичних обсягів споживання електричної енергії від встановлених цільових змінних.

Побудувавши та проаналізувавши зазначені контрольні карти для виробничого об'єкта, що розглядається (рис. 4.41-4.43), можна зробити наступні висновки:

- 1) Протягом робочих днів з умовним номером 34, 53, 64, 53 спостерігалися невинні суттєві зміни технологічного параметру F2;
- 2) Протягом робочих днів номер 62 та 63 спостерігалися невинні суттєві зміни параметру F1;
- 3) Протягом робочого дня номер 65 спостерігалися невинні суттєві зміни параметру F3;
- 4) Протягом робочих днів номер 51 та 66 відбувалися невинні суттєві зміни одночасно параметрів F1 та F2;
- 5) Протягом робочих днів номер 39 та 54 усі технологічні параметри знаходилися в допустимих межах, тобто невиконання цільових змінних електроспоживання у ці дні було спричинене впливом невідомих чинників.

Як зазначалося у розділі 3.4.2, для контролю та аналізу зміни числових значень одночасно кількох чинників, що впливають на електроспоживання також можна використовувати багатовимірний варіант карти Шухарта — контрольні карти Хоттелінга. Такі карти дозволяють контролювати та аналізувати як зміну значень одночасно всіх чинників, так і кожного чинника окремо. Для виробничого об'єкту, що розглядається, контрольна карта Хоттелінга, побудована окремо для кожного з технологічних параметрів, наведена на рис. 4.44.

Результати оперативного контролю енергоефективності підрозділу хімічного підприємства з виробництва аміаку, що здійснювався за цільовими змінними, встановленими на основі довірчих інтервалів до математичної моделі електроспоживання, та подальшого аналізу причин невідповідної зміни рівня ефективності використання електроенергії у зазначеному технологічному процесі з застосуванням одновимірних карт Шухарта представлено в табл. 4.29.

Таблиця 4.29

Результати оперативного контролю та аналізу енергоефективності підрозділу з виробництва аміаку

День	Вихід технологічних параметрів за верхню границю їх допустимих значень			Вихід технологічних параметрів за нижню границю їх допустимих значень			Відхилення від цільових змінних електроспоживання, %		Причина
	$\Delta F1$	$\Delta F2$	$\Delta F3$	$\Delta F1$	$\Delta F2$	$\Delta F3$	Перевитрати	Економія	
34	0	30,5	0	0	0	0	0,06	0	F2 збільшився
39	0	0	0	0	0	0	0	0,26	Інші фактори чинники
48	0	0	0,836	0	-1,419	0	0,14	0	F3 збільшився F2 зменшився
50	0	0	0	0	0	0	2,31	0	Інші фактори чинники
53	0	0	0	0	-21,21	0	0	1,62	F3 зменшився
54	0	0	0	0	0	0	2,03	0	Інші фактори чинники
62	330,2	0	0	0	0	0	0,65	0	F1 збільшився
63	80,2	0	0	0	0	0	9,73	0	F1 збільшився
64	0	60,1	0	0	0	0	14,29	0	F2 збільшився
65	0	0	0	0	0	-7,507	0	7,59	F3 зменшився
66	0	30,1	5,075	0	0	0	8,88	0	F2 збільшився F3 збільшився

Таким чином, продемонстрована на цьому прикладі процедура оперативного контролю та аналізу енергоефективності, що базується на застосуванні одно або багатовимірних контрольних карт, дає змогу об'єктивно визначати періоди часу (зокрема, робочі дні), у які відбулися суттєві невідповідності зміни рівня ефективності використання електричної енергії у технологічному процесі, що розглядається, а також аналізувати причини їх виникнення, що, у свою чергу, дозволяє постійно підтримувати ефективність використання електроенергії в цьому процесі на заданому рівні, а також періодично планувати та здійснювати заходи з її підвищення.

Висновки до розділу 4

1. Застосування ймовірнісно-статистичних методів, навіть в умовах, коли відомими є тільки фактичні загальні обсяги споживання електроенергії на підприємстві, у порівнянні з результатами використання спрощеного розрахунково-аналітичного методу дає змогу будувати більш достовірні баланси споживання електричної енергії на виробничих об'єктах, оскільки вони обґрунтовані думками фахівців-експертів чи результатами вибіркового спостереження, встановленими законами розподілу числових значень статей витратної частини електробалансів, а також знаходженням найбільш ймовірної її структури.

2. У порівнянні з результатами використання спрощеного розрахунково-аналітичного методу, застосування ймовірнісно-статистичного підходу в умовах, коли відомими є обсяги споживання електроенергії та виробництва продукції на підприємстві, дозволяє будувати значно більш достовірні електробаланси, оскільки вони не тільки мають найбільш ймовірну структуру витратної частини, але й додатково обґрунтовані також фактичними обсягами продукції, які, здебільшого, найбільш суттєво впливають на витрати електричної енергії у виробничому секторі.

3. Застосування ймовірісно-статистичного підходу в умовах, коли відомими є об'єктивні аналітичні залежності для розрахунку обсягів споживання електричної енергії технологічним обладнанням, у порівнянні з результатами використання розрахунково-аналітичного методу, дає можливість будувати значно більш достовірні електробаланси виробничих об'єктів, оскільки вони обґрунтовані не тільки відповідними аналітичними залежностями, але й найбільш ймовірними значеннями нечітко визначених параметрів технологічного процесу.

4. Використання розробленого підходу до виявлення агрегатів або їх груп, що вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів виробничих об'єктів, дозволяє визначати вузли схеми електропостачання, в яких необхідно в першу чергу встановлювати додаткові прилади обліку з метою верифікації та уточнення числових значень статей витратної частини балансів споживання електричної енергії, одержаних на основі застосування ймовірісно-статистичних методів.

5. Застосування запропонованої процедури оперативного контролю та аналізу енергоефективності, що базується на побудові одно або багатовимірних контрольних карт, дає змогу об'єктивно визначати періоди часу, у які відбуваються не випадкові суттєві зміни рівня ефективності використання електричної енергії на виробничих об'єктах, а також аналізувати причини їх виникнення, що, у свою чергу, дозволяє постійно підтримувати ефективність використання електроенергії на об'єкті на заданому рівні, а також періодично планувати та здійснювати заходи з її підвищення.

ВИСНОВКИ

1. Запропонований ієрархічний підхід до побудови електробалансів виробничих об'єктів, що базується на послідовному вирішенні задачі спочатку за видами продукції, а потім за агрегатами, що задіяні у процесі виробництва кожного з її видів, дає змогу істотно спростити процедуру визначення структури витратної частини електробалансів;

2. Розроблена методологія складання електробалансів в різних умовах та випадках їх побудови, що базується на використанні ймовірнісно-статистичних методів, дає можливість у порівнянні з іншими методами одержувати більш обґрунтовані та достовірні електробаланси виробничих об'єктів. За результатами експериментальної перевірки застосування запропонованих методів, зокрема для побудови електробалансів за видами продукції, максимальна похибка розрахункових статей електробалансу не перевищувала 6,5%.

3. Створені з використанням методів імітаційного моделювання методичні основи визначення агрегатів або їх груп, що вносять найбільшу невизначеність при побудові балансів споживання електроенергії, дають змогу знаходити вузли схем електропостачання, в яких з метою верифікації статей електробалансів мають бути встановлені додаткові прилади обліку. Така верифікація за результатами виконаних розрахунків має скоригувати числові значення статей балансу в середньому на 6 %.

4. Запропоновані наукові засади встановлення оптимального складу чинників, що впливають на електроспоживання технологічних об'єктів, засновані на використанні апарату нечіткої логіки та методів аналізу багатовимірних статистичних даних, дозволяють з урахуванням додаткових обмежень визначати виробничі параметри, які необхідно і доцільно враховувати для побудови найбільш адекватних математичних моделей споживання електроенергії.

5. Удосконалені теоретичні основи встановлення базових ліній електроспоживання на основі довірчих інтервалів до відповідних математичних

моделей з застосуванням бутстреп-методу, дозволяють встановлювати більш об'єктивні та обгрунтовані цільові змінні, необхідні для здійснення контролю енергоефективності виробничих об'єктів.

6. Створені методичні основи вибору найбільш прийнятних математичних моделей електроспоживання технологічних об'єктів, що базуються на їх конкурентному відборі за різними критеріями з використанням DEA аналізу, дають змогу врахувати особливості кожного об'єкту. За результатами виконаних розрахунків обрана модель електроспоживання за узагальненим показником її «ефективності» в середньому на 21% є кращою від моделей – конкурентів.

7. Розроблена процедура оперативного контролю та аналізу виконання встановлених цільових змінних електроспоживання, яка базується на порівнянні з ними фактичних обсягів споживання електроенергії та побудові контрольних карт Шухарта або Хоттелінга для чинників, що впливають на електроспоживання, дозволяє визначати моменти невідповідної зміни рівня енергоефективності та аналізувати причини їх появи. Застосування цієї процедури дає змогу виявляти потенціал економії електроенергії, який за результатами експериментальних розрахунків для окремих робочих днів в середньому складав 14%.

8. У подальшому отримані результати можуть бути використані для практичного здійснення контролю енергоефективності на різноманітних виробничих об'єктах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авидов-Карнаухов Б.Н. Метод нормирования и расчета электроэнергии для предприятий, выпускающих разнородную продукцию / Б.Н. Авилов-Карнаухов // труды VII междунар. конф. по промышленной энергетике, 1972 г. : тезисы докл. – К. – 1972. – С. 9-13.
2. Аккозиев И.А. Компьютерное прогнозирование и нормирование электропотребления для управления энергохозяйством производств с изменяемым ассортиментом / И.А. Аккозиев, В.А. Юриков, Т.А. Шестопалова // Вестник КРСУ. – 2004. – Том 4. – № 1. – С. 103-108.
3. Агеев С.П. Математическое моделирование процесса электропотребления приемников поточного пороизводства. Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение/ С.П. Агеев // Тезисы докладов научно-технической конференции. Новомосковск. – 2002. – С. 39-41.
4. Башкис А. Определение численных значений статей электробалансов производственных объектов в условиях неопределенности исходной информации / А. Башкис, Д.О. Иванько, В.Ф. Находов // Минск: БГТУ, 2015. – Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов, Минск: БГТУ. – 2015. – С. 142-146.
5. Банди Б. Методы оптимизации / Б. Банди — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.
6. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере / В. Боровиков — СПб.: Питер, 2003. — 688 с.
7. Бешелев С. Экспертные оценки / С. Бешелев, Ф. Гурвич — М.: Наука, 1973. — 246 с.
8. Бабак В.Ф. Нормирование электропотребления с применением ВРwin технологий./ В.Ф. Бабак, Т.А. Шестопалова // Вестник КРСУ — № 1. — 2003. — С.1-3.
9. Волошко А. В. К вопросу применения кратномасштабного анализа для сжатия и восстановления графика электрической нагрузки / А.В.

Волошко, Д.О. Иванько, К.Ю. Гура, Д.К. Мищенко // Электроника и связь. – 2010. – № 4. – С. 59-64.

10. Вартазаров И. С. Экспертные оценки и их применение в энергетике / И. С. Вартазаров, И. Г. Горлов, Е. В. Минаев – М.: Энергоиздат, 1981. – 188 с.

11. Вознесенский В.А. Принятие решений по статистическим моделям / В.А. Вознесенский, А.Ф. Ковальчук. – Москва: Статистика, 1978. – 192 с.

12. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель – М.: Наука, 1980. – 208 с.

13. Воронцов К.В. Лекции по методам оценивания и выбора моделей [Электронный ресурс] // Воронцов К.В. – 2010. – 28 с. – Режим доступа: <http://www.ccas.ru/voron/.index-eng.html>.

14. Випанасенко С.І. Методика прогнозування електроспоживання вугільної шахти / С.І. Випанасенко, Н.С. Дрешпак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 6. – 2011.— С. 118-120.

15. Випанасенко С.І. Контроль ефективності використання електроенергії вугільними шахтами / С.І. Випанасенко // Техн. електродинаміка : Проблеми сучасної електротехніки. – 2006. – Ч 4. – С. 53—59.

16. Випанасенко С.І. Прогнозування обсягів електроспоживання вугільної шахти/ С. І. Випанасенко // Науковий вісник НГУ. – №6. – 2011. — С. 93-98.

17. Випанасенко С.І. Особливості використання регресійного аналізу в системах енергоменеджменту вугільних шахт/ С. І. Випанасенко //Вісник приазовського державного технічного університету. – №18. – 2008. – С. 21-26.

18. Вдовин А.М. К вопросу получения более точных оценок планируемых удельных норм расхода электроэнергии путем использования

метода наименьших квадратов. / А.М. Вдовин, Р.Г. Идиятуллин, Д.В. Шуралев // Статья. Казань.: КГЭУ – 2001. – С.57-59.

19. Вейц В.И. Экономия электрической энергии в промышленности / В.И. Вейц. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1947. – 208 с.

20. Волобринский С.Д. Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий / С.Д. Волобринский – М. -Л.: Энергия, 1976. – 154 с.

21. Горяинов В.Б. Математическая статистика / В.Б. Горяинов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – 2001. – 424 с.

22. Генкин Б. М. Экономика и социология труда / Б. М. Генкин – М. : Норма, 2007. – 448 с.

23. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений / А.А. Грешилов – МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 642 с.

24. Грозных В.А. Нормирование: от единичного электроприемника к ценологическому множеству / В.А. Грозных // Промышленная Энергетика. – № 3.– 2012 – С. 26-29.

25. Гнатюк В.И. Методика определения оптимальных норм электропотребления/ В.И. Гнатюк // Journal of applied informatics – № 3 (51). – 2014.– С. 68–74.

26. Гринев А.В. Анализ существующих и перспективных методов нормирования потребления топливно-энергетических ресурсов на промышленном предприятии / А.В. Гринев // Промышленная энергетика. – № 3. – 2012. – С.19-22.

27. Гринев А.В. Повышение эффективности нормирования потребления энергоресурсов на промышленных предприятиях/ А.В. Гринев, О.В. Новикова, С.В. Лозовский //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки – № 5(180). – 2013. – С. 54-59.

28. Гулбрандсен Т.Х. Энергоэффективность и энергетический менеджмент : учебно-методическое пособие / Т. Х. Гулбрандсен, Л. П. Падалко, В. Л. Червинский. – Минск : БГАТУ 2010. – 240 с.
29. Гофман И.В. Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий / И.В. Гофман. – М.–Л.: Энергия, 1966. – 319 с.
30. Галузева програма енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 року// Затверджено наказом Міністра промислової політики України № 152 від 25.02.2009 року.
31. Дружинин Н.К. Выборочное наблюдение и эксперимент / Н.К. Дружинин – М.: Статистика, 1977. – 368 с.
32. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии / Е.З. Демиденко – М.: Финансы и статистика, 1981. — 304 с.
33. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В.П. Дьяконов – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.
34. Доугерти К.Д. Введение в эконометрику / К.Д. Доугерти – М. : ИНФРА-М, 1999. — 402 с.
35. Долотовский И.В. Концепция системного анализа и многокритериальной оценки эффективности энергетического комплекса предприятий добычи и переработки углеводородного сырья/ Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. // Вестник Саратовского государственного технического университета – №3(54). – том 1. – 2011. – С. 187-192.
36. ДСТУ 3176-95 (ГОСТ 30341-96) Енергозбереження. Методи визначення балансів енергоспоживання гірничими підприємствами – [Чинний від 01.07.1997]. – К. : Держстандарт України, 1997.– (Державний стандарт України).
37. ДСТУ 4714:2007 Енергозбереження. Паливно-енергетичні баланси промислових підприємств. Методика побудови та аналізу – [Чинний від

01.07.2007]. – К. : Держстандарт України, 2007.– (Державний стандарт України).

