

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



**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

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертація на правах рукопису.

Роботу виконано на кафедрі електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** кандидат технічних наук, доцент  
**Находов Володимир Федорович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», м. Київ, доцент кафедри  
електропостачання.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, с.н.с.  
**Нікітін Євген Євгенійович**,  
Інститут газу Національної академії наук України,  
м. Київ, провідний науковий співробітник відділу  
процесів горіння;

кандидат технічних наук, с.н.с.  
**Танкевич Сергій Євгенійович**,  
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,  
старший науковий співробітник відділу моделювання  
електроенергетичних об'єктів та систем.

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
канд. техн. наук, доцент



А.М. Ковальчук

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**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, А. 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 University 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 КПІ 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 ймовірнісно-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 [19].

**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 [1]; аналіз методів стиснення і відновлення графіків електричного навантаження [2]; розробка процедури визначення складу чинників, що є достатніми і необхідними для побудови адекватних «стандартів» енергоспоживання [3]; аналіз та порівняння діючих в Україні та за кордоном методів контролю енергоефективності, формулювання основних напрямків подальшого удосконалення систем оперативного контролю енергоефективності [4, 9, 11]; 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 [5,10,12]; вдосконалення підходу до визначення складу чинників, що впливають на величину енергоспоживання при створенні систем оперативного контролю енергоефективності [6]; розробка підходу до виявлення агрегатів або їх груп, що вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів [7,16]; аналіз методик визначення обсягів енергоспоживання на котельних [8,14]; розробка методичного підходу до визначення технологічних об'єктів, для яких системи оперативного контролю енергоефективності мають бути побудовані в першу чергу [13]; розробка методичних основ застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови електробалансів за агрегатами в умовах нечітко визначених вихідних даних [15, 17]; аналіз особливостей застосування методу Вальда для здійснення оперативного контролю енергоефективності технологічного обладнання компресорної станції [18]; аналіз нечітко визначених чинників, які входять до розрахунково-аналітичних залежностей, що використовуються при побудові електробалансів на підприємствах теплоенергетики [19].

**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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, темами та планами, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет досліджень, наведено методи виконання досліджень, зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих у дисертації результатів, а також особистий внесок здобувача, наведено дані щодо апробації результатів роботи та їх публікації.

У **першому розділі** виконано аналіз існуючих підходів до побудови балансів споживання електроенергії та методів здійснення контролю енергоефективності виробничо-господарських об'єктів.

Доведено, що традиційні методи не дають можливості будувати достатньо достовірні та обґрунтовані електробаланси виробничих об'єктів на підприємствах України. Існуючі методи контролю енергоефективності, які застосовуються на вітчизняних підприємствах, також мають суттєві недоліки і практично не дозволяють здійснювати оперативний контроль ефективності енерговикористання.

Таким чином, для вирішення зазначених проблем на вітчизняних підприємствах необхідно, в першу чергу, розробити нові більш досконалі підходи до побудови електробалансів виробничо-господарських об'єктів, удосконалити методи визначення кількісних показників енергоефективності, а також розробити процедури оперативного контролю ефективності енерговикористання на їх основі.

У **другому розділі** розглянуто особливості застосування ймовірно-статистичних методів для різних умов та випадків побудови електробалансів виробничо-господарських об'єктів.

Багатьом вітчизняним підприємствам властивий низький рівень оснащення приладами обліку електроспоживання та інших технологічних параметрів. У зазначених умовах обсяги електроспоживання кожної одиниці виробничого обладнання на підприємстві є невідомими або нечітко визначеними величинами. Методичною основою, яка дає змогу будувати електробаланси в зазначених умовах, є ймовірно-статистичний підхід.

Вибір тих чи інших методів для побудови електробалансів на зазначених рівнях залежить від наявності та повноти вихідних даних. З метою максимального врахування наявних вихідних даних для побудови об'єктивних та обґрунтованих електробалансів у роботі розроблено декілька підходів для різних умов вирішення цієї задачі. Надалі характерні умови, в яких здійснюється побудова електробалансів, у роботі називатимуться Ситуації (рис. 1).



Рис. 1. Умови побудови електробалансів

Наявність на промислових підприємствах значної кількості технологічних установок, які працюють у різних режимах, значно ускладнює процедуру побудови електробалансів виробничих об'єктів. З метою спрощення цієї задачі в дисертаційній роботі запропоновано ієрархічний підхід до побудови балансів споживання електричної енергії виробничих об'єктів, який базується на застосуванні ймовірно-статистичних методів і передбачає послідовну побудову електробалансів на двох рівнях: за видами продукції та за агрегатами, задіяними в процесах виробництва кожного окремого виду продукції.

Найскладнішим варіантом побудови електробалансів є Ситуація 1 (рис. 1), коли єдиною вихідною інформацією для вирішення цієї задачі є обсяг споживання електроенергії на підприємстві в цілому, а також технологічні схеми виробництва продукції. В зазначених умовах для знаходження обсягів електроспоживання окремих агрегатів застосовують спрощену розрахунково-аналітичну формулу:

$$W_i = P_{\text{вст.}i} k_{3,i} T_i, \quad (1)$$

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

Числові значення величин  $k_{3,i}$  та  $T_i$ , як правило, є невідомими або нечітко визначеними параметрами. Для вирішення цієї проблеми першим кроком побудови електробалансів у зазначених умовах є визначення найбільш ймовірних значень показників  $k_{3,i}$  та  $T_i$ . З цією метою пропонується будувати та використовувати гістограми частот виникнення можливих значень цих параметрів, які визначаються на основі реальних статистичних даних, отриманих з застосуванням методу моментних спостережень, або псевдореальних даних, отриманих з застосуванням методів експертного опитування та імітаційного моделювання.

Побудовані гістограми частот можливих значень  $k_{3,i}$  та  $T_i$  дають можливість визначати закони розподілу цих показників, а враховуючи рівняння (1), також закони розподілу можливих обсягів електроспоживання для кожної технологічної установки. Після цього шляхом об'єднання законів розподілу електроспоживання окремих агрегатів, що задіяні у виробництві відповідної продукції, визначаються закони розподілу обсягів споживання електроенергії на кожен її вид.

