

## ЗАСТОСУВАННЯ ЙМОВІРІСНО-СТАТИСТИЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРОБАЛАНСІВ АМІАЧНОГО ЦЕХУ

*У статті розглянуто удосконалення методології побудови балансів споживання електроенергії, що ґрунтується на використанні методів отримання більш об'єктивної та обґрунтованої вихідної інформації, зокрема методів збору та оброблення необхідних статистичних даних. Тобто для поліпшення результатів побудови енергобалансів виробничих об'єктів необхідно застосовувати ймовірісно-статистичні методи. Складання електробалансів виробничих об'єктів із застосуванням ймовірісно-статистичного підходу може ґрунтуватися на побудові багатofакторних математичних моделей споживання електричної енергії підприємством в цілому та його підрозділами, на встановленні довірчих інтервалів до цих моделей, на визначенні варіантів можливих обсягів використання електроенергії окремими підрозділами підприємства або на виробництво окремих видів продукції, а також на виявленні найбільш ймовірного варіанта розподілу енергії на об'єкті. Застосовуючи ймовірісно-статистичний підхід, який пропонується використовувати в умовах невизначеності вихідних даних, можна будувати більш достовірні баланси споживання електричної енергії виробничо-господарських об'єктів, ніж за допомогою розрахунково-аналітичного методу. Однак можливість застосування ймовірісно-статистичного методу побудови електробалансів може виявитися суттєво ускладненою для виробництв, що мають широкий асортимент продукції, та складну, розгалужену схему технологічного процесу, коли у виготовленні окремих видів продукції беруть участь багато підрозділів.*

**Ключові слова:** баланс споживання електричної енергії, ймовірісно-статистичний метод, довірчі інтервали, розрахунково-аналітичний метод, компресор, аміачний цех.

### Вступ

Україна є енергодефіцитною державою, яка імпортує переважну більшість необхідних первинних енергетичних ресурсів, зокрема, природного газу, нафти та нафтопродуктів. Тому раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), тобто практичне вирішення задач енергозбереження в усіх галузях економіки було і залишається для держави актуальною і життєво важливою проблемою.

Є очевидним, що всі види діяльності в сфері енергозбереження фактично являють собою діяльність, спрямовану на підвищення ефективності використання ПЕР, яка має базуватися на об'єктивній кількісній оцінці існуючого рівня енергоефективності, на побудові, аналізі та оптимізації енергетичних потоків, зокрема, і потоків споживання електричної енергії, на визначенні найбільш доцільних заходів і проектів з енергозбереження, на їх впровадженні на різних виробничих, комерційних та комунально-побутових об'єктах.

Відомо, що основним (а краще сказати – єдиним) методом планування та аналізу споживання і ефективності використання палива та енергії всіх видів є побудова та аналіз відповідних енергетичних балансів, які відображають кількісну відповідність між надходженням і використанням тих чи інших енергоресурсів [1]. При цьому необхідно зазначити, що єдиної, універсальної методики складання та аналізу фактичних енергобалансів для різних об'єктів, а також на різних рівнях управління економікою на сьогоднішній день практично не існує. Особливо складними задачами є побудова та аналіз енергобалансів окремих агрегатів, установок чи виробничих процесів. Причому найбільші труднощі виникають при побудові та аналізі балансів споживання електричної енергії, структура витратної частини яких, на відміну від балансів споживання палива чи, наприклад, теплової енергії, є значно більш складною і динамічною (протягом короткого часу можуть відбуватися суттєві зміни як складу, так і числових значень статей витратної частини балансу).

Тому, особливо при побудові та аналізі балансів споживання електроенергії на виробничих об'єктах, де, як правило, відбуваються швидкі зміни складу працюючого обладнання, його режимів роботи та завантаження за продуктивністю, а також численних технологічних параметрів, важливо не просто застосовувати чітку і об'єктивну методику побудови електробалансів, але й мати можливість вирішувати цю задачу достатньо оперативно (наприклад, щодобово або, навіть, щогодинно).

Теоретично для побудови електробалансів будь-яких технологічних чи виробничо-господарських об'єктів можуть бути застосовані експериментальний, розрахунково-аналітичний або комбінований методи, останній з яких являє собою поєднання двох попередніх [2, 3].

Найбільш достовірна та оперативна інформація для побудови електробалансів виробничих об'єктів (машин, установок, агрегатів, окремих технологічних процесів, підприємств, їх підрозділів тощо) може бути отримана за допомогою приладів обліку, тобто експериментальним шляхом. Однак застосування цього методу для складення фактичних балансів споживання електричної енергії на переважній більшості діючих в Україні підприємств є просто неможливим, оскільки при його використанні мова йде про необхідність проведення синхронізованих у часі вимірювань у багатьох десятках чи навіть сотнях пунктів. Тому про використання експериментального методу для побудови енергобалансів виробничо-господарських об'єктів мова може йти лише у тому випадку, якщо підприємство, організація чи установа має розгалужену систему технічного обліку електроспоживання, зокрема відповідну автоматизовану систему обліку. Проте на сьогоднішній день переважна більшість подібних об'єктів в Україні таких систем обліку не має.

Найбільш реальним для побудови енергобалансів виробничо-господарських об'єктів традиційно вважається комбінований метод. Однак практичне застосування цього методу також є суттєво обмеженим, зокрема, через неможливість отримання з зазначених вище причин необхідних експериментальних даних.

Таким чином, для побудови балансів споживання електричної енергії для різних виробничо-господарських об'єктів зараз фактично використовується лише один метод - розрахунково-аналітичний. При застосуванні цього методу кількісна величина корисних витрат та втрат енергії за кожною статтею витратної частини електробалансу мають визначатись на підставі відповідних фізико-хімічних або емпіричних залежностей, які можуть бути знайдені у відповідній довідковій літературі. Однак для значної кількості діючих технологічних об'єктів (машин, установок, агрегатів чи окремих технологічних процесів) необхідні емпіричні залежності виявляються відсутніми або непридатними для нових типів обладнання, оскільки наявна в Україні довідкова література видавалася ще за радянських часів, а потрібних фізико-хімічних залежностей може не бути взагалі. До того ж, необхідно зазначити, що навіть наявні і придатні до використання фізико-хімічні або емпіричні залежності, здебільшого, практично не можуть бути застосовані для побудови електробалансів, оскільки на переважній кількості виробничих об'єктів не здійснюється облік чи моніторинг числових значень показників, які необхідно використовувати у зазначених формулах для виконання відповідних розрахунків (тобто, числові значення цих показників є невідомими).