38. Дрешпак Н.С. Вимірювання та контроль ефективності споживання електроенергії виробничими підрозділами підприємства / Н.С. Дрешпак // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. 2012. – С. 139-143.

39. ДСТУ ISO 50001:2014 Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2011, IDT) – [Чинний від 16.09.2014]. – К. : Держстандарт України, 2014.– (Державний стандарт України).

40. Зорин В.В. Мероприятия по повышению эффективности режимов действующих распределительных электрических сетей / В.В. Зорин, Р.А. Буйный, Д.О. Иванько // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 2. – С. 70-77.

41. Заименко А.А. Определение потенциала энергосбережения на основе техноценологического метода / А.А. Заименко // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. Материалы IV Всероссийской научно-технической интернет-конференции. – 2014. – С.55-63.

42. Змиева К.А. Повышение эффективности управления процессом механообработки на основе автоматизированной системы энергосбережения // Безопасность жизнедеятельности. – №10. – 2009. – С. 6-8.

43. Закон України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р. № 74/94-ВР [Електронний ресурс]. – Офіційний веб-сайт Верховної Ради України. – Режим доступу до документа: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=74%2F94-%E2%F0>.

44. Загальні вимоги до організації та проведення енергетичного аудиту // Національне Агентство України з Питань Забезпечення Ефективного Використання Енергетичних Ресурсів наказ 20.05.2010 N 56.

45. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / Ивахненко А.Г. – К. : Техніка, 1975. – 311 с.
46. Иваничев А.В. Разработка методики комплексного определения электрических нагрузок на основе кластерного и ценологического анализа / А.В. Иваничев // Проблемы электротехники и электротехнологии: сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Тольятти: ТГУ – 2009. – С. 162-165.
47. Иващенко В.А. Теоретико-методологические основы, методы и математические модели управления электропотреблением промышленных предприятий/ В.А. Иващенко// Вестник СГТУ. – 2005. – № 2 (7) – С. 100-114.
48. Ковалко М.П. Энергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М.П. Ковалко, С.П. Денисюк. – К. : УЕЗ, 1998. – 506 с.
49. Клячкин В.Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии// В.Н. Клячкин – М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2009. — 304 с.
50. Костерев В.В. Надежность технических систем и управление риском / В.В. Костерев – МИФИ. – 2008. – 280 с.
51. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн – М.:Наука, 1984. — 830 с.
52. Когге Ю.К., Майский Р.А. Основы надежности авиационной техники // Ю.К. Когге, Р.А. Майский – Издательство: Машиностроение, 1993. – 176 с.
53. Казаринов Л.С. Метод нормирования и прогноза потребления воды в системе оборотного и технического водоснабжения промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова, Т.А. Барбасова, А.Р. Хасанов // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции Издательский центр ЮУрГУ – 2014. – С. 656 - 660.

54. Казаринов Л.С. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, А.А. Захарова // Вестник ЮУрГУ. – 2014. – том 14. – № 1. – С. 5-13.
55. Киреева Н.В. Методология нормирования энергопотребления на промышленных предприятиях: проблемы и направления развития / Н.В. Киреева // Казанская наука. – №8. – 2012. – С. 30-34.
56. Кошарная Ю.В. Методика анализа параметров электропотребления для нормирования и оценки энергосбережения при проведении энергоаудита предприятий и организаций / Ю.В. Кошарная // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – №4. – 2016. – С. 56-69.
57. Ляхомский А.В. Моделирование поверхности показателей энергоэффективности обогащательных производств горных предприятий/ Ляхомский А.В., Петров М.Г., Вахрушев С.В // Горный информационно-аналитический бюллетень – № 10 – 2006. – С. 313-316.
58. Лясковец Т.Н. Проблемы нормирования потерь электрической энергии на угольных шахтах / Т.Н. Лясковец, В.В. Халимов// Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2010. – №30 – С. 113-124.
59. Леонтьев Е.В. Методика проведения энергоаудита компрессорной станции, компрессорных цехов с газотурбинными и электроприводными ГПА / Е.В. Леонтьев , В.В. Огнев , Г.А. Хворов // СТО Газпром 2-1.20-122-2007.
60. Медведев В.С. Нейронные сети / В.С. Медведев – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
61. Мусаев А.А. Современное состояние и направления развития общего логико-вероятностного метода анализа систем / А.А. Мусаев, И.А. Гладкова // Труды СПИИРАН. – 2010. – №12. – С. 75–96.

62. Мандель И.Д. Кластерный анализ / И.Д. Мандель – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
63. Материалы проекта «Усиление действий по подготовке энергоменеджеров в Украине» по программе TACIS №EUK 9701. / К.:ІЕЕ НТУУ «КПІ», 1999. – 156 с.
64. Макоклюев Б.И. Единая система классификации и кодирования электроэнергетике. Проблемы и пути решения/ Б.И. Макоклюев, М.И. Лондер, С.Г. Попов, М.Л. Котляр, Ю.М. Кудряшов, В.Ф. Шумилин, Ю.А. Шадунц. // Электрические станции 2006. – № 3. – С. 2-6.
65. Могиленко А. Энергосбережение и энергоэффективность. Важные аспекты мониторинга и анализа / А. Могиленко, Д. Павлюченко // Новости электротехники. – 2012. – №4 (76) – С.1-6.
66. Методика аналізу та розрахунку питомих витрат енергоресурсів під час проведення експертизи з енергозбереження та інспектування споживачів енергоресурсів// Державний Комітет України з Енергозбереження наказ 05.12.2002 N 132 Про затвердження Методики аналізу.
67. Методологічні положення з організації державних статистичних спостережень щодо використання палива та енергії// Державний комітет статистики України наказ 03.10.2011 N 250.
68. Находов В.Ф. Вибір необхідного складу критеріїв адекватності математичних моделей енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 3. – С. 68-77.
69. Находов В.Ф. Контроль ефективності енерговикористання в системі енергетичного менеджменту / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько // Журнал «Вісник КНУТД». – 2013. – №6. – С. 67-77.
70. Находов В.Ф. Вибір найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення стандартів енергоспоживання виробничих об'єктів.

/ В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – №1. – С. 20-29.

71. Находов В.Ф. Комплексний підхід до визначення складу чинників, що впливають на величину енергоспоживання при впровадженні систем оперативного контролю енергоефективності / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько, І.О. Єгорова // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – №2. – С. 68–77.

72. Находов В.Ф. Виявлення «проблемних» ділянок схеми електропостачання для верифікації розрахункових електробалансів / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько, І.В. Якобюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 2/8 (74). – С. 4-10.

73. Находов В.Ф. Аналіз методики розрахунку нормативних витрат електричної енергії на виробництво і транспортування тепла / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько, Т.В. Мазаєва // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 6. – С. 2-11.

74. Находов В.Ф. Вибір методу математичного моделювання енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів. Збірник наукових праць I Міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів: м. Донецьк: «ДВНЗ» ДонНТУ. – 2013. – 197 с.

75. Находов В.Ф. Удосконалення методологічних засад побудови систем оперативного контролю ефективності енерговикористання / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько // Энергозбережение на дорожном транспорте и промышленности. Материалы IV Международной научно-практической конференции «Энергосбережение на дорожном транспорте и промышленности» – Д.ДНУЖТ. – 2013. – 90 с.

76. Находов В.Ф. Вибір методів математичного моделювання процесів енергоспоживання в системах оперативного контролю

енергоефективності / В.Ф. Находов, Д.О. Іванько, А.В. Головка // Енергетика: економіка, технології, екологія. – Спецвипуск. – 2013. – С. 20-27.

77. Находов В.Ф. Визначення оптимальних умов для побудови систем оперативного контролю ефективності енергоспоживання [Текст] / В.Ф. Находов, Я.С. Бедерак, Д.О. Іванько, Ю.О. Богданова // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2013. – С. 377-385.

78. Находов В.Ф. Застосування ймовірно-статистичного підходу для побудови балансів електроспоживання котельних / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько, А.В. Ройтер, Ю.В. Пахарєв // III Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'16» – С. 82-83.

79. Находов В.Ф., Бориченко О.В. Побудова електробалансів виробничо-господарських об'єктів на основі апарату нечіткої логіки та математики // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2009. – №15. – С.5-12.

80. Находов В.Ф. Энергосбережение и проблема контроля эффективности энергоиспользования// Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2007. – № 1.– С. 34–42.

81. Находов В.Ф. Побудова енергобалансів виробничо-господарських об'єктів ймовірносно-статистичним методом / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко // Енергоефективність великого промислового регіону : III міжнар. наук.-практ. конф. : тези доп. – Донецьк, 2008. – С. 150–155.

82. Нечаєва І.А. Метод аналізу середовища функціонування для оцінки ефективності роботи суб'єкта, який ухвалює рішення, та його переваги / І.А. Нечаєва, Д.С. Проскуріна // Економічний аналіз. – 2013. – Том 14. – № 3. – С. 162-167.

83. Находов В.Ф. Ймовірносно-статистичний підхід до побудови енергобалансів виробничо-господарських об'єктів / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – № 6. – С. 45–54.

84. Находов В.Ф. Побудова балансів споживання електроенергії виробничих об'єктів з використанням імовірносно-статистичних методів/ В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, О.О. Мусатова // Енергетика: економіка, технології, екологія : наук.-техн. конф. молодих дослідників, аспірантів та магістрантів, 20–21 травня 2010 р. : тези доп. – К., 2010.

85. Новиков, С.А. Оценка эффективности мероприятий по снижению электроемкости машиностроительной продукции / С.А. Новиков // Проблемы совершенствования организации производства и управления промышленными предприятиями: межвуз. сб. науч. тр. – Самара: Изд-во Самар. гос. экон. ун-та. – 2009. – С. 78-84.

86. Ольшанский А.И. Основы энергосбережения / А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский, Н.В. Беляков – УО «ВГТУ», Витебск, 2007. – 223 с.

87. Основні положення з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві // Наказ Державного комітету України з енергозбереження від 22 жовтня 2002 року N 112.

88. Павлов А. Н. Принятие решений в условиях нечеткой информации // А. Н. Павлов, Б. В. Соколов – ГУАП – СПб., 2006 – 72 с.

89. Праховник А.В. Контроль ефективності енерговикористання – ключова проблема управління енергозбереженням / А.В. Праховник, В.Ф. Находов, О.В. Бориченко // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2009. – №8(66). – С. 41–54.

90. Праховник А.В. Контроль і нормалізація енергоспоживання/ А.В. Праховник, Г.Р. Трапп // Управління енерговикористанням : зб.доп. – К.: Альянс за збереження енергії, 2001.– С.387–398.

91. Праховник А.В. Энергетический менеджмент / А.В. Праховник, А.И. Соловей, В.В. Прокопенко и др.// К.: ІЕЕ НТУУ «КПІ», 2001. – 472 с.
92. Постнікова М.В Шляхи раціональних витрат електроенергії поточкових ліній очищення зерна/ Постнікова М.В., Назар'ян Г.Н., Никифорова Л.Є., Михайлов Є.В., Карпова О.П. // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. - Мелітополь: ТДАТУ, 2012. - Вип. 12. Т.2. - 243 с.
93. Пособие по курсу «Основы целевого энергетического мониторинга». – М.: ЭНИЗАН, АСЭМ, 1997. – 38 с.
94. Передерий В.П. Применение методов математического моделирования для оценки удельной энергоемкости технологии получения белых столовых виноматериалов// В.П. Передерий, В.А. Виноградов, В.П. Антипов, К.Ф. Феодоси// Виноградарство и виноделие. – Сборник научных трудов НИВив «Магараж» - 2011.- С 106-108.
95. Петрицкий, С.А. Расчет нормативного электропотребления / С.А. Петрицкий // Теория и практика энергосбережения. – Нижний Новгород: НГТУ, НИЦЭ. – 2006. – С. 67-80.
96. Пермяков А.А. Об экономии электроэнергии и ее нормировании в механообработке / Пермяков А.А., Забара А. // Технології в машинобудуванні – Вестник НТУ "ХПІ".– №1.– С.1-9.
97. Положення з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів на підприємствах і в організаціях Укравтодору/ Пол.-218-03450778-391-2004.
98. Порядок нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві// Кабінет Міністрів України постанова від 15 липня 1997 р. N 786 Київ.
99. Рябинин И.А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов – М.: Радио и связь, 1981. - 216 с.

100. Розен, В.П. Методологія бенчмаркінгу енергоефективності для промисловості України / Розен В.П., Тішкевич Б.Л., Розен П.В. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит – НТУ "ХПИ". – 2012. – №6. – С.9-19.

101. Розен В.П. Электробаланс и моделирование его слагаемых для энергоёмких технологических процессов подземных железорудных производств/ В.П. Розен, Р.А. Пархоменко, И.О. Синчук, О.Е. Мельник // Электротехника, радиотехника, телекоммуникации, и электроника. – 2013. – С. 19-30.

102. Разработка инновационной комплексной системы управления энергосбережением, снижением энергоемкости выпускаемой продукции и экологизацией производства, система энергоменеджмента [Электронный ресурс] // Энергетика. Энергоэффективность. Известные энергетики 2012. – Режим доступа до документа: www.feeder.ru.

103. Свідोцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір «Ймовірісно-статистичний підхід до побудови балансів електроспоживання на підприємствах теплотехніки» / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько – №69589; заявка від 04.01.2017р.; зареєстр. 04.11.2016 р.

104. Сытник В.Ф. АСУП и оптимальное планирование// В.Ф. Сытник – Вища школа, 1977. – 312 с.

105. Стеценко І.В. Побудова багатofакторних математичних енергоспоживання на хімічному виробництві / І.В. Стеценко, Я.С. Бедерак // Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит. – 2013. – №7(113). – С. 41-48.

106. Стадник В.В., Миколук О.А. Теоретико-методичні підходи до формування системи управління енергоспоживанням машинобудівних підприємств/ В.В. Стадник, О.А. Миколук // Економічний простір – №37.– 2010. – С.248-262.

107. Сергеев Н.Н. Методологические аспекты энергосбережения и повышения энергетической эффективности промышленных

предприятий / Н.Н. Сергеев – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2013. – 116 с.

108. Свидерская О.В. Основы энергосбережения / О.В. Свидерская – Мн.:Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006. – 296 с.

109. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Том 1. Электроснабжение / Под общ. ред. А. А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 568 с.

110. Тайц А.А. Методика нормирования удельных расходов электроэнергии / А. А. Тайц – Госэнергоиздат в М., 1946. - 150 с.

111. Токочакова Н.В. Способы построения расчетно-статистических моделей электропотребления промышленных потребителей / Токочакова Н.В., Мороз Д.Р. // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого – №2. – 2006. – С. 37-46.