Для Ситуації 1 (рис. 1) задача визначення невідомої структури витратної частини електробалансу підприємства за видами продукції полягає в знаходженні найбільш ймовірних значень витрат електроенергії на виробництво кожного з видів продукції. Пошук таких значень пропонується здійснювати шляхом вирішення оптимізаційної задачі:

$$z = \prod_{i=1}^n f(W_i^{\text{пп}}) \rightarrow \max; \quad (2)$$

$$W_{i\text{min}}^{\text{пп}} \leq W_i^{\text{пп}} \leq W_{i\text{max}}^{\text{пп}}, \quad \sum_{i=1}^n W_i^{\text{пп}} = W^{\text{під}}, \quad (3)$$

де  $f(W_i^{\text{пп}})$  – ймовірність появи певного значення електроспоживання на виробництво  $i$ -го виду продукції, визначена за відповідним законом розподілу;



$W_i^{\text{пр}}$  – можливий обсяг споживання електроенергії на виробництво  $i$ -го виду продукції (змінна оптимізації);  $W^{\text{під}}$  – загальний обсяг споживання електричної енергії на випуск всіх видів продукції, отриманий за даними обліку.

Наступним кроком побудови електробалансів в Ситуації 1 (рис. 1) є визначення витратних частин електробалансів за агрегатами, задіяними у випуску кожного окремого виду продукції, яке здійснюється шляхом вирішення низки оптимізаційних задач:

$$z = \prod_{i=1}^n f(W_i^{\text{ар}}) \rightarrow \max; \quad (4)$$

$$W_{i\min}^{\text{ар}} \leq W_i^{\text{ар}} \leq W_{i\max}^{\text{ар}}, \quad \sum_{i=1}^n W_i^{\text{ар}} = W^{\text{пр}}, \quad (5)$$

де  $f(W_i^{\text{ар}})$  – ймовірність появи певної величини обсягу електроспоживання  $i$ -го агрегату, визначена за відповідним законом розподілу;  $W_i^{\text{ар}}$  – можливі обсяги споживання електроенергії  $i$ -м агрегатом (змінна оптимізації);  $W^{\text{пр}}$  – обсяг споживання електричної енергії на виробництво  $i$ -го виду продукції, визначений у результаті побудови електробалансу підприємства за видами продукції.

Таким чином, електробаланси за видами продукції та агрегатами, побудовані для Ситуації 1 з застосуванням запропонованого підходу, є значно достовірнішими, ніж такі ж баланси, отримані розрахунково-аналітичним методом.

Здебільшого на підприємствах, крім обліку загального електроспоживання, додатково здійснюється облік обсягів виробленої продукції, що створює інші, більш сприятливі умови для побудови електробалансів (Ситуація 2, рис. 1). У цьому випадку вирішення задачі розпочинається з побудови попереднього електробалансу за видами продукції, який може бути отримано шляхом побудови лінійної багатofакторної математичної моделі:

$$W = b_1 Q_1 + b_2 Q_2 + \dots + b_n Q_n, \quad (6)$$

де  $W$  – загальний обсяг електроспоживання на підприємстві;  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  – обсяги виробленої продукції кожного виду;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Для числових значень коефіцієнтів наведеної моделі доцільно встановлювати довірчі інтервали, фізичним змістом яких є діапазони можливих значень питомих витрат електроенергії на виробництво кожного виду продукції, які визначаються за таким виразом:

$$[d_{i.\min} = d_i - t(\alpha, n - m) s_{d_i}; d_{i.\max} = d_i + t(\alpha, n - m) s_{d_i}], \quad (7)$$

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

Побудову остаточного електробалансу за видами продукції в умовах Ситуації 2 (рис. 1.) пропонується виконувати за алгоритмом, розробленим для вирішення задачі у Ситуації 1. Однак для вирішення оптимізаційної задачі

побудови електробалансу за видами продукції (рівняння (2)), діапазони можливих обсягів споживання електроенергії на виробництво кожного виду продукції в нерівностях (3) додатково обґрунтовуються та уточнюються на основі раніше побудованих довірчих інтервалів до параметрів регресійної моделі (7). Далі побудова електробалансів за агрегатами, що задіяні у виробництві кожного з видів продукції, здійснюється аналогічно вирішенню цієї задачі у Ситуації 1.

Запропонований підхід до побудови електробалансів виробничих об'єктів у Ситуації 2 дає змогу одержувати більш достовірні електробаланси за видами продукції, оскільки вони обґрунтовуються фактичними обсягами виробленої продукції на підприємстві за відповідний період.

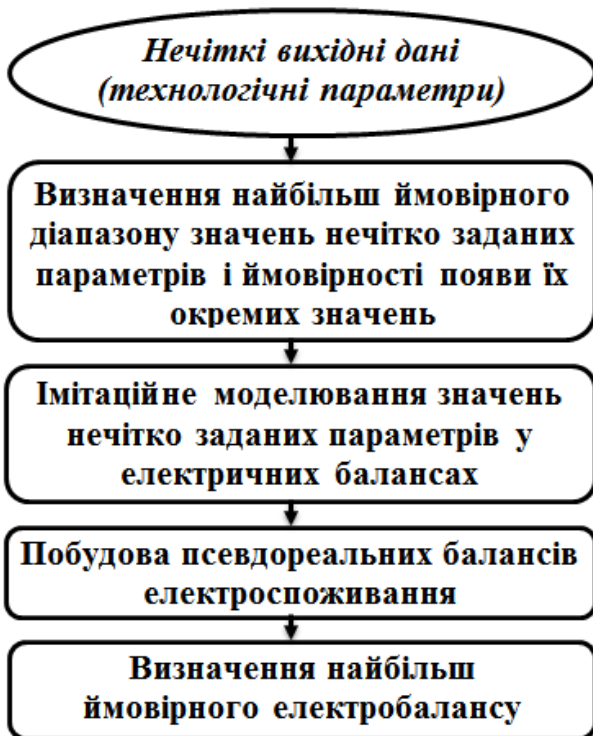


Рис. 2. Алгоритм визначення витратної частини електробалансів при відомих розрахунково-аналітичних залежностях

