

УДК 621.311

Випанасенко С.І.*

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Визначені особливості використання регресійного аналізу для контролю загальних витрат електроенергії на видобуток вугілля.

Існуючі методи управління енерговикористанням вугільних шахт не є достатньо ефективними і потребують удосконалення. Основні функції такого управління виконує служба головного енергетика. Вона не має розгалуженої структури, що дозволяє здійснювати ефективний контроль рівня витрат енергії на різних стадіях вуглевидобутку. Відсутні також технічні засоби, які забезпечують контроль виробництва та оцінку показників енергоефективності. В існуючій ситуації дії служби головного енергетика шахти часто зводяться до формування програми з енергозбереження без її належного техніко-економічного обґрунтування, виконання якої є проблематичним, виходячи із фінансового стану вугільного підприємства. Важлива особливість діючої системи управління енерговикористанням полягає у покладенні відповідальності за стан справи на одну особу – головного енергетика шахти, який, в принципі, не має ефективного механізму для виконання цих функцій. Очевидно те, що необхідно створювати нову систему управління, побудовану на інших принципах, здатну навести порядок з нераціональним використанням енергії на вугільних шахтах.

Проблема може бути вирішена шляхом упровадження в управління енерговикористанням принципів, характерних для відомих у світовій практиці систем контролю та нормалізації [1]. Основна суть діючих систем полягає у персональній відповідальності керівників виробничих ділянок за показники ефективності використання енергії безпосередньо на робочих місцях (технологічних лініях, в енергоємному обладнанні). Такий підхід дозволяє диференціювати відповідальність, акцентувати увагу на контролі споживання енергії на робочих місцях. Відома загальна методика створення та упровадження таких систем на енергоємних виробництвах. Задача полягає у застосуванні існуючої методики до умов виробництва, характерних для вугільних шахт України. Виходячи із позитивного досвіду упровадження таких систем за кордоном (5-10 % економії енергоресурсів підприємства), доцільність створення таких систем на вугільних шахтах України безсумнівна. Слід врахувати також, що упровадження подібних систем віднесено до мало витратних заходів з енергозбереження.

Роботи по створенню систем енергоменеджменту, побудованих на принципах функціонування систем контролю та нормалізації, для вугільних шахт, виконувались продовж декількох років у центрі енергозбереження та енергоменеджменту Національного гірничого університету. Для усвідомлення загальної суті створеної системи розглянемо її структурну схему (рис. 1).

В рамках існуючої структури вугільної шахти повинні бути виділені структурні підрозділи із значним енергоспоживанням. Вони і є об'єктами управління, що отримали назву „центри обліку енергії (ЦОЕ)”. Важливо мати можливості для вимірювання витрат енергії в ЦОЕ. Крім того, повинні бути визначені особи, які відповідають за ефективність споживання енергії виробничим підрозділом. Як правило, такими призначають керівників відповідних підрозділів. В ЦОЕ необхідно встановити технологічні параметри, від яких залежить енергоспоживання і визначити з їх числа головні, тобто її параметри, які в більшій мірі впливають на витрати енергії.

* Національний гірничий університет, д-р техн. наук, проф.