112. Троицкий-Марков Т.Е.. Методическое пособие для производственных малых и средних предприятий по вопросам повышения ресурсо - и энергоэффективности (практика энергоменеджмента)/ Троицкий-Т.Е. Марков, Д.В. Сенновский, В.И. Зуев, Д.В. Журова – М., 2010. — 136 с.

113. Тарасова В.В. Математическое моделирование для обработки результатов энергетических обследований и повышения эффективности использования энергетических ресурсов /В.В. Тарасова, В.Г. Ковалев// Энергетическое обследование как первый этап реализации концепции энергосбережения: материалы Международной конференции Томского политехнического университета. – Изд-во ООО «СПБ Графика». – 2012. — С. 23-25.

114. Труфанов И.Д. Системные факторы стратегии разработки энергосберегающих адаптивно-экстремальных систем автоматизации в электрометаллургии /И.Д. Труфанов, А.П. Лютый, К.И. Чумаков, М.А. Поляков, А.В. Близняков, И.А. Кашук// Восточно-Европейский журнал передовых технологий – №47. – 2010. – С.21-32.

115. Турченко Д.К. Критериальная база оценки использования энергетических ресурсов в производстве/ Д.К. Турченко // Економіка промисловості. – 2006. – № 4. – С. 133-137.
116. Хорьков С.А. Расчеты электропотребления при энергетическом обследовании промышленного предприятия / С.А. Хорьков – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2011.–111с.
117. Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками/ М.И. Хакимьянов // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – № 2 (63). – С. 54–60.
118. Хлістунова Н.В. Особливості бенчмаркінгу енергоефективності у вищих навчальних закладах/ Н.В. Хлістунова // Вісник КНУТД. – №5 (79). – 2014. – С. 25-28.
119. Харитонов А.Ю. Анализ энерго - и ресурсопотребления муниципальных объектов с помощью методов системной динамики на основе автоматизированной системы мониторинга / А.Ю. Харитонов // ДонНТУ Сборник научных трудов "Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе" – № 1. – 2012. – С. 286-289.
120. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений. // И. Г. Черноруцкий – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
121. Чубукова И.А. Data Mining // И.А. Чубукова – Курс лекций интернет-университета INTUIT, 2006 р. – 328 с.
122. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. / Р. Шторм – М.: Мир, 1970. – 368 с.
123. Шитиков В.К. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ данных по биологии и экологии с использованием R/ В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг – Тольятти: «Кассандра», 2013. - 305 с.
124. Шульга Ю.И. Проблемы нормирования энергопотребления и направления их решения / Ю.И. Шульга, В.Ф. Находов, Е.А. Глухонина

//Доклады международной научно-технической конференции «Энергоэффективность» – 2002. – С. 76-81.

125. Шуралев Д.В. Разработка теории расчета адекватных удельных норм электропотребления для нестационарных режимов загрузки предприятия / Д.В. Шуралев, Р.Г. Идиятуллин // Проблемы энергетики. Известия высших учебных заведений. – 2001. – С.101-112.

126. Шестопалова Т.А. Математическая модель электропотребления многономенклатурного производства при часто изменяемом ассортименте/ Т.А. Шестопалова // Вестник КРСУ. – № 2. – 2002. – С. 1-4.

127. Щелоков Я.М. Энергетическое обследование: справочное издание. Том 1. Теплоэнергетика.// Я.М. Щелоков, Н.И. Данилов – Екатеринбург, 2011. – 264 с.

128. Askounis D. Information system for Monitoring and Targeting (M&T) of energy consumption in breweries/ D. Askounis, D. Psarras // Energy Vol. 23 – № 5 – 1998. – P. 413–419.

129. Andreassi L. Innovative method for energy management: Modelling and optimal operation of energy systems/ L. Andreassi, M.V. Ciminelli, M. Feola, S. Ubertini //Energy and Buildings – № 41. – 2009. – P. 436-444.

130. Aughney N. The energy saving opportunity in targeting non-value added manufacturing activities — a structured approach/ N. Aughney, G.E. O'Donnell //Journal of Cleaner Production – №86– 2015. – P.191-200.

131. Abonyi J. Historical Process Data Based Energy Monitoring - Model Based Time-Series Segmentation to Determine Target Values. / J. Abonyi, T. Kulcsar, M. Balaton, L. Nagy // Chemical Engineering Transactions – №35. – 2013.— P. 931-936.

132. Arney W. M. Predicting and Verifying Energy Savings for Energy Service Companies Using Short-Term Monitoring / W.M. Arney, S.S. Waterbury,

M.J. Ossi – American Council for an Energy Efficient Economy Summer Study, Panel 3, 1998. – 10p.

133. Baskys A. Calculation of Electrical Energy Balances of Production Systems Based on Probabilistic-Statistical Approach / A. Baskys, V. Nakhodov, D. Ivanko, C.F. Pfeiffer // Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2015 IEEE 3rd Workshop on Advances in Riga – 2015. – P.1-6.

134. Bersimis S. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview. / S. Bersimis, S. Psarakis, J. Panaretos // Quality and Reliability in Engineering. International. – 2007. – P. 517-543.

135. Beale M. H. Neural Network Toolbox 7 User's Guide/ M. H. Beale, H. B. Hagan – Copyright by The MathWorks, 2017. – 446 p.

136. Bureau, ETSU, Harwell, Oxfordshire, OX11. Good Practice Guide 112. – 1998. – 45p.

137. Chernick M. R. Bootstrap Methods: A Guide for Practitioners and Researchers// M. R. Chernick – Wiley Series in Probability and Statistics, 2007. – 400 p.

138. Computer Based Monitoring And Targeting On A Hot Rolling Mill. Energy Efficiency Enquiries Bureau / ETSU, Harwell, Oxfordshire, OX11. Best Practice Programme. – 1992. – 26 p.

139. Monitoring and targeting: Techniques to help organisations control and manage their energy use./ Carbon Trust. No. CTG008. – 2008. – 33p.

140. Wheeler J. Donald Understanding statistical process control// J. Donald Wheeler, S. David Chambers – SPC PRESS, 1992 — 446 p.

141. Efron B. An Introduction to the Bootstrap./ B. Efron, R.J. Tibshirani – Chapman and Hall/CRC, 1993. – 436 p.

142. Esbensen K.H. Multivariate Data Analysis – In Practice// K.H. Esbensen – CAMO: NedleVollgate 8, Oslo Norway, 2002. – 587 p.

143. Edomah N. Optimizing Energy Consumption in Industrial Plants through Effective Energy Monitoring & Targeting / N. Edomah // International Journal of Engineering and Technology – V. 3. – № 7. – 2013. – P. 702-705.
144. Electricity Costs of Energy Intensive Industries. An international comparison.// Ecofys and Fraunhofer ISI 2015.— 84p.
145. Energy efficiency market report 2015. Market trends and medium-term prospects//International Energy Agency 2015 – 249 p.
146. Farinaccio L. Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses/ L. Farinaccio, R. Zmeureanu // Energy and Buildings – №30 – 1999.— P. 245-259.
147. Boyd G. The evolution of the ENERGY STAR energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use/ Boyd G., Dutrow E., Tunnessen W. // Journal of Cleaner Production. – №16. – 2008. – P. 709-715.
148. Gotel D. G. The application of monitoring & targeting to energy management/ D. G. Gotel – London: HMSO. Monitoring and Targeting (M&T). – 1989. – 53 p.
149. Harris P. Energy monitoring and target setting using CUSUM// P. 149. Harris Cheriton Technology Publications. – 1989. – 13 p.
150. Henson J. L, Stott M. D. Energy Monitoring and Targeting in the Foundry Industry/ J. L Henson, M. D. Stott / British Foundry man, November 1988.— P. 13-17.
151. Herrmann C. Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application / C. Herrmann, S. Thiede, S. Kara, J. Hesselbach // CIRP Annals - Manufacturing Technology – №60 – 2011. – P. 45–48.
152. Hilliard A. Recursive Estimates as an Extension to CUSUM-based Energy Monitoring & Targeting. / A. Hilliard, G.A. Jamieson / Proceedings of the 2013 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry Niagara Falls, NY: ACEEE. – 2013.— P. 4–13.

153. Hu S. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools/ S. Hu, F. Liu, Y. He, T. Hu //Journal of Cleaner Production – №27. – 2012. – P.133-140.
154. Hilliard A., Jamieson G.A. Monitoring & Targeting Energy in Practice: A Field Study/ A. Hilliard // University of Toronto, King's College Rd. – 2014. – 11 p.
155. Ivakhnenko A.G. The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling (GMDH) / A.G. Ivakhnenko // Pattern Recognition and Image Analysis – Vol. 5 – № 4 – 1995. – P. 527-535.
156. International Performance Measurement and Verification Protocol / Prepared by Efficiency Valuation Organization EVO – 2007. – 21 p.
157. Jones P. Getting started with Monitoring & Targeting (M&T) / P. Jones // Fundamental Series. – 2004. – №7. – P. 29–32.
158. Kreith F. Energy management and conservation handbook / F. Kreith, D. Y. Goswami – CRC Press, 2008. – 443 p.
159. Kara S. Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems/ S. Kara, G. Bogdanski , W. Li // Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany – №4. – 2011. – P. 1-10.
160. Kulcsar T. Feature Selection Based Root Cause Analysis for Energy Monitoring and Targeting/ T. Kulcsar, M. Balaton, L. Nagy, J. Abonyi // Chemical Engineering Transactions. – Vol. 39. – 2014. – P.709-714.
161. Kanako T. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy/ T. Kanako // Energy Policy 36. – 2008. – P. 2887– 2902.
162. Leobner I. Monitoring of energy flows and optimization of energy efficiency in a production facility/ I. Leobner, K. Ponweiser , C. Dorn, F. Bleicher // International Conference Recent Researches in Geography, Geology, Energy, Environment and Biomedicine. – 2001. – p. 81-85.

163. Lee A. H.W. Verification of electrical energy savings for lighting retrofits using short- and long-term monitoring / A. H.W. Lee // *Energy Conversion and Management* – Vol. 41. – № 18. – 2000.— P. 1999–2008.
164. Lau H.C.W. A fuzzy logic approach to forecast energy consumption change in a manufacturing system/ H.C.W. Lau, E.N.M. Cheng, C.K.M. Lee, G.T.S. Ho // *Expert Systems with Applications*. – 2008. – №34. – P. 1813-1824.
165. McMullan A. Low Investment, Low Risk Approach to Energy Cost Savings/ A. McMullan, M. Rutkowski, A. Karp // *Proceedings from the Twenty-third National Industrial Energy Technology Conference, Houston, TX.* – 2001. – P. 196-203.
166. Murray G Patterson What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues/ G Patterson Murray / *Energy Policy*. – Vol. 24. – № 5. – 1996. – P. 377-390.
167. Nakhodov V. Development of methods for monitoring of energy efficiency in the energy management systems [Текст] / V. Nakhodov, N. Skeie, C.F. Pfeiffer, E. Borichenko, D. Ivanko // Міжнародна науково-практична та навчально-методична конференція «Сталий енергетичний розвиток: сучасні тенденції, технології та рішення» НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2014. – 61 с.
168. Nakhodov V. Application of sequential analysis of Wald for energy efficiency monitoring [Текст] / V. Nakhodov, A. Baskys, E. Borichenko, D. Ivanko // *Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2016 IEEE 4rd Workshop on Advances in Vilnius – 2016.* – P.1-6.
169. Nakhodov V. Identification of technological equipment with significant impact on uncertainty of electrical balances [Текст] / V. Nakhodov, A. Baskys, C. Pfeiffer, D. Ivanko // *Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), eStream Vilnius – 2016.* – P.1-6.
170. Oakland J.S. Statistical Process Control / J.S. Oakland – Butterworth-Heinemann, 2008. — 473 p.

171. Pomerantsev A.L. Confidence intervals for nonlinear regression extrapolation./ A.L. Pomerantsev // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 49. – 1999. – P. 41–48.
172. Piet G.M. Boonekamp Evaluation of methods used to determine realized energy savings/ G.M. Piet / *Energy Policy* – 2006. – № 34. –P. 3977–3992.
173. Pooley John. Quick Start Guide to Energy Monitoring & Targeting (M&T) [Электронный ресурс] // *Effective Energy Management Guide*. – 2005. – Режим доступа: <http://www.oursouthwest.com/SusBus/susbus9/m&tguide.pdf>.
174. Rodionova O.Y. Application of SIC (simple interval calculation) for object status classification and outlier detection – comparison with regression approach / O.Y. Rodionova, K.H. Esbensen, A.L. Pomerantsev // *Chemometrics*. – 2004 – №18. – P.402–413.
175. Raab J. Regulating DSM Program Evaluation: Policy and Administrative Issues for Public Utility Commissioners./ J. Raab, D. Violette – Washington, DC., National Association of Regulatory Utility Commissioners, 1994. – 63 p.
176. Rudramoorthy R. Development of effective energy monitoring and targeting system (eemts) for a foundry using statistical model technique/ R. Rudramoorthy, S Puranik Vinod, R. Velavan // *4-th International Conference on Mechanical Engineering*. Dhaka, Bangladesh. – 2001. – P. 27-31.
177. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency// European Commission, 2009.— 398 p.
178. Seber G.A.F. Nonlinear Regression// G.A.F. Seber, C.J. Wild – Wiley, New York, 2003. —800 p.
179. Y. Seow A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems/ Seow Y., Rahimifard S. // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – №4. – 2011. – P.258–264.

180. Scott L. Freeman Measuring industrial energy intensity: practical issues and problems/ Freeman L. Scott, J. Niefer Mark, M. Roop Joseph // Energy PoBcy – Vol. 25. – 1997. – P. 703-714.
181. The Investment Plan for Europe and Energy: making the Energy Union a reality / European Commission - Fact Sheet, Brussels, 14 June 2016
182. Utlu Z. Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production/ Z. Utlu, Sogut Z., Hepbasli A., Oktay Z. // Applied Thermal Engineering – 26. – 2006.— P. 2479–2489.
183. Vine E.-L. The monitoring, evaluation, reporting, verification, and certification of energy-efficiency projects/ E.-L. Vine, J.-A. Sathaye //Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. – №5.— 2000.— P. 189–216.
184. Vijayaraghavan A. Automated energy monitoring of machine tools/ A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld // CIRP Annals – Manufacturing Technology – №59. – 2010. – P. 21–24.
185. Wilson T. Computer Aided Monitoring and Targeting / T. Wilson // British Foundry man – 1992. – P. 5–7.
186. Weinert N. Methodology for planning and operating energy-efficient production systems/ N. Weinert, S. Chiotellis, G. Seliger // CIRP Annals – Manufacturing Technology – № 60. – 2011. – P. 41–44.
187. P. Zhou Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance/ P. Zhou, B.W. Ang // Energy Policy 36. – 2008. – P. 2911– 2916.
188. Zhu J. Data Envelopment Analysis: A Handbook of Models and Methods / J. Zhu – Springer, 2015. — 472 p.
189. Zarasimhan S. Data Reconciliation and Gross Error Detection: An Intelligent Use of Process Data / S. Zarasimhan, C. Jordache/ Gulf Professional Publishing – 2006. – 428 p.