На деяких виробничих об'єктах існує ситуація, коли для всіх технологічних процесів відомими є аналітичні залежності між обсягами електроспоживання, обсягами виробництва продукції та іншими технологічними параметрами (Ситуація 3, рис. 1). Наявність зазначених залежностей, в принципі, вже дає змогу будувати достатньо достовірні електробаланси розрахунково-аналітичним методом. Однак на практиці числові значення багатьох параметрів, що використовуються у відповідних залежностях, є нечітко визначеними величинами, представленими у вигляді деяких інтервалів можливих їх значень. Для Ситуації 3 розроблена спеціальна процедура побудови балансів електроспоживання, застосування якої дає змогу визначати найбільш ймовірні значення відповідних нечітких параметрів, і тим самим підвищує достовірність і обґрунтованість витратної частини електробалансів, одержаних на

основі розрахунково-аналітичного методу. Така процедура наведена на рис. 2.

Застосування зазначеної процедури дає можливість вирішувати задачу побудови балансів електроспоживання за агрегатами на основі поєднання розрахунково-аналітичного та ймовірнісно-статистичного підходів. На відміну від алгоритму, запропонованого для Ситуації 1, замість вирішення оптимізаційної задачі (4) і (5) застосовується алгоритм імітаційного моделювання можливих значень нечітко заданих технологічних параметрів і побудови та оцінки ймовірності появи псевдореальних балансів виробничого об'єкта, що відповідають даним обліку загального електроспоживання на об'єкті. Як остаточний електробаланс за агрегатами в Ситуації 3 (рис. 1) приймається найбільш ймовірний з побудованих псевдореальних балансів.

При побудові електробалансів з застосуванням ймовірнісно-статистичних методів у будь-якій ситуації з метою підвищення їх достовірності доцільними є верифікація та уточнення одержаних результатів за допомогою приладів обліку електроспоживання. Кількість наявних приладів обліку на підприємствах є обмеженою, тому виникає необхідність знаходження агрегатів або їх груп, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів. Для цього розроблено методичний підхід до визначення вузлів схем електропостачання, в яких найбільш доцільно здійснювати верифікацію побудованих електробалансів з застосуванням додаткових приладів обліку. В першу чергу, при застосуванні такого підходу визначаються вузли схем електропостачання, у яких фізично можуть бути встановлені додаткові прилади обліку електроспоживання. Далі виконується імітаційне моделювання різних варіантів електробалансів, виходячи з припущення про те, що змодельовані обсяги електроспоживання для кожного з можливих місць установки лічильників є реальними. Вузли, у яких в першу чергу слід здійснювати верифікацію побудованих електробалансів, пропонується визначати за мінімальним значенням критерію *performance index of data reconciliation results (IRR)*, який розраховується за формулою:

$$IRR = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (W_{i,j} - W_{n.p_{i,j}})^2 \right), \quad (8)$$

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 (наприклад, за алгоритмом для Ситуації 1).

Побудова достатньо обґрунтованих та достовірних електробалансів виробничих об'єктів з застосуванням розглянутого вище ймовірнісно-статистичного підходу дає змогу одержувати окремо для кожного агрегату розрахункову статистику обсягів їх електроспоживання, необхідну для здійснення оперативного контролю ефективності використання електроенергії відповідними технологічними об'єктами.

У **третьому розділі** удосконалено методичні основи побудови та застосування систем оперативного контролю ефективності використання електроенергії на виробничих об'єктах.

Як прототип для побудови таких систем можуть розглядатися відомі системи контролю і планування енергоспоживання (системи КІП).

У традиційних системах КІП відсутні рекомендації щодо вибору складу чинників, які суттєво впливають на обсяги енергоспоживання будь-якого технологічного об'єкта, тому в дисертаційній роботі запропоновано комплексний підхід до вирішення цієї задачі, схема реалізації якого показана на рис. 3.

Для визначення набору чинників, які необхідно враховувати при побудові математичних моделей електроспоживання конкретного технологічного об'єкта,

на початковому етапі запропоновано використовувати експертні методи з застосуванням апарата нечіткої логіки, що дає змогу спростити процедуру опитування експертів.

Розроблений підхід передбачає можливість оптимізації складу чинників, виходячи з їх відносної важливості для побудови адекватних математичних моделей електроспоживання з урахуванням додаткових обмежень, зокрема, економічних. З метою реалізації зазначеного комплексного підходу в дисертаційній роботі сформульовано відповідну задачу комбінаторної оптимізації:

$$\sum_{i=1}^N k_i x_i \rightarrow \max, \text{ при обмеженні } \sum_{i=1}^N Z_i x_i \leq C, \quad (9)$$

де  $k_i$  – значення коефіцієнтів відносної важливості врахування чинників, розраховані на основі ітераційного алгоритму ранжирування оцінок експертів;  $x_i$  – числові значення змінних оптимізації ( $x_i = 1$ , якщо чинник враховується, або  $x_i = 0$  якщо чинник не враховується);  $Z_i$  – витрати на здійснення обліку значень  $i$ -го чинника;  $C$  – загальний обсяг коштів, що можуть бути витрачені на облік технологічних параметрів на відповідному об'єкті.

Для остаточного підтвердження необхідності врахування всіх чинників, що були відібрані в результаті вирішення оптимізаційної задачі (9), у дисертаційній роботі пропонується додатково визначати ступінь і характер їх впливу на обсяги електроспоживання з використанням методу головних компонент.

У зв'язку зі специфічними особливостями об'єктів контролю енергоефективності для кожного з них існує необхідність вибору “індивідуального” методу моделювання та виду математичної моделі. Для визначення математичної моделі електроспоживання, найбільш прийнятної для здійснення оперативного контролю енергоефективності конкретного технологічного об'єкта, розроблено методичні основи вирішення цієї задачі у виробничих умовах, які базуються на принципі конкурентного відбору моделей, що розглядаються (рис. 4).

