

УДК 621.23.14

ПОНОВЛЕННЯ РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ УНОРМУВАННЯ ПИТОМИХ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ

ДРЕШПАК Н.С.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: dreshpak.n.s@nmu.one.

Мета роботи. Розробити спосіб поновлення регресійної моделі для унормування питомих витрат енергії при наявності частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу.

Методи дослідження. Аналіз існуючих способів поновлення регресійних моделей, співставлення їх можливостей, синтез способу поновлення моделі в умовах частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу.

Отримані результати. Встановлено, що при наявності значної кількості можливих варіантів структурних і режимних змін в енергоспоживанні об'єкту контролю введення в регресійну модель супутніх змінних є проблематичним, так як потребує збільшення кількості експериментальних даних в умовах їх очікуваної неоднорідності. Розкрито недолік відомої регресійної моделі для унормування електроспоживання об'єкта контролю, який полягає у тому, що модель не враховує значень останніх в послідовності їх появи експериментальних даних, отриманих у процесі контролю енергоефективності. Це знижує точність прогнозованих значень енергоспоживання. Запропоновано здійснювати поновлення регресійної моделі щоразу після виконання контролю енергоефективності і здійснення коригування вибірки. Коригування реалізують шляхом перевірки однорідності отриманих експериментальних даних з наступним приєднанням їх до елементів існуючої вибірки та вилученням (у разі необхідності) із вибірки застарілих даних. Визначена послідовність коригування вихідних даних дозволяє своєчасно здійснювати поновлення моделі і виконання прогнозу питомого енергоспоживання, вводячи дані, що відображають останні зміни, які відбулися в енергозабезпеченні об'єкта. Запропонований спосіб поновлення моделі реалізує наближення в часі моменту контролю енергоефективності до моментів отримання експериментальних даних для побудови регресійної залежності для унормування значень енергоспоживання. Це сприяє підвищенню точності прогнозу унормованих значень. Суттєва зміна умов виробництва продукції з порушенням однорідності даних супроводжується переходом в перехідний режим коригування, де пропонується зменшувати кількість елементів існуючої вибірки, забезпечуючи послідовне вилучення найбільш віддалених від наступного моменту контролю елементів. Вилучення продовжують до досягнення однорідності даних. При щоденному контролі ефективності споживання електричної енергії зміна значень коефіцієнтів регресійної моделі в процесі її поновлення відображає зміни в електроспоживанні об'єкта, які відбулися за останню добу. Це дозволяє відокремити їх вплив від впливу змін, що сталися раніше та оцінити рівень цього впливу.

Наукова новизна. Вперше визначені недоліки існуючих способів поновлення регресійних моделей в умовах частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу. Розроблено спосіб поновлення моделі в цих умовах, що передбачає коригування вибірки експериментальних даних шляхом зміни кількості її елементів, перевірку однорідності даних.

Практична цінність полягає у визначенні послідовності дій при реалізації розробленого способу поновлення регресійної моделі, що дозволяє підвищити точність розрахунку унормованих значень питомого енергоспоживання.

Ключові слова: контроль енергоефективності; унормування енергоспоживання; регресійна модель; коригування вибірки; питомі витрати енергії.

І. ВСТУП

Для унормування рівня питомих витрат енергії при виконанні контролю енергоефективності виробничих процесів часто використовують регресійні моделі [1]-[3]. Унормовані значення енергоспоживання отримують в результаті аналізу експериментальних даних, що характеризують рівні витрат енергії і їх залежність від змін умов протікання виробничого процесу. Регресійні залежності орієнтовані на визначення середніх значень питомого енергоспоживання, характерного для існуючих в момент прогнозу умов протікання технологічного процесу. Контроль енерго-

ефективності виробничого процесу передбачає зіставлення фактичних значень питомого енергоспоживання з унормованими (прогнозованими) значеннями, отриманими з регресійної залежності. Виходячи з цього, існує необхідність забезпечення прийнятної точності визначення унормованих значень, що сприятиме підвищенню достовірності контролю і покращить можливості для якісного управління енергоефективністю [1]. При використанні регресійних моделей точність розрахунку нормованих значень значною мірою залежить від виду регресійної моделі, а також порядку отримання експериментальних даних для її побудови. Задіяна вибірка даних повинна враховува-

ти зміни, що відбулися на об'єкті контролю. В умовах ринкової економіки, де процес виробництва продукції часто змінюється і удосконалюється, процес прогнозування унормованих значень показників енергоспоживання ускладнюється. Виникає необхідність урахування цих змін. Орієнтуючись на наявність частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу, в [3] запропоновано здійснювати унормування питомого енергоспоживання, використовуючи регресійну модель змінної структури, що передбачає зміну коефіцієнтів лінійної регресійної залежності. Зміна умов виробничого процесу повинна супроводжуватись коригуванням (змінною складу) вибірки вихідних даних для побудови регресійної залежності і відповідним поновленням (змінною структури) моделі. Коригування вибірки даних повинно бути своєчасним, тобто здійснюватися без затримки відносно терміну зміни умов виробничого процесу, що підвищить точність визначення унормованих значень. В публікації [3] наголошується на можливості використання однофакторних регресійних моделей. Запропоновано в однофакторних лінійній та нелінійній моделях використовувати значення обсягу випуску продукції, як комплексної характеристики, що визначає рівень споживання енергії.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відомі різні підходи до поновлення регресійної моделі при зміні ситуації на об'єкті контролю. Для цього, наприклад, в регресійну модель включають «супутні якісні змінні Z » [4]. Розглянемо наступну ситуацію. Регресійна залежність для унормування питомого електроспоживання об'єкта має вигляд