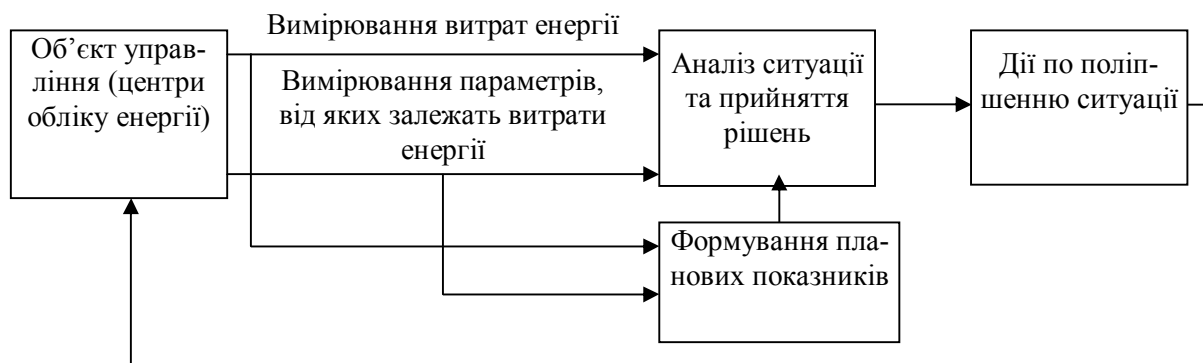


Рис. 1 – Структура системи енергоменеджменту

Збір інформації про рівень витрат енергії в ЦОЕ і про параметри, які його визначають, здійснюється в перебігу певного часу. Цей час повинен бути достатнім для отримання необхідного обсягу статистичної інформації і визначення на її основі планових показників (регресійної залежності рівня витрат енергії від значень технологічних параметрів).

В період контролю за рівнем енергоспоживання в ЦОЕ здійснюються поточні вимірювання (один раз на добу або тиждень), які зіставляються з плановими показниками, отриманими з регресійної залежності. На цій основі оцінюється ефективність енергоспоживання об'єкту. Складаються звіти, які підлягають аналізу створеними на підприємстві відділами контролю енергоспоживання. В цих відділах спільно з управлінськими, виробничими структурами підприємства виробляються рішення, що сприяють поліпшенню ситуації. Здійснюється контроль виконання прийнятих для реалізації в ЦОЕ рішень.

Враховуючи те, що вугільна шахта споживає в основному електричну енергію доцільно виділити тут декілька ЦОЕ з контролем споживання електроенергії [2]. Визначені також технологічні параметри, від яких залежить енергоспоживання в ЦОЕ вугільної шахти [3]. На цій основі для кожного ЦОЕ будуються регресійні залежності. Контроль ефективності використання електроенергії в ЦОЕ, що передбачає застосування регресійної залежності, має деякі особливості, які слід розкрити. Стаття присвячена визначенню цих особливостей, обґрунтуванню принципів контролю енерговикористання в ЦОЕ.

Витрати енергії в ЦОЕ можна розглядати як випадкові величини, які змінюються в часі (добові, тижневі та інші енерговитрати). Значення енерговитрат залежать від низки параметрів, які також змінюються випадково. Розглянемо задачу побудови регресійної залежності між двома параметрами. По даній вибірці

$$(x_1, y_1) (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n),$$

де x_i – незалежний технологічний параметр; y_i – залежний параметр (рівень енерговитрат), знаходять рівняння регресії у вигляді залежності середніх значень параметра $y(a_y)$ від параметра x [$a_y = \varphi(x)$]. Оскільки середні a_y є істинними значеннями спостережуваної величини (без урахування випадкового фактора), то регресія дає істинну залежність між цими величинами, позбавлену випадкових нашарувань. При обмеженій кількості спостережень побудувати залежність $a_y = \varphi(x)$ не можливо. Може йтися про побудову наближеної регресії $\hat{y} = f(x) \approx a_y$, де \hat{y} – оцінка середнього значення a_y . На рис. 2 показана лінійна залежність між параметрами \hat{y} і x , побудована за результатами спостережень. Залежність $\hat{y} = f(x)$ будується виходячи з принципу найменших квадратів, який забезпечує мінімальне розсіювання значень y_i навколо функції $f(x)$. Орієнтовно вид залежності визначають за характером розташування експериментальних даних. Широке розповсюдження отримала лінійна регресія $\hat{y} = \alpha + \beta x$. Цей вид залежності найбільш поширений в діючих системах енергоменеджменту.

Розглянемо підхід до аналізу результатів, який дозволяє використовувати регресійну залежність для контролю енергоспоживання. Припустимо, що така залежність для конкретного ЦОЕ побудована за експериментальними даними, отриманих в попередніх „n” дослідках. Тоді фактичне енергоспоживання (параметр y) у всіх наступних дослідках повинне зіставлятися з середнім (плановим) значенням a_y , що відповідає даному x . Якщо для x_{n+1} фактичне енергоспоживання y_{n+1} перевищує значення $a_{y(n+1)}$, то це свідчить про нераціональне використання енергії в ЦОЕ. Якщо показник фактичного енергоспоживання нижче середнього, то це свідчить про ефе-

ктивне енергоспоживання. Слід звернути увагу на той факт, що планові показники енергоспоживання повинні бути отримані виходячи з точної регресійної залежності $a_y = \varphi(x)$. Насправді ми маємо наближену залежність, що дозволяє отримати оцінку (\hat{y}) істинного середнього значення a_y . Очевидно, в цьому випадку необхідно побудувати довірчі інтервали, усередині яких з високою довірчою імовірністю знаходитиметься істинна (точна) регресійна залежність $a_y = \varphi(x)$. Стосовно випадку лінійної регресії довірчі інтервали показані на рис. 2.