З зазначених причин при використанні для побудови електробалансів розрахунково-аналітичного методу обсяги споживання електричної енергії для більшості установок чи агрегатів на практиці визначаються за спрощеною розрахунковою формулою [3]:

$$W = P_{\text{вст}} \cdot k_{\text{вик}} \cdot t, \quad (1)$$

де  $P_{\text{вст}}$  – встановлена потужність електродвигуна (чи іншого електроприймача) виробничого обладнання, кВт;  $t$  – тривалість його роботи протягом відповідного періоду, год.;  $k_{\text{вик}}$  – середній коефіцієнт використання встановленої потужності електродвигуна такого обладнання.

Якщо встановлену потужність електроприймачів виробничого обладнання можна вважати відомою, то тривалість його роботи, здебільшого, є невідомою. Виключенням може бути тільки основне обладнання, тривалість роботи якого визначається відповідними технологічними картами або регламентами. Що ж стосується коефіцієнтів використання встановленої потужності і тривалості роботи переважної більшості виробничого та допоміжного обладнання, що використовуються в наведеній вище спрощеній формулі (1), то вони, як правило, являють собою невизначені параметри, числові значення яких необґрунтовані жодними експериментальними вимірюваннями, розрахунками або технологічною документацією.

Тому при побудові електробалансів виробничо-господарських об'єктів спрощеним розрахунково-аналітичним методом застосовують середньостатистичні значення коефіцієнтів використання встановленої потужності електроприймачів, наведені у довідковій літературі для відповідних типів обладнання (наприклад, у [4]). Ці коефіцієнти не тільки є середньостатистичними величинами і, здебільшого, не відповідають конкретним виробничим умовам того чи іншого підприємства, але, до того ж, наводяться в довідниках для кожного типу обладнання у вигляді досить широкого інтервалу можливих їх числових значень. При цьому вибір конкретних числових значень довідкових коефіцієнтів використання встановленої потужності з діапазону їх можливих величин (наприклад, мінімальних або максимальних) фактично є довільним, хоча дуже помітно впливає на розрахунковий обсяг споживання електроенергії відповідним обладнанням.

Таким чином, можна стверджувати, що внаслідок застосування недостовірних значень коефіцієнтів використання встановленої потужності установок чи агрегатів а також тривалості їх роботи розрахункові величини обсягів споживання електричної енергії, що визначаються спрощеним розрахунково-аналітичним методом, можуть суттєво відрізнятись від фактичних обсягів електроспоживання відповідного обладнання протягом певного періоду. Однак при цьому загальне (сумарне) розрахункове споживання електроенергії на виробничо-господарському об'єкті, для якого складається енергобаланс, може досить точно співпадати з фактичним обсягом споживання електричної енергії на цьому об'єкті, зареєстрованим приладами обліку.

Такий збіг розрахункових і фактичних сумарних витрат електричної енергії на тому чи іншому виробничо-господарському об'єкті зазвичай сприймається як ознака достатньої точності побудованого для нього електробалансу. Проте, виходячи з зазначеного вище, необхідно розуміти, що оцінки обсягів споживання електроенергії за окремими статтями електробалансів, одержаних спрощеним розрахунково-аналітичним шляхом, здебільшого, виявляються спотвореними і значною мірою не відповідають реальним витратам електричної енергії окремими установками чи агрегатами.

Отже можна сказати, що баланси споживання електричної енергії виробничо-господарських об'єктів, що складаються з використанням спрощеного розрахунково-аналітичного методу, фактично будуються в умовах невизначеності та неповноти вихідних даних. Зважаючи на це, електричні баланси, побудовані із застосуванням цього методу, здебільшого, не можна вважати достатньо достовірними та обґрунтованими [5].

Приймаючи до уваги надзвичайно важливу роль балансів споживання електричної енергії для успішного вирішення задач управління ефективністю її використання, зокрема на виробничо-господарських об'єктах, цілком очевидним є, що в існуючих умовах удосконалення і подальший розвиток методів побудови балансів споживання електричної енергії на господарських об'єктах є задачею важливою і актуальною.

Оскільки електроспоживання виробничих об'єктів значною мірою має випадковий характер, а їх електробаланси складаються в умовах невизначеності та неповноти вихідних даних, одним з найбільш доцільних та перспективних напрямів удосконалення методології побудови балансів споживання електроенергії слід вважати застосування ймовірно-статистичного підходу [5, 6].

Застосування в зазначених умовах відповідних методів теорії ймовірності та математичної статистики, на відміну від розрахунково-аналітичних методів, здатне забезпечити побудову значно більш достовірних та обґрунтованих електробалансів, що, у свою чергу, дасть змогу здійснювати об'єктивний контроль та аналіз ефективності використання електроенергії у суспільному виробництві.

#### **Пропозиції і цілі**

Метою цієї статті є продемонструвати на реальних прикладах можливість та доцільність застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови електробалансів виробничих об'єктів в умовах неповноти та невизначеності вихідних даних.

#### **Матеріали та результати дослідження**

Для досягнення зазначеної мети було проведено експеримент, в ході якого з використанням спрощеного розрахунково-аналітичного і ймовірно-статистичного методів здійснювалась побудова фактичних добових балансів споживання електричної енергії у одному з підрозділів хімічного підприємства, а саме, у цеху з виробництва аміаку.

Вибір саме цього підрозділу для проведення експерименту зумовлений тим, що даний цех з точки зору побудови електробалансів являє собою дуже простий об'єкт, для якого досить успішно може бути застосовано навіть спрощений розрахунково-аналітичний метод. Основним електрообладнанням цеху є п'ять однотипних аміачних компресорів, які, здебільшого, працюють з постійним навантаженням, мають однакову встановлену потужність електродвигунів (6780 кВт) і живляться електричною енергією від цехової трансформаторної підстанції за радіальною схемою фідерами, які умовно позначено номерами 3Г, 28Г, 4Г, 3В і 4В.