$$\hat{W} = Q_0 + Q_1 \cdot X, \quad (1)$$

де $\hat{W}$ – оцінка середнього значення щоденного питомого споживання електроенергії; Q_1, Q_2 – коефіцієнти регресійної моделі (постійна Q_0 та змінна Q_1 складові). Залежність (1) отримують за результатами експериментальних даних окремої вибірки $\tilde{B}_n = \{(X_1, W_1), (X_2, W_2) \dots (X_n, W_n)\}$. Дані вибірки фіксують в певних проміжках часу. Таким чином, індекс « n » характеризує послідовність їх реєстрації в часі. Зрозуміло, що значення коефіцієнтів Q_0, Q_1 обумовлені статистичними даними цієї вибірки і відповідають умовам енергоспоживання об'єкта, які існували протягом періоду збору експериментальних даних. Зміна умов споживання енергії, що пов'язана із структурними і режимними змінами, які відбуваються в межах об'єкту контролю, приводить до наступних наслідків. Нова вибірка щоденних даних, отриманих протягом певного періоду часу, забезпечить зміну коефіцієнтів регресійної залежності (1). Якщо використання даних сусідніх вибірок приводить

до зміни коефіцієнтів Q_0, Q_1 , то користуються моделлю зі змінною структурою. Причиною зміни коефіцієнтів Q_0, Q_1 є наявність супутніх якісних змінних Z , які впливають на значення коефіцієнтів [4]

$$\hat{W} = Q_0(Z) + Q_1(Z) \cdot X. \quad (2)$$

Будемо вважати, що вплив Z на значення питомого споживання енергії W не приводить до появи нелінійності в рівнянні (2). Дія неврахованих супутніх змінних проявляється виключно в зміні значень коефіцієнтів Q_0, Q_1 . Зрозуміло, що при стабільних значеннях Z (при відсутності змін в умовах виробництва продукції) структура регресійної моделі не змінюється. Слід звернути увагу на те, що на відміну від пояснюючих змінних регресійної моделі, які підлягають обов'язковому вимірюванню, супутні зміні не вимірюють. Фіксують тільки їх наявність (як якісних змінних) і розраховують ступінь їх впливу на значення коефіцієнтів регресійної моделі [4]. Якщо моменти введення в дію супутніх змінних відомі, то в регресійну модель вводять манекенні змінні, які діють у визначених термінах часу і, таким чином, змінюють структуру регресійної моделі. Суттєвою перевагою використання супутніх змінних є відсутність вимірювань їх значень, тобто фіксується тільки наявність або відсутність дії змінної, що здійснюють введенням в регресійну модель значень 1 або 0. Недолік їх введення в регресійну модель полягає у тому, що збільшується кількість пояснюючих змінних моделі, що потребує збільшення кількості експериментів для забезпечення статистичної надійності оцінки енергоспоживання [4]. В умовах оперативного контролю і при наявності структурних та режимних змін в електроспоживанні об'єкта з широким переліком можливих варіантів супутніх змін введення в регресійну модель значної кількості манекенних змінних є проблематичним. Між тим, ідея використання змінних Z заслуговує на увагу завдяки відсутності кількісної оцінки їх значень. При обмежених можливостях вимірювання пояснюючих змінних регресійної моделі для унормування енергоспоживання, використання супутніх змінних Z без їх фактичного введення в регресійну модель і обов'язкове забезпечення оцінки їх впливу на значення коефіцієнтів регресійного рівняння є прийнятним рішенням, що сприяє підвищенню точності унормування ефективності використання енергії.

Інший підхід до формування регресійної моделі змінної структури полягає у розподілі експериментальних даних на вибірки з однорідними елементами [4]. У цьому випадку для кожної вибірки розраховують відповідні коефіцієнти регресійного рівняння. Близький до цього підхід, який передбачає розподіл даних на окремі вибірки з формуванням на їх основі регресійних моделей, використано в [1] для контролю енергоспоживання ділянки видобутку вугілля.

Фактичні показники енергоспоживання об'єкта використовують як для виконання операції співставлення з унормованим значеннями, так і для побудови поновленої регресійної моделі. Після чергового накопичення експериментальних даних відбувається заміна однієї моделі іншою (поновленою). Поновлена модель використовує ряд отриманих останніми в період контролю експериментальних даних з їх послідовною фіксацією в часі. Принцип побудови моделі зі змінною структурою, де кожна структура діє певний проміжок часу і використовується для унормування електроспоживання об'єкта, розглянуто, наприклад, у відомих роботах [1], [2]. Перехід від однієї моделі до іншої відбувається після накопичення певної кількості експериментальних даних, необхідних для побудови нової регресійної моделі. В цих роботах зроблено припущення про однорідність даних регресійних вибірок, що не завжди виконується при частих змінах умов виробництва. Розподіл даних не передбачає їх перевірку на однорідність, але процес поновлення регресійної моделі реалізується. Рис.1 ілюструє послідовність поновлення регресійної моделі в певних проміжках часу. Контролюючі дії співпадають у часі з накопиченням експериментальних даних для побудови наступної регресійної залежності.

Недолік існуючого підходу полягає у тому, що дані, які використовують для побудови регресійної залежності, не перевіряють на однорідність. Це може привести до зниження точності прогнозу при визначенні унормованих значень енергоспоживання. Виявлення неоднорідності даних повинно слугувати сигналом до зміни структури моделі, що супроводжується суттєвою зміною коефіцієнтів Q_0 , Q_1 . Інший недолік розглянутого підходу полягає у тому, що проміжки часу між контролюючими діями і періодом формування регресійної моделі, за допомогою якої здійснюється контроль, можуть бути значними. Затримка контролю особливо відчутна в кінці терміну контролю (див. рис.1). Виходячи з того, що у проміжку часу між введенням в дію регресійної залежності і моментом контролю можливі зміни умов споживання енергії, урахування цих змін не відбувається.