При виборі математичних моделей електроспоживання перш за все слід використовувати критерії їх адекватності. На основі аналізу тісноти статистичного зв'язку між різними критеріями в роботі визначено необхідний їх склад, які не дублюють один одного (рис. 4). Також обґрунтовано доцільність застосування інших “якісних” критеріїв, які враховують додаткові вимоги до моделей, наприклад прийнятні витрати часу або інших ресурсів на їх побудову.



Рис. 3. Комплексний підхід до визначення складу чинників, що суттєво впливають на обсяги електроспоживання технологічних об'єктів

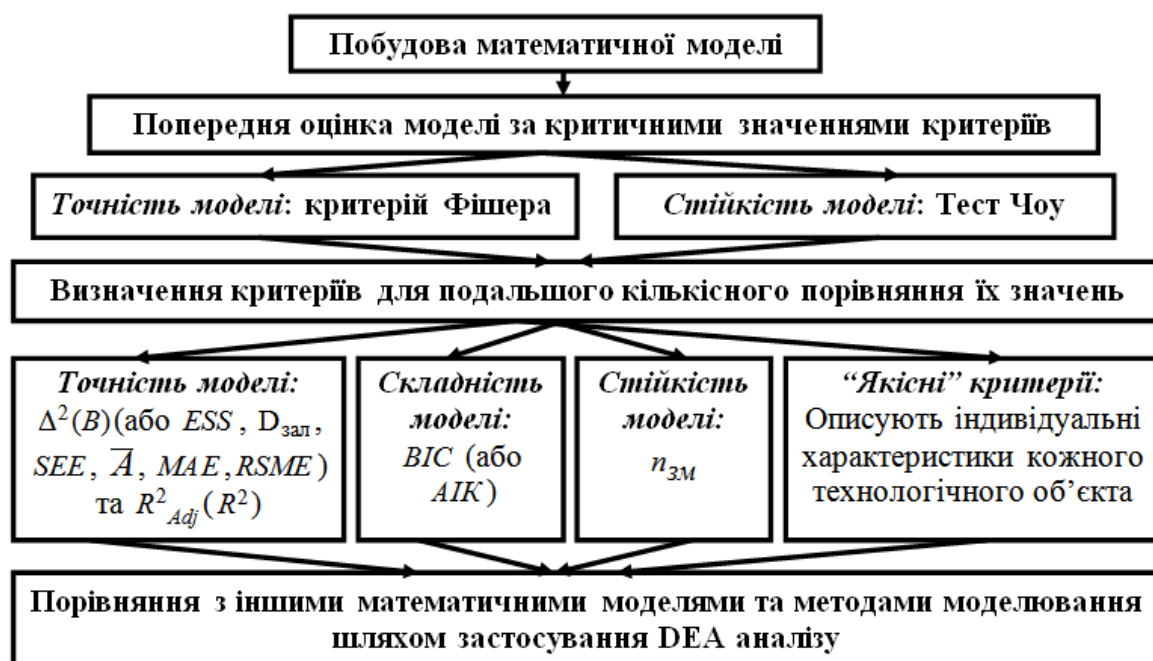


Рис. 4. Процедура вибору найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення цільових змінних електроспоживання

Визначення найбільш прийнятної методу математичного моделювання і виду моделі електроспоживання того чи іншого технологічного об’єкта є багатокритеріальною задачею. Для вирішення відповідної задачі запропоновано використовувати DEA аналіз, згідно з яким доцільність застосування кожного з методів моделювання та виду математичних моделей обсягів електроспоживання визначається шляхом розрахунку узагальнюючого показника «ефективності»:

$$f_n = \max_{u_i, v_j \in G} \frac{u_1 Y_1 + u_2 Y_2 + \dots + u_k Y_k}{v_1 X_1 + v_2 X_2 + \dots + v_m X_m}, \quad \frac{u_1 Y_1 + u_2 Y_2 + \dots + u_k Y_k}{v_1 X_1 + v_2 X_2 + \dots + v_m X_m} \leq 1, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

де  $Y_i$  – числові значення показників адекватності моделі, яка побудована з застосуванням  $n$ -го методу моделювання;  $X_j$  – оцінки витрат ресурсів, необхідних для побудови відповідної математичної моделі;  $u_i = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$  та  $v_i = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  – вагові коефіцієнти, що максимізують функціонал  $f_n$ .

Системи співвідношень виду (10), складені для кожного з  $n$  конкуруючих методів моделювання ( $n = 1 \dots N$ ), визначають  $N$  задач нелінійного програмування. Рішення задачі (10) для  $n$ -ї моделі, що розглядається, дає змогу отримати узагальнений показник її адекватності  $f_n$ , який є основою для вибору найбільш прийнятної в конкретних умовах математичної моделі електроспоживання.

Для здійснення оперативного контролю енергоефективності технологічних об’єктів необхідно на основі математичних моделей їх електроспоживання встановлювати достатньо об’єктивні цільові змінні, з якими будуть порівнюватись фактичні обсяги споживання електричної енергії. З метою врахування залишкової похибки моделювання цільові змінні електроспоживання необхідно встановлювати на основі довірчих інтервалів (ДІ) до відповідної математичної моделі. Рекомендації щодо визначення меж ДІ для багатofакторних нелінійних моделей в традиційних системах контролю енергоефективності відсутні.

Для визначення цільових змінних на основі складних нелінійних математичних моделей обґрунтовано доцільність застосування бутстреп-методу, перевагою якого є універсальність, тобто можливість застосування його для математичних моделей будь-якого виду.

У результаті порівняння фактичних обсягів електроспоживання технологічного об'єкта з межами ДІ до математичної моделі електроспоживання, можуть бути визначені моменти невідповідності рівня його енергоефективності (рис. 5). Визначення таких моментів ще не дає змоги здійснювати аналіз причин, що призвели до їх появи. Для усунення зазначеного недоліку автором дисертаційної роботи запропоновано після визначення змін в рівні енергоефективності будь-якого технологічного об'єкта здійснювати також аналіз невідповідних змін числових значень чинників, які враховані у відповідній моделі електроспоживання.