Цей об'єкт було вибрано ще й з тієї причини, що даний цех оснащено автоматизованою системою обліку споживання електричної енергії, яка охоплює, зокрема, і всі аміачні компресори. Ця обставина дозволила в ході експерименту порівнювати результати побудови електробалансів різними методами не тільки між собою, але й з фактичними даними обліку електроспоживання.

Автоматизована система обліку споживання електричної енергії щодоби дозволяє отримувати дані про фактичні щогодинні обсяги використання енергії окремо кожним з аміачних компресорів а також всією їх групою. Очевидним є, що ці дані являють собою фактичні електробаланси (годинні і добові) даної групи компресорів.

У таблиці 1 наведено зазначені дані про фактичні обсяги електроспоживання групи аміачних компресорів цеху за певну добу, яка має умовний номер 1. На прикладі цієї доби далі буде

продемонстровано процес та результати побудови балансу споживання електричної енергії даної групи компресорів.

Крім фактичних обсягів споживання електроенергії, за даними, одержаними з автоматизованої системи обліку електроспоживання, можна визначити тривалість роботи кожного з аміачних компресорів протягом відповідної доби. Наприклад, для доби № 1 (табл. 1) тривалість роботи компресорів номер 1, 2, 3 і 5 складала 19 годин. Компресор номер 4 протягом цієї доби взагалі не працював.

Таблиця 1 – Фактичні дані про споживання електричної енергії (кВт·год.) в цеху з виробництва аміаку протягом доби з умовним номером 1

Година доби	Компресор 1 (Фідер 3Г)	Компресор 2 (Фідер 28Г)	Компресор 3 (Фідер 4Г)	Компресор 4 (Фідер 3В)	Компресор 5 (Фідер 4В)
0 – 1	5 496,00	5 130,44	5 191,00	0,00	5 515,00
1 – 2	5 481,63	5 121,63	5 180,00	0,00	5 503,00
2 – 3	5 480,00	5 132,00	5 185,00	0,00	5 507,00
3 – 4	5 487,25	5 132,00	5 193,00	0,00	5 508,00
4 – 5	5 494,44	5 153,63	5 208,00	0,00	5 525,00
5 – 6	5 565,63	5 216,06	5 291,00	0,00	5 596,00
6 – 7	5 525,63	5 179,25	5 246,00	0,00	5 547,00
7 – 8	5 536,06	5 200,00	5 254,00	0,00	5 561,00
8 – 9	5 545,63	5 192,00	5 243,00	0,00	5 552,00
9 – 10	5 520,81	5 170,44	5 221,00	0,00	5 536,00
10 – 11	5 500,00	5 143,25	5 202,00	0,00	5 518,00
11 – 12	5 488,81	5 135,25	5 185,00	0,00	5 505,00
12 – 13	5 504,81	5 134,38	5 182,00	0,00	5 528,00
13 – 14	5 488,00	5 116,88	5 173,00	0,00	5 507,00
14 – 15	5 483,25	5 106,44	5 163,00	0,00	5 506,00
15 – 16	5 491,25	5 093,63	5 148,00	0,00	5 510,00
16 – 17	5 479,25	5 078,44	5 134,00	0,00	5 503,00
17 – 18	5 484,00	5 087,19	5 139,00	0,00	5 503,00
18 – 19	5 493,63	5 094,44	5 144,00	0,00	5 520,00
19 – 20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20 – 21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21 – 22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22 – 23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23 – 24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Проведений експеримент полягав у тому, що фактичні щогодинні обсяги споживання електричної енергії протягом тієї чи іншої доби окремо кожним компресором вважалися невідомими. Однак при цьому було прийнято, що за даними обліку для відповідної доби є відомими сумарні обсяги електроспоживання всієї групи аміачних компресорів, що розглядається.

Побудова електробалансів групи компресорів спрощеним розрахунково-аналітичним методом.

Для побудови фактичних балансів споживання електроенергії (годинних чи добових) традиційно використовують спрощений розрахунково-аналітичний метод. Як було зазначено вище, згідно цього методу обсяг споживання електричної енергії окремо кожним компресором ( $W$ ) протягом того чи іншого періоду визначається розрахунковим шляхом за спрощеною формулою (1).

Виходячи з наведених вище умов даного експерименту єдиною невідомою величиною у формулі (1) є коефіцієнт використання встановленої потужності електродвигуна компресора. Точніше, ця величина є нечітко визначеною, оскільки її, здебільшого, приймають на підставі відповідних довідкових матеріалів, де такі коефіцієнти наводяться у вигляді певних інтервалів можливих їх числових значень. Наприклад, згідно [4] середні числові значення коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів подібних компресорів можуть знаходитись в інтервалі 0,6 – 0,8. Не маючи даних про фактичні величини цих коефіцієнтів для реальних компресорів, що розглядаються, логічним є для розрахунку використовувати їх середнє довідкове значення (0,7). Виконавши відповідні розрахунки за формулою (1) для всіх аміачних компресорів, отримаємо розрахунковий баланс споживання електричної енергії групою цих компресорів, зокрема, для доби з умовним номером 1 (табл. 2).

На підставі результатів, наведених в таблиці 2, вже можна зробити певні висновки стосовно можливості та доцільності застосування спрощеного розрахунково-аналітичного методу побудови електробалансів в умовах недостатніх та нечітко заданих вихідних даних.

Відносна похибка визначення сумарного обсягу споживання електричної енергії всією групою аміачних компресорів, що дорівнює 11,1%, є дещо зовеликою, але може вважатися прийнятною. Тим більше, що похибка розрахунку аналогічних показників, визначених в ході цього експерименту з використанням спрощеного розрахунково-аналітичного методу для низки інших діб, також не перевищувала 10%.

