

*Запропоновано методику знаходження ділянок схеми електропостачання, які створюють найбільшу невизначеність при побудові електричних балансів, яка базується на застосуванні методів експертного опитування та імітаційного моделювання. Визначення таких ділянок дозволяє здійснювати верифікацію електричних балансів, отриманих розрахунково-аналітичним або ймовірно-статистичним шляхом та визначати місця з найбільшим потенціалом економії енергії*

*Ключові слова: електричний баланс, електроспоживання, експертне опитування, імітаційне моделювання, енергетична ефективність, верифікація*

*Предложена методика нахождения участков схемы электроснабжения, создающих наибольшую неопределенность при построении электрических балансов, основанная на применении методов экспертного опроса и имитационного моделирования. Определение таких участков позволяет осуществлять верификацию электрических балансов, полученных расчетно-аналитическим или вероятностно-статистическим путем, а также определять места с наибольшим потенциалом экономии энергии*

*Ключевые слова: электрический баланс, электропотребление, экспертный опрос, имитационное моделирование, энергетическая эффективность, верификация*

УДК 621.311.003.13

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.39770

## ВИЯВЛЕННЯ «ПРОБЛЕМНИХ» ДІЛЯНОК СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ВЕРИФІКАЦІЇ РОЗРАХУНКОВИХ ЕЛЕКТРОБАЛАНСІВ

**В. Ф. Находов**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: nakhodov@ukr.net

**О. В. Бориченко**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: borichenko@mail.ru

**Д. О. Іванько**

Аспірант\*

E-mail: dimo-vin@ua.ru

**І. В. Якобюк**

E-mail: yakobiuk.iryana@gmail.com

Кафедра електропостачання\*

\*Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

вул. Борщагівська, 115, м. Київ, Україна, 03056

### 1. Вступ

Сучасною тенденцією функціонування світового виробництва є постійне зростання темпів випуску продукції, що в свою чергу стимулює підвищення попиту на енергоносії на національних, регіональних та світових рівнях. В результаті цього багатьом країнам доводиться постійно стикатися з цілою низкою проблем в енергетичному секторі, зокрема: підвищенням цін на енергоресурси, дефіцитом генеруючих потужностей, зростанням залежності від країн експортерів енергоресурсів та погіршенням екологічної ситуації [1].

В індустріально розвинутих країнах світу основним споживачем енергоносіїв є промисловий сектор. Саме тому перспективним шляхом подолання кризових явищ в енергетиці є широке впровадження на промислових підприємствах енергозберігаючих заходів та технологій.

Раціональне використання енергетичних ресурсів вигідне і для самих підприємств. Кошти, які сплачуються за споживання енергоресурсів, як пра-

вило, складають значну частку в собівартості виробленої продукції. Ефективне використання енергоресурсів дозволяє підприємствам випускати більш конкурентну продукцію. Саме тому останнім часом все частіше створюються різноманітні міжнародні та регіональні стандарти, проекти та фонди, які мають на меті стимулювання ефективного використання енергетичних ресурсів в промисловому секторі.

Для того, щоб цілеспрямовано визначати та впроваджувати найбільш доцільні заходи з енергозбереження, перш за все необхідно періодично виявляти, де та на які потреби споживається електрична енергія на підприємстві [2]. А для досягнення бажаних результатів у сфері енергозбереження необхідно здійснювати подальший систематичний контроль ефективності використання енергії та управління енергоспоживанням [3].

Електрична енергія є одним з основних енергоресурсів, що споживається в промисловому секторі. Зважаючи на зазначене, ця стаття присвячена саме питанням удосконалення методів аналізу електроспоживання [4].

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Основним інструментом, який застосовується для аналізу електроспоживання та контролю ефективності використання електричної енергії на промислових підприємствах, є побудова та аналіз електробалансів [5, 6].

Під електричними балансами розуміють систему взаємозв'язаних показників, які відображають кількісну відповідність між надходженням і використанням електричної енергії на тому чи іншому виробничому об'єкті. Такими об'єктами, зокрема є окремі установки, технологічні процеси, цехи, виробничі підрозділи та підприємства в цілому.