З метою вирішення задачі аналізу змін значень параметрів умов виробництва обґрунтовано доцільність і можливість застосування в системах оперативного контролю енергоефективності контрольних карт Шухарта або карт Хоттелінга (рис. 6).

Принцип здійснення контролю тих чи інших технологічних параметрів з використання зазначених карт полягає у встановленні граничних значень цих параметрів і у подальшому порівнянні з ними їх фактичних величин (рис. 6).

Верхня ( $UCL$ ) та нижня ( $LCL$ ) границі допустимих середніх значень параметрів, що контролюються для карт Шухарта, визначаються за формулою:

$$UCL(LCL) = X_{\text{сер}} \pm \sigma_{\Delta W} A_t, \quad (11)$$

де  $X_{\text{сер}}$  – середнє значення відповідного чинника, що впливає на величину електроспоживання;  $\sigma_{\Delta W}$  – стандартне відхилення цього чинника;  $A_t$  – табличне значення коефіцієнта для обчислення контрольних меж.

При використанні карт Хоттелінга аналіз зміни значень параметрів технологічного процесу виконується одразу для всіх чинників, що розглядаються.

Для побудови карт Хоттелінга розраховується узагальнена статистика ( $T_i^2$ ):

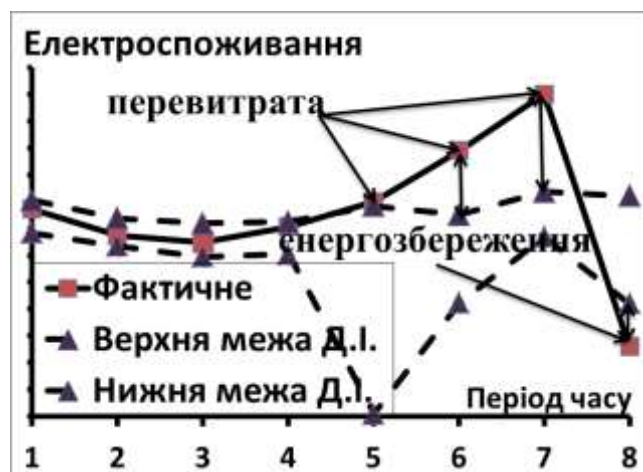


Рис. 5. Здійснення контролю енергоефективності на основі довірчих інтервалів до математичної моделі

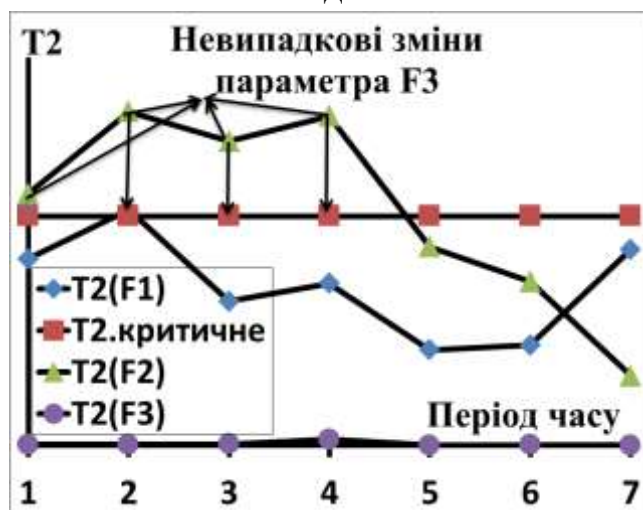


Рис. 6. Приклад контрольної карти Хоттелінга, побудованої для трьох змінних F1, F2, F3

$$T_i^2 = (\bar{X}_i - X_{\text{сер}})^T S^{-1} (\bar{X}_i - X_{\text{сер}})^T, \quad (12)$$

де  $T_i^2$  – 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.

Одержані за формулою (12) розрахункові значення  $T_i^2$  необхідно порівнювати з табличними значеннями квантилів розподілу  $\chi^2$ . Якщо розрахункове значення  $T_i^2$  перевищує відповідну табличну величину, то можна стверджувати, що один або декілька чинників, які аналізуються, вийшли за межі встановлених для них граничних значень. В іншому випадку слід вважати, що числові значення всіх чинників, знаходяться у допустимих межах (рис. 7, Пункт 5).

Для того щоб визначити, які саме чинники вийшли за межі їх граничних значень, при застосуванні таких контрольних карт можуть бути визначені розрахункові величини часткових критеріїв Хоттелінга:

$$T_j^2 = \left[ c_j^T (\bar{X}_{t0} - X_{\text{сер}})^2 \right] / \left[ c_j^T S c_j \right], \quad (13)$$

де  $c_j$  – вектор-стовпець з нулями в усіх рядках, крім  $j$ -го, який відповідає номеру чинника, що розглядається, і в якому знаходяться одиниці;  $\bar{X}_{t0}$  – матриця значень технологічних параметрів на момент часу, що розглядається.

На кожному кроці контролю енергоефективності пропонується виконувати процедуру, наведену на рис. 8.

У **четвертому розділі** продемонстровані приклади практичної реалізації результатів роботи на декількох підприємствах, зокрема: застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови електробалансів у Ситуації 1 (рис. 7, Пункт 1), у Ситуації 2 (рис. 7, Пункт 2), у Ситуації 3 (рис. 7, Пункт 3), знаходження агрегатів або їх груп, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів (рис. 7, Пункт 4), здійснення оперативного контролю та аналізу ефективності використання електроенергії (рис. 7, Пункт 5).

Максимальна похибка окремих статей електробалансів визначних ймовірно-статистичним і розрахунково-аналітичним методами за агрегатами підприємства (рис. 7, Пункт 1) складала 17%. Максимальна похибка статей електробалансів за видами продукції підприємства пакувальної продукції (рис. 7, Пункт 2) знаходилася в межах допустимої похибки і не перевищувала 6,5%. Ймовірно-статистичний дозволив враховувати невизначеність вихідних даних і отримувати більш достовірні результати ніж розрахунково-аналітичний метод.