Таблиця 2 – Результат порівняння розрахункового електробалансу групи аміачних компресорів з їх фактичним балансом споживання електроенергії, одержаним за даними обліку електроспоживання для доби з умовним номером 1

Компресор	№1 (Фідер 3Г)	№ 2 (Фідер 28Г)	№ 3 (Фідер 4Г)	№ 4 (Фідер 3В)	№ 5 (Фідер 4В)	Група компресорів разом
$W_{\text{факт.}}$	104546,06	97617,31	98682,00	0	104950,00	405795,38
$W_{\text{розр.}}$	90174	90174	90174	0	90174	360696
Відносна похибка $\delta$	-0,1374711	-0,0762499	-0,0862163	0	-0,1407909	-0,1111382

Таким чином за результатами даного експерименту виявилось, що в зазначених вище умовах застосування спрощеного аналітичного методу для розрахунку сумарного обсягу електроспоживання групи аміачних компресорів (тобто, числового значення прибуткової частини відповідних добових електробалансів) є можливим.

Однак, що стосується числових величин статей витратної частини таких електробалансів (тобто, обсягів електроспоживання окремих компресорів), то використання для їх визначення спрощеного розрахунково-аналітичного методу вважати доцільним неможна, оскільки відносні похибки розрахунку цих величин для різних діб в ході виконання експериментальних розрахунків коливалися в широких межах: від 1,5 до 52 і, навіть, до 89%.

Крім того, слід звернути увагу на той факт, що, використовуючи зазначений спрощений метод, практично неможливо будувати годинні електробаланси. Це легко помітити, зокрема, на прикладі групи аміачних компресорів, що розглядається: числові значення статей витратної частини таких балансів, визначені спрощеним розрахунково-аналітичним шляхом, залишатимуться однаковими для будь-якої години доби, у той час, як фактичні величини коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів кожного з компресорів щогодини можуть змінюватись в досить широких межах (пропорційно рівню завантаження компресорів за продуктивністю).

Більш того, розрахункові обсяги годинного споживання електроенергії окремими компресорами, визначені з застосуванням такого спрощеного методу, часто взагалі не являтимуть собою числові значення статей відповідних годинних балансів електроспоживання, оскільки сума цих розрахункових значень буде суттєво відрізнятися від фактичного загального обсягу споживання електричної енергії всією групою компресорів, визначеного за даними обліку.

Таким чином одержані результати підтверджують, що, навіть у достатньо сприятливих умовах, в яких проводився даний експеримент, застосування спрощеного розрахунково-аналітичного методу для побудови балансів споживання електроенергії далеко не завжди є доцільним, а досить часто є взагалі неможливим, оскільки оцінки обсягів споживання електроенергії за окремими статтями електробалансів, одержані з використанням цього методу, здебільшого виявляються спотвореними і значною мірою не відповідають реальним витратам електричної енергії окремими установками чи агрегатами.

#### Побудова електробалансів групи компресорів ймовірно-статистичним способом.

Ідея використання для побудови балансів споживання електричної енергії виробничо-господарських об'єктів ймовірно-статистичних методів ґрунтується на тому, що традиційний розрахунково-аналітичний метод не враховує випадкового характеру як невідомих обсягів електроспоживання, так і необхідних для побудови балансів вихідних даних, частина яких часто є просто відсутньою, а частина являє собою нечітко визначені показники. Цілком очевидним є, що для одержання достатньо обґрунтованих та достовірних електробалансів виробничо-господарських об'єктів в зазначених умовах доцільно застосовувати саме методи теорії ймовірності та математичної статистики [7, 8].

Обсяги споживання електричної енергії кожним з аміачних компресорів, необхідні для складання електробалансів їх групи, є величинами, на які впливають численні чинники, зокрема, кількість виробленої

продукції, технічний стан та режими роботи обладнання, параметри технологічного процесу тощо. Однак в умовах нашого експерименту числові значення таких чинників є невідомими. Тому зазначені обсяги електроспоживання окремих компресорів необхідно розглядати як випадкові величини, які теоретично можуть приймати будь-які значення.

Проте, застосовуючи ймовірно-статистичний підхід до побудови електробалансів, можна визначити деякі максимальні й мінімальні значення цих випадкових величин, в межах яких з певною ймовірністю будуть знаходитись дійсні, реальні обсяги споживання електричної енергії кожним з аміачних компресорів, що розглядаються [5, 8]. Наприклад, такі мінімальні і максимальні значення електроспоживання для будь-якого ( $i$ -го) компресора можна визначити, маючи статистичні дані про фактичні обсяги споживання електроенергії кожним з компресорів за попередні періоди і знаючи закон розподілу відповідних випадкових величин:

$$W_{\max i} = M_{W_i} + t_{1-\alpha} \sigma_{W_i}; \quad W_{\min i} = M_{W_i} - t_{1-\alpha} \sigma_{W_i}, \quad (2)$$

де  $M_{W_i}$  – математичне сподівання обсягу споживання електроенергії  $i$ -го компресора, що визначається за наявною вибіркою фактичних обсягів його електроспоживання;  $\sigma_{W_i}$  – середньоквадратичне відхилення фактичних величин електроспоживання від їх середнього значення (визначається за тією ж вибіркою фактичних обсягів електроспоживання);  $t_{1-\alpha}$  – квантиль порядку  $1-\alpha$  для стандартизованого Гаусового розподілу (якщо дана випадкова величина має нормальний закон розподілу).

При цьому можна стверджувати, що з певною ймовірністю  $\alpha$  фактичний обсяг електроспоживання  $i$ -го компресора за будь-який попередній період (наприклад, добу) знаходиться в інтервалі:

$$W_{\min i} < W_i < W_{\max i}. \quad (3)$$

Але, щоб скористатися формулами (2) для визначення можливої мінімальної і максимальної величини обсягу споживання електроенергії будь-яким ( $i$ -м) компресором, треба мати статистичні (звітні) дані про фактичні обсяги його електроспоживання за попередні періоди а також знати закон розподілу відповідної випадкової величини.

За умовами даного експерименту таких даних ми не маємо. У такій ситуації для знаходження величин  $W_{\max i}$  та  $W_{\min i}$  можна спробувати скористатися досвідом та знаннями спеціалістів-експертів підприємства (операторів, енергетиків, менеджерів) і відповідними методами експертного опитування [9]. Проте навряд чи фахівці підприємства мають уявлення про інтервали можливих значень обсягів електроспоживання конкретних компресорів, якщо облік цих величин на підприємстві не здійснюється (а саме це передбачено умовами даного експерименту).