Додаток А

Особливості побудови багатofакторної лінійної регресійної залежності обсягів електроспоживання підприємства від обсягів виробленої на ньому продукції

На практиці обсяги виробництва продукції можуть суттєво різнитися протягом певним періодів часу (сезонів, днів тижня тощо). Побудова математичної моделі в зазначених умовах не дозволяє отримати об'єктивні результати через значну похибку моделювання. Тому доцільною є розподілення вихідних даних обсягів електроспоживання та виробництва продукції на однорідні групи, для кожної з яких в подальшому повинна визначатись окрема багатofакторна лінійна регресійна модель.

Для визначення однорідних груп статистичних даних доцільно скористатися одним з методів кластерного аналізу, зокрема k-середніх. Даний метод визначає границі кластерів шляхом оцінки сумарного квадратичного відхилення точок кластерів від центрів зазначених кластерів [63]:

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2, \quad (\text{A.1})$$

де k — кількість кластерів; S_i — отримані кластери; $i = 1, 2, \dots, k$ та μ_i — центри мас та векторів $x_j \in S_i$.

Традиційно, у більшості літературних джерел побудову залежностей електроспоживання від тих чи інших параметрів виробничих процесів пропонується здійснювати методом найменших квадратів (МНК). Даний метод дозволяє визначати коефіцієнти регресії за умовою мінімізації суми квадратів відхилень змодельованих даних від їх дійних значень.

У матричній формі коефіцієнти рівняння математичної моделі визначаються за наступним виразом:

$$b = (X^T X)^{-1} X Y, \quad (\text{A.2})$$

де b — вектор коефіцієнтів рівняння регресії; X — матриця незалежних змінних; X^T — транспонована матриця незалежних змінних; Y — матриця залежних змінних.

Для визначення коефіцієнтів рівняння регресії МНК необхідно згорнути матрицю $(X^T X)^{-1}$. При цьому, якщо матриця X є колінеарною, тобто незалежні змінні мають сильний кореляційний зв'язок між собою, тоді розрахунок матриці $(X^T X)^{-1}$ не має розв'язків. Крім того, дана задача також не може бути вирішена в випадку, коли кількість незалежних змінних перевищує кількість наявних статистичних даних.

Відомо, що на практиці, на багатьох підприємствах існує сильний статистичний взаємозв'язок між випуском різних видів продукції. Тому, проблема врахування колінеарності між незалежними змінними при побудові електробалансів за видами продукції є актуальною.

Для вирішення проблеми колінеарності між незалежними змінними у регресійному аналізі традиційно застосовується підхід, який базується на вилученні з розрахунків окремих незалежних змінних, до того моменту, доки матриця $(X^T X)^{-1}$ не буде давати задовільний розв'язок.

При побудові балансів електроспоживання за видами продукції традиційний підхід боротьби з колінерністю, тобто не врахування в моделі окремих незалежних змінних, не може застосовуватись. Весь набір незалежних змінних у відповідній задачі фактично використовується для відтворення балансу електроспоживання на підприємстві. Усунення із розрахунків хоча б однієї з незалежних змінних призводить до втрати важливої інформації та отримання електробалансів, які не будуть адекватно відтворювати процеси енергоспоживання на підприємстві.

Для вирішення проблеми колінеарності, що виникає під час вирішення задачі побудови електробалансів за видами продукції, в роботі запропоновано замість більш розповсюдженого методу найменших квадратів використовувати метод побудови регресії на латентні структури (PLS). PLS базується на методі

білінійної проекції, який дозволяє отримувати стійкі рішення при наявності сильного колінеарного зв'язку між незалежними змінними, при цьому враховуючи усі незалежні змінні. Зокрема даний алгоритм було наведено в [142]. У загальній формі PLS -модель записується як $X = TP^T + E$ і $Y = TQ^T + F$. Де X відповідно характеризує кількість випущеної продукції, а Y електроспоживання.

1) Нормовані вхідні змінні X та y центрують, відповідно:

$$X_0 = X - 1\bar{x}^T, y_0 = y - 1\bar{y}, \quad (\text{A.3})$$

2) Вибирається значення $A_{\max}$ так, щоб воно було більше, ніж число явищ, наявність яких передбачається в X . Для кожного головної компоненти (ГК) з номером $a = 1, \dots, A_{\max}$ виконуються кроки 2.1 – 2.5:

2.1) Для знаходження зважених навантажень w_a використовується метод найменших квадратів і локальна модель:

$$X_{a-1} = y_{a-1}w_a^T + E, \quad (\text{A.4})$$

Потім проводиться нормування:

$$\bar{w}_a = cX_{a-1}^T y_{a-1}, \quad (\text{A.5})$$

де c – нормувальний фактор, який робить довжину $\bar{w}_a$ рівний одиниці, тобто

$$c = (y_{a-1}^T X_{a-1} X_{a-1}^T y_{a-1})^{-0.5}, \quad (\text{A.6})$$

2.2) Визначаються рахунки $\hat{t}_a$ за допомогою локальної моделі

$$X_{a-1} = \hat{t}_a \bar{w}_a^T + E, \quad (\text{A.7})$$

Рішення МНК має вигляд (так як $\bar{w}_a^T \bar{w}_a = 1$)

$$\hat{t}_a = X_{a-1} \bar{w}_a, \quad (\text{A.8})$$

2.3) Визначається «спектральне» навантаження p_a за допомогою локальної моделі

$$X_{a-1} = \hat{t}_a p_a^T + E, \quad (\text{A.9})$$

яка має МНК рішення

$$\bar{p}_a = X_{a-1}^T \hat{t}_a / \hat{t}_a^T \hat{t}_a, \quad (\text{A.10})$$

2.4) Визначаються «хімічні» навантаження q_a за допомогою локальної моделі

$$y_{a-1} = \hat{t}_a q_a + f, \quad (\text{A.11})$$

Яка має рішення МНК:

$$\bar{q}_a = y_{a-1}^T \hat{t}_a / \hat{t}_a^T \hat{t}_a, \quad (\text{A.12})$$

2.5) Віднімаючи вклад від знайденої ГК, отримуємо нові залишки X та y :

$$\bar{E} = X_{a-1} - \hat{t}_a \bar{p}_a^T, \quad (\text{A.13})$$

$$\bar{f} = y_{a-1} - \hat{t}_a \bar{q}_a, \quad (\text{A.14})$$

Для цих залишків розраховуються різноманітні статистичні показники, які отримуємо визначенням сумарного значення $\hat{e}_{ik}$ по всіх об'єктах i змінним k , а також сумуванням $\bar{f}_i$ по всім i об'єктам.

Замінюємо старі величини X_{a-1} і y_{a-1} новими значеннями $\bar{E}, \bar{f}$ і збільшуємо номер ГК на одиницю:

$$\begin{aligned} X_a &= \bar{E} \\ y_a &= \bar{f}, \\ a &= a + 1 \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

3) Визначаємо A – число ГК ПЛС, яке являється для даної калібрувальної моделі.

4) Для A ГК, розраховуємо $\bar{b}_0$ і $\bar{b}$, які будуть використовуватись в рівнянні: $\bar{y} = 1\bar{b}_0 + X\bar{b}$

$$\bar{b} = \bar{W}(\bar{P}^T \bar{W})^{-1} \bar{q}, \quad (\text{A.16})$$

$$\bar{b}_0 = \bar{y} - \bar{x}^T \bar{b}, \quad (\text{A.17})$$

Визначення прогнозної моделі:

Для кожного нового об'єкту $i = 1, 2, \dots, t$ виконуються кроки P1-P3 або крок P4.

Р 1) Вихідні дані x_i нормуються також, як нормувались раніше калібрувальні змінні. Потім розраховуються: $x_{i,0}^T = x_i^T - \bar{x}1$, де $\bar{x}$ — центр калібрувальних зразків. Для кожної ГК з номерами $a=1,...,A$ виконуються кроки Р 2.1 – Р 2.2.

Р 2.1) Знаходимо $\hat{t}_{i,a}$ в співвідношенні з формулою С 2.2, тобто $\hat{t}_{i,a} = x_{i,a}^T - 1\bar{w}_a$.

Р 2.2) Розраховуємо нові залишки $x_{i,a} = x_{i,a-1} - \hat{t}_{i,a} \bar{p}_a^T$.

Якщо $a < A$, то збільшуємо a на одиницю і повертаємось до Р 2.1. Якщо $a = A$, то переходимо до Р3.

Р 3) Передбачення y_i за допомогою $\bar{y}_i = \bar{y} + \sum_{a=1}^A \hat{t}_{i,a} \hat{q}_a$.

Підрахунок статистик для залишків в x_{iA} і $\hat{t}_i$.

Передбачення за допомогою X

Р 4) Замість кроків Р1 – Р3 можна знайти $\bar{y}$, використовуючи $\bar{b}_0$ і $\bar{b}$ з пункту 4:

$$\bar{y} = \bar{b}_0 + \bar{x}^T \bar{b}, \quad (\text{A.18})$$

Зауважимо, що Р та Q не нормовані, Т і W ортогональні, а W до того є нормованими.

Як бачимо алгоритм побудови PLS моделі є набагато складнішим ніж використання методу найменших квадратів та потребує застосування спеціального програмного забезпечення. На даний час таке програмне забезпечення існує і може бути використано. Визначення коефіцієнтів регресійної моделі PLS методом реалізовано у цілій низці програмних продуктів, зокрема Matlab, Statistica, Unscramble.

Іншим ключовим питанням, на яке необхідно звернути увагу на даному кроці вирішення задачі побудови електробалансів, є те наскільки отримані тим чи іншим методом коефіцієнти регресійної моделі дозволяють відтворити реальний процес енергоспоживання за видами продукції на підприємстві і чи можливо їх вважати достовірними.

Добре обумовлена система вихідних рівнянь дозволяє стверджувати, що розрахований за допомогою регресійного аналізу електробаланс за видами продукції з високою ймовірністю відповідає дійсності. У разі, якщо система виявиться погано обумовленою довіряти отриманим за допомогою регресійної моделі результатам не можна.

Підвищити ступінь обумовленості системи можна за рахунок збільшення кількості вихідних даних, які використовуються для побудови моделі електробалансу за видами продукції.

Якщо на певний період часу на підприємстві наявною є недостатня кількість вихідних даних, тоді доцільно зменшити період для якого будуються електробаланси. Наприклад, якщо наявні річні статистичні дані не дають змогу отримати обумовлену систему вихідних рівнянь математичної моделі, тоді доцільно перейти до побудови місячних електробалансів, а вже за їх допомогою відтворити річні баланси.

На практиці, на більшості вітчизняних підприємств найменшим періодом для якого фіксуються статистичні данні є місяць. У випадку, коли наявні статистичні данні не дають змогу отримати достовірний електробаланс за видами продукції, а збір додаткових даних вимагає значних витрат часу, найбільш доцільним є використання підходу до побудови електробалансів наведеного в пункті 2.2.

Додаток Б

Застосування різних форм функції належності нечітких параметрів при обробці результатів експертного опитування

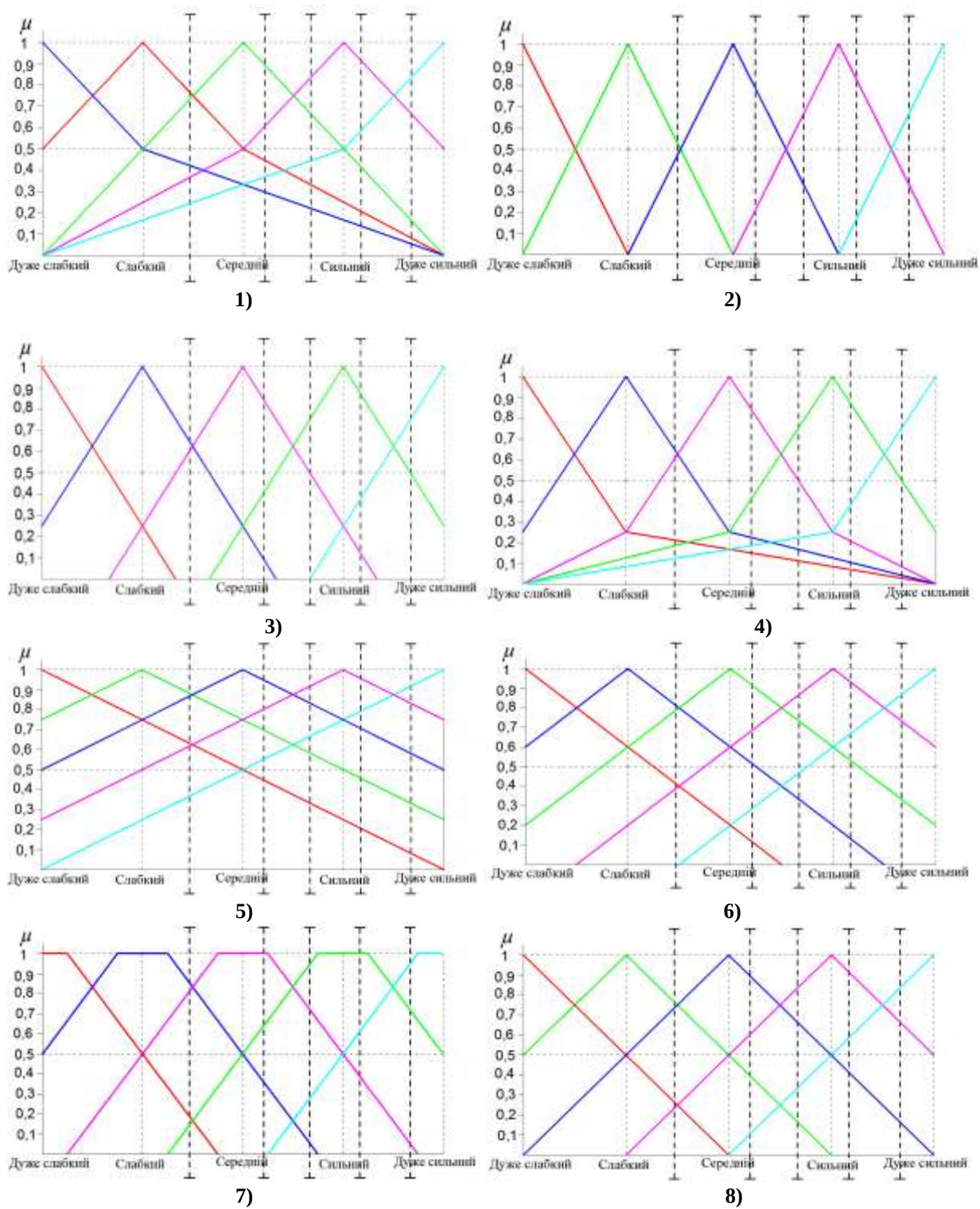
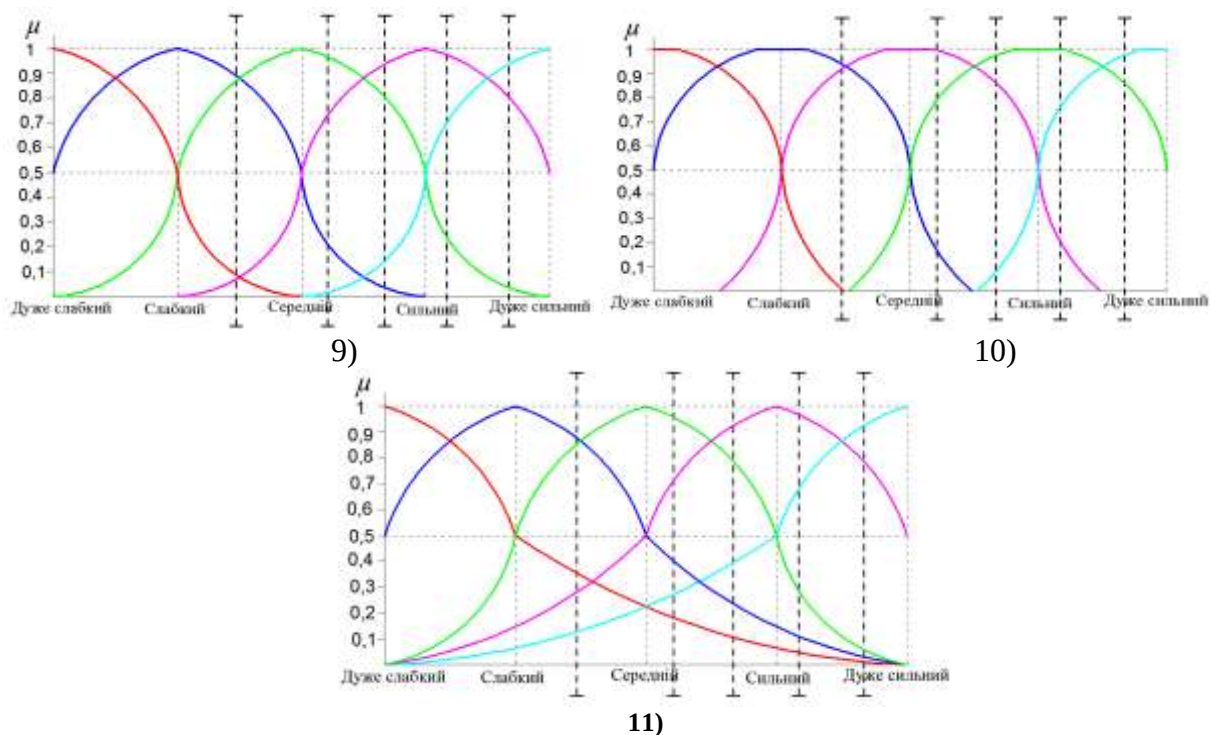


Рис Б.1. Оцінки рівня впливу чинників на енергоспоживання з використанням різних функцій належності нечіткого параметра



Продовження Рис Б.1.