При цьому унормовані значення питомого енергоспоживання не містять складових, зумовлених змі-

нами, які відбулися, що знижує точність їх визначення.

III. МЕТА РОБОТИ

Аналізуючи недоліки відомих методів поновлення регресійної моделі, приходимо до висновку про необхідність зосередження уваги на обґрунтуванні послідовності отримання вибірових даних регресійної моделі для кожної змінної структури, забезпеченні їх однорідності та підвищення точності визначення унормованих значень питомого енергоспоживання в умовах частих і суттєвих змін енергоефективності виробничого процесу. Дослідження статті спрямовані на вирішення сформульованих завдань.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В процесі контролю енергоефективності процесу при суттєвій зміні умов виробництва продукції і використанні статистичного методу унормування питомого енергоспоживання доцільно здійснювати послідовну реєстрацію в часі вихідних даних, необхідних для побудови регресійної моделі. Характерною ознакою процесів, що протікають в часі, є, як правило, взаємна кореляція залишків регресійної моделі [4]. Прояв взаємного впливу зменшується по мірі взаємної віддаленості в часі спостережень, які розглядаються. При кореляції залишків лінійної регресійної моделі та відсутності гомоскедастичності для розрахунку коефіцієнтів моделі використовують узагальнений метод найменших квадратів [4]. Виконання розрахунку передбачає визначення матриці коваріації вектору регресійних залишків. Виходячи з того, що в статті завдання параметризації регресійної моделі розглядається в загальному вигляді, тобто не стосується конкретної технології виробництва продукції, елементи матриці коваріації, необхідної для визначення коефіцієнтів регресійної моделі, невідомі. Більш того, при суттєвій зміні умов виробничого процесу вид кореляційної залежності може змінюватись, що практично унеможливорює застосування цього методу. В цій ситуації авторка роботи пропонує користуватися класичним методом найменших квадратів,

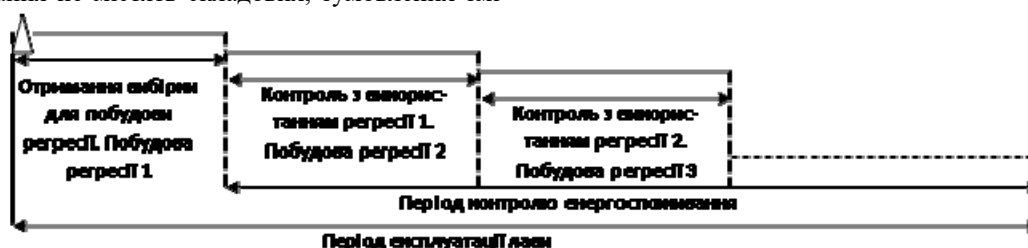


Рисунок 1. Збір даних та побудова регресійних моделей

але при цьому забезпечити наявність у вибірці вихідних даних для побудови моделі значень, максимально наближених в часі до наступного моменту контролю енергоефективності виробничого процесу. Це забезпечить більшу ступінь кореляції їх значень з прогнозованим значенням питомого споживання енергії, необхідним для виконання процедури контролю, дозволить урахувати останні зміни умов виробництва продукції, що сприятиме підвищенню точності визначення унормованих значень. У цьому полягає особливість запропонованого авторкою роботи коригування вибірки вихідних даних регресійної моделі.

Розглянемо послідовність дій при виконанні запропонованого способу коригування (зміни) значень вибірки експериментальних даних для побудови регресійної залежності на кожному кроці контролю. Вихідні дані ($\tilde{B}_n$), використані для побудови діючої регресійної моделі, розташовують (упорядковують) в послідовності їх отримання в часі при виконанні контролю енергоефективності

$$\tilde{B}_n = \{(X_1, W_1), (X_2, W_2) \dots (X_n, W_n)\}. \quad (3)$$

Будемо вважати, що існуюча вибірка (3) містить однорідні дані. Регресійна залежність, побудована за даними вибірки (3), використана для унормування значення питомих витрат енергії на $(n+1)$ кроці процесу контролю. На цьому кроці контролю з'являються нові експериментальні дані (X_{n+1}, W_{n+1}) . Для отримання поновленої регресійної залежності, необхідної для унормування енергоспоживання на наступному кроці контролю $(n+2)$, здійснимо коригування вибірки даних (3). Для цього розглянемо можливості об'єднання вибірки (3) з щойно отриманими даними (X_{n+1}, W_{n+1}) . При цьому розгляду підлягає варіант об'єднання, що відповідає збереженню всіх елементів вибірки (3), а також варіант вилучення її значень, найбільш віддалених від моменту контролю процесу на наступному кроці $(n+2)$ (обидва варіанти будуть докладно розглянуті нижче). Таким чином, в результаті проведення дій по об'єднанню вибірок, отримаємо об'єднану вибірку з елементами, відмінними від складу існуючої вибірки. Вилучення та введення нових вихідних даних щоразу супроводжується побудовою поновленої регресійної моделі. Рис. 2 ілюструє замкнутий цикл дій, що виконуються щоразу в процесі контролю енергоефективності і спрямовані на поновлення регресійної залежності.

Ясно, що період формування вихідних даних для побудови поновленої моделі, який розглядається, є менш віддаленим від наступного моменту контролю (крок $(n+2)$), ніж це спостерігається у випадку, який ілюструє рис.1.