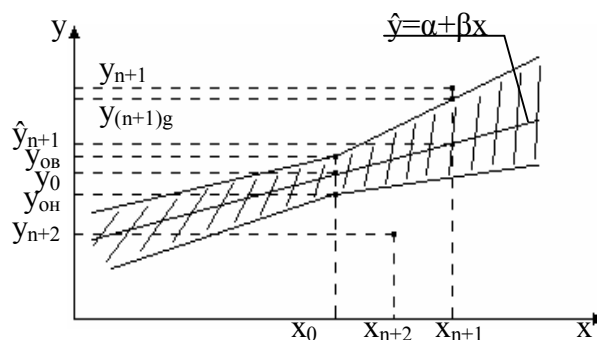


Рис. 2 – Лінійна регресія та її довірчі інтервали

Пряма $\hat{y} = \alpha + \beta x$ знаходиться усередині області, обмеженої довірчими інтервалами. Порядок побудови довірчих інтервалів буде викладений нижче. Зараз розглядається принцип контролю енергоспоживання. З урахуванням довірчих інтервалів усі значення фактичних енерговитрат, які потрапляють в заштриховану область, слід розглядати як такі, що відповідають плановим показникам. Якщо показники енерговитрат виходять за межі довірчих інтервалів (за заштриховану область), то значення y_{n+1} , наприклад, свідчить про нераціональне використання енергії в ЦОЕ на контрольованому етапі (зміна, доба, тиждень), а значення y_{n+2} свідчить про раціональне використання енергії (розташоване нижче заштрихованої області). Зі збільшенням кількості дослідів заштрихована область звужується, що підвищує ефективність здійснюваного контролю. Таким чином, особливість контролю полягає у тому, що функціональна залежність *середнього* значення енерговитрат на об'єкті від прийнятих незалежних параметрів, які характеризують енергоспоживання, є межею поділу хороших результатів роботи від незадовільних.

Виходячи з самого принципу контролю енерговикористання, очевидно можна ставити питання і про оцінку *рівня* незадовільної або хорошої роботи ЦОЕ. Дійсно, чим більші відмінності в значеннях фактичного та планового енергоспоживання, тим в більшій мірі співробітники ЦОЕ заслуговують похвали або негативного ставлення (у разі перевитрат енергії). Тому іноді здійснюють розрахунок різниці $y_{n+1} - \hat{y}_{n+1} = \Delta y_{n+1}$ (в теорії енергоменеджменту Δy_{n+1} відома як дисперсія) та представляють її у вигляді міри відмінності фактичних і планових енерговитрат. Якщо бути більш точним, то рівень відхилень слід розраховувати по відношенню до верхнього (у разі перевитрат енергії) або нижнього (у разі економії) рівнів довірчого інтервалу. Так, з рис. 2 перевитрата енергії визначається як $\Delta y_{(n+1)g} = y_{n+1} - y_{(n+1)g}$. Оскільки в різних експериментах рівні $y_{(n+1)g}$ відрізняються, то рівень перевитрат (або економії) слід подавати у відносних одиницях, виражаючи у відсотках:

$$\delta = \frac{\Delta y_{(n+1)g}}{y_{(n+1)g}} \cdot 100 \% .$$

В цьому варіанті параметр δ залежить не тільки від абсолютної різниці значень $\Delta y_{(n+1)g}$, але і від рівня запланованого в даних умовах (при заданому x_{n+1}) енергоспоживання. Це важливо, оскільки ці рівні в різних дослідів відрізняються. Тобто параметр δ показує відсоток перевищення (або економії) енерговитрат по відношенню до планованого значення з урахуванням довірчих інтервалів. Розрахунок δ – важливий момент аналізу, оскільки цей показник може використовуватися в системі контролю і визначати той *рівень матеріального заохочення (або збитків)*, який буде застосований до ЦОЕ за результатами його роботи. Ясно, що цей показник необхідно пов'язати з матеріальними стимулами, що використовуються на шахті.