Таблиця Б.1

Обробка результатів експертного оцінювання з використанням різних функції належності нечітких параметрів

Оцінка впливу	Умовний номер функцій належності нечіткого параметра										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Дуже слабкий	0,226	0	0	0,124	0,34	0,106	0,037	0,053	0,017	0,0008	0,140
Слабкий	0,366	0,106	0,147	0,236	0,59	0,358	0,253	0,265	0,227	0,22	0,331
Середній	0,575	0,318	0,413	0,446	0,787	0,66	0,594	0,575	0,582	0,596	0,588
Сильний	0,677	0,408	0,505	0,542	0,825	0,72	0,690	0,651	0,702	0,726	0,733
Дуже сильний	0,495	0,168	0,226	0,327	0,659	0,457	0,367	0,372	0,358	0,363	0,479

Як свідчать результати експериментальних розрахунків (табл. Б.1), форма функції належності практично не впливає на одержувані результати, оскільки в процесі обробки думок експертів необхідно визначити ступінь їх відповідності, кожному з встановлених нечітких лінгвістичних термів, а не кількісні значення (співвідношення) нечітких параметрів, що розглядаються.

Додаток В

Визначення коефіцієнтів відносної важливості чинників шляхом переходу від методу нечіткої логіки до методу попарного порівняння

З метою визначення коефіцієнтів відносної важливості чинників може бути здійснено перехід від методу експертних оцінок з застосуванням апарату нечіткої логіки до методу попарних порівнянь.

Використання методу парного порівняння дозволяє встановити перевагу чинників один над одним при порівнянні всіх можливих їх пар. В процесі порівняння кожної пари чинників експерт повинен впорядкувати цю пару, роблячи висновок, що фактор $F_i > F_j$ (тобто фактор F_i має більший вплив на енергоспоживання ніж фактор F_j); $F_i < F_j$ (тобто фактор F_i менше впливає на енергоспоживання ніж фактор F_j); $F_i \approx F_j$ (фактори F_i і F_j впливають на енергоспоживання з однаковою силою). Такий спосіб проведення експертного оцінювання є досить простою та зрозумілою задачею для експертів [7].

Результати лінгвістичних оцінок експертів отримані з застосуванням апарату нечіткої логіки можуть бути переведені в таблиці попарних порівнянь критеріїв.

Для визначення коефіцієнтів “переваг”, які в подальшому будуть використані для визначення ваг всіх факторів, необхідно задати рівні “переваг”. Наприклад, три рівні: $F_i > F_j$ — $Q(F_i)=1, Q(F_j)=0$; $F_i < F_j$ — $Q(F_i)=0, Q(F_j)=1$, $F_i \approx F_j$ — $Q(F_i)=0.5, Q(F_j)=0.5$.

Алгоритм обробки оцінок експертів в методі парних порівнянь полягає в побудові матриці математичних очікувань оцінок всіх пар об'єктів отриманої на підставі таблиці переваг факторів. За цією матрицею визначається вектор коефіцієнтів відносної важливості кожного з чинників (ваги кожного з факторів), на підставі якого і робиться висновок про врахування того чи іншого чинника.

Оцінка математичного очікування дискретної випадкової величини буде дорівнює:

$$x_{i,j} = a_1 \frac{m_i}{m} + a_2 \frac{m_p}{m} + a_3 \frac{m_j}{m}, \quad (\text{B.1})$$

де $a_1=1, a_2=0.5, a_3=0$ — рівні переваг;

m_i, m_p, m_j — кількість експертів, що поставили рівень a_1, a_2, a_3 ;

m — загальна кількість експертів.

За допомогою отриманої матриці проводиться ранжування всіх чинників і визначаються коефіцієнти їх відносної важливості, тобто вектор:

$$k = [k_1, k_2, \dots, k_n]^T, \quad (\text{B.2})$$

Значення елементів вектора k можуть бути розраховані з застосуванням ітераційного алгоритму виду:

1) початкова умова $t = 0$

$$k^0 = [1, 1, \dots, 1]^T, \quad (\text{B.3})$$

2) рекурентні відношення

$$k^t = \frac{1}{\lambda^t} X k^{t-1}, \quad (\text{B.4})$$

$$\lambda^t = [111\dots 1] X k^{t-1}, \quad (\text{B.5})$$

де X — матриця математичних очікувань оцінок пар об'єктів,

k^t — вектор коефіцієнтів відносної важливості об'єктів порядку t .

3) $\sum_{i=1}^n k_i^t = 1$ — умова нормування (ознака закінчення) $\|k^t - k^{t-1}\| \leq E$,

де E величина допустимої похибки.

Факторні значення k_i , які є найменшими в порівнянні з іншими чинниками можуть бути рекомендовані до вилучення з подальшого розгляду при побудові математичних моделей енергоспоживання.

Додаток Г

Алгоритм застосування Методу Головних Компонент

Для використання даного методу статистичні данні необхідно представити у вигляді матриці змінних X розмірністю $(I \times J)$, де I — число дослідів, J — число змінних. Основна ідея МГК полягає в декомпозиції матриці даних X і переходу до нових ортогональних змінних T (матриці рахунків, scores) і P (матриці навантажень, loadings) [142]:

$$X = TP^T + E, \quad (\text{Г.1})$$

де E — матриця залишків;

На практиці для визначення головних компонент використовують NIPALS алгоритм, який відноситься до ітераційний методів і дозволяє за один цикл визначити одну ГК. Зокрема даний алгоритм було наведено в одній з найбільш ґрунтовних робіт по хемометриці “Multivariate Data Analysys” К. Есбенсена [142].

Перед початком роботи вихідні данні піддають попередній обробці з метою позбавлення від шумів та значної різниці в величині змінних. Зокрема проводиться центрування та вирівнювання даних (автошкалування даних). Існує багато методів проведення зважування даних та найбільш популярним є використання з цією метою стандартного відхилення. Тоді, формулу попередньої обробки даних можна подати в наступному виді [142]:

$$\bar{x}_{i,j} = (x_{i,j} - x_{j,\text{сеп}}) / \sigma_j, \quad (\text{Г.2})$$

де σ_j — стандартне відхилення в J стовпчику матриці змінних X , $x_{j,\text{сеп}}$ — середнє значення в J стовпчику матриці змінних X .

Після цього рівняння (3.13) переписується в наступному вигляді

$$x_{ik} = x_{\text{сеп.к}} + \sum_{a=1}^A t_{ia} p_{ka} + e_{ik(A)}, \quad (\text{Г.3})$$

Для головних компонент з номерами $a = 1, 2, \dots, A$ значення $\hat{t}_a$ та $\bar{p}_a$ визначаються за наступним алгоритмом:

- 1) Задаються початкові значення $\hat{t}_a$, які наприклад дорівнюють стовпчику матриці $\bar{X}_{a-1}$, яка має найбільшу залишкову суму квадратів.
- 2) Уточнення наближення вектора навантажень $\bar{p}_a$ для даної головної компоненти шляхом проекції матриці $\bar{X}_{a-1}$ на $\hat{t}_a$

$$\bar{p}_a^T = (\hat{t}_a^T \hat{t}_a)^{-1} \hat{t}_a^T \bar{X}_{a-1}, \quad (\Gamma.4)$$

- 3) Проводиться нормування вектора $\bar{p}_a$ для усунення розрахункових похибок

$$\bar{p}_a = \bar{p}_a (\bar{p}_a^T \bar{p}_a)^{-0.5}, \quad (\Gamma.5)$$

- 4) Уточнення наближення рахунків $\hat{t}_a$ для даної ГК шляхом проекції $\bar{X}_{a-1}$ на $\bar{p}_a$:

$$\hat{t}_a = \bar{X}_{a-1} \bar{p}_a (\bar{p}_a^T \bar{p}_a)^{-1}, \quad (\Gamma.6)$$

- 5) Уточнення наближення власного значення $\hat{\tau}_a$

$$\hat{\tau}_a = \hat{t}_a^T \hat{t}_a, \quad (\Gamma.7)$$

- 6) Перевірка на збіжність. Якщо $\Delta = \hat{\tau}_a - \hat{\tau}_{a-1} < e$, де $\hat{\tau}_{a-1}$ — величина отримана на попередній ітерації, e — деяка константа, яка може дорівнювати, наприклад 0,0001 від $\hat{\tau}_a$, то вважається що метод для цієї ГК зійшовся. Якщо ж ні то необхідно знову повернутися на крок 1.

- 7) Віднімається вклад цієї головної компоненти

$$X_a = X_{a-1} - \hat{t}_a \bar{p}_a^T, \quad (\Gamma.8)$$

Після цього той же самий алгоритм застосовується і для визначення інших головних компонент.

Максимальне число ГК, яке може бути побудоване на одиницю менше ніж число змінних в матриці X . Як правило, подальшу роботу ведуть тільки з "головними компонентами", які мають найбільший вплив, а несуттєві вилучаються з розгляду, що дозволяє знизити похибку розрахунків. Для

визначення числа головних компонент зазвичай прийнято використовується графік поясненої дисперсії в залежності від їх числа [142].

Додаток Д

Таблиця Д.1

Критерії оцінки адекватності математичних моделей

№	Назва	Формула	Умовні позначення	Зміст критерію
1	ESS - сума квадратів залишків моделювання	$ESS = \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2$	де $y_k, \hat{y}_k$ - фактичні та розрахункові значення залежної змінної.	Близькість SSE до нуля свідчить про хороше наближення вихідних даних побудованою моделлю.
2	Залишкова дисперсія	$D_{\text{зал}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{\text{фi}} - y_i^*)^2$	де $y_{\text{фi}}, y_i^*$ - фактичні та розрахункові значення змінної; n - кількість спостережень.	Характеризує розкид значень залишків моделювання навколо лінії регресії. Чим меншим є цей розкид, тим кращою є модель.
3	Стандартна похибка моделювання (SEE)	$SEE = \sqrt{\frac{ESS}{n-k-1}}$	де ESS - сума квадратів залишків моделювання; n - кількість спостережень; k - число незалежних змінних.	SEE можна інтерпретувати як різновид середнього значення залишків моделювання або як середню похибку прогнозування значень залежної змінної.
4	Коефіцієнт детермінації (R^2 ; R-square)	$R^2 = 1 - \frac{ESS}{TSS}$	де ESS - сума квадратів залишків моделювання; $TSS = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2$ - сума квадратів відхилення фактичних значень залежної змінної від її середньої величини.	Це частка дисперсії залежної змінної, яка «пояснюється» побудованою математичною моделлю, тобто тим складом незалежних змінних, що включені до відповідної моделі. Цей критерій розглядають як універсальну міру тісноти статистичної залежності однієї випадкової величини від певної кількості інших величин.
5	Уточнений коефіцієнт детермінації (Adjusted R-square)	$R^2_{\text{Adj}} = 1 - \frac{ESS(n-1)}{TSS(n-m)}$	де n - кількість спостережень; m - число параметрів (незалежних змінних) моделі.	Це значення коефіцієнту детермінації, скориговане з урахуванням числа ступенів свободи вихідних даних до та після побудови математичної моделі. Близькі до одиниці значення цього критерію свідчать про хороше наближення вихідних даних відповідною моделлю.
6	Середня похибка апроксимації	$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left \frac{y - \hat{y}}{y} \right 100\%$	де $\hat{y}, y$ - відповідно розрахункові та фактичні значення залежної змінної; n - кількість спостережень.	Характеризує середнє відносне відхилення розрахункових значень залежної змінної від фактичних. Побудована математична модель вважається прийнятною, якщо значення (цього критерію) не перевищує 10-12%.

Продовження Таблиці Д.1

7	Mean Absolute Error (MAE)	$MAE = \frac{1}{n} \sum y - \hat{y} $	де $\hat{y}, y$ - відповідно розрахункові та фактичні значення залежної змінної; n - кількість спостережень.	Чим меншою є величина MAE , тим більш точною вважається побудована математична модель.
8	Інформаційний критерій Акаїке	$AIC = \ln(\sigma^2) + \frac{2k}{n}$	де σ^2 - залишкова дисперсія моделювання; n - кількість спостережень; k - число параметрів або незалежних змінних моделі.	«Винагороджує» математичну модель за точність наближення вихідних даних, але і «штрафує» за наявність зайвої кількості параметрів або незалежних змінних моделі. Вважається, що найкращою буде модель з найменшим значенням критерію AIC.
9	Критерій Шварца (BIC)	$BIC = \ln(\sigma^2) + \frac{k \ln n}{n}$	де σ^2 - залишкова дисперсія моделювання; n - кількість спостережень; k - число параметрів або незалежних змінних моделі.	Більшою мірою, ніж критерій AIC, «штрафує» математичні моделі за наявність в них зайвої кількості параметрів або незалежних змінних.
10	F-критерій Фішера	$F = \frac{R^2 / k}{R^2 / (n - k - 1)}$	де R^2 - коефіцієнт детермінації математичної моделі; n - кількість спостережень; k - число параметрів (незалежних змінних) моделі.	Використовується для порівняння дисперсій двох варіаційних рядів. Фактичне значення F-критерію Фішера порівнюється з табличним значенням Fтабл. Якщо фактичне значення F-критерію більше табличного (Fфакт > Fтабл), то побудовану математичну модель слід вважати неадекватною.
11	Корінь з середньої суми квадратів залишків моделювання (RSME)	$RSME = \sqrt{\frac{ESS}{n - m}}$	де ESS - сума квадратів залишків моделювання; n - кількість спостережень; m - число параметрів (незалежних змінних) моделі.	Близькі до нуля значення RSME означають хороше наближення вихідних даних побудованою моделлю.
12	Критерій Стьюдента (t-критерій)	$t_{ai} = \frac{a_i \sqrt{n - k - 1}}{\sigma_{a.i}}$	де n - кількість спостережень; k - число параметрів (незалежних змінних) рівняння регресії; $\sigma_{a.i}$ - середнє квадратичне відхилення значення i -го параметру моделі; a_i - i -й параметр моделі.	За допомогою t критерію з'ясовують чи не є отримані значення параметрів моделі результатами дії випадкових причин. Оцінка значимості коефіцієнтів простої лінійної регресії, побудованих за сукупностями вихідних даних, у яких $n < 30$, базується на порівнянні розрахункової величини критерію Стьюдента з його теоретичними значеннями.