Рисунок 2. Алгоритм поновлення регресійної залежності для унормування споживання електроенергії

Це досягається тим, що поновлення регресійної залежності здійснюється щоразу після виконання чергового контролю і загальна кількість поновлень моделі зростає. Запропонована процедура поновлення дозволяє увести в регресійну модель інформацію, щойно отриману в результаті проведеного контролю. Рис. 3 ілюструє запропонований підхід до формування регресійної моделі. Переміщення в часі контролюючих дій супроводжується аналогічним переміщенням періоду формування вибірових даних для побудови регресійної залежності, яка забезпечує прогнозування унормованих значень енергоспоживання.

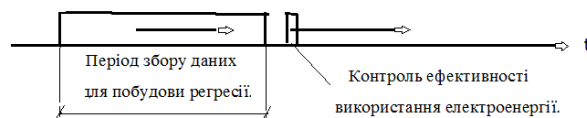


Рисунок 3. Зв'язок моменту контролю енергоефективності з періодом формування даних для побудови регресійної залежності

Коригування вихідних даних для побудови поновленої регресії може супроводжуватись втратою однорідності даних. Поява неоднорідних з існуючою вибіркою (3) даних, отриманих на $(n+1)$ кроці контролю і зумовлених змінами енергоспоживання об'єкта, приводить до суттєвої зміни структури поновленої регресійної моделі, що супроводжується значною зміною коефіцієнтів Q_0 та Q_1 . Слід звернути увагу на те, що втрати однорідності даних при об'єднанні вибірок, як це показано [4], відбувається при суттєвих змінах цих коефіцієнтів. Уточнення є слушним, так як кожне введення в регресійну модель нових експериментальних даних також, як правило, приводить до зміни значень Q_0 та Q_1 . Відрізняється ступінь їх зміни. Так, в [4] показано, що якщо таке введення даних не приводить до зміни коефіцієнтів в рамках похибки їх визначення, то ці дані можна вважати однорідними. Можливість об'єднання однорідних даних в одну вибірку визначають також за допомогою критерія Г. Чоу [5]. Розглянемо цей критерій з метою його застосування в процесі коригування вибірових даних. Значення критичної статистики $\gamma_{n,n1}$ визначають за

формулою

$$\gamma_{n,n1} = \frac{(\hat{\varepsilon}^T \cdot \hat{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}^{(1)T} \cdot \hat{\varepsilon}^{(1)} / n2)}{(\hat{\varepsilon}^{(1)T} \cdot \hat{\varepsilon}^{(1)}) / n1 - p - 1}, \quad (4)$$

де $\hat{\varepsilon}$, $\hat{\varepsilon}^{(1)}$ – вектори нев'язок об'єднаної та існуючої вибірок; $n1$, $n2$, n – кількість спостережень існуючої, приєднаної та об'єднаної вибірок відповідно ($n=n1+n2$); P – кількість пояснюючих змінних регресійної моделі.

При сумісному розгляді змісту викладеної вище процедури коригування даних на кожному кроці контролю енергоефективності з перевіркою об'єднаної вибірки на однорідність її даних отримаємо наступні значення змінних в формулі (4): $p=1$, $n2=1$, які відповідають випадку застосування одно факторної лінійної регресійної моделі зі зміною значень існуючої вибірки і отриманням на цій основі об'єднаної вибірки. Існуюча вибірка, задіяна в залежності (4) з кількістю спостережень $n1$, враховує зміну складу вибірки (3) на кожному $(n+1)$ кроці контролю. Можливість об'єднання вихідних даних існуючої вибірки ($n1$) та приєднаної вибірки X_{n+1}, W_{n+1} ($n2$) для отримання об'єднаних даних (n) підтверджується, якщо значення $\gamma_{n,n1} \leq F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1)$. Тут

$F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1) - 100 \cdot \alpha, \%$ – точка F розподілення з числами ступенів свободи чисельника та знаменника, рівними відповідно $n2$ та $n1 - p - 1$; α – заданий рівень значущості критерію [5]. Поява неоднорідних експериментальних даних свідчить про суттєву зміну умов виробничого процесу. У цьому випадку отримані неоднорідні дані не приєднують до існуючої вибірки. В той же час, існує можливість подальшого коригування існуючої вибірки ($n1$) шляхом зменшення кількості її елементів з метою забезпечення однорідності даних об'єднаної вибірки. Покажемо таку можливість.

Можливість об'єднання двох вибірок експериментальних даних значною мірою залежить від табличного значення $F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1)$. В табл.1 наведено залежність значення $F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1)$ від числа ступенів свободи знаменника ($n1 - p - 1$) при визначених вище значеннях $n2$, p та $\alpha = 0,05$.

Видно, що зміна кількості елементів існуючої вибірки $n1$ суттєво впливає на значення F_{α} . Зменшення їх кількості супроводжується збільшенням значення F_{α} і, відповідно, зменшенням можливості підтвердження неоднорідності даних.

Таблиця 1. Залежність $F_{\alpha}(n2, n1 - p - 1)$ від числа ступенів свободи знаменника ($n1 - p - 1$) при $n2=1$, $p=1$ та $\alpha=0,05$.

F_{α}	161	6,61	4,96	4,54	4,35	4,24	4,17	4,08	4,00	3,92
$n1-2$	1	5	10	15	20	25	30	40	60	120

Таким чином, при наявності неоднорідності в даних об'єднаної вибірки (в процесі коригування вибірових даних) необхідно шляхом вилучення змен-

шувати кількість елементів існуючої вибірки $n1$ з метою отримання такої їх кількості, що забезпечить виконання наведеної вище умови однорідності.