Визначений за результатами експериментальних розрахунків потенціал економії електроенергії технологічного об'єкту (рис. 7, Пункт 5) для окремих робочих днів становив 14 %. Застосування контрольної карти Хоттелінга (рис. 7, Пункт 5) дало змогу визначити причини не ефективного електроспоживання, подальше усунення яких дозволить підвищити ефективність споживання електроенергії на підприємстві.

**Пункт 1. Електробаланс технологічних об'єктів виробництва кабельної продукції (Ситуація 1)**

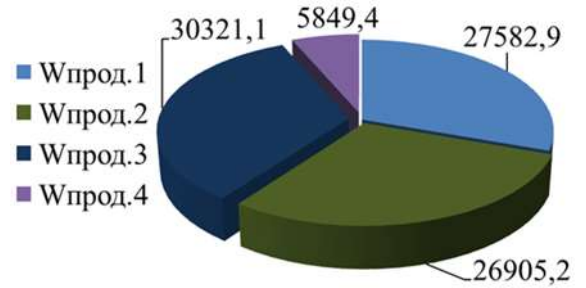
*Електробаланс за агрегатами*



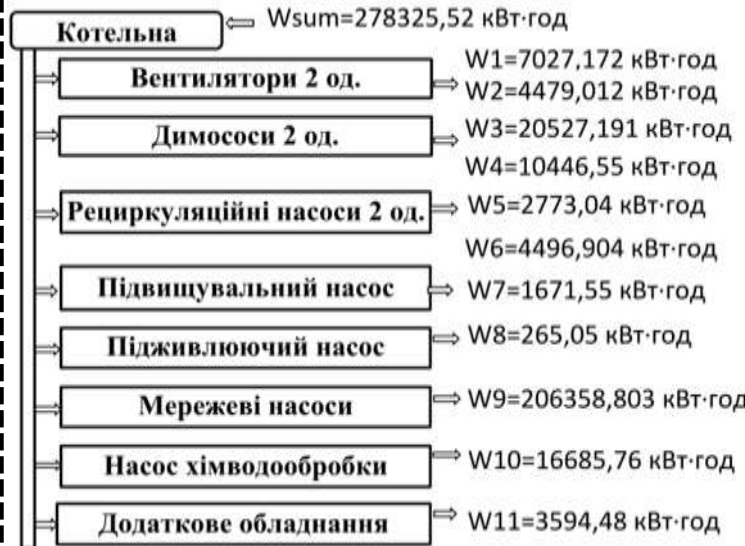
*Електробаланс за видами продукції*



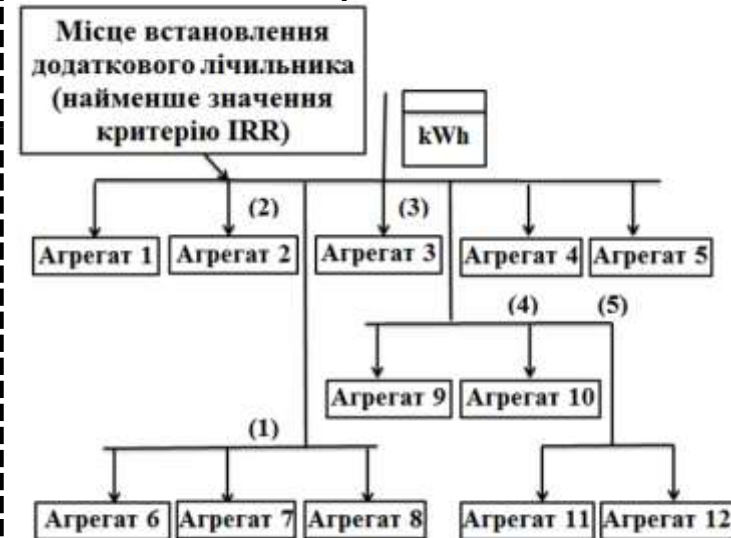
**Пункт 2. Електробаланс за видами продукції на підприємстві пакувальної продукції (Ситуація 2)**



**Пункт 3. Електробаланс за агрегатами котельної (Ситуація 3)**



**Пункт 4. Знаходження агрегатів або їх груп, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів**



**Пункт 5. Оперативний контроль енергоефективності на підприємстві хімічної промисловості**

*Склад чинників, що впливають на електроспоживання:*



*Математична модель електроспоживання:*

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

*Оперативний контроль та аналіз енергоефективності:*

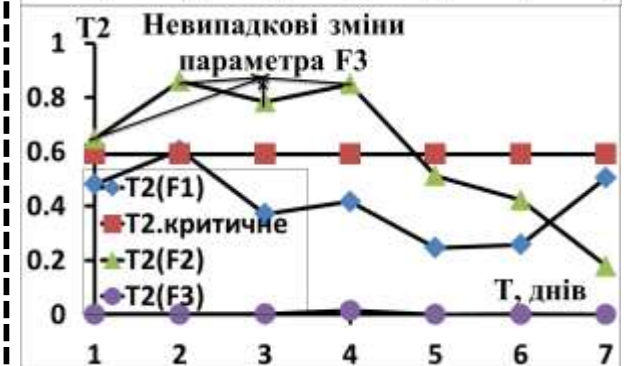
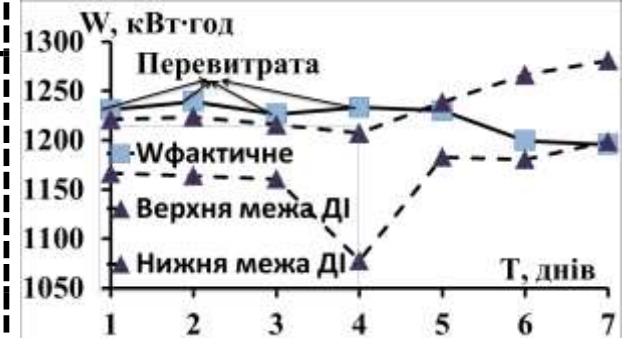


Рис.7. Результати застосування методів побудови електробалансів та здійснення оперативного контролю енергоефективності