Продовження Таблиці Д.1

13	Критерій Дарбіна-Уотсона (DW-критерій)	$DW = 2 \cdot (1 - p)$	де p - коефіцієнт кореляції між квадратами залишків моделювання, визначеними для навчальної та перевіркової вибірок.	Застосування критерію Дарбіна-Уотсона базується на порівнянні його розрахункової величини з теоретичними значеннями для заданої кількості спостережень, числа незалежних змінних моделі та рівня значущості похибки.
14	Тест Чоу на стабільність моделі	$F(T, m) = \frac{(RSS_{T+m} - RSS_T) / k}{RSS_T / (n - k - 1)}$	де RSS_T та RSS_{T+m} - сума квадратів залишків моделювання, визначена відповідно для вибірки, що включає дані за період T та період $T+m$. RSS_{T+m}	За допомогою F-критерію Фішера дозволяє перевірити, чи істотною є похибка прогнозування значень залежної змінної на m майбутніх періодів часу.
15	Критерій регулярності	$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (y_{табл} - y_m)_i^2}{\sum_{i=1}^{N_B} (y_{табл})_i^2}$	де $y_{табл}$ - експериментальні значення залежної змінної, що належать до перевіркової послідовності (B); y_m - значення залежної змінної, розраховані за відповідною моделлю; N_B - кількість експериментальних точок перевіркової послідовності.	Цей критерій дозволяє перевірити, чи математична модель, побудована на навчальній послідовності, є достатньо стійкою. Багато алгоритмів побудови математичних моделей дозволяють отримати на навчальній послідовності розрахункові значення залежної змінної, дуже близькі до експериментальних, проте на перевірконій послідовності не завжди дають змогу отримати такий самий результат.
16	Критерій мінімуму зсуву	$n_{zc} = \frac{1}{R_1 + R_2} \sum_{i=1}^{R_1+R_2} (z_r^* - z_r^{**})^2$	де R_1, R_2 - розміри першої і другої підвибірок даних відповідно, z_r^*, z_r^{**} - значення прогнозу першої та другої моделі щодо всіх точок вибірок.	Критерій мінімуму зсуву приймає значення близьке до нуля у випадку знаходження «істинної» моделі. Однак бувають випадки, коли цей критерій приймає нульове значення і для «неістинних» моделей. У цьому випадку вибірку експериментальних даних слід розбити на три, чотири і більше підвибірки, поки не буде побудована одна, незміщена модель, - вона і буде «істинною».
15	Критерій регулярності	$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (y_{табл} - y_m)_i^2}{\sum_{i=1}^{N_B} (y_{табл})_i^2}$	де $y_{табл}$ - експериментальні значення залежної змінної, що належать до перевіркової послідовності (B); y_m - значення залежної змінної, розраховані за відповідною моделлю; N_B - кількість експериментальних точок перевіркової послідовності.	Цей критерій дозволяє перевірити, чи математична модель, побудована на навчальній послідовності, є достатньо стійкою. Багато алгоритмів побудови математичних моделей дозволяють отримати на навчальній послідовності розрахункові значення залежної змінної, дуже близькі до експериментальних, проте на перевірконій послідовності не завжди дають змогу отримати такий самий результат.

Додаток Е

Перевірки на «однорідність» критеріїв адекватності математичних моделей

Процедура перевірки на «однорідність» критеріїв адекватності, які належать до кожної з наведених вище груп, можна проілюструвати на прикладі вибору найкращої математичної моделі енергоспоживання одного з виробничих підрозділів реального хімічного підприємства. Для зазначеного виробничого підрозділу з застосуванням різних методів було побудовано 12 математичних моделей, які відрізнялися між собою як виглядом, так і складом незалежних змінних. Зокрема, одна з цих моделей мала вигляд лінійного полінома:

$$P(F1, F2, F3) = 45.51 + 0.043F1 + 0.72F2 + 0.058F3, \quad (E.1)$$

де $F1, F2, F3$ — чинники, що впливають на величину енергоспоживання підрозділу, що розглядався.

Для кожної з побудованих математичних моделей за відповідними формулами (табл. Е.1) було визначено числові значення критеріїв адекватності, які наведено в табл. Е.1.

Таблиця Е.1

Розрахункові значення критеріїв адекватності математичних моделей

№ моделі	ESS	$D_{\text{зап}}$	SEE	R^2	$\Delta^2(B)$	$\bar{A}$	MAE	$RSME$	R^2_{Adj}	AIC	BIC	$n_{\text{зс}}$
1	7,40	0,25	0,52	0,74	0,0000931	0,79	0,40	0,51	0,71	-1,24	-1,10	0,67
2	4,75	0,16	0,42	0,83	0,0000597	0,61	0,31	0,41	0,81	-1,68	-1,54	101,78
3	8,52	0,28	0,56	0,93	0,0001225	0,90	0,42	0,55	0,92	-1,10	-0,96	6,12
4	4,74	0,16	0,42	0,66	0,0000588	0,60	0,30	0,41	0,62	-1,68	-1,54	582,85
5	4,66	0,16	0,42	0,40	0,0000598	0,68	0,34	0,41	0,34	-1,70	-1,56	0,27
6	10,98	0,37	0,64	0,47	0,0001397	1,01	0,51	0,63	0,41	-0,84	-0,71	0,41
7	1,72	0,06	0,25	0,43	0,0000214	0,39	0,20	0,25	0,36	-2,70	-2,56	0,52
8	4,00	0,13	0,38	0,27	0,0000490	0,56	0,29	0,38	0,19	-1,85	-1,72	0,20
9	3,16	0,11	0,34	0,23	0,0000387	0,45	0,23	0,34	0,14	-2,09	-1,95	0,26
10	10,79	0,36	0,63	0,20	0,0001345	0,88	0,45	0,62	0,11	-0,86	-0,72	3,38
11	7,43	0,25	0,52	0,81	0,0000940	0,76	0,38	0,52	0,79	-1,23	-1,10	0,09
12	4,30	0,14	0,40	0,20	0,0000514	0,58	0,30	0,39	0,11	-1,78	-1,64	0,32

З метою оцінки «однорідності» критеріїв адекватності математичних моделей можуть бути визначені коефіцієнти парної кореляції між числовими значеннями критеріїв, які входять до однієї і тієї ж з зазначених вище груп. Зокрема, коефіцієнти кореляції між значеннями критеріїв першої групи наведено в табл. Е. 2

Таблиця Е.2

Коефіцієнти кореляції між значеннями критеріїв, які характеризують точність математичної моделі

Критерій адекватності	ESS	$D_{\text{зал}}$	SEE	R^2	$\Delta^2(B)$	$\bar{A}$	MAE	$RSME$	R^2_{Adj}
ESS	1	1	0,99	0,21	0,99	0,97	0,97	0,99	0,21
$D_{\text{зал}}$	1	1	0,99	0,21	0,99	0,97	0,97	0,99	0,21
SEE	0,99	0,99	1	0,26	0,99	0,98	0,98	1,00	0,26
R^2	0,21	0,21	0,26	1	0,27	0,32	0,27	0,26	1
$\Delta^2(B)$	0,99	0,99	0,99	0,27	1	0,98	0,97	0,99	0,27
$\bar{A}$	0,97	0,97	0,98	0,32	0,98	1	1	0,98	0,32
MAE	0,97	0,97	0,98	0,27	0,97	1,00	1	0,98	0,27
$RSME$	0,99	0,99	1,00	0,26	0,99	0,98	0,98	1,00	0,26
R^2_{Adj}	0,21	0,21	0,26	1,00	0,27	0,32	0,27	0,26	1

Додаток Ж

Ж.1 Приклад побудови електробалансів виробничих об'єктів за наявності аналітичних залежностей для розрахунку електроспоживання агрегатів

Застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови електробалансів в зазначених умовах, представленого в розділі 2.4, може бути проілюстровано на прикладі районної котельної, яка надає послуги з гарячого водопостачання та опалення житлових будинків. Перелік основного та допоміжного електричного обладнання котельної, а також результати розрахунку витрат електроенергії для одного з попередніх опалювальних сезонів наведено в таблиці Ж.1.

Таблиця Ж.1

Нормативні витрати електричної енергії основним та допоміжним обладнанням котельної, визначені розрахунково-аналітичним методом

Обладнання	Нормативні витрати електроенергії, кВт·год/сез.	Частка від загального споживання, %
Вентилятор №1	7313,618	2,73
Вентилятор №2	4479,012	1,67
Димосос №1	18920,197	7,07
Димосос №2	10446,558	3,90
Рециркуляційний насос №1	3034,608	1,13
Рециркуляційний насос №2	4496,904	1,68
Підвищувальний насос сирої води	1444,622	0,54
Підживлюючий насос	293,521	0,11
Мережеві насоси	197073,211	73,59
Насос хімводообробки	16685,76	6,23
Допоміжне обладнання	3594,48	1,34
Загальне споживання електричної енергії	267782,5	100

Як зазначалося в розділі 2.4, однією з позитивних особливостей підприємств теплоенергетики, зокрема, котельних є те, що на відміну від багатьох інших виробництв, для їх обладнання існують достатньо обґрунтовані фізичні або емпіричні залежності, які встановлюють функціональний зв'язок

між обсягами споживання електричної енергії та параметрами технологічних процесів і зовнішніх умов виробництва. Такі залежності наведені у відповідних нормативно-методичних матеріалах (наприклад, «Порядок розрахунку нормативних витрат електроенергії підприємствами теплоенергетики при виробництві, транспортуванні та постачанні (розподілі) теплової енергії» (далі Порядок)).

Нормативні витрати електричної енергії протягом опалювального періоду (сезону) для кожного з видів обладнання окремо і для котельної в цілому визначається розрахунково-аналітичним методом згідно відповідних формул та алгоритмів, наведених у зазначеному Порядку.

Наведені в таблиці Ж.1 числові значення являють собою статті витратної частини розрахункового електробалансу котельної. Однак, як зазначалося, одержаний таким чином баланс споживання електроенергії не можна вважати цілком достовірним та обґрунтованим. Стверджувати це можна з тієї причини, що при виконанні розрахунків нормативних витрат електроенергії практично для всіх видів обладнання згідно Порядку необхідно використовувати значну кількість технологічних параметрів, що є нечітко визначеними величинами.

Зокрема, як зазначалося у розділі 2.4, до таких параметрів можна віднести: $\alpha_{д.г}$ — коефіцієнт надлишку повітря в димових газах; α_t — коефіцієнт надлишку повітря в топці котла; $H_{рец}$ — тиск рециркуляційного насосу №1, м в. ст.; $H_{мер}$ — тиск мережевих насосів, м в. ст.; $H_{підж}$ — тиск насосів підживлення теплової мережі, м в. ст.; $H_{с.в}$ — тиск підвищувального насоса сирої води, м в. ст. тощо.

Числові значення таких параметрів при застосуванні розрахунково-аналітичного методу побудови електробалансів приймаються, здебільшого, як середні величини з досить широких діапазонів їх можливих значень.

Для підвищення достовірності та обґрунтованості розрахункового електробалансу котельної потрібно визначити найбільш ймовірні значення нечітко заданих технологічних параметрів. З цією метою необхідно використати відповідні ймовірнісно-статистичні методи. Згідно загального

алгоритму застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови електробалансів першим етапом є опитування спеціалістів-експертів.

Ж.1.1 Експертне опитування спеціалістів котельної

Опитування спеціалістів здійснювалося за допомогою анкети, приклад заповнення якої трьома експертами наведено на рис. Ж.1-Ж.3.

На кожному з зазначених рисунків представлені шкали можливих значень відповідних нечітко заданих технологічних параметрів: а — коефіцієнту надлишку повітря у димових газах, б — коефіцієнту надлишку повітря в топці, в — тиску рециркуляційного насосу, г — тиску мережевих насосів, д — тиску насоса підживлення теплової мережі, е — тиску насоса сирої води.

Кожному експерту пропонувалося на наведених в анкетах шкалах вертикальною лінією позначити числову величину, яка на його думку відповідає дійсним середнім значенням кожного з нечітких технологічних параметрів, які мали місце протягом опалювального періоду.

Ж.1.2 Обробка анкет експертного опитування

Обробка результатів експертного опитування здійснювалась за алгоритмом, наведеним в розділі 2.1.2. В процесі обробки результатів експертного опитування були визначені можливі рівні значень кожного з нечітких вихідних параметрів, які у подальшому будуть використані при побудові електробалансу котельної, а також ймовірності того, що реальні середні величини відповідних нечітких виробничих параметрів дорівнюють тому чи іншому з можливих рівнів їх значень. Узагальнені результати опитування експертів щодо середніх значень нечітких виробничих параметрів, що розглядаються, у вигляді гістограм наведено на рисунках Ж.4-Ж.9.