Повернемося до розгляду варіантів зміни існуючої вибірки (3) при її об'єднанні з приєднаною вибіркою (X_{n+1}, W_{n+1}). Якщо вибірку (3) не змінювати, то кількість елементів коригованої об'єднаної вибірки збільшиться на 1. Аналогічне збільшення буде спостерігатися на кожному наступному кроці контролю. Таким чином, розмір об'єднаної вибірки в процесі контролю буде зростати. Процес коригування, пов'язаний із зміною розміру об'єднаної вибірки, будемо вважати «перехідним режимом» на відміну від режиму зі стабільним розміром, який назовемо «усталеним режимом». Збільшення розміру об'єднаної вибірки в процесі контролю сприяє підвищенню статистичної надійності визначення нормованого значення питомого енергоспоживання [4]. Звуження довірчого інтервалу і, відповідно, підвищення точності визначення прогнозованого значення досягається збільшенням кількості елементів вибірки. Характерно, що інтенсивність звуження зменшується при суттєвому збільшенні кількості елементів. В той же час, збільшення кількості елементів об'єднаної вибірки сприяє зростанню проміжку часу між моментами отримання початкових значень вибірки (3) (наприклад, $(X_1, W_1), (X_2, W_2) \dots$) і моментом контролю на $(n+2)$ кроці, що, як показано вище, сприяє зниженню точності прогнозу. Тому доцільно встановити обмеження максимальної кількості елементів об'єднаної вибірки з урахуванням міркувань відносно її статистичної надійності та прийнятної точності прогнозу унормованих значень енергоспоживання. Збільшення кількості елементів вибірки є доцільним у випадку, коли умови виробничого процесу змінюються поступово. При частих змінах умов виробництва продукції необхідно зменшувати кількість елементів. Аналіз свідчить про те, що прийнятним є обмеження кількості елементів вибірки в інтервалі 10 – 30 значень.

Перейдемо до розгляду варіанту вилучення значень елементів вибірки (3), найбільш віддалених від моменту контролю процесу на наступному кроці ($n+2$). Якщо вилученню підлягає значення (X_1, W_1) , то об'єднана вибірка має вигляд

$$\tilde{W}_n = \left\{ (X_2, W_2), (X_3, W_3) \dots (X_n, W_n), \right. \\ \left. (X_{n+1}, W_{n+1}) \right\}. \quad (5)$$

Завдяки введенню в об'єднану вибірку значення (X_{n+1}, W_{n+1}) вона має такий же розмір, як і існуюча вибірка (3), тобто в процесі коригування вибірки її розмір не змінюється і забезпечується усталений режим коригування, де кількість елементів об'єднаної вибірки є стабільною і відповідає встановленому обмеженню на її розмір (від 10 до 30 значень). В кожно-

му із розглянутих варіантів зміни існуючої вибірки (3) слід аналізувати можливість її об'єднання з приєднаною вибіркою, користуючись залежністю (4). Однорідність даних об'єднаної вибірки повинна підтверджуватись на кожному кроці контролюючих дій. Якщо однорідність даних порушується, що цілком можливо при наявності частих змін умов виробництва продукції, то пропонується зменшувати кількість елементів існуючої вибірки (3), забезпечуючи послідовне вилучення найбільш віддалених від наступного моменту контролю елементів (спочатку (X_1, W_1) , далі (X_2, W_2) і наступні значення). Вилучення продовжують до досягнення однорідності даних. Кількість вилучених елементів може бути значною, що суттєво знизить статистичну надійність об'єднаної вибірки. В той же час, цей підхід до відновлення однорідності даних можна вважати вдалим рішенням, так як при відмові від його застосування виникає необхідність припинення контролю енергоефективності на термін формування нової вибірки експериментальних даних. Після відновлення однорідності даних процес коригування може розвиватися як в напрямку збільшення кількості елементів об'єднаної вибірки і виходу на усталений режим, так і роботи в перехідному режимі, де вибірка буде мати максимальну кількість елементів, яка забезпечить однорідність даних.

Запропонований спосіб коригування кількості елементів об'єднаної вибірки слід доповнити визначенням порядку коригування на початковому етапі контролю. На початку контролю кількість елементів вибірки дорівнює нулю. Тому необхідно забезпечити мінімальну кількість експериментальних даних, необхідних для здійснення першого кроку перевірки однорідності даних. Із табл. 1 видно, що мінімальна кількість даних існуючої вибірки повинна бути $n=3$. Тоді значення $F_\alpha=161$, що практично гарантує однорідність даних об'єднаної вибірки, отриманої в результаті приєднання даних, визначених на четвертому кроці контролю. Очевидно, що наступні кроки коригування об'єднаної вибірки необхідно спрямовувати на збільшення кількості її елементів, що відповідає розглянутому вище перехідному режиму коригування. Якщо на кожному кроці перехідного режиму підтверджується однорідність даних, то процес розширення вибірки завершується досягненням максимальної кількості елементів (дорівнює уведеному обмеженню). Далі реалізується усталений режим коригування з можливим переходом в перехідний при виникненні неоднорідності даних. Слід звернути увагу на те, що на початку виконання контролюючих дій, а також при виникненні неоднорідності даних кількість елементів об'єднаної вибірки скорочується, що, (як показано в [4]), супроводжується розширенням меж довірчого інтервалу при визначенні середнього значення питомих витрат енергії і впливає на точність унормування показника енергоефективності. Більшу стабільність меж довірчого інтервалу слід очікувати в усталеному режимі коригування, де кількість елементів вибірки

залишається незмінною. Це слід віднести до переваг усталеного режиму у випадку, коли в процесі контролю необхідно забезпечити незначні коливання похибки визначення унормованих значень.