Складання і аналіз електробалансів дозволяє:

- виявляти нераціональні витрати та втрати електроенергії і планувати заходи щодо їх усунення;
- визначати напрями реконструкції морально і фізично застарілого обладнання;
- обґрунтувати величину і режими електроспоживання;
- виявляти об'єкти з найбільшим потенціалом економії електричної енергії;
- вибирати раціональні схеми електропостачання;
- встановлювати технічно обґрунтовані показники ефективності енерговикористання, зокрема, норми питомої витрати електроенергії тощо.

Єдиної методики побудови та аналізу фактичних електричних балансів, а також оцінки і нормалізації корисних витрат та втрат енергії на сьогодні практично не існує. Тому на практиці баланси, як правило будують найбільш доступними і простими методами, без подальшої верифікації отриманих результатів.

Проблемою розробки та удосконалення методів побудови електричних балансів займалося багато відомих дослідників, як в Україні так за кордоном [3].

Загальновідомими методами побудови енергобалансів є експериментальні, розрахункові та змішані підходи. Детальний аналіз переваг та недоліків кожного з цих підходів наведено в роботі [5].

В Україні для побудови електричних балансів на більшості підприємств, зокрема, і під час проведення енергетичних аудитів використовують розрахунково-аналітичний метод [7, 8].

Використання цього методу дозволяє отримувати енергетичні баланси шляхом спрощених розрахунків, які не потребують значних витрат ресурсів і часу. Значення споживання електроенергії кожним видом обладнання визначається за спрощеною формулою:

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

де  $P_{вст.i}$  – встановлена потужність і-го виду обладнання;  $P_{вст.i}$  – середній коефіцієнт завантаження обладнання;  $T_i$  – тривалість роботи цього обладнання протягом відповідного періоду.

Для того щоб отримати об'єктивний електричний баланс в такий спосіб, необхідно знати точні значення  $k_{з.i}$  та  $T_i$ . Проте на більшості підприємств облік цих показників не ведеться [4].

Тому в зазначених умовах побудова балансів здійснюється з використанням довідкової літератури та суб'єктивних оцінок фахівцями відповідних невідомих, що дозволяє одержувати їх значення у вигляді доволі широких інтервалів.

Практичних рекомендацій, які саме значення невідомих величин необхідно приймати з наявних їх інтервалів, не існує. Отже в залежності від вибраних числових значень зазначених показників на одному й тому ж об'єкті можна отримати абсолютно різні електробаланси.

Таким чином, електричні баланси, побудовані з застосуванням спрощеного розрахунково-аналітичного методу, здебільшого не можна вважати достатньо обґрунтованими. Так само, як не слід вважати достатньо об'єктивними результати аналізу енергоспоживання, одержані на підставі таких балансів.

Іншим, більш досконалим, є імовірісно-статистичний підхід до побудови балансів споживання електричної енергії [9]. Більш точні та обґрунтовані електричні баланси при застосуванні цього підходу можна отримувати завдяки використанню експертних методів та подальшого вирішення задачі оптимального програмування, цільова функція якої має вигляд:

$$z = \left( W_{пр} - \left( \sum_{i=1}^n W_i + \Delta W_{тр} + \Delta W_{л} \right) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $W_{пр}$  – одержаний за даними обліку загальний обсяг споживання електричної енергії на підприємстві в цілому або у його підрозділі;  $n$  – кількість видів обладнання, що споживає електричну енергію;  $W_i$  – споживання електроенергії і-м видом обладнання;  $W_{тр}$  та  $W_{л}$  – втрати електроенергії відповідно в трансформаторах та лініях.

При вирішенні зазначеної оптимізаційної задачі на числові значення всіх змінних  $W_i$ , накладають обмеження:

$$W_{i\min} \leq W_i \leq W_{i\max}, \quad W_i > 0, \quad (3)$$

де  $W_{i\min}$ ,  $W_{i\max}$  – відповідно мінімальні та максимальні обсяги споживання електричної енергії і-м видом обладнання визначені статистичним або експертним шляхом.

Застосування такого підходу дає можливість отримувати більш точні та обґрунтовані електричні баланси виробничих об'єктів. Проте вирішення оптимізаційної задачі з цільовою функцією (2) за різних вихідних умов також може давати декілька можливих варіантів розподілу обсягів електроспоживання між видами обладнання, що розглядаються. При цьому, чим більшою є невизначеність наявних вихідних даних, тим більше отримані результати можуть відрізнятися від дійсного балансу споживання електроенергії на об'єкті.