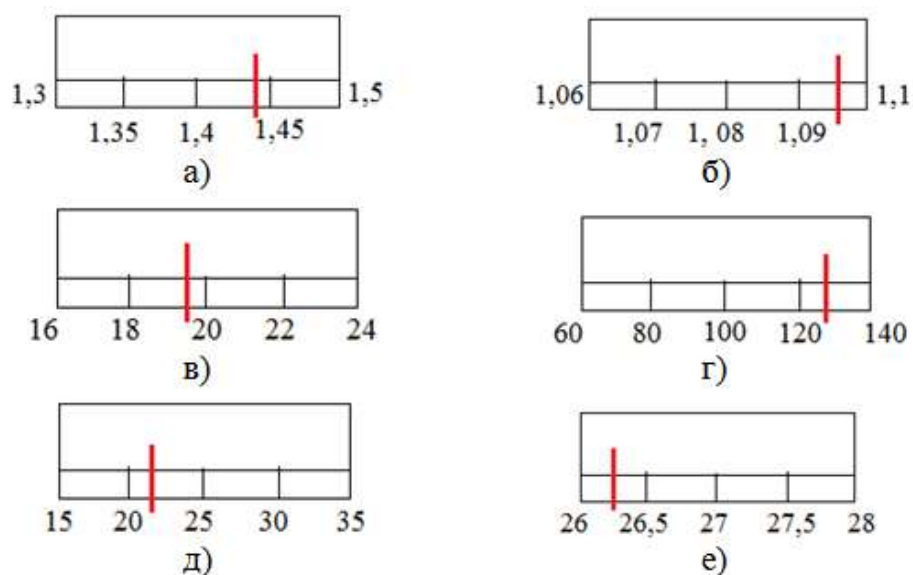


Рис. Ж.1. Результати заповнення анкети експертом №1

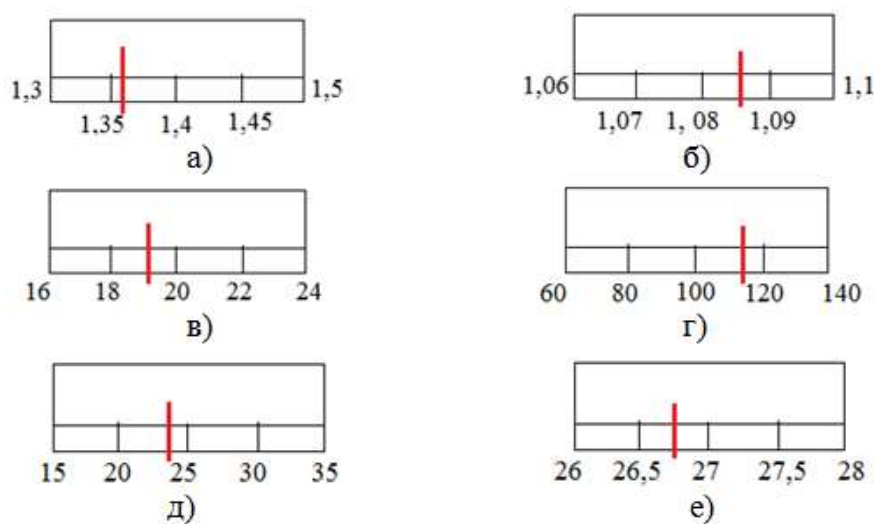


Рис. Ж.2. Результати заповнення анкети експертом №2

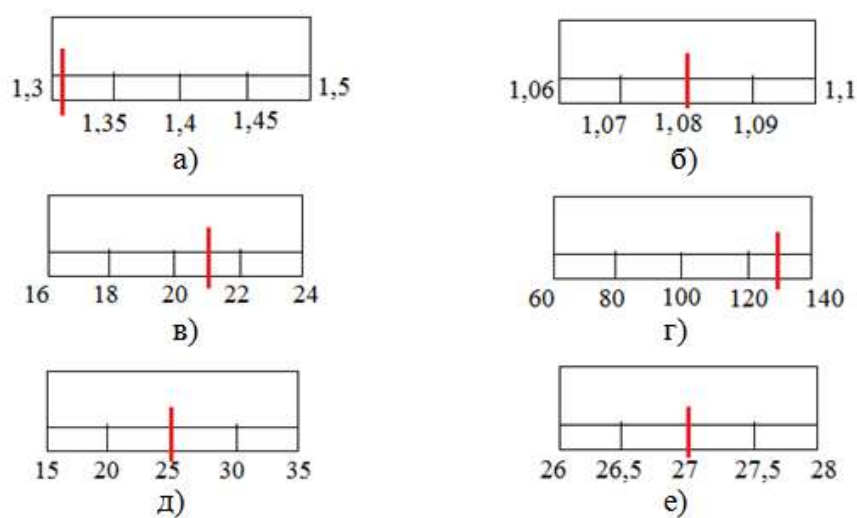


Рис. Ж.3. Результати заповнення анкети експертом №3

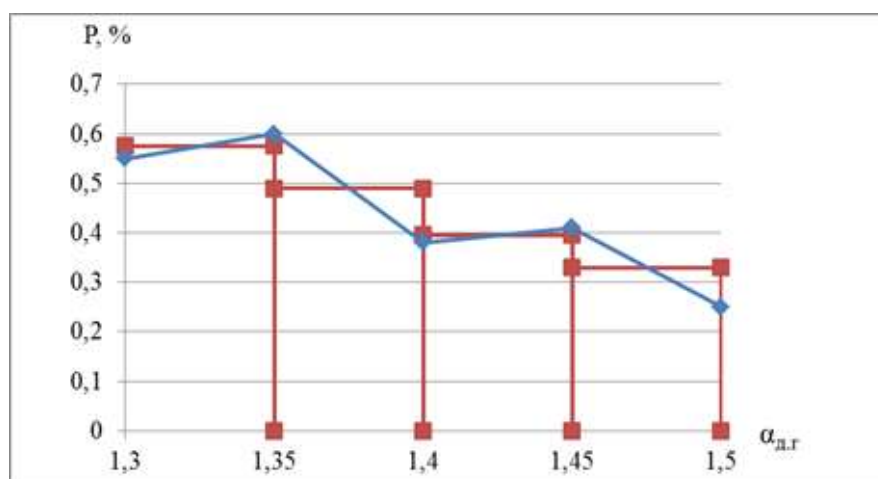


Рис. Ж.4. Гістограма суб'єктивної ймовірності появи можливих значень коефіцієнта надлишку повітря в димових газах

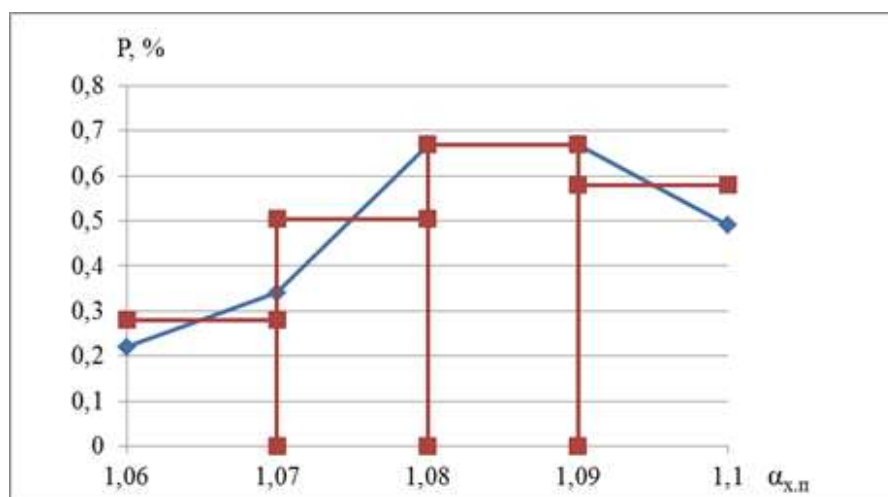


Рис. Ж.5. Гістограма суб'єктивної ймовірності появи можливих значень коефіцієнта надлишку повітря в топці

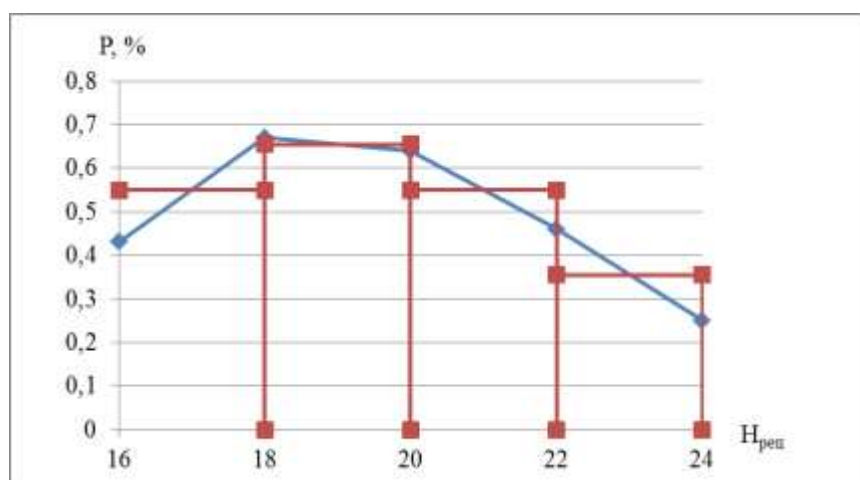


Рис. Ж.6. Гістограма суб'єктивної ймовірності появи можливих значень тиску рециркуляційного насосу

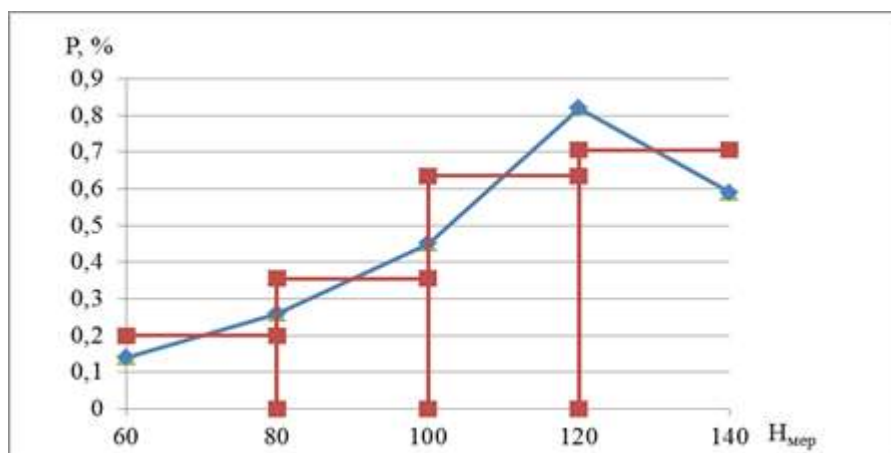


Рис. Ж.7. Гістограма суб'єктивної ймовірності появи можливих значень тиску мережевого насосу

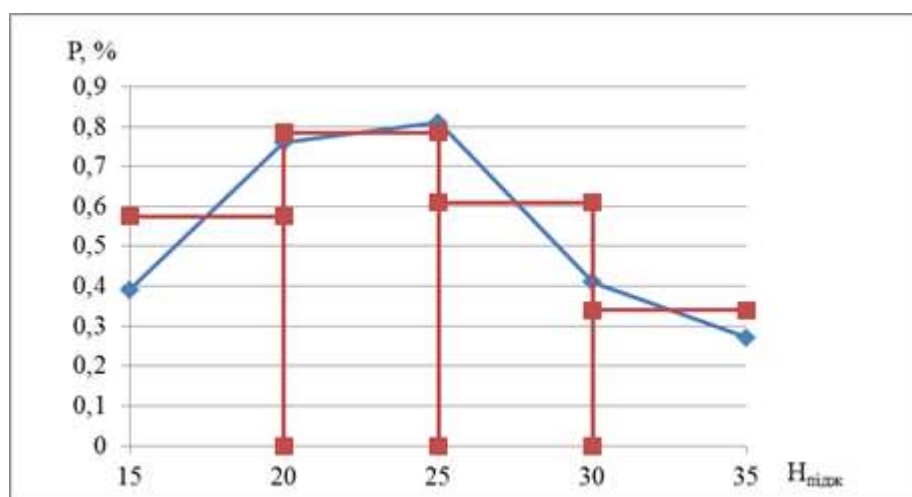


Рис. Ж.8. Гістограма суб'єктивної ймовірності появи можливих значень тиску насоса підживлення теплової мережі

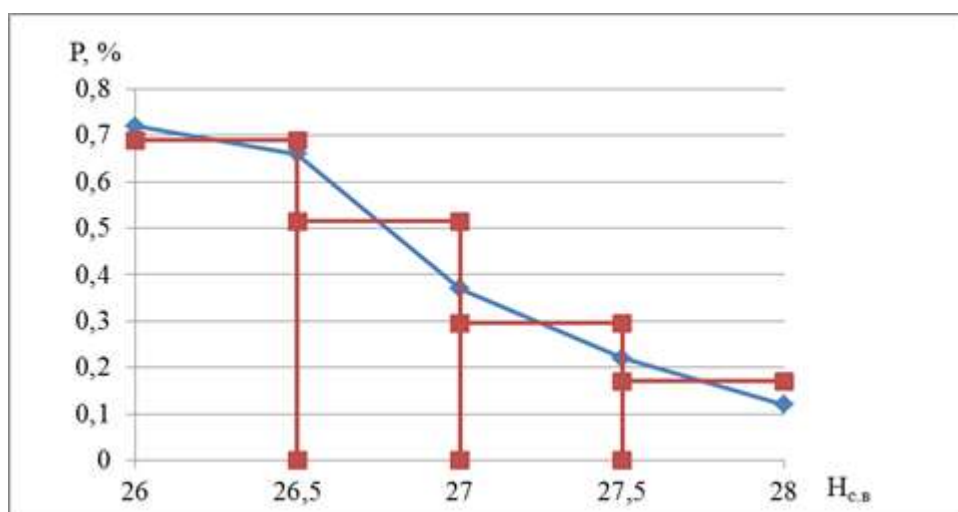


Рис. Ж.9. Гістограма суб'єктивної ймовірності появи можливих значень тиску підвищувального насоса сирової води

Згідно загального алгоритму застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови електробалансів котельних (розділ 2.4) другим етапом вирішення цієї задачі є формування псевдореальних статистичних даних про числові значення нечітких технологічних параметрів, яке здійснюється з використанням методів імітаційного моделювання.

Ж.1.3 Імітаційне моделювання псевдореальних значень нечітких параметрів

Імітаційне моделювання здійснювалось згідно розділу 2.1.2 методом Монте-Карло з застосуванням комп'ютерної програми Matlab. Для ілюстрації побудови електробалансу котельної в цьому прикладі було згенеровано по 50 псевдореальних значень шести нечітких виробничих параметрів: коефіцієнтів надлишку повітря в димових газах ($\alpha_{д.г}$) та в топці котла ($\alpha_т$), робочого тиску рециркуляційного насосу ($H_{рец}$), насосу сирі води ($H_{с.в}$), підживлюючого насоса ($H_{підж}$) та мережевих насосів ($H_{мер}$). Одержані значення цих нечітких параметрів наведені в таблиці Ж.15.

При генеруванні псевдореальних даних були враховані гісторгами ймовірності знаходження можливих значень цих параметрів в межах тих чи інших інтервалів (рис. Ж.4-Ж.9.).

Наприклад, при формуванні псевдореальних значень коефіцієнта надлишку повітря в димових газах з застосуванням методу Монте-Карло випадковим шляхом була сформована вибірка з 50 елементів. При цьому для врахування ймовірності знаходження можливих числових значень цього параметру у відповідних інтервалах (рис. Ж.4.), 17 елементів цієї вибірки були вибрані випадковим чином з першого інтервалу можливих значень параметру, якому відповідає ймовірність 57,5 %, 13 елементів – з другого інтервалу з рівнем ймовірності 49%, 11 – з третього інтервалу з ймовірністю 39,5 % та 9 елементів – з останнього інтервалу.

Згенеровані таким чином окремі псевдореальні значення нечітких технологічних параметрів, що розглядаються, для прикладу наведено у табл. Ж.2. При цьому наведені в таблиці величини ***p*** являють собою ймовірності появи тих чи інших можливих значень відповідних нечітких параметрів.