Таким чином, запропонований спосіб коригування об'єднаної вибірки передбачає зміну в процесі контролю енергоефективності кількості елементів вибірки, чергування перехідних і стаціонарних режимів коригування. При цьому суттєва зміна умов виробництва продукції, що супроводжується порушенням однорідності даних, передбачає перехід в перехідний режим коригування, де пропонується зменшувати кількість елементів існуючої вибірки, забезпечуючи послідовне вилучення найбільш віддалених від наступного моменту контролю елементів. Вилучення елементів продовжують до досягнення однорідності даних.

Зосередимося на усталеному режимі коригування вибірки (3). Кожна наступна контролююча дія супроводжується вилученням із переліку упорядкованих вихідних даних цієї вибірки найбільш віддалених в часі фактичних значень пояснювальної та пояснюючої змінних і введенням в цей перелік нових, щойно отриманих значень цих змінних. Отримаємо вибірку (5). Значення змінних X_{n+1}, W_{n+1} отримані в результаті контролю, який відбувся першим після введення в дію вибірки Q_0 та Q_1 .

При використанні для побудови регресійної моделі методу найменших квадратів значення коефіцієнтів Q_0 та Q_1 (відповідають вибірці $\tilde{B}_n$) отримують з відомих формул [1]

$$Q_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n W_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2};$$

$$Q_0 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i - Q_1 \cdot \sum_{i=1}^n X_i}{n}. \quad (6)$$

Із залежностей (6) видно, що послідовність в розташуванні експериментальних даних у вибірці $\tilde{B}_n$ не впливає на значення коефіцієнтів Q_0 та Q_1 , тобто моменти отримання цих даних не є суттєвими. При побудові поновленої регресійної моделі (вибірка (5) $\tilde{B}_n$) важлива послідовність отримання даних в часі. Відповідні значення коефіцієнтів Q_0' та Q_1' отримаємо з формул

$$Q_1' = \frac{n(\sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i - X_1 \cdot W_1 + X_{n+1} \cdot W_{n+1}) - (\sum_{i=1}^n X_i - X_1 + X_{n+1})}{n \cdot (\sum_{i=1}^n X_i^2 - X_1^2 + X_{n+1}^2) - (\sum_{i=1}^n X_i - X_1 + X_{n+1})^2} \times$$

$$\times \frac{\sum_{i=1}^n W_i - W_1 + W_{n+1}}{1}; \quad (7)$$

$$Q_0' = \frac{\sum_{i=1}^n W_i - W_1 + W_{n+1} - Q_1' (\sum_{i=1}^n X_i - X_1 + X_{n+1})}{n}.$$

Якщо $X_1 = X_{n+1}$ і $W_1 = W_{n+1}$, то значення коефіцієнтів діючої та поновленої моделей однакові ($Q_0 = Q_0'$, $Q_1 = Q_1'$). Залежності (6) та (7) дозволяють оцінити ступінь коригування коефіцієнтів на кожному кроці контролюючих дій

$$\Delta Q_0 = Q_0 - Q_0'; \quad (8)$$

$$\Delta Q_1 = Q_1 - Q_1'.$$

Перевага запропонованого підходу поновлення регресійної моделі в співставленні з відомим (рис. 1) полягає у тому, що на кожному кроці контролю співставлення фактичних показників енергоспоживання здійснюється з унормованими значеннями, які враховують структурні і режимні зміни, що відбулися на об'єкті протягом усіх попередніх контролюючих дій. Це є важливою особливістю запропонованого підходу до контролю, так як вона дозволяє зафіксувати і оцінити рівень змін в енергоспоживанні, які відбулися безпосереднього на останньому етапі контролю. Зважаючи на те, що контроль пропонується здійснювати щоденно, існує можливість фіксації змін, що відбуваються на об'єкті протягом доби з визначенням їх якісного змісту (визначенням причини зміни рівня енергоспоживання, наприклад, шляхом опитування керівників виробничих підрозділів з використанням телефонного зв'язку), а також кількісної оцінки їх впливу. Очевидно, що запропонований підхід близький за змістом до використання якісних супутніх змінних [4]. Але визначення змінних не супроводжується їх уведенням в регресійну модель. Кількісна оцінка впливу цих змінних визначається різницею між фактичними і нормативними значеннями споживання енергії. Інформація є важливою для прийняття вірних рішень в управлінні енергоспоживанням об'єкту за результатами оперативного контролю.

V. ВИСНОВКИ

1. При наявності значної кількості можливих варіантів структурних і режимних змін в енергоспоживанні об'єкту контролю уведення в регресійну модель супутніх змінних є проблематичним, так як потребує збільшення кількості експериментальних даних в умовах їх очікуваної неоднорідності.

2. Недолік відомої регресійної моделі для унормування електроспоживання об'єкта контролю полягає у

тому, що модель не враховує значень останніх в послідовності їх появи експериментальних даних, отриманих у процесі контролю енергоефективності. Це знижує точність прогнозованих значень енергоспоживання. Крім того, введено припущення про однорідність даних вибірки, що при частих змінах умов виробництва продукції не завжди виконується і вносить додаткову похибку в результат прогнозу.

3. Запропоновано здійснювати поновлення регресійної моделі щоразу після виконання контролю енергоефективності і здійснення коригування вибірки. Коригування здійснюють шляхом перевірки однорідності отриманих експериментальних даних з наступним приєднанням їх до елементів існуючої вибірки та вилученням (у разі необхідності) із вибірки застарілих даних. Така послідовність коригування вихідних даних дозволяє своєчасно здійснювати поновлення моделі і виконання прогнозу питомого енергоспоживання, вводючи дані, що відображають останні зміни, які відбулися в енергозабезпеченні об'єкта. Запропонований спосіб поновлення моделі реалізує наближення в часі моменту контролю енергоефективності до моментів отримання експериментальних даних для побудови регресійної залежності для унормування значень енергоспоживання. Це сприяє підвищенню точності прогнозу унормованих значень.