Таким чином, існує необхідність у подальшому удосконаленні існуючих методів побудови електричних балансів, в тому числі і на базі використання імовірісно-статистичний підходу [10].

Одним з необхідних кроків в напрямку удосконалення методики побудови електробалансів є розробка рекомендацій щодо перевірки їх адекватності, тобто верифікації отриманих результатів. Для цього традиційно рекомендується порівнювати значення статей електробалансу, отриманих різними шляхами, наприклад експериментальним і розрахунковим [5]. Якщо різні методи дають достатньо близькі результати, це свідчить, що баланс відповідає дійсності.

Проте, щоб провести таку верифікацію в умовах великої кількості обладнання, що використовується на підприємстві, необхідно виконати значний обсяг робіт, витратити багато часу та матеріальних ресурсів [7]. Тому на практиці така перевірка через занадто велику трудомісткість проведення робіт не здійснюється у необхідному обсязі. Наприклад, при проведенні енергоаудитів для перевірки точності визначених статей балансу виконують лише певні вибіркові вимірювання показників енергоспоживання. При цьому відомо, що не потрібно рекомендацій, які б давали відповідь на питання, де та яким чином необхідно проводити такі контрольні вимірювання, не існує.

Таким чином, виникає проблема визначення найбільш «проблемних» виробничих об'єктів або ділянок схеми електропостачання, на яких додаткові вимірювання та верифікацію отриманих результатів побудови електробалансу необхідно проводити в першу чергу. Іншими словами, мова йде про задачу виявлення таких об'єктів чи ділянок, які створюють найбільшу невизначеність при побудові балансів споживання електричної енергії.

Важливість та необхідність вирішення цієї задачі підтверджується ще й тим, що на таких об'єктах чи ділянках може бути зосереджений найбільший потенціал енергозбереження. І саме на таких ділянках чи об'єктах у подальшому може виникнути необхідність створення систем оперативного контролю енергоефективності.

### 3. Цілі та задачі дослідження

Метою роботи є розробка методичних основ визначення найбільш «проблемних» виробничих об'єктів або ділянок схеми електропостачання, на яких необхідно в першу чергу шляхом проведення додаткових вимірювань здійснювати верифікацію отриманих результатів побудови електробалансів.

Для досягнення даної мети були поставлені наступні завдання:

- розробка процедури зменшення невизначеності вихідних даних при побудові електробалансів, зокрема методами експертного опитування;
- розробка алгоритму визначення найбільш «проблемних» ділянок виробничих схем електропостачання на основі методів імітаційного моделювання.

### 4. Методика визначення ділянок, які вносять найбільшу невизначеність при побудові електробалансів

Визначення найбільш «проблемних» ділянок при побудові електричних балансів на промислових підприємствах може здійснюватись з застосуванням методів імітаційного моделювання. До таких методів, зокрема, відносять рандомізацію, бутстреп і метод Монте-Карло [11, 12].

Для оцінки ступеню невизначеності, яку створюють окремі виробничі об'єкти при побудові балансів споживання електричної енергії, авторами цієї статті розроблено алгоритм, що базується на використанні методів імітаційного моделювання.

Першим етапом вирішення задачі є проведення експертного опитування. На будь-якому підприємстві може бути визначена група спеціалістів, робота яких безпосередньо пов'язана з експлуатацією обладнання, яке необхідно приймати до уваги при побудові відповідного електробалансу (енергетики, оператори установок, технологи тощо). Опираючись на їх знання та досвід можна отримати попередню оцінку обсягів електроспоживання цього обладнання, достатньо наближену до реальних значень.

Опитування спеціалістів-експертів здійснюється за допомогою анкет, у яких кожному експерту пропонується на спеціальній шкалі позначити вертикальними та горизонтальними лініями інтервали, в яких знаходяться фактичні обсяги споживання електричної енергії тим чи іншим видом обладнання, а також частоту, з якою дійсні значення електроспоживання спостерігаються в межах цих інтервалів.

