

УДК 620.9

М.В. ГНІДИЙ, кандидат економічних наук, **О.Є. МАЛЯРЕНКО**, кандидат технічних наук
(Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ)

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА РІЗНИХ РІВНЯХ УПРАВЛІННЯ ЕКОНОМІКОЮ

Представлено математичну модель та алгоритм визначення теоретичного потенціалу енергозбереження на рівні технології (виробництва), галузі та країни при використанні різних груп показників: енергетичної ефективності технологічних процесів та макроекономічних показників.

Досвід розробки Комплексної державної програми енергозбереження, галузевих та регіональних енергозберігаючих програм показує, що не існує однозначного підходу до методів визначення величини економії палива та енергії на різних рівнях управління економіки країни та алгоритму розрахунку потенціалів енергозбереження.

Безпосередньо на енергозбереження впливають п'ять груп факторів: *технологічні, структурні, економічні, правові, організаційні*.

До **технологічних факторів** належать: напрями реконструкції та модернізації основних енергоємних технологій; науково-технічного прогресу щодо використання нових технологій; технічний рівень обладнання на підприємствах та окремих виробництвах; стан енергоефективності на підприємствах тощо. Цей фактор діє на всіх рівнях впровадження енергозберігаючих заходів.

До **структурних факторів** можна віднести такі: змінення макроекономічних пропорцій з метою зниження рівнів енергоспоживання; підвищення в структурі економіки питомої ваги наукоємних малоресурсо-містких галузей та виробництв; скорочення питомої ваги енергоємних галузей і виробництв промисловості та транспорту; зниження матеріаломісткості продукції; раціоналізацію енергетичних балансів країни, галузі, підприємств; удосконалення структури кінцевого споживання енергоресурсів тощо. Цей фактор починає діяти на рівні галузі.

Економічні фактори характеризуються впливом на процес енергозбереження особливостей розвитку економіки та її показників на різних рівнях управління. До них слід віднести: основні напрями й обсяги виробництв і технологій та їх економічну ефективність; економічні умови, в яких відбувається процес реалізації енергозберігаючих заходів; наявність служб енергоменеджменту на підприємствах та в галузі; екологічність енергозберігаючого обладнання; рівень цін на основне технологічне обладнання; цінову і тарифну політику на енергоресурси; заробітну плату відповідних категорій спеціалістів і робочих, що залучаються до ре-

алізації енергозберігаючих заходів. Ці фактори окремими чинниками впливають також на всіх рівнях впровадження енергозбереження – від технології до економіки країни.

Правові фактори спрямовані на створення дієвої системи законодавчих і нормативно-правових актів, яка передбачає регламентацію всіх важливих аспектів процесу енергозбереження, зокрема його стимулювання. До цих факторів належать: правове забезпечення системи фінансування енергозберігаючих заходів (фонди енергозбереження різних рівнів, пільгові кредити, пріоритетність інвестування тощо); наявність ефективного механізму стимулювання енергозбереження, що базується на необхідних нормативно-правових документах; встановлення пільгових податків на прибуток від реалізації енергозберігаючих заходів; впровадження Державної системи визначення рівня енергетичної ефективності для конкретних виробництв (технологій). Правовий фактор визначається на рівні економіки країни.

До **організаційних факторів**, що впливають на процес енергозбереження, можна віднести: діяльність Національного агентства України з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів щодо координації в країні робіт з енергозбереження, фінансування наукової діяльності, розробки енергозберігаючих програм; діяльність Державної інспекції з енергозбереження щодо контролю за ефективністю використання енергоресурсів тощо. Організаційні фактори безумовно визначаються державною політикою щодо енергозбереження, яка своєю чергою формується за обраною моделі економічного розвитку.

Таким чином, реалізація енергозбереження визначається багатьма факторами, що впливають як на ефективність енергозберігаючих заходів, так і на механізм їх впровадження.

На визначення теоретичного потенціалу енергозбереження, на нашу думку, впливають перші три групи факторів – технологічний, структурний та економічний відповідно до рівнів управління економікою.

При визначенні методів оцінки теоретичного потенціалу енергозбереження проаналізовано термінологію щодо визначення теоретичного потенціалу енергозбереження (енергоощадності) за ДСТУ 24-20-94: "Теоретичний потенціал енергоощадності – це максимальна економія паливно-енергетичних ресурсів, яка може бути одержана внаслідок ліквідації всіх видів втрат енергії (оборотних втрат енергії) у національному господарстві".

Термін "оборотні втрати" не є вдалим, тому що в оборотних циклах (процесах) втрат немає, а оскільки реальний технологічний процес протікає у незворотному циклі, то існують неминучі та технічно усунені втрати. Тому при визначенні теоретичного потенціалу енергозбереження ми будемо порівнювати ідеальні процеси без втрат енергії з реальними, де існують лише неминучі втрати від незворотності процесів. Технічно усунені втрати розглядаються при визначенні технічно можливого та економічно доцільного потенціалів енергозбереження.