З іншого боку, як було показано вище, невідомі обсяги споживання електричної енергії кожним з аміачних компресорів (зокрема,  $W_{\max i}$  та  $W_{\min i}$ ) можна визначити розрахунковим шляхом, скориставшись спрощеною формулою (1), у якій за умовами експерименту єдиним нечітко визначеними показниками є коефіцієнти використання встановленої потужності електродвигунів компресорів ( $k_{\text{вик.}i}$ ). При цьому фахівці підприємства можуть мати значно краще уявлення про діапазони можливих числових значень цих коефіцієнтів, ніж про невідомі обсяги електроспоживання компресорів.

Отже діапазони можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності для кожного з компресорів, що розглядаються, можна визначити, використовуючи методи експертного опитування, зі значно більшою достовірністю, ніж безпосередньо інтервали можливих обсягів їх електроспоживання. У крайньому випадку для встановлення діапазонів можливих значень цих коефіцієнтів, як і при застосуванні спрощеного розрахунково-аналітичного методу, можна скористатися відповідними довідковими даними [4] або, навіть, прийняти, що ці коефіцієнти знаходяться в інтервалі від 0 до 1. Це суттєво не вплине на точність побудови електробалансів, а тільки може дещо збільшити розмірність і тривалість вирішення відповідної задачі.

Зокрема, в даному експерименті за результатами опитування спеціалістів-експертів аміачного цеху було визначено, що фактичні значення коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів кожного з компресорів з найбільшою ймовірністю знаходяться в межах 0,65 – 0,85.

Застосування ймовірно-статистичного підходу до побудови балансів споживання електричної енергії базується на тому, що в межах встановлених довірчих інтервалів (3), для визначення достовірних обсягів споживання електроенергії кожним з аміачних компресорів, що розглядаються, необхідно згенерувати серію можливих варіантів (альтернатив) величини їх електроспоживання.

Однак, враховуючи сказане вище, генерувати слід альтернативи можливих числових значень коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів кожного з компресорів ( $k_{\text{вик},i}$ ), а відповідні їм альтернативи можливих обсягів споживання електричної енергії цими компресорами ( $W_i$ ) потрібно визначати розрахунковим шляхом, використовуючи спрощену залежність (1). Тобто, цей процес полягає у послідовному формуванні двох відповідних матриць, число рядків яких дорівнює кількості згенерованих альтернатив, а число стовпців – кількості статей витратної частини електробалансу (тобто, кількості споживачів електроенергії, які мають бути враховані у цьому балансі).

Фрагмент прикладу одного з результатів генерування можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності п'яти аміачних компресорів, що розглядаються в цьому експерименті, наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Частина згенерованих можливих значень (альтернатив) коефіцієнтів використання встановленої потужності для п'яти аміачних компресорів

Умовні номери альтернатив значень $k_{\text{вик},i}$	Компресор 1 (Фідер 3Г)	Компресор 2 (Фідер 28Г)	Компресор 3 (Фідер 4Г)	Компресор 4 (Фідер 3В)	Компресор 5 (Фідер 4В)
1	0,79	0,66	0,82	0,84	0,74
2	0,84	0,78	0,78	0,76	0,79
3	0,68	0,84	0,78	0,73	0,75
4	0,72	0,81	0,76	0,68	0,70
5	0,68	0,67	0,73	0,78	0,78
.....	.....	.....	.....	.....	.....

Кожен з стовпців таблиці 3 являє собою деяку вибірку можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів аміачних компресорів, що розглядаються. При цьому, якщо є відомими статистичні характеристики цих вибірок (математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення числових значень елементів вибірки від їх середньої величини), а також закон розподілу відповідної випадкової величини, то можна визначити ймовірність появи кожної з альтернатив значень коефіцієнтів використання встановленої потужності компресорів.

Найпростіше визначити такі ймовірності, якщо закон розподілу цієї випадкової величини для кожного з компресорів є нормальним. Забезпечити виконання цієї умови можна вже в процесі генерування можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів компресорів. Для цього, по-перше, необхідно генерувати достатньо великі вибірки значень цих коефіцієнтів. Зокрема, в ході даного експерименту при побудові кожного з електробалансів групи аміачних компресорів, що розглядаються, для кожного з них генерувалися вибірки можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності, що містили по 10 000 елементів. По-друге, кожна числова величина коефіцієнтів використання встановленої потужності, що була включена до цих вибірок, вибиралася випадковим способом з наведеного вище діапазону їх можливих значень (0,65 – 0,85).

Далі загальний діапазон можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів, визначений для кожного з компресорів, необхідно поділити на певну кількість інтервалів. При цьому ймовірність  $p$  появи будь-якого ( $i$ -го) числового значення коефіцієнту використання встановленої потужності ( $k_{\text{вик},i}$ ), яке знаходиться у тому чи іншому з цих інтервалів, визначається за формулою:

$$p(k_{\text{вик},i}) = 0,5(F(t)_{\text{верхн.}} - F(t)_{\text{нижн.}}), \quad (4)$$

де  $F(t)_{\text{верхн.}}$  і  $F(t)_{\text{нижн.}}$  – числові значення інтеграла Лапласа [7, 8] для верхньої та нижньої межі інтервалу, у якому знаходиться відповідне альтернативне значення коефіцієнту використання встановленої потужності компресора.

Для кожного з п'яти аміачних компресорів, що розглядалися в ході цього експерименту, загальний діапазон можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності їх електродвигунів було прийнято однаковим. Цей діапазон для кожного з компресорів було поділено на чотири інтервали (0,65 –

0,7; 0,7 – 0,75; 0,75 – 0,8 і 0,8 – 0,85). Після чого з використанням формули (4) була визначена ймовірність знаходження можливих значень (альтернатив) коефіцієнтів використання встановленої потужності у кожному з зазначених інтервалів. При цьому, не дивлячись на те, що межі інтервалів можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності для всіх компресорів були прийняті однаковими, ймовірність знаходження цих коефіцієнтів у відповідних інтервалах для різних компресорів є різною, оскільки різними є статистичні характеристики згенерованих вибірок коефіцієнтів використання (стовпці табл. 3). Наприклад, величини зазначеної ймовірності для компресорів № 1 та № 3 наведено в таблицях 4 і 5 відповідно.