Для оцінки частоти знаходження фактичних обсягів споживання електроенергії у відповідних інтервалах експертам у найпростішому випадку можуть бути запропоновані три рівні, характеристика яких наведена в табл. 1.

Таблиця 1

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

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

На рис. 1 наведено приклад заповнення анкет трьома експертами та визначення їх «спільної думки» стосовно обсягів електроспоживання деякого виду обладнання. Обробка анкет може здійснюватись, зокрема, геометричним способом. Для цього у результуючій анкеті на горизонтальній осі позначаються всі визначені експертами інтервали обсягів споживання електроенергії обладнанням, що розглядається. Після цього у кожному інтервалі здійснюється узагальнення думок всіх щодо частоти знаходження дійсних величин електроспоживання обладнання у межах того чи іншого інтервалу. У цьому прикладі для спрощення таке узагальнення думок експертів виконано за «більшістю голосів».

Таким чином за результатами експертного опитування визначаються інтервали, в яких можуть знаходитись фактичні обсяги споживання електричної енергії всіма видами обладнання, що розглядаються при побудові відповідного електробалансу, а також частота, з якою дійсні значення їх електроспоживання спостерігаються в межах цих інтервалів.

Наступним кроком вирішення задачі є генерування деякої, достатньо великої кількості *m* псевдо електробалансів, тобто штучно створених балансів, побудованих на основі зроблених експертами оцінок можливих обсягів споживання електричної енергії всіма видами обладнання.

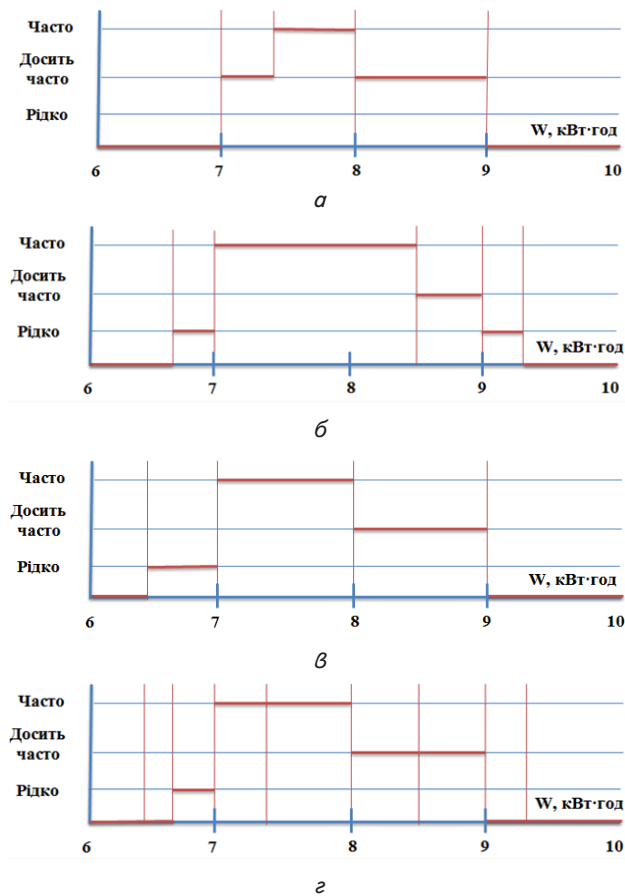


Рис. 1. Визначення «спільної думки» за результатами опитування трьох експертів: а – результати опитування першого експерта; б – результати опитування другого експерта; в – результати опитування третього експерта; з – «спільна думка» експертів

Будь-який псевдо електробаланс генерується шляхом багаторазової генерації вибірок на базі наявних інтервалів в яких може знаходитись фактичний обсяг електроспоживання і-го виду обладнання.

З кожного інтервалу в якому може знаходитись фактичний обсяг електроспоживання того чи іншого і-го виду обладнання випадковим шляхом вибирається псевдореальна величина його електроспоживання  $W_{n,pj}$ .