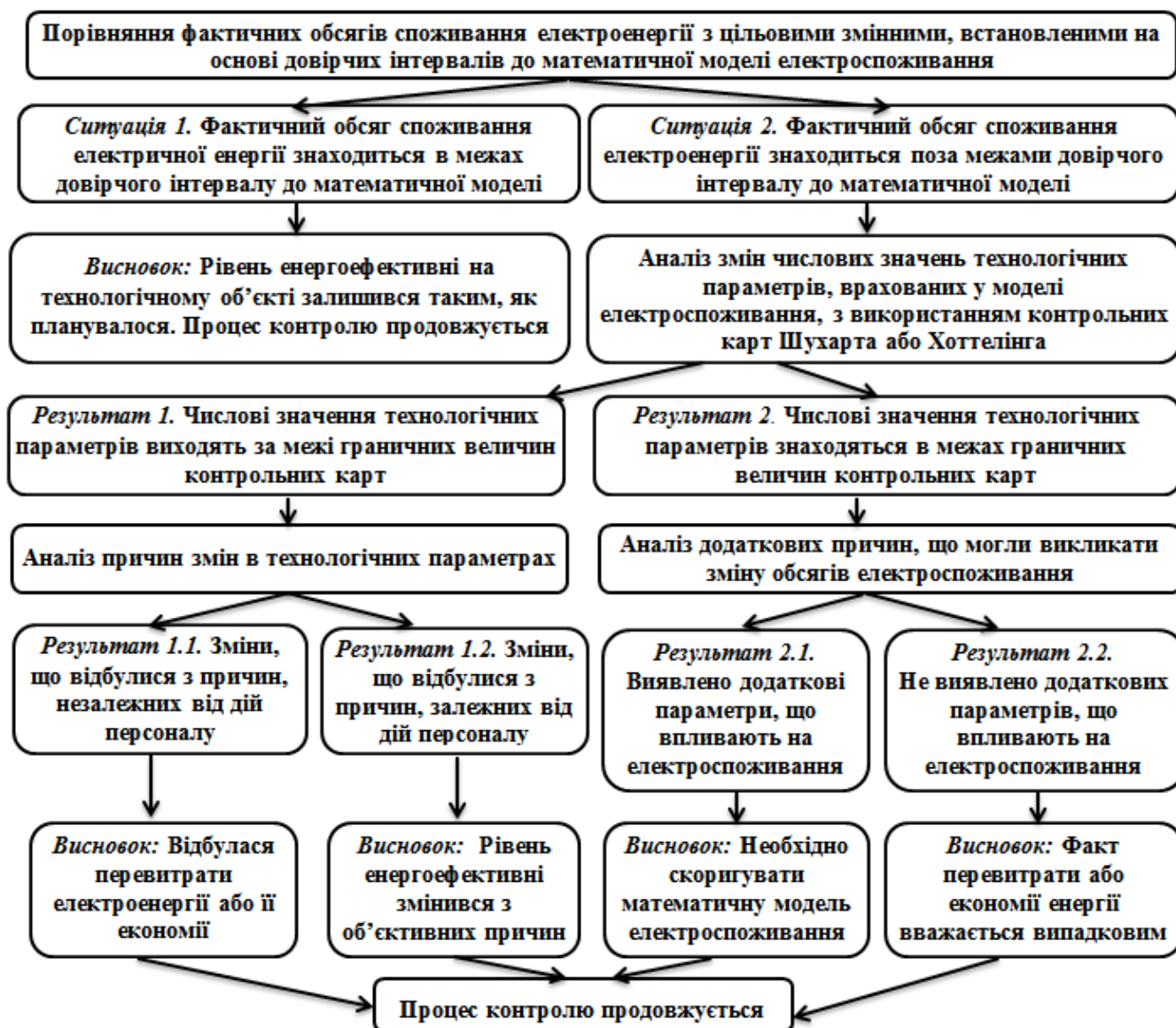


Рис.8. Процедура виконання контролю енергоефективності

Результати застосування розроблених методів доводять, що їх застосування дає змогу будувати об'єктивні баланси споживання електроенергії в різних умовах вирішення відповідної задачі, а також здійснювати оперативний контроль енергоефективності технологічних об'єктів.

## 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 обґрунтовані 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 складає 14%.

8. У подальшому отримані результати можуть бути використані для практичного здійснення контролю енергоефективності на різноманітних виробничих об'єктах.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Зорин В.В. Мероприяття по підвищенню ефективності режимов действующих распределительных электрических сетей [Текст] / В.В. Зорин, Р.А. Буйный, Д.О. Иванько // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 2. – С. 70-77.
2. Волошко А. В. К вопросу применения кратномасштабного анализа для сжатия и восстановления графика электрической нагрузки [Текст] / А.В. Волошко, Д.О. Иванько, К.Ю. Гура, Д.К. Мищенко // Электроника и связь. – 2010. – № 4. – С. 59-64.
3. Находов В.Ф. Вибір необхідного складу критеріїв адекватності математичних моделей енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності [Текст] / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Иванько // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 3. – С. 68-77.
4. Находов В.Ф. Контроль ефективності енерговикористання в системі енергетичного менеджменту [Текст] / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Иванько // Журнал «Вісник КНУТД». – 2013. – №6. – С. 67-77.
5. Находов В.Ф. Вибір найбільш прийнятної математичної моделі для встановлення стандартів енергоспоживання виробничих об'єктів. [Текст] / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Иванько // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – №1. – С. 20-29.
6. Находов В.Ф. Комплексний підхід до визначення складу чинників, що впливають на величину енергоспоживання при впровадженні систем оперативного контролю енергоефективності [Текст] / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Иванько, І.О. Єгорова // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – №2. – С. 68–77.
7. Находов В.Ф. Виявлення «проблемних» ділянок схеми електропостачання для верифікації розрахункових електробалансів [Текст] / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Иванько, І.В. Якобюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 2/8 (74). – С. 4-10. (Включена до міжнародних наукометричних баз даних Index Copernicus).
8. Находов В.Ф. Аналіз методики розрахунку нормативних витрат електричної енергії на виробництво і транспортування тепла [Текст] / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Иванько, Т.В. Мазасва // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 6. – С. 2-11. (Включена до міжнародної наукометричної бази даних Ulrich's Periodicals Directory).
9. 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.
10. Находов В.Ф. Вибір методу математичного моделювання енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності [Текст] / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Иванько // 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.