Таблиця 4 – Ймовірності знаходження у визначених інтервалах можливих значень коефіцієнту використання встановленої потужності для компресора № 1

$k_{\text{вик.}}$	Нормоване значення (t) $k_{\text{вик.}}$	$F(t)$	Ймовірність знаходження в інтервалі
0,65	1,65	-0,90106	0,1624
0,70	0,80	-0,57629	
0,70	0,80	-0,57629	0,3121
0,75	0,06	0,04784	
0,75	0,06	0,04784	0,2973
0,80	0,92	0,64243	
0,80	0,92	0,64243	0,1412
0,85	1,78	0,92492	

Таблиця 5 – Ймовірності знаходження у визначених інтервалах можливих значень коефіцієнту використання встановленої потужності для компресора № 3

$k_{\text{вик.}}$	Нормоване значення (t) $k_{\text{вик.}}$	$F(t)$	Ймовірність знаходження в інтервалі
0,65	1,75	-0,91988	0,1361
0,70	0,93	-0,64763	
0,70	0,93	-0,64763	0,2840
0,75	0,10	-0,07966	
0,75	0,10	-0,07966	0,3041
0,80	0,72	0,52848	
0,80	0,72	0,52848	0,1740
0,85	1,54	0,87644	

Як зазначалося раніше, можливі числові значення (альтернативи) обсягів споживання електричної енергії, які відповідають згенерованим можливим величинам коефіцієнтів використання встановленої потужності електродвигунів компресорів (зокрема, наведеним у табл. 3), було визначено розрахунковим шляхом з використанням спрощеної формули (1). Фрагмент прикладу одного з результатів розрахунку можливих значень (альтернатив) обсягів електроспоживання для п'яти аміачних компресорів, що розглядаються в цьому експерименті, наведено в таблиці 6.

Так як у формулі (1) за умовами даного експерименту присутня лише одна випадкова (нечітко задана) величина - коефіцієнти використання встановленої потужності електродвигунів компресорів, для подальших розрахунків можна прийняти, що числові величини ймовірності появи визначених розрахунковим шляхом можливих значень (альтернатив) обсягів електроспоживання для п'яти аміачних компресорів (табл. 6) є такими ж, як і ймовірності появи відповідних їм можливих значень коефіцієнтів використання встановленої потужності (табл. 4 і 5).

Беручи до уваги, що загальне споживання електричної енергії всією групою компресорів, що розглядається, це сума обсягів її споживання окремо кожним компресором, та комбінуючи випадковим чином різні альтернативи обсягів їх електроспоживання (табл. 6), можна отримати множину рівнянь,



кожне з яких являє собою один з можливих варіантів балансу споживання електроенергії цією групою компресорів:

$$\begin{aligned} W_{11} + W_{21} + \dots + W_{n1} &= W_{1\Sigma}^p, \\ W_{12} + W_{22} + \dots + W_{n2} &= W_{2\Sigma}^p, \\ W_{13} + W_{23} + \dots + W_{n3} &= W_{3\Sigma}^p, \\ &\dots \\ W_{1m} + W_{2m} + \dots + W_{nm} &= W_{m\Sigma}^p, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $W_{ij}$  – можливий обсяг споживання електроенергії  $j$ -м компресором, який являє собою певну ( $i$ -ту) альтернативу величини його електроспоживання;  $W_{j\Sigma}^p$  – розрахунковий обсяг споживання електроенергії всією групою компресорів ( $j$ -й можливий варіант загального обсягу електроспоживання даної групи компресорів).

Таблиця 6 – Частина розрахованих можливих значень (альтернатив) обсягів електроспоживання для п'яти аміачних компресорів

Умовні номери альтернатив значень $W_i$	Компресор 1 (Фідер 3Г)	Компресор 2 (Фідер 28Г)	Компресор 3 (Фідер 4Г)	Компресор 4 (Фідер 3В)	Компресор 5 (Фідер 4В)
1	101767,8	85021,2	105632,4	0	95326,8
2	108208,8	100479,6	100479,6	0	101767,8
3	87597,6	108208,8	100479,6	0	96615
4	92750,4	104344,2	97903,2	0	90174
5	87597,6	86309,4	94038,6	0	100479,6
.....	.....	.....	.....	.....	.....

Якщо загальна кількість комбінацій альтернатив обсягів споживання електроенергії окремими компресорами є достатньо великою, то можна стверджувати, що серед всієї множини рівнянь (5) обов'язково присутнє таке рівняння, яке точно відображає фактичний електробаланс цієї групи компресорів, який дійсно мав місце протягом відповідного періоду (наприклад, доби).

Однак певна кількість отриманих таким чином варіантів загального електроспоживання групи компресорів (5) є абсолютно недостовірними (неможливими), оскільки для них виконується нерівність:

$$\frac{|W_{j\Sigma}^p - W_{j\Sigma}^f|}{W_{j\Sigma}^f} \cdot 100 \geq \Delta, \quad (6)$$

де  $W_{j\Sigma}^f$  – фактичний загальний обсяг споживання електроенергії групою компресорів протягом відповідного періоду, визначений за приладами обліку електроспоживання;  $\Delta$  – заздалегідь встановлене припустиме відхилення розрахункового значення загального обсягу споживання електричної енергії ( $j$ -го можливого варіанту загального обсягу електроспоживання) цією групою компресорів від його фактичної величини.

Такі, недостовірні варіанти балансу споживання електроенергії даною групою компресорів слід виключити з подальшого розгляду.

Приклад комбінування можливих обсягів (альтернатив) споживання електричної енергії для групи аміачних компресорів, що розглядаються в цьому експерименті, наведено в таблиці 7.