Таким же чином визначаються псевдореальні величини обсягів споживання електроенергії всіма іншими видами обладнання, що розглядаються  $i=1, n$ , після чого розраховується сума одержаних псевдореальних значень електроспоживання

$$W_{\Sigma n,pj} = \sum_{i=1}^n W_{n,pj}$$

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

$$W_{\Sigma \min} \leq W_{\Sigma n,pj} \leq W_{\Sigma \max}, \quad (4)$$

де  $W_{\Sigma \min}$ ,  $W_{\Sigma \max}$  – відповідно мінімальні та максимальні обсяги споживання електричної енергії споживання електричної енергії на виробничому об'єкті.

Якщо ця умова не виконується, то одержаний таким чином псевдо електробаланс відкидається як нереальний, після чого починається генерування нового можливого варіанту балансу споживання електроенергії на даному об'єкті. Якщо ж умова (4) виконується, то можна вважати, що побудований псевдо реальний електробаланс є ймовірним і може використовуватись для подальшого аналізу.

Процес генерування псевдореальних балансів споживання електроенергії повторюються, доки не буде отримана необхідна їх кількість  $m$ . Чим більшою є величина  $m$ , тим більш точними та достовірними будуть результати вирішення поставленої задачі. В літературних джерелах зазначається, що для виробничих об'єктів, де кількість обладнання є меншою, ніж 100 одиниць, достатньо прийняти  $m=5000$  [13].

Очевидно, що при формуванні псевдореальних електробалансів необхідно враховувати частоту, з якою фактичне електроспоживання кожного виду обладнання знаходиться в межах певних інтервалів. Для цього у кожному заданому інтервалі, виходячи з узагальненої оцінки експертами рівня цієї частоти («часто», «досить часто», «рідко»), повинна генеруватися відповідна кількість псевдо реальних величин споживання електричної енергії.

Наприклад, при необхідності одержання для кожного виду обладнання 5000 псевдо реальних значень електроспоживання, 3000 з яких мають знаходитись у інтервалі, що характеризується рівнем «часто», 1500 – в інтервалі з рівнем «досить часто» та 500 – в інтервалі з рівнем «рідко». Таким чином, псевдо реальні величини електроспоживання з інтервалу, позначеного рівня «часто», мають вибиратися частіше, і тому їх вплив на кінцевий результат вирішення задачі буде більшим, ніж вплив величин споживання електроенергії, вибраних з інших інтервалів. При цьому очевидно, що кожне конкретне значення псевдо реального споживання електричної енергії, яке вибирається для будь-якого виду обладнання з того чи іншого інтервалу, повинно генеруватися випадковим чином.

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

Числові значення обсягів споживання електроенергії цим видом обладнання визначаються на підставі раніше згенерованих псевдо електробалансів. Однак при цьому приймається, що ці псевдо реальні обсяги споживання електроенергії одержані за даними обліку і є дійсними. Величини ж електроспоживання всіх інших видів обладнання вважаються невідомими і визначаються шляхом вирішення оптимізаційної задачі, яка має наступну цільову функцію:

$$z = \left( W_{\Sigma n,pj} - \left( \sum_{i=1}^n W_{ij} + \Delta W_{tr} + \Delta W_{л} \right) \right)^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

При цьому на числові значення змінних накладаються обмеження у вигляді нерівностей:

$$W_{\min} \leq W_{i,j} \leq W_{\max}, W_i > 0, \tag{6}$$

де  $W_{\min}$ ,  $W_{\max}$  – визначені експертним шляхом мінімальні і максимальні значення, які можуть приймати обсяги електроспоживання того чи іншого (і-го) виду обладнання.

Зазначені вище припущення приймаються і відповідні розрахунки виконуються для кожного з раніше згенерованих  $m$  псевдо електробалансів.

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

Визначення найбільш «проблемної» ділянки схеми електропостачання чи виду обладнання, які створюють найбільшу невизначеність при побудові балансів споживання електроенергії може базуватися на розрахунку показника, який в зарубіжній практиці має назву Performance index of data reconciliation results (IRR). Застосування показника IRR було запропоновано в науковому напрямку Data Reconciliation, де він довів свою ефективність [14]. Величина IRR для будь-якого виду обладнання чи ділянки схеми електропостачання визначається за наступною формулою:

$$IRR = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{m} \sum_{j=1}^1 (W_{i,j} - W_{n,p,i,j})^2 \right), \tag{7}$$

де  $W_{n,p,i,j}$  – псевдо реальні значення споживання електричної енергії одержані з застосуванням методів імітаційного моделювання;  $W_{i,j}$  – розрахункові значення споживання електричної енергії для відповідного варіанту встановлення додаткового приладу обліку.