4. Процес коригування, пов'язаний із зміною розміру об'єднаної вибірки, запропоновано вважати «перехідним режимом» на відміну від режиму зі стабільним розміром, який названо «усталеним режимом». Запропонований спосіб коригування об'єднаної вибірки передбачає чередування перехідних і усталених режимів. При цьому суттєва зміна умов виробництва продукції з порушенням однорідності даних супроводжується переходом в перехідний режим коригування, де пропонується зменшувати кількість елементів існуючої вибірки, забезпечуючи послідовне вилучення найбільш віддалених від наступного моменту контролю елементів. Вилучення продовжують до досягнення однорідності даних.

5. При щоденному контролі ефективності споживання електричної енергії зміна значень коефіцієнтів регресійної моделі в процесі її поновлення відображає зміни в електроспоживанні об'єкта, які відбулися за останню добу. Це дозволяє відокремити їх вплив від впливу змін, що сталися раніше та оцінити рівень цього впливу. Існує можливість визначення змісту (причин виникнення) останніх змін, що розширює інформаційні можливості контролю, сприяє підвищенню його оперативності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення: навч. посібник/ Г.Г. Півняк, С.І. Випанасенко. О.І. Хованська, Ю.В. Хацкевич, Н.С. Дрешпак. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 214 с.
- [2] Vypanasenko, S., Dreshpak, N. (2015) Informational and methodological support for energy efficiency

- control Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, 2, 53-57.
- [3] Dreshpak, N., Dreshpak, O. (2023) Parametrization of the statistical model for electrical energy efficiency control Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 4, 96-102. Retrieved from <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/096>.
- [4] Айвазян С.А. Методы эконометрики/ С.А. Айвазян.– М.: Магистр: ИНФРА-М, 2010. – 512с.
- [5] Літнарівч Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу: навчальний посібник/ Р.М. Літнарівч; МЕНУ.– Рівне, 2011. –140 с.
- [6] Dreshpak, O.S, Dreshpak, N.S., & Vypanasenko, S.I. (2022). Technology of Raw Materials Enrichment of Inhomogeneous Carbonate Deposits and Evaluation of its Energy Efficiency: Multi-authored: Monograph. Romania: UNIVERSITAS Publishing. Retrieved from <https://doi.org/10.31713/m1107>.
- [7] Закон України «Про енергозбереження»: прийнятий постановою Верховної Ради України № 75/94-ВР від липня 1994 р./ М-во юстиції України. – К. : Ін Юре, 1994. – 283 с.
- [8] Методика визначення нерационального (неефективного) використання паливно-енергетичних ресурсів: методичні рекомендації/ Національне агентство України з питань ефективного використання енергетичних ресурсів. – Київ, 2009. – 25 с.
- [9] В Україні прийнято національні стандарти з енергоаудиту та енергетичного менеджменту відповідно до європейських норм [Електронний ресурс]: сайт Держенергоефективності, 2016. – Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk/news/1184> (дата звернення: 26.09.2023).
- [10] Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України [Електронний ресурс]: сайт проекту UNIDO/GEF, 2015. Режим доступу: <http://www.ukree.org.ua/uk/proekt/meta-proekta> (дата звернення: 26.09.2023).
- [11] Шулле Ю. А. Використання АСКОВЕ для підвищення ефективності енерговикористання на промислових підприємствах / Ю.А. Шулле, І.С. Розанський// Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2016.– № 1.– С. 59-63.
- [12] Кодекс комерційного обліку електричної енергії. №311§. розд. I п. 1.2. [Електронний ресурс]: сайт Верховної Ради України, 2018. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text> (дата звернення: 26.09.2023).
- [13] Pothina, R., & Kesojevic, V. (2007). A Gyrotory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. Minerals and Metallurgical Processing, 24(3), 170-180.
- [14] Aslaksen, E. (2008) Designing complex systems. Foundations of design in the functional domain. Auerbach publications, 176.
- [15] Barrera, D., Diaz, M. (2011) Communicating systems with UML 2. Modeling and analysis of network protocols. ISTE ltd, 268.
- [16] Boehm, B. (2010) A spiral model of software development and enhancement. Object management group, 180.
- [17] Palekhova, L., & Simon, S. (2016). Competitive advantages through the implementation of international energy management standards. Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture, 3, 42-51. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Competitiveadvantages-through-the-implementation-PaliekhovaSimon/9c1feb73e964bc8b5c3b9fbabdbdb81d4484fb>

Стаття надійшла до редакції 06.12.2023

RENEWAL OF THE REGRESSION MODEL FOR NORMALIZATION OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION

DRESHPAK Ph.D, associate professor, associate professor of electrical engineering department at Dnipro N.S. University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: dreshpak.n.s@nmu.one.

Purpose. To develop a method of updating the regression model for the normalization of specific energy consumption in the presence of frequent and significant changes in the energy efficiency of the production process.

Methodology. Analysis of existing methods of updating regression models, comparison of their possibilities, and synthesis of the method of updating the model in conditions of frequent and significant changes in the energy efficiency of the production process.