Фактичний загальний обсяг споживання електричної енергії всією групою аміачних компресорів, що розглядається, протягом доби з умовним номером 1, визначений за даними системи обліку електроспоживання, склав 405795,38 кВт·год. Таким чином, якщо припустиме відхилення розрахункового значення загального обсягу споживання електричної енергії ( $j$ -го можливого варіанту загального обсягу електроспоживання) цією групою компресорів від його фактичної величини не повинно перевищувати, наприклад, 5%, то варіанти балансу споживання електроенергії даною групою компресорів з умовними номерами 4 і 5 (табл. 7), які мають величину зазначеного відхилення відповідно 5,1% і 9,2%, слід вважати недостовірними і виключити з подальшого розгляду.

Для тих можливих розрахункових значень загального споживання електроенергії всією групою аміачних компресорів, які несуттєво відрізняються від фактичної величини їх електроспоживання (нерівність (6) не виконується), необхідно визначити ймовірність появи відповідної комбінації альтернатив обсягів споживання електричної енергії кожним з компресорів (тобто, ймовірність появи відповідного варіанту балансу споживання електроенергії цією групою компресорів).

Таблиця 7 – Окремі можливі комбінації випадкових значень (альтернатив) коефіцієнтів використання встановленої потужності та відповідних їм розрахункових обсягів електроспоживання для п'яти аміачних компресорів

Умовні номери альтернатив значень $W_i$	Компресор 1 (Фідер 3Г)		Компресор 2 (Фідер 28Г)		Компресор 3 (Фідер 4Г)		Компресор 4 (Фідер 3В)		Компресор 5 (Фідер 4В)		Група компресорів разом
	$k_{\text{вик}}$	$W$	$k_{\text{вик}}$	$W$	$k_{\text{вик}}$	$W$	$k_{\text{вик}}$	$W$	$k_{\text{вик}}$	$W$	$W_{\Sigma}$
1	0,79	101768	0,66	85021	0,82	105632	0,84	0	0,74	95327	387748
2	0,84	108209	0,78	100480	0,78	100480	0,76	0	0,79	101768	410936
3	0,68	87598	0,84	108209	0,78	100480	0,73	0	0,75	96615	392901
4	0,72	92750	0,81	104344	0,76	97903	0,68	0	0,7	90174	385172
5	0,68	87598	0,67	86309	0,73	94039	0,78	0	0,78	100480	368425
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	...	.....	.....	.....	.....

Оскільки комбінування можливих альтернатив обсягу споживання електричної енергії окремими компресорами при формуванні варіантів електробалансу їх групи здійснювалось випадковим чином, поява кожної альтернативи електроспоживання компресорів є незалежними подіями. Отже суміщена ймовірність виникнення того чи іншого результату такого комбінування (тобто, того чи іншого варіанта електробалансу даної групи компресорів) визначається як добуток ймовірностей ( $p_i$ ) появи кожної з альтернатив електроспоживання окремих компресорів, які утворюють відповідний варіант електробалансу [7, 8]:

$$p_c = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n. \quad (7)$$

Таким чином, всі достовірні варіанти балансу споживання електричної енергії групою аміачних компресорів, що розглядаються, можуть бути ранжировані у порядку зменшення величини суміщеної ймовірності виникнення кожного з цих варіантів. При цьому можна стверджувати, що варіант, який має найбільшу суміщену ймовірність його появи, відображає найбільш ймовірну структуру витратної частини фактичного електробалансу цієї групи компресорів за відповідний період (наприклад, добу), тобто характеризує найбільш ймовірний розподіл загального обсягу споживання електроенергії всією групою компресорів, відомого за даними обліку електроспоживання, між окремими компресорами [8].

Наприклад, в таблиці 8 наведено обсяги споживання електроенергії за трьома найбільш ймовірними варіантами електробалансу групи аміачних компресорів, що розглядалися в цьому експерименті.

Таблиця 8 – Обсяги споживання електроенергії аміачними компресорами за трьома найбільш ймовірними електробалансами, побудованими з застосуванням ймовірнісно-статистичного підходу для доби з умовним номером 1

Компресор 1 (Фідер 3Г)		Компресор 2 (Фідер 28Г)		Компресор 3 (Фідер 4Г)		Компресор 4 (Фідер 3В)		Компресор 5 (Фідер 4В)		Група компресорів разом	
$W_i$	$p_i$	$W_i$	$p_i$	$W_i$	$p_i$	$W_i$	$p_i$	$W_i$	$p_i$	$W_{\Sigma}$	Суміщена ймовірність
99191,4	0,297	91462,2	0,344	101767,8	0,304	0	...	94038,6	0,338	386460	0,0032

Продовження табл. 8

95326,8	0,312	99191,4	0,31	96615	0,284	0	...	99191,4	0,307	390324,6	0,002566
103056	0,297	94038,6	0,344	94038,6	0,284	0	...	101767,8	0,307	392901	0,002548

Таблиця 9 містить результати порівняння обсягів споживання електричної енергії цієї групи компресорів, що являють собою статті найбільш ймовірного електробалансу, з їх фактичними значеннями, одержаними за даними обліку електроспоживання.

Таблиця 9 – Результат порівняння найбільш ймовірного електробалансу групи аміачних компресорів з їх фактичним балансом споживання електроенергії, одержаним за даними обліку електроспоживання для доби з умовним номером 1

Компресор	№1 (Фідер 3Г)	№ 2 (Фідер 28Г)	№ 3 (Фідер 4Г)	№ 4 (Фідер 3В)	№ 5 (Фідер 4В)	Група компресорів разом
$W_{\text{факт.}}$	104546,06	97617,31	98682,00	0	104950,00	405795,38
$W_{\text{найбільшймовірне}}$	99191,4	91462,2	101767,8	0	94038,6	386460
Відносна похибка $\delta$	-0,0512182	-0,0630535	0,0312701	0	-0,1039676	-0,0476481

Таким чином наведені в таблицях 8 та 9 результати даного експерименту, які підтверджуються також результатами подібних розрахунків, виконаних для цієї ж групи компресорів для інших періодів часу, дозволяють зробити остаточні висновки щодо застосування двох різних підходів до побудови балансів споживання електричної енергії на виробничо-господарських об'єктах.