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

### 5. Результати дослідження визначення найбільш «проблемних» ділянок для верифікації електробалансу підрозділу промислового підприємства

Методика визначення найбільш «проблемних» ділянок або видів обладнання, які створюють найбільшу невизначеність при побудові балансів споживання електричної енергії може бути проілюстрована на прикладі виробничого підрозділу промислового підприємства, принципова схема електропостачання якого наведена на рис. 2.

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

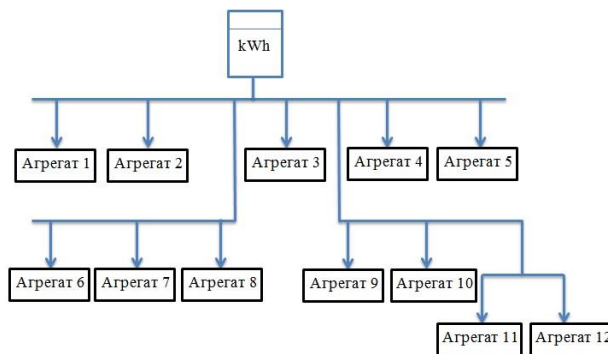


Рис. 2. Принципова схема електропостачання виробничого підрозділу підприємства: 1 – транспортер, 2 – млин шаровий, 3 – міксер, 4 – електронасос, 5 – басейн з двома мішалками, 6 – басейн для збору води, 7 – прес гідравлічний, 8 – сушарка, 9 – конвеєрна лінія, 10 – двохярусна піч, 11 – вентилятор, 12 – компресор

Графічне представлення узгодженої думки експертів стосовно можливих обсягів електроспоживання обладнання номер 1 наведено на рис. 3.

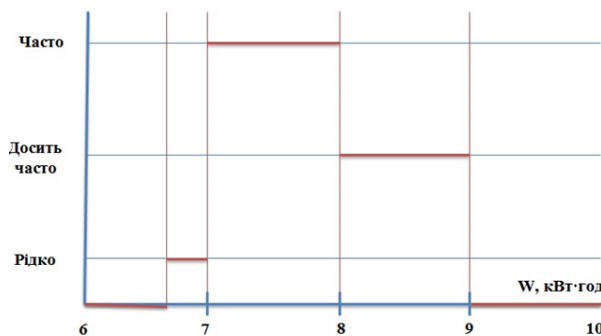


Рис. 3. Графічне представлення узгодженої думки експертів стосовно можливих обсягів електроспоживання обладнання номер 1

З рис. 3 випливає, що фактичне електроспоживання транспортера ніколи не знаходиться в інтервалах 6–6,75 та 9...10; в інтервалі 6,75–7 дійсне споживання електроенергії цим обладнанням знаходиться рідко; в інтервалі 7...8 – часто; а в інтервалі 8–9 – досить часто. Результати опитування експертів стосовно можливих обсягів споживання електричної енергії всіма видами обладнання, що розглядаються, наведені в табл. 2.

Виходячи з принципової схеми електропостачання виробничого підрозділу, наведеної на рис. 2 можна визначити, що існує 17 варіантів встановлення додаткових приладів обліку електроспоживання, а саме: варіанти з 1-го по 12-й – лічильник може бути встановлений безпосередньо на одному з видів обладнання; варіант 13 – може здійснюватись облік електроспоживання обладнання 6 та 7 разом; варіант 14 – обладнання 6,7 та 8 разом; варіант 15 – обладнання 9,10,11 та 12 разом; варіант 16 – обладнання 10, 11 та 12 разом; варіант 17 – обладнання 11 та 12 разом.

Користуючись лише даними табл. 2, зробити однозначні висновки щодо виду обладнання або ділянки схеми електропостачання, обсяг споживання електроенергії яких має найбільший вплив на сумарне

електроспоживання виробничого підрозділу в цілому, практично не можливо.