Таблиця Ж.2

Окремі псевдореальні значення нечітких параметрів, згенеровані методом Монте-Карло

№ П/П	$\alpha_{д,г,}$	<i>p</i>	$\alpha_{т,}$	<i>p</i>	$H_{рец,}$	<i>p</i>	$H_{с,в,}$	<i>p</i>	$H_{підж,}$	<i>p</i>	$H_{мер,}$	<i>p</i>
1	1,31	0,56	1,06	0,23	17,16	0,56	26,47	0,66	17,32	0,56	72,67	0,21
2	1,31	0,56	1,06	0,29	16,17	0,45	26,02	0,71	15,41	0,42	68,71	0,19
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
50	1,45	0,38	1,09	0,65	23,58	0,29	27,72	0,17	34,2	0,29	122,21	0,79

Таким чином, результатом другого етапу побудови електробалансу котельної з використанням ймовірнісно-статистичного підходу є формування достатньо великих за обсягом вибірок псевдореальних значень всіх нечітких виробничих параметрів, які у подальшому будуть використані для розрахунку нормативних витрат електричної енергії як окремими видами обладнання, так і на котельній в цілому.

Ж.1.4 Генерування комбінацій можливих значень нечітких технологічних параметрів

На основі сформованих вибірок псевдореальних величин нечітких технологічних параметрів (табл. Ж.2) здійснюється генерування комбінацій можливих їх числових значень.

Оскільки в таблиці Ж.2. було згенеровано по 50 числових величин для шести параметрів, то з цієї кількості значень може бути отримано 1192052400 варіантів різних комбінацій цих величин. В таблиці Ж.3. для прикладу частково представлені такі комбінації.

Таблиця Ж.3

Окремі комбінації псевдореальних значень нечітких виробничих параметрів

№ комбінації	$\alpha_{д,г}$	α_t	$H_{рец}$	$H_{с,в,}$	$H_{підж,}$	$H_{мер,}$
1	2	3	4	5	6	7
1	1,317	1,061	17,16	26,476	17,324	72,67
2	1,317	1,061	17,16	26,476	17,324	108,82
3	1,317	1,061	17,16	26,476	17,324	122,212
...	...	...	...	...	...	...
11 265	1,366	1,061	17,16	27,727	21,507	72,67
...	...	...	...	...	...	...

Кожна з одержаних таким чином комбінацій псевдореальних значень нечітких виробничих параметрів являє собою окремий набір чітко визначених вихідних даних, за якими може бути побудована одна з можливих розрахункових моделей електроспоживання котельної. Формування таких моделей, тобто деякої, достатньо великої кількості псевдореальних балансів споживання електричної енергії на котельній є третім етапом вирішення цієї задачі.

Ж.1.5 Побудова розрахункових моделей електроспоживання котельної

Формування розрахункових моделей електроспоживання котельної являє собою окрему, досить складну ітеративну процедуру. Кожна така модель будується шляхом одноразового застосування існуючого, достатньо чіткого алгоритму визначення розрахунково-аналітичним шляхом обсягів нормативних витрат електроенергії всіма видами обладнання котельної, які відповідають одній з комбінацій можливих значень нечітких технологічних параметрів. Алгоритм та методику виконання таких розрахунків наведено у зазначеному вище Порядку.

Кожна з одержаних таким чином розрахункових моделей електроспоживання являє собою один з можливих варіантів витратної частини

балансу споживання електроенергії, для якого має бути визначено відповідний загальний обсяг витрати електричної енергії на котельній.

Як зазначалося, кожному з псевдореальних значень будь-якого з нечітких виробничих показників, що розглядаються, відповідає певна, визначена експертним шляхом ймовірність їх появи. На підставі цих «індивідуальних» ймовірностей появи окремих величин нечітких вихідних параметрів була визначена «сумарна» ймовірність появи кожної з комбінацій можливих значень всіх нечітких параметрів, необхідних для побудови розрахункових моделей електроспоживання котельної.

Результати визначення загального обсягу електроспоживання котельної (W) за окремими розрахунковими моделями, які відповідають певним комбінаціям значень нечітких технологічних параметрів, а також зазначеної «сумарної» ймовірності (P) появи цих комбінацій для прикладу представлені в таблиці Ж.4.

Таблиця Ж.4

Розрахунковий загальний обсяг електроспоживання котельної і «сумарна» ймовірність появи окремих комбінацій значень нечітких виробничих параметрів

№ комбінації	W , кВт·год	P	№ комбінації	W , кВт·год	P
1	2	3	4	5	6
1	275695,34	0,006	11 266	388549,54	0,006
2	387605,22	0,017	11 267	430007,28	0,008
3	429062,96	0,022	11 268	276796,12	0,001
...	...	...	...	...	...
11 265	276639,66	0,002	675 650	390039,01	0,033
...	...	...	...	...	...

Кожен з одержаних таким чином варіантів електробалансу котельної необхідно перевірити з точки зору його правдоподібності. З цією метою загальний розрахунковий обсяг споживання електроенергії на котельній (W), який відповідає тій чи іншій комбінації можливих значень нечітких технологічних параметрів, слід порівняти з фактичними даними обліку витрат

електроенергії і перевірити, чи знаходиться різниця між цими величинами у межах певної припустимої похибки.

Ж.1.6 Визначення достовірного та найбільш імовірного електробалансу котельної

При перевірці правдоподібності одержаних варіантів електробалансу котельної було прийнято, що зазначена вище допустима похибка дорівнює 5 %. Фактична загальна витрата електроенергії на котельній протягом відповідного опалювального сезону за даними обліку склала 282537 кВт·год. Тому правдоподібний загальний розрахунковий обсяг споживання електроенергії на котельній повинен знаходитись в межах від 268410,96 до 296664,74 кВт·год./сезон.

Проаналізувавши дані, зокрема, наведені в таблиці Ж.4, можна сказати, що зазначеній умові відповідають далеко не всі розрахункові моделі електроспоживання. Окремі варіанти електробалансу котельної, які пройшли зазначену перевірку на правдоподібність, для прикладу представлені в таблиці Ж.5. Проаналізувавши дані, зокрема, наведені в таблиці Ж.5, можна зробити висновок, що найбільш ймовірним електробалансом котельної є варіант з умовним номером 675607, оскільки він має найбільшу «сумарну» ймовірність (0,017) появи відповідної комбінації можливих значень нечітких виробничих параметрів

Таблиця Ж.5

Окремі розрахункові електробаланси котельної, які пройшли перевірку на правдоподібність

№ комбінації	W, кВт·год./сезон	P
31	275918,5	0,01
46	275945,43	0,002
11 268	276796,12	0,001
675 607	278325,5	0,017
675 649	278129,13	0,012

Отже, найбільш ймовірно, що середні числові величини нечітких виробничих параметрів протягом опалювального сезону відповідали комбінації їх можливих значень з тим же умовним номером 675607 і дорівнювали: $\alpha_{d,z} = 1,457$; $\alpha_m = 1,081$; $H_{pec} = 18,292$ м в. ст.; $H_{мер} = 72,67$ м в. ст.; $H_{підж} = 21,507$ м в. ст.; $H_{с.в} = 26,645$ м в. ст. Враховуючи проміжні результати, що були одержані в процесі побудови розрахункової моделі електроспоживання з умовним номером 675 607, можна стверджувати, що найбільш ймовірна структура витратної частини розрахункового балансу споживання електричної енергії на котельній є такою, яка наведена в таблиці Ж.6.

Найбільш ймовірна витратна частина фактичного електробалансу котельної для опалювального сезону, що розглядається, має вигляд, наведений в таблиці Ж.6. Таким чином, фактичний баланс споживання електроенергії на підприємстві визначається шляхом розподілу загального фактичного обсягу споживання між статтями пропорційно частці, що визначена за найбільш ймовірним розрахунковим балансом.

Таблиця Ж.6

Найбільш ймовірна структура витратної частини розрахункового
електробалансу котельної

Обладнання	Нормативні витрати електроенергії, кВт·год./сезон	Фактичні витрати електроенергії, кВт·год./сезон	Частка загального споживання, %
Вентилятор №1	7027,1	7133.43	2,5
Вентилятор №2	4479,01	4546.78	1,6
Димосос №1	20527,1	20837.71	7,3
Димосос №2	10446,5	10604.57	3,7
Рециркуляційний насос №1	2773,04	2815.00	0,9
Рециркуляційний насос №2	4496,9	4564.95	1,6
Підвищувальний насос сирієї води	1671,5	1696.79	0,6
Підживлюючий насос	265,05	269.06	0,09
Мережеві насоси	206358,8	209481.33	74,1
Насос хімводообробки	16685,7	16938.18	5,9
Допоміжне обладнання	3594,4	3648.79	1,29
Загальне споживання електричної енергії	278325,5	282537	100

Таким чином, у порівнянні з результатами використання розрахунково-аналітичного методу, застосування ймовірнісно-статистичного підходу в умовах, коли відомими є об'єктивні аналітичні залежності для розрахунку обсягів споживання електричної енергії технологічним обладнанням, дозволяє будувати значно більш достовірні електробаланси виробничих об'єктів, оскільки вони обґрунтовані не тільки відповідними аналітичними залежностями, але й найбільш ймовірними значеннями нечітко визначених параметрів технологічного процесу.

Додаток И

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Національного технічного
університету України

«Київський політехнічний
інститут»

акад. НАН України, д.т.н., проф.



Ю.І. Якименко

2016 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри електропостачання
Іванько Дмитра Олеговича у навчальний процес НТУУ «КПІ»

Ми, що нижче підписалися, в.о. завідувача кафедри електропостачання М.М. Федосенко, голова методичної комісії ІЕЕ А.Л. Ган, склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою кандидатської дисертаційної роботи Іванька Дмитра Олеговича «Оперативний контроль енергоефективності виробничих систем на основі ймовірнісно-статистичного підходу» використовуються у навчальному процесі Інституту Енергозбереження та Енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» на кафедрі електропостачання.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження та досягнутий фактичний ефект
Методичні основи встановлення «стандартів» в системах оперативного контролю енергоефективності на основі рівнянь багатофакторної регресії та побудови довірчих інтервалів до них. Методичні основи виконання процедури оперативного контролю енергоефективності з застосуванням одно та багатовимірних контрольних карт.	Матеріали дисертаційної роботи впроваджені у вигляді лекційних та практичних занять для дисципліни «Методи контролю ефективності енерговикористання». Впровадження вказаних методично-навчальних матеріалів дозволило наводити в лекційному матеріалі більш сучасні відомості про методи та способи здійснення оперативного контролю енергоефективності виробничих об'єктів, а також застосовувати удосконалені методи при вирішенні студентами відповідних практичних задач.

В.о. завідувача кафедри
електропостачання, к.т.н., доц.

Голова методичної комісії ІЕЕ,
к.т.н., доц.

М.М. Федосенко

А.Л. Ган



REFERENCE

About approbation of the researches of the post-graduate student IVANKO DMYTRO

JSC Lietpak is one of the leading manufacturers of packaging materials made from the polymer film. The company focuses on increasing the efficiency of energy consumption at all stages of the production process. For this purpose, the company is constantly improving the monitoring system of energy efficiency on relevant enterprise. Post graduate student Ivanko Dmytro participated in appropriate works in 2016 year.

Developed by Ivanko D.O. methodological approaches of energy efficiency monitoring by probabilistic-statistical approaches have been tested in JSC Lietpak. The results of approbation show that the proposed by Ivanko D.O. approaches of estimation and control of energy efficiency are relevant, have a great practical application and can be successfully implemented on industrial enterprises.

Chief Power Engineer

Tomas Mulevičius
 29.02.2016
 Energetikas
TOMAS MULEVIČIUS

UAB „Lietpak“

A. Mickevičius str. 165
 Cekoniskės settlement
 LT-14207 Vilnius district
 Lithuania

Tel. (+370 5) 249 1000
 Fax. (+370 5) 249 0272

www.lietpak.lt
 lietpak@lietpak.lt

IBAN: LT357300010000052194
 „Swedbank“, AB
 Bank code: 73000

Company code: 125261991
 VAT code: LT252619917



КОМАНДИТНЕ ТОВАРИСТВО

«ЗАПОРІЗЬКИЙ ЗАВОД ВИСОКОВОЛЬТНОЇ АПАРАТУРИ – ВАКАТОВ» І КОМПАНІЯ»
КТ «ЗЗВА»

Дніпропетровське шосе, 13, м. Запоріжжя, 69069

Телефон (061) 2206400, 2206402, Факс (061) 2206319, 2206311

E-mail: office@zva.zp.ua WEB: http://www.zva.zp.ua

Код ЄДРПОУ 05755559

р/р 2600 7 001006 838 в ПАТ «МОТОР-БАНК», м. Запоріжжя, МФО 313009

№ _____ На № _____ Від _____

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Генеральний директор КТ «ЗЗВА»



Гашенко В.О.
(П.І.Б.)

_____ 2015 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів роботи
аспіранта НТУУ “КП”

ІВАНЬКО ДМИТРА ОЛЕГОВИЧА

Протягом 2013-2015 року аспірантом НТУУ “КП” Іванько Дмитром Олеговичем проводилась робота щодо розробки методичних основ побудови балансів споживання електричної енергії ймовірно-статистичними методами.

Застосування розроблених оригінальних підходів до побудови балансів споживання електроенергії на КТ «Завод високовольтної апаратури» дозволили проводити розрахунок електробалансів за видами продукції та агрегатами, які задіяні в випуску окремо кожного з видів продукції та, як наслідок, управляти ефективністю використання паливно-енергетичних ресурсів маючи уявлення про величину та основні напрямки використання наявного потенціалу енергозбереження підприємства.

Результати дослідного використання розроблених систем, алгоритмів та методів для проведення розрахунку балансів електричної енергії на нашому підприємстві підтверджують доцільність та необхідність їх практичного застосування в умовах промислового підприємства.

Комерційний директор
(посада)

Гашенко А.В.
(П.І.Б.)



**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**
Україна, 03680, МСП, м. Київ-35,
вул. Урицького, 45
Тел. (044) 494-06-06
Факс (044) 494-06-67
E-mail: post@sips.gov.ua



**STATE INTELLECTUAL
PROPERTY SERVICE
OF UKRAINE**
Ukraine, 03680, MSP, Kyiv-35,
45, Urytskogo str.
Tel. (044) 494-06-06
Fax (044) 494-06-67
E-mail: post@sips.gov.ua

Р І Ш Е Н Н Я

ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР

Державна служба інтелектуальної власності розглянула заяву

Находов Володимир Федорович, вул. Метробудівська, 11, кв. 21, м. Київ, 03065

(повне ім'я автора, адреса)

заявка від 04.11.2016 № 70135

про реєстрацію авторського права на твір і прийняла рішення зареєструвати авторське право на твір Науковий твір "Ймовірісно-статистичний підхід до побудови балансів електроспоживання на підприємствах теплоенергетики"; **Находов Володимир Федорович, Бориченко Олена Володимирівна, Іванько Дмитро Олегович**

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, повне ім'я, псевдонім (за наявності) автора (ів))

Внесення відомостей до Державного реєстру свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та видача свідоцтва будуть здійснені за умови сплати збору за оформлення і видачу свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно до п.3 постанови Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 року № 1756 "Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права автора на твір".

Якщо протягом трьох місяців від дати одержання заявником рішення про реєстрацію авторського права на твір Державна служба не одержала документ про сплату збору за оформлення і видачу свідоцтва у розмірі та порядку, визначених законодавством, або копію документа, що підтверджує право на звільнення від сплати зазначеного збору, заявка вважається відхиленою і реєстрація авторського права та публікація відомостей про реєстрацію Державною службою не проводиться.

**В.о. Голови Державної служби
інтелектуальної власності**



А.А.Малиш