## Висновки

1. В умовах недостатніх та нечітко заданих вихідних даних застосування спрощеного розрахунково-аналітичного методу для побудови балансів споживання електроенергії далеко не завжди є доцільним, а досить часто є взагалі неможливим, оскільки оцінки обсягів споживання електроенергії за окремими статтями електробалансів, одержані з використанням цього методу, здебільшого виявляються спотвореними і значною мірою не відповідають реальним витратам електричної енергії окремими установками чи агрегатами.

2. Одним з найбільш доцільних напрямів удосконалення методології побудови балансів споживання електроенергії на виробничо-господарських об'єктах в зазначених умовах слід вважати застосування для вирішення цієї задачі ймовірно-статистичних методів.

3. Як свідчать, зокрема, наведені в цій статті результати проведеного експерименту, створена авторами методологія складення електробалансів на основі ймовірно-статистичного підходу, у порівнянні з традиційним спрощеним розрахунково-аналітичним методом, дає змогу одержувати значно більш обґрунтовані та достовірні баланси споживання електричної енергії у виробництві.

## Список використаної літератури

- Находов В.Ф., Бориченко О.В., Кочетова К.К. Аналіз діючих в Україні методик нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів. *Промелектро*. 2007. № 2. С. 42-48.
- Архипов Л.И., Гаряев А.Б., Горбенко В.А. и др. Методы составления энергобалансов промышленных предприятий: учебное пособие по курсу «Энергобалансы промышленных предприятий» для студ., обучающ. по направлению «Теплотехника». М.: Издательство МЭИ, 2000. 48 с.
- ДСТУ 4714:2007 Енергозбереження. Паливно-енергетичні баланси промислових підприємств. Методика побудови та аналізу. Київ, ДП «УкпНДНЦ», 2007, 25 с.
- Справочник по электроснабжению и электрическому оборудованию: В 2 т. Т.2. Электрооборудование / [Р.Б. Авринский, С.И. Вершинина, С.И. Гамазин и др.]; под общ. ред. А.А. Фёдорова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 592 с.

5. Находов В. Ф., Бориченко О.В. Ймовірно-статистичний підхід до побудови енергобалансів виробничо – господарських об'єктів. *Промелектро*. 2007. № 6. С. 45-54.
6. Находов В.Ф., Бориченко О.В. Побудова оптимальних розрахункових моделей електробалансів виробничо-господарських об'єктів. *Промелектро*. 2010. № 6. С. 47–51.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк, 2003. 479 с.
8. Paolo L. Gatti. Probability Theory and Mathematical Statistics for Engineers. London: Spon Press, 2005. 368 p.
9. Вартазаров И.С., Горлов И.Г., Минаев Е.В., Хвастунов Р.М. Экспертные оценки и их применение в энергетике. М.: Энергоиздат, 1981. 188 с.

**V. Nakhodov**, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0001-7643-5965  
**O. Borychenko**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-6127-2945  
**V. Oliinyk**, Msc.  
**National Technical University of Ukraine**  
**«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

## **APPLICATION PROBABILISTIC-STATISTICAL APPROACH FOR CONSTRUCTION OF ELECTRICAL BALANCES OF AMMONIA DEPARTMENT**

*The article considers the improvement of the methodology for constructing the balance of electricity consumption based on the use of methods to obtain more objective and verifiable background information, including methods of collecting and compiling the necessary statistics. That is to improve the results of constructing energy balance of production facilities necessary to apply probabilistic and statistical methods. Construction of electric balances of production facilities using a probabilistic-statistical approach can be based on the construction of multifactor mathematical models of electricity consumption by the enterprise as a whole and its units, on establishing confidence intervals for these models, on determining options for possible electricity use by individual units or on production certain types of products, as well as to identify the most likely distribution of energy at the facility. Using the probabilistic-statistical approach, which is proposed to be used in the conditions of uncertainty of the initial data, it is possible to build more reliable balances of electricity consumption of industrial facilities than with the help of calculation and analytical method. However, the possibility of applying probabilistic and statistical methods for constructing of electric balances may be considerably complicated for enterprises with a wide range of products and complex, extensive circuit manufacturing process when manufacturing certain products involves many departments.*

**Keywords:** balance of electricity consumption, probabilistic and statistical method, confidence intervals, calculation and analytical method, compressor, ammonia department.

### **REFERENCES**

1. Nakhodov V. F., Borychenko O. V., Kochetova K.K. Analysis of current methods of standardization of specific costs of fuel and energy resources in Ukraine. *Promelektro*. 2007. No 2. Pp. 42-48. (Ukr)
2. Arkhypov L. Y., Garyayev A. B., Gorbenko V. A. and others. Methods of construction energy balances of industrial enterprises: a textbook for the course "Energy balances of industrial enterprises" for students which training in the direction of "Heat engineering". Moscow: Publisher MEI, 2000. 48 p. (Rus)
3. State Standard of Ukraine 4714:2007 Energy saving. Energy balance of industrial enterprises. The method of construction and analysis. Kyiv, DP "UkrNDNTs", 2007, 25 p. (Ukr)
4. Handbook on power supply and electrical equipment: 2 vol. Vol. 2. Electrical equipment / [R. B. Avrinskiy, S. Y. Verzhinina, S. Y. Gamazin and others]; under total. ed. A.A. Fedorova. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 592 p. (Rus)
5. Nakhodov V. F., Borychenko O. V. Probabilistic and statistical approach to construction energy balance of industrial and commercial facilities. *Promelektro*. 2007. No 6. Pp. 45-54. (Ukr)
6. Nakhodov V. F., Borychenko O. V. Construction of optimal calculation models of electric balances of production and economic objects. *Promelektro*. 2010. No 6. Pp. 47-51. (Ukr)
7. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola, 2003. 479 p. (Rus)
8. Paolo L. Gatti. Probability Theory and Mathematical Statistics for Engineers. London: Spon Press, 2005. 368 p.
9. Vartazarov I.S., Gorlov I.G., Minayev E.V., Khvastunov R.M. Expert assessments and their application in the energy sector. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 188 p. (Rus)

Надійшла 15.11.2020  
Received 15.11.2020