Findings. It was established that in the presence of a significant number of possible variants of structural and mode changes in the energy consumption of the control object, the introduction of associated variables into the regression model is problematic, as it requires an increase in the number of experimental data in conditions of their expected heterogeneity. The flaw of the well-known regression model for normalizing the power consumption of the object of control is revealed, which consists of the fact that the model does not take into account the last values in the sequence of their appearance of experimental data obtained in the process of energy efficiency control. This reduces the accuracy of predicted energy consumption values. It is proposed to update the regression model every time after performing the energy efficiency control and sample adjustment. Adjustments are implemented by checking the homogeneity of the obtained experimental data, followed by their addition to the elements of the existing sample and removal (if necessary) from the sample of outdated data. The defined sequence of adjustment of the initial data allows timely updating of the

model and implementation of the forecast of specific energy consumption, entering data reflecting the latest changes that occurred in the facility's energy supply. The proposed method of updating the model implements the approximation in time of the moment of energy efficiency control to the moment of obtaining experimental data for building a regression dependence for normalizing energy consumption values. This helps to increase the accuracy of the forecast of normalized values. A significant change in the conditions of production of products with a violation of the homogeneity of data is accompanied by a transition to the transitional mode of adjustment, where it is proposed to reduce the number of elements of the existing sample, ensuring the sequential removal of the elements furthest from the next moment of control. Extraction continues until data homogeneity is achieved. During the daily control of the efficiency of electricity consumption, the change in the values of the regression model coefficients in the process of its renewal reflects the changes in the object's electricity consumption that occurred over the last day. This allows you to separate their impact from the impact of changes that occurred earlier and to assess the level of this impact.

Originality. For the first time, the shortcomings of the existing methods of updating regression models in the conditions of frequent and significant changes in the energy efficiency of the production process were identified. A method of updating the model under these conditions has been developed, which involves adjusting the sample of experimental data by changing the number of its elements and checking the homogeneity of the data.

Practical value is that the sequence of actions during the implementation of the developed method of updating the regression model is defined, which allows for an increase in the accuracy of calculating the normalized values of specific energy consumption.

Keywords: energy efficiency control; normalization of energy consumption; regression model; sample adjustment; specific energy consumption.

REFERENCES

- [1] Pivniak, H.H., Vypanasenko, S.I., Khovanska, O.I., Khatskevych, Yu.V., Dreshpak, N.S. (2013). Systemy enerhomenedzhmentu ta yikh matematychnye zabezpechennia. D.: Natsionalnyi hirnychyi universytet, 214.
- [2] Vypanasenko, S., Dreshpak, N. (2015) Informational and methodological support for energy efficiency control Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, 2, 53-57.
- [3] Dreshpak, N., Dreshpak, O. (2023) Parametrization of the statistical model for electrical energy efficiency control Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 4, 96-102. Retrieved from <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/096>.
- [4] Aivazian, S.A. (2010). Metody ekonometryky. M.: Mahystr: YNFRA-M, 512 (in Russian).
- [5] Litnarovych, R.M. (2011). Pobudova i doslidzhennia mate-matychnoi modeli za dzhherelamy eksperymentalnykh danykh metodamy rehresiinoho analizu. Rivne: MEHU, 140.
- [6] Dreshpak, O.S, Dreshpak, N.S., & Vypanasenko, S.I. (2022). Technology of Raw Materials Enrichment of Inhomogeneous Carbonate Deposits and Evaluation of its Energy Efficiency: Multi-authored: Monograph. Romania: UNIVERSI-TAS Publishing. Retrieved from <https://doi.org/10.31713/m1107>.
- [7] «Pro energozberezhennya» [Elektronnyi resurs]: Zakon Ukrainy [Priinyaty postanovo Verkhovnoyi Radi Ukrainy № 75/94-BP від 01.07.94.— Rezhim dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80>
- [8] Nacionalne agentstvo Ukrainy z pitan efektyvnogo vikoristannya energetichnih resursiv (2009) Metodika viznachennya neracionalnogo (neefektyvnogo) vikoristannya palivnoenergetichnih resursi. Kyiv: GO.
- [9] V Ukraini pryiniato natsionalni standarty z enerhoaudytu ta enerhetychnoho menedzhmentu vidpo-vidno do yevropeiskyykh norm [Elektronnyi resurs]: sait Derzhenerhoefektyvnosti, 2016. — Rezhym dostupu: <http://saee.gov.ua/uk/news/1184> (data zvernennia: 26.09.2023).
- [10] Vprovadzhennia standartu system enerhomenedzhmentu v promyslovosti Ukrainy [Elektronnyi resurs]: sait proiektu UNIDO/GEF, 2015. — Rezhym dostupu: <http://www.ukriee.org.ua/uk/proekt/meta-proekta> (data zvernennia: 26.09.2023).
- [11] Shullie, Yu. A., Rozianskyi, I.S. (2016). Vykorystannia ASKOE dlia pidvyshchennia efektyvnosti enerhovykorystannia na promyslovyykh pid-priemstvakh. Informatsiini tekhnolohii ta komp-iuterna inzheneriia, 1, 59-63.
- [12] Kodeks komertsiiinoho obliku elektrychnoi enerhii. No311§. section I p. 1.2. (2018). — Rezhim dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text>.
- [13] Pothina, R., & Kecojevic, V. (2007). A Gyrtory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. Minerals and Metallurgical Processing, 24(3), 170-180.
- [14] Aslaksen, E. (2008) Designing complex systems. Foundations of design in the functional domain. Auerbach publications, 176.
- [15] Barrera, D., Diaz, M. (2011) Communicating systems with UML 2. Modeling and analysis of network protocols. ISTE Ltd, 268.
- [16] Boehm, B. (2010) A spiral model of software development and enhancement. Object management group, 180.
- [17] Palekhova, L., Simon, S. (2016). Competitive advantages through the implementation of international energy management standards. Bulletin of the Dnieper State Academy of Construction and Architecture, 3, 42-51. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Competitiveadvantages-through-the-implementation-PalekhovaSimon/9c1feb73e964bc8b5c3b9fbabdbdb81d4484fb>