Якщо врахувати, що матеріальне стимулювання здійснюється з певними інтервалами часу (щомісячно), то доцільно користуватися інтегральним показником відхилень $\sum \Delta y_{(n+1)g}$, розрахованим як сума відхилень в перебігу місяця з урахуванням знаку окремих складових (економія або перевитрата енергії). Цей параметр отримав назву кумулятивної суми.

Звівши значення дисперсії Δy_{n+1} (йдеться не тільки про вимірювання на $n+1$ кроці, але і на всіх наступних кроках контролю) на рівень матеріальних стимулів, очевидно потрібно ставити перед собою задачу достатньо точного (виходячи з цілей контролю) розрахунку самої регресійної залежності, тобто необхідно відповісти на питання, наскільки *вид* регресійної залежності відповідає даним експерименту, а також на питання про те, наскільки отримана нами наближена регресія відрізняється від істинної (питання довірчих інтервалів).

Відповідаючи на перше питання, необхідно звернути увагу на деякі особливості зв'язку енерговитрат з цільовими параметрами, що характерні для вугільних шахт. Ці особливості налаштовують нас на використання простої лінійної залежності першого порядку, де розглядатимуться енерговитрати залежно від цільових показників, характерних для конкретних ЦОЕ. Розглянемо ці доводи:

- лінійну регресію слід передбачити в дослідженнях, де справедливий закон „рівномірного накопичення”. Тобто відомо, що у пов'язаний із зміною x , але не залежить від того, яка „кількість” параметра x накопичилася. Саме цей закон, на погляд автора, прийнятний для існуючої на шахтах залежності між енергоспоживанням і параметрами, від яких воно залежить (в першу чергу від обсягу видобутку);

- межі зміни параметрів, від яких залежить енергоспоживання в конкретному ЦОЕ, як правило, невеликі. Це зумовлено сталим в перебігу багатьох років ритмом роботи вугільного підприємства, де робота чітко направлена на отримання результату – видобутку вугілля. Тому в сталих режимах роботи виробництва показники видобутку вугілля, проходки варіюються в незначній мірі. При невеликих межах зміни аргументу лінеаризація навіть істотно нелінійної залежності $y = f(x)$ призводить до незначних похибок. Тобто передбачається, що лінійна залежність характерна для вузького діапазону зміни аргументу x ;

- лінійна регресійна залежність має чіткі, однозначно трактовані показники, що характеризують ступінь залежності однієї випадкової величини від іншої (коефіцієнти кореляції, детермінації). Математичні вирази, що визначають коефіцієнти регресійної прямої, прості. Лінійна залежність дозволяє легко розрахувати очікувану економію енергоресурсів, прогнозувати рівні енергоспоживання.

Поки що йдеться про найпростіші спостереження. Питання вибору виду регресійної кривої може розглядатися і в теоретичному плані. Проте, загальні рекомендації такі, що на початковому етапі контролю енерговикористання слід прийняти просту залежність (в першу чергу лінійну першого порядку з однією незалежною змінною). У разі потреби (при низькій точності прогнозованих результатів) ця регресійна залежність може бути уточнена у міру накопичення експериментальних даних в окремих ЦОЕ. В кінцевому варіанті можна орієнтуватися на лінійну множинну регресію [4], де як незалежні змінні будуть використані цільові і додаткові параметри, що були запропоновані в [3].