Виходячи з обраного визначення, для розрахунку неминучих втрат енергії розглянуто різні види енергетичних балансів і проаналізовано методи їх складання.

Рівняння енергетичного балансу складають згідно з першим законом термодинаміки – законом збереження енергії. Ліва частина його є сумою підведеної до системи енергії всіх видів, а права дорівнює сумі енергії, що віддана [1].

$$\sum Q_T + \sum Q_{ел} + \sum Q_c + \sum Q_{екз} = \sum Q_{п} + \sum Q_{від_i} + \sum Q_{енд} + \sum \Delta Q, \quad (1)$$

де Q_T – тепло від спалювання палива, кДж; $Q_{ел}$ – тепло, що є еквівалентним до підведеної до процесу електричної або механічної енергії, кДж; Q_c – фізичне тепло вихідної сировини, палива, дуття та ін. матеріалів, кДж; $Q_{екз}$, $Q_{енд}$ – тепло екзо- і ендотермічних реакцій, відповідно, кДж; $Q_{п}$, $Q_{від}$ – фізичне тепло продуктів і відходів, кДж; ΔQ – втрати тепла зовнішніми поверхнями агрегата, випромінюванням тощо.

Складання енергобалансу технічних систем, в яких співіснують різні види енергії, потребує приведення всіх видів енергії до єдиного. На практиці всі види енергії, що беруть участь у системі, за відповідними еквівалентами переводять у тепло і зводять баланс, тому такі баланси називають тепловими. В теплових балансах не враховується хімічна енергія сировини та палива, а включається лише сумарне тепло реакцій, що відбуваються в системі.

Однак енергобаланс, який складено лише на основі першого закону термодинаміки, не задовольняє всім сучасним вимогам практики, а саме: не враховує неоднакове перетворення різних видів енергії в роботу або які-небудь інші види; не дає можливості встановити місця та причини виникнення всіх видів втрат енергії; визначити їх якісну оцінку для усунення або скорочення обсягів втрат. Тобто аналіз таких балансів не може дати відповіді на питання, які з втрат процесу, що досліджується, є незворотними, а які можливо усунути.

Складання повного енергетичного балансу, до якого крім теплового ефекту реакції додано ще й хімічну енергію палива, сировини, продуктів і відходів, має загальний вигляд [1]:

$$\sum E' + \sum E'_M + \sum I'_x + \sum I'_q = \sum E'' + \sum E''_M + \sum I''_x + \sum I''_q. \quad (2)$$

де E' , E'' – підведена та відведена електрична енергія, кДж; E'_M , E''_M – підведена та відведена механічна енергія, кДж; I'_x , I''_x – підведена та відведена хімічна енергія (ентальпія) сировини, палива, продуктів і відходів, кДж; I'_q , I''_q – підведене та відведене тепло (ентальпія), що вноситься до системи з потоком сировини, палива, дуття, продуктів і відходів, передане системі, а також відведене від неї випромінюванням або теплопередачею, кДж.

Також не має можливості виділити з усіх втрат ту частину, що визначає неминучі втрати та не враховує неоднакове перетворення різних видів енергії в роботу, не встановлює місця та причини виникнення всіх видів втрат енергії, що не дозволяє знайти засоби їх усунення або скорочення. Оскільки в енергетичному балансі дотримується рівність лівої та правої частин, про енергетичні втрати кажуть умовно, маючи на увазі ту частину енергії, яку не було корисно використано в процесі.

В літературних джерелах [1, 2] існують пропозиції додавати до енергобалансу баланс ексергії (властивості термодинамічної системи або потоку енергії, що визначається кількістю роботи, яка може бути отримана зовнішнім приймачем енергії за оборотної їхньої взаємодії з довкіллям до встановлення повної рівноваги). Ексергія системи, що взаємодіє з довкіллям, залишається незмінною за оборотного проведення всіх процесів як усередині її, так і в разі взаємодії із середовищем, і зменшується, якщо кожний із цих процесів проходить незворотно.

Таким чином, балансові рівняння системи для ексергії Ex є універсальними і повністю придатними для будь-яких термодинамічних систем неза-

лежно від видів енергії, що беруть участь у процесі. При цьому завжди виконується нерівність [2]:

$$\sum Ex' \geq (\sum Ex'' + \Delta Ex) \quad (3)$$

або

$$\sum D = \sum Ex' - (\sum Ex'' + \Delta Ex) \quad (4)$$

де Ex , Ex'' – підведені та відведені до системи потоки ексергії; D – втрати ексергії від незворотності процесів у системі; ΔEx – збільшення ексергії системи від початкової до кінцевої точок процесу. Для стаціонарного процесу $\Delta Ex = 0$ та $\sum D = \sum Ex' - \sum Ex''$.