Таблиця 2

Результати опитування експертів стосовно можливих обсягів споживання електричної енергії всіма видами обладнання

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

Для одержання відповіді на це питання на основі експертних даних було згенеровано 5000 варіантів псевдо електробалансів підрозділу, окремі з яких наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Окремі варіанти (1,2...5000) псевдо електробалансів виробничого підрозділу

№ п/п	Вид обладнання	1	2	...	5000
1	Транспортер	7,92	8,64	...	9,00
2	Млин шаровий	36,68	31,66	...	37,15
3	Міксер	1,61	1,48	...	1,64
4	Електронасос	6,13	6,01	...	5,69
5	Басейн з двома мішалками	17,13	17,80	...	17,21
6	Басейн для збору води	5,76	5,53	...	5,43
7	Прес гідравлічний	50,38	50,04	...	52,44
8	Сушарка	30,98	37,19	...	30,01
9	Конвеєрна лінія	5,89	5,91	...	6,01
10	Двохярусна піч	77,69	81,52	...	75,28
11	Вентилятор	6,22	6,22	...	6,25
12	Компресор	24,10	24,03	...	23,05
13	W <sub>Σп.рj</sub>	270,50	276,03	...	269,14

Розглянемо перший варіант можливого встановлення додаткового лічильника споживання електроенергії: безпосередньо на обладнанні № 1. Приймаємо, що обсяги електроспоживання цього обладнання, наведені в табл. 3, є дійсними.

Розрахункові значення обсягів споживання електричної енергії для всіх інших видів обладнання визначаємо шляхом вирішення наведеної вище оптимізаційної задачі окремо для кожного з 5000 варіантів псевдо електробалансів виробничого підрозділу. Окремі результати цих розрахунків наведені в табл. 4.

В результаті виконання подібних розрахунків отримуємо 17 таблиць розрахункових енергобалансів виробничого підрозділу для всіх можливих варіантів

місця встановлення додаткового приладу обліку споживання електричної енергії.

Таблиця 4

Окремі варіанти розрахункових енергобалансів підрозділу при встановленні додаткового лічильника на обладнанні № 1

№ п/п	Вид обладнання	1	2	...	5000
1	Транспортер	7,92	8,64	...	8,997369805
2	Млин шаровий	40,26	40,50	...	39,98917983
3	Міксер	1,70	1,70	...	1,639179845
4	Електронасос	5,66	6,30	...	5,4
5	Басейн з двома мішалками	15,26	16,04	...	15
6	Басейн для збору води	6,00	6,00	...	5,789179832
7	Прес гідравлічний	48,26	49,04	...	48
8	Сушарка	35,26	36,04	...	34,98917983
9	Конвеєрна лінія	6,16	6,16	...	5,98917983
10	Двохярусна піч	74,51	75,29	...	74,25
11	Вентилятор	6,26	6,30	...	6
12	Компресор	23,26	24,04	...	23,1
13	W <sub>Σп.рj</sub>	270,50	276,03	...	269,14

На підставі даних цих таблиць за формулою (7) визначаємо числові значення показника IRR для всіх варіантів встановлення додаткового лічильника. Наприклад, для варіанту, коли додатковий прилад обліку буде встановлено на обладнанні № 1, числове значення цього показника дорівнює:

$$IRR_{n1} = \frac{1}{5000} \sum \left( (7,92 - 7,92)^2 + \dots + (9,00 - 8,997)^2 \right) + \dots + \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{1}{5000} \sum (24,10 - 23,26)^2 + \dots + (23,05 - 23,1)^2 \right) = 63,821.$$

Розраховані подібним чином значення показника IRR для інших варіантів встановлення додаткового лічильника наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Розрахункові значення коефіцієнту IRR

№	Ділянка або вид обладнання	IRR
1	Агрегат 2	36,80
2	Агрегати 10,11,12	36,95
3	Агрегати 9,10,11,12	37
4	Агрегат 10	37,81
5	Агрегат 8	51,83
6	Агрегати 6,7,8	57,63
7	Агрегати 6,7	61,59
8	Агрегат 7	62
9	Агрегат 1	63,82
10	Агрегат 6	63,92
11	Агрегат 5	64
12	Агрегати 11,12	64,36
13	Агрегат 12	64,63
14	Агрегат 3	64,93
15	Агрегат 4	65
16	Агрегат 9	65,31
17	Агрегат 11	65,55