Відповідь на друге питання (довірчі інтервали) так само надзвичайно важлива. Важлива тому, що саме лінія регресії є межею поділу незадовільних і хороших результатів роботи. Формування довірчих інтервалів та області (рис. 2), усередині якої з високою імовірністю знаходиться точне значення лінії регресії, дозволяє виділити область, усередині якої можна фіксувати прийнятні результати енергоспоживання (заштрихована область рис. 2). І лише вихід результатів за межі цієї області розглядається як незадовільний (значення y розташовані вище) або хороший (розташовані нижче) результат. У випадку, якщо довірчі інтервали будуть широкими, ефективність контролю енергоспоживання знижується. При цьому велика частина експериментальних даних опиниться в заштрихованій зоні і вони розглядатимуться як такі, що задовольняють плановим показникам. Звуження області спостерігатиметься при посиленні кореляційного зв'язку між залежною і незалежною змінними, а також при збільшенні кількості експериментів. Тому при побудові регресійної залежності слід звернути увагу на ширину області, що визначена довірчими інтервалами. Чим вужче ця область, тим більш ефективно здійснюється контроль (велика кількість експериментів буде трактуватися як незадовільні або хороші результати). Очевидно має сенс визначити максимальну ширину цієї області, при якій можна вважати

контроль ефективним. Так, пропонується визначити значення $(y_{os} - y_{on})/y_0$ і виразити його у відсотках (рис. 2). Із рис. 2 видно, що ці значення залежної змінної y отримані для середнього значення незалежної змінної x_0 , яка в свою чергу отримана в n експериментах. Виникає питання, чому розглядаються значення y , які відповідають середньому значенню x_0 ? Це виправдано виходячи з факту, що розсіяння змінної x відбувається в області середнього значення x_0 , причому, як вже про це згадувалося, слід чекати невелику дисперсію значень x . Тому значення енерговитрат, характерні для x_0 , відображають енерговитрати в інших експериментах. Задаючи рівень параметра ϵ [$\epsilon = (y_{os} - y_{on}) \cdot 100 \% / y_0$] ми тим самим визначаємо вимоги до довірчого інтервалу i , отже, до точності контролю рівня енерговитрат. Так, наприклад, якщо вимагати, що значення ϵ не повинне перевищувати 10 %, то це значить, що в області значень x , близьких до x_0 , точність контролю енерговитрат, обумовлена наявністю довірчих інтервалів, приблизно складе значення ± 5 %. Ясно, що якщо значення ϵ буде наперед визначеним, то формування регресійної залежності з необхідними довірчими інтервалами (обумовленими максимальним значенням ϵ) буде можливим тільки при проведенні певної кількості експериментів n . Нагадаємо, що зі збільшенням n область, обмежена довірчими інтервалами, звужується. Практична реалізація цієї вимоги полягає в тому, що кількість дослідів, необхідних для побудови регресії, повинна бути такою, щоб забезпечити значення ϵ меншим, ніж вимагається. Тому побудова регресійної залежності буде пов'язана з попередньою оцінкою необхідної кількості експериментальних даних. Наведені міркування щодо процесу формування довірчих інтервалів справедливі і для випадку множинної регресії (з декількома незалежними змінними).

Наступні дослідження пов'язані з тим, щоб встановити відмінності звичайної постановки задачі регресійного аналізу (традиційної) від задачі, що вирішується за допомогою регресії в системі енергетичного менеджменту. В традиційному підході побудова регресійної залежності пов'язана з необхідністю розрахунку значень залежної змінної y при відомому поєднанні незалежних змінних (x_1, x_2, \dots, x_m) . При цьому велика увага приділяється точності розрахунку прогнозованого параметра y . Урахування більшої кількості незалежних змінних, як правило, призводить до більш точного прогнозу значення y .