11. Находов В.Ф. Удосконалення методологічних засад побудови систем оперативного контролю ефективності енерговикористання [Текст] / 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.

12. Находов В.Ф. Вибір методів математичного моделювання процесів енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності [Текст] / В.Ф. Находов, Д.О. Іванько, А.В. Головка // Энергетика: економіка, технології, екологія. – Спецвипуск. – 2013. – С. 20-27.

13. 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 // Энергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2013. – С. 377-385.

14. Находов В.Ф. Застосування ймовірно-статистичного підходу для побудови балансів електроспоживання котельних [Текст] / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, Д.О. Іванько, А.В. Ройтер, Ю.В. Пахарев // III Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'16» – С. 82-83.

15. Башкис А. Определение численных значений статей электробалансов производственных объектов в условиях неопределенности исходной информации [Текст] / А. Башкис, Д.О. Іванько, В.Ф. Находов // Минск: БГТУ, 2015. – Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов, Минск: БГТУ. – 2015.– С. 142-146.

16. Nakhodov V. Identification of technological equipment with significant impact on uncertainty of electrical balances [Текст] / V. Nakhodov, A. Baskys, S. Pfeiffer, D. Ivanko // Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), eStream Vilnius – 2016. – P.1-6.

17. Baskys A. Calculation of Electrical Energy Balances of Production Systems Based on Probabilistic-Statistical Approach [Текст] / 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.

18. 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.

19. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір «Ймовірно-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.

## АНОТАЦІЯ

**ІВАНЬКО Д.О. Оперативний контроль енергоефективності виробничих систем на основі ймовірно-статистичного підходу. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

Виконано аналіз існуючих підходів до здійснення контролю енергоефективності виробничо-господарських об'єктів. Обґрунтовано необхідність подальшого удосконалення підходів до побудови електробалансів та здійснення оперативного контролю енергоефективності в умовах вітчизняних підприємств. Розроблено методичні основи застосування ймовірно-статистичного підходу для найбільш характерних умов та випадків визначення витратної частини електробалансів на двох рівнях, за видами продукції та агрегатами.

Удосконалено методичні основи оперативного контролю енергоефективності технологічних об'єктів, що дають змогу встановлювати більш коректні цільові змінні електроспоживання, а також визначати моменти та причини змін рівня енергоефективності зазначеного обладнання.

**Ключові слова:** баланс споживання електроенергії, оперативний контроль енергоефективності, математична модель електроспоживання, цільові змінні електроспоживання, процедура контролю енергоефективності.

## АННОТАЦИЯ

**Иванько Д.О. Оперативный контроль энергоэффективности производственных систем на основе вероятностно-статистического подхода. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2017.

Диссертация посвящена проблемам построения электробалансов и осуществления оперативного контроля энергоэффективности на отечественных промышленных предприятиях. В работе выполнен анализ существующих подходов к построению балансов потребления электроэнергии и методов осуществления контроля энергоэффективности производственно-хозяйственных объектов. Также обоснованы необходимость и целесообразность дальнейшего совершенствования существующих методов решения соответствующих задач.

Рассмотрены различные условия построения электробалансов производственных объектов. Доказана необходимость применения иерархического подхода к составлению электробалансов производственных объектов на двух уровнях по видам продукции и агрегатам. Разработаны методические основы построения электробалансов с применением вероятностно-статистических методов для различных условий решения указанной задачи. В частности, при известных объемах электропотребления на предприятии в целом и технологических схем

производства продукции; объемах электропотребления предприятия в целом и объемах производства продукции; аналитических зависимостях объемов электропотребления агрегатов от параметров технологических процессов.

Созданы методические основы определения узлов схем электроснабжения, в которых наиболее целесообразно осуществлять верификацию построенных электробалансов с применением дополнительных приборов учета на основе имитационного моделирования различных структур балансов электропотребления.

Разработана комплексная процедура определения оптимального состава факторов, влияющих на энергопотребление технологических объектов, основанная на экспертных методах, процедуре оптимизации состава факторов по их относительной важности и методах многомерного анализа статистических данных.

Создан универсальный подход к выбору наиболее приемлемых математических моделей энергопотребления технологических объектов на основе их конкурентного отбора по нескольким критериям, которые разносторонне характеризуют свойства соответствующих моделей.

Усовершенствованы методические основы установления базовых линий энергопотребления и осуществления оперативного контроля энергоэффективности технологических объектов, что позволило определять неслучайные изменения в их уровне энергоэффективности, а также анализировать причины их появления.

**Ключевые слова:** баланс потребления электроэнергии, оперативный контроль энергоэффективности, целевые переменные электропотребления, математическая модель энергопотребления, процедура контроля энергоэффективности.

## ABSTRACT

**IVANKO D.O. Operational control of energy efficiency of production systems based on a probabilistic-statistical approach. – Manuscript.**

The thesis is dedicated to the obtaining candidate's degree on technical sciences in the specialty 05.14.01 - energy systems and complexes. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2017.

The analysis of approaches to the control of energy efficiency of industrial objects has been carried out in the thesis. The necessity of further improvement of approaches to the calculation of electrical balances and operational control of energy efficiency in the conditions of Ukrainian enterprises has been substantiated.

The methodical bases of application of the probabilistic-statistical approach for the most characteristic conditions and cases of determination of electric balances at two levels, by types of products and technological equipment has been developed.

In the thesis has been improved methodical bases of operational control of energy efficiency of technological objects, which allowing us to set more correct target energy variables, as well as to determine the moments and causes of not casual changes in the level of the energy efficiency.

**Key words:** electrical energy balance, operational control of energy efficiency, target energy variables, mathematical model of energy consumption, procedure of energy efficiency control.