Дані табл. 5 свідчать, що найбільш «проблемними» об'єктами є обладнання № 2 та вузол схеми електропостачання, до якого приєднане обладнання № 10, № 11, № 12. Тобто саме в цих точках схеми електропостачання виникає найбільша невизначеність при побу-

дові електробалансів даного виробничого підрозділу, а отже саме в цих точках потрібно в першу чергу здійснювати додаткові вимірювання з метою верифікації одержаних балансів. Також на цих ділянках схеми електропостачання у подальшому доцільно встановити постійні прилади обліку, які є необхідними для систематичного контролю електроспоживання та ефективності використання електричної енергії.

## 6. Висновки

– Розроблена авторами статті процедура, що базується на застосуванні методів експертного опи-

тування, дає змогу зменшувати невизначеність вихідних даних при побудові електробалансів розрахунково-аналітичним або ймовірно-статистичним шляхом.

– Експериментально доведено, що запропонований авторами алгоритм вирішення задачі, основою якого є використання методів імітаційного моделювання, дозволяє визначати «проблемні» ділянки схеми електропостачання та види обладнання, розрахункові показники електроспоживання яких створюють найбільшу невизначеність при побудові електробалансів виробничих об'єктів і вимагають першочергової верифікації шляхом проведення додаткових вимірювань.

## Література

1. Ковалко, М. П. Энергобережения – приоритетный напрямок державної політики України [Текст] / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк. – К.: УЕЗ, 1998. – 506 с.
2. Находов, В. Ф. Энергосбережение и проблема контроля эффективности энергоиспользования [Текст] / В. Ф. Находов // «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро: інформ. зб. – 2007. – № 1. – С. 34–42.
3. Находов, В. Ф. Побудова оптимальних розрахункових моделей електробалансів виробничо-господарських об'єктів [Текст] / В. Ф. Находов, О. В. Бориченко // «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро: інформ. зб. – 2010. – № 6. – С. 47–51.
4. Kreith, F. Energy management and conservation [Text] / F. Kreith, D. Goswami. – Handbook CRC Press, 2007. – 440 p.
5. Гофман, И. В. Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий [Текст] / И. В. Гофман. – М.–Л.: Энергия, 1966. – 319 с.
6. Iliev, I. Energy Efficiency and Energy Management [Text] / I. Iliev, N. Kloyanov, P. Gramatkov. – Handbook Bulgaria Energy Efficiency for Competitive Industry Financing Facility (BEECUFF), 2011 – 205 p.
7. Hasanbeigi, A. Price Industrial Energy Audit Guidebook: Guidelines for Conducting an Energy Audit in Industrial Facilities [Text] / A. Hasanbeigi, K. Lynn. – Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
8. Волобринский, С. Д. Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий Энергобережения. Паливно-енергетичні баланси промислових підприємств. Методика побудови та аналізу [Текст] / С. Д. Волобринский // Держстандарт України, 2007. – 25 с.
9. Находов, В. Ф. Побудова балансів споживання електроенергії виробничих об'єктів з використанням імовірно-статистичних методів [Текст]: тези доп. / В. Ф. Находов, О. В. Бориченко, О. О. Мусатова // Енергетика: економіка, технології, екологія: наук.-техн. конф. молодих дослідників, аспірантів та магістрантів. К., 2010.
10. Nordell, D. E. Principles for Effective Load Management [Text] / D. E. Nordell // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1985. – Vol. 6 – P. 1450–1454.
11. Efron, B. An Introduction to the Bootstrap [Text] / B. Efron, R. Tibshirani // CRC Press LLC – 2000 – 456 p. doi: 10.1109/tpas.1985.319159
12. Chernick, M. R. Bootstrap methods, a practitioner's guide [Text] / M. R. Chernick. – Wiley Series in Probability and Statistics. – 1999. – 369 p.
13. Шитиков, В. К. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ данных по биологии и экологии с использованием R [Текст] / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг. – Тольятти: «Кассандра», 2013. – 305 с.
14. Narasimhan, S. Data Reconciliation and Gross Error Detection: An Intelligent Use of Process Data [Text] / S. Narasimhan, C. Jordache. – Shankar Narasimhan and Cornelius Jordache 2000. – 405 p.