Прогноз значень y здійснюється і в регресійному аналізі, що використовується в енергоменеджменті. Особливість полягає в тому, що по цих даних судять про ефективність використання енергії (про хороші або незадовільні результати). Тому слід зрозуміти, на які показники енерговитрат ми повинні орієнтуватися при складанні прогнозу. Іншими словами, слід зрозуміти, яке енергоспоживання слід вважати *виправданим* за існуючих умов експлуатації устаткування, технологічних ліній. Очевидно, що виправданим слід вважати таке енергоспоживання, при якому керовані параметри приймуть оптимальні значення, які визначають мінімум енерговитрат. Змінна складова енерговитрат буде пов'язана з варіацією параметрів, на які співробітники ЦОЕ впливати не можуть (це, наприклад, запланований підприємством обсяг випуску продукції, температура оточуючого повітря, кут нахилу пласта при видобуванні вугілля). Це некеровані параметри (точніше сказати малокеровані, тобто такі, що, у принципі, управління ними в певних умовах можливе, проте воно не виправдано виходячи з інших міркувань). Звідси видно, що постановка традиційної задачі регресійного аналізу дещо відрізняється від постановки задачі, що стосується контролю енергоспоживання. Для осмислення цього факту наведемо приклад. Відомо, що енерговитрати на транспортування вугілля конвеєрним транспортом залежать від обсягу перевезеного вантажу, а також ступеня завантаження конвеєра. Очевидно, що обсяг вантажу – некерований параметр, а ступінь завантаження конвеєра – керований. Більш того, ступінь завантаження повинен бути таким, що забезпечує мінімум енерговитрат (оптимальний). Очевидно, що *виправданим* слід вважати енергоспоживання при оптимальному завантаженні з урахуванням можливих варіацій обсягу вантажу. Ясно, що в регресійну залежність слід ввести некерований параметр – обсяг вантажу. Саме збільшення обсягу виправдовує додаткові енерговитрати. Немає необхідності для введення в модель параметра, який характеризує ступінь завантаження конвеєра (керована змінна). Дійсно, якщо такий параметр буде введений, то експлуатація устаткування з різним ступенем завантаження буде *виправданою* (при зниженні ступеня завантаження конвеєра розраховані за допомогою регресійної залежності питомі енерговитрати (запланований рівень енерговитрат) виростуть і не входить у суперечність із збільшеними фактичними питомими енерговитратами). При цьому обслуговуючий персонал не вживатиме

ніяких дій щодо оптимізації ступеня завантаження, адже в цьому випадку результати контролю свідчатимуть про те, що ситуація з енерговикористанням в ЦОЕ нормальна.

Із сказаного виходить, що в регресійну модель слід вводити некеровані змінні. Саме це дозволить формувати залежності, що відображають виправдане обставинами енергоспоживання і використовувати їх для контролю ефективності використання енергії в ЦОЕ.

Висновки

- В системах енергетичного менеджменту контроль енергоспоживання окремих ЦОЕ здійснюють з використанням регресійних моделей. Лінія регресії є межею поділу хороших і незадовільних показників роботи. При цьому контролюється ступінь відмінності фактичного енергоспоживання від планового (дисперсія).

- Оскільки в практиці використовують наближену регресійну залежність, контроль енергоспоживання слід здійснювати з урахуванням довірчих інтервалів. Рівень відхилень слід розраховувати по відношенню до верхнього (у разі перевитрати енергії) або до нижнього (у разі економії) рівнів довірчого інтервалу. Матеріальне стимулювання в ЦОЕ повинне зв'язуватися з показниками контролю (рівнями відхилень, кумулятивною сумою).

- Показано, що в умовах, характерних для вугільної шахти, можна орієнтуватися на використання лінійної регресійної залежності. У разі потреби (при низькій точності прогнозованих результатів) залежність може бути уточнена. В кінцевому варіанті можна застосовувати множинну лінійну регресію.

- Для забезпечення необхідної точності контролю енергоспоживання пропонується встановити межі довірчих інтервалів, які відповідають заданому рівню параметра ϵ . Необхідний рівень досягається при врахуванні певної кількості експериментальних даних, в що формують лінію регресії.

- Показано, що в системах енергоменеджменту доцільно використовувати регресійну залежність, яка містить некеровані параметри. В цьому випадку залежність відобразить рівень „виправданого” енергоспоживання.

Перелік посилань

1. *Випанасенко С.І.* Передумови створення систем енергоменеджменту вугільних шахт / *С.І. Випанасенко* // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 20. – С. 136-143.
2. *Випанасенко С.І.* Центри обліку енергії у системі енергоменеджменту вугільної шахти / *С.І. Випанасенко* // Науковий вісник НГУ. – 2005. – № 10. – С. 89-94.
3. *Випанасенко С.І.* Обґрунтування вибору контрольованих технологічних параметрів в центрах обліку енергії вугільних шахт / *С.І. Випанасенко* // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 2. – С. 88-93.
4. *Демиденко Е.З.* Линейная и нелинейная регрессии / *Е.З. Демиденко.* – М.: Финансы и статистика, 1981. – 301 с.

Рецензент: Ю.Л. Сасенко
д-р техн. наук, проф., ПДТУ

Стаття надійшла 12.03.2008