На відміну від рівняння, що відображає енергетичний баланс, вирази, які розкривають ексергетичний баланс системи, спираються як на перший, так і на другий початки термодинаміки. Ексергетичний баланс у всіх випадках показує величину втрат від незворотності системи.

Існує ще один підхід, де баланс ексергії не просто додається, а входить до повного енергетичного балансу, в якому потоки енергії всіх форм можуть бути представлені у вигляді суми ексергії та енергії. Аналіз повного енергетичного балансу, представлений у такому вигляді, також дозволяє встановити місце та причини виникнення найбільших втрат енергії всіх видів [1]:

$$\begin{aligned} \sum E' + \sum E'_m + \sum (Ex'_x + B'_x) + \sum (Ex'_q + B'_q) &= \sum E'' + \\ + \sum E''_m + \sum (Ex''_x + B''_x) + \sum (Ex''_q + B''_q) \end{aligned} \quad (5)$$

де E'' , E' – підведена та відведена електрична енергія, кДж; E'_m , E''_m – підведена та відведена механічна енергія кДж; Ex'_x , Ex''_x – підведена та відведена ексергія хімічних речовин, сировини, палива, продуктів і відходів, кДж; B'_x , B''_x – підведена та відведена енергія хімічних речовин, палива, сировини, продуктів і відходів, кДж; Ex'_q , Ex''_q – підведена та відведена ексергія теплового потоку, що вноситься в систему з потоком сировини, палива, дуття, енергоносіїв (пари), продуктів і відходів, передана системі, а також відведена від неї випромінюванням або теплопередачею, кДж; B'_q , B''_q – підведена та відведена енергія теплового потоку, кДж.

При виборі методу розрахунку, ступеня деталізації та точності енергетичного балансу необхідно враховувати мету, якої потрібно досягти, та завдання, які потрібно вирішити за його допомоги. Деталізація балансу може бути доведена до кожного технологічного процесу, кожного енергоємного агрегата. Визначення ККД технологічних процесів із балансових рівнянь енергії + ексергії або повного енергетичного балансу (5) дозволяє

перейти до визначення теоретичного потенціалу енергозбереження.

Загальний алгоритм визначення теоретичного потенціалу енергозбереження на рівні виробництва (технології) – $P_e^{теор}$ – має вигляд:

$$P_e^{теор} = \sum_{j=1}^J (\eta^{ід} - \eta^{ex}) u_j W^0_{j під} \quad (6)$$

Для окремих технологічних процесів, що здійснюються в термодинамічних циклах, можна скласти більш детальні алгоритми розрахунку $P_e^{теор}$. Так, для прямого циклу з підведеною ексергією теплоти можна записати:

$$P_{k_3}^{теор} = \sum_{k_3}^{K_3} \sum_j^J \left(1 - \frac{L_{k_3}}{Ex_{qjk_3}^{під}}\right) u_j W^0_{k_3j під} \quad (7)$$

де K_3 – рівень управління економікою, що відповідає технологічному процесу; J – види використаних енергетичних ресурсів; L_{k_3} – корисна робота, яку виконано в технологічному процесі; $Ex_{qjk_3}^{під}$ – підведена ексергія теплоти; u_j – еквівалент перерахунку j -ого виду енергоресурсу в джоулі теплоенергії; $W^0_{k_3j під}$ – витрати підведеного j -ого виду енергоресурсу до k -ої енергоспоживаючої системи в базовому році.

Якщо у процесі підведеним теплом є ексергія підведеного палива, то

$$Ex_{qjk_3}^{під} = Ex_{nj k_3}$$

де $Ex_{nj k_3}$ – підведена ексергія палива.

У зворотних циклах (при $T < T_0$ – холодильна установка та при $T > T_0$ – тепловий насос) ефектом процесу є не робота, а отримане тепло: Ex_{q4k_3} або $Ex_{qjk_3}^{від}$, а підведеною може бути як робота L_{k_3} , так і тепло [2]:

Холодильна установка компресійного типу:

$$P_{k_3}^{теор} = \sum_{k_3}^{K_3} \sum_j^J \left(1 - \frac{Ex_{q4k_3}}{L_{k_3}}\right) u_j W^0_{k_3j під} ; \quad (8)$$

– абсорбційного типу:

$$P_{k_3}^{теор} = \sum_{k_3}^{K_3} \sum_j^J \left(1 - \frac{Ex_{q4k_3}}{Ex_{qjk_3}^{під}}\right) u_j W^0_{k_3j під} \cdot \quad (9)$$

Теплонасосна установка компресійного типу:

$$P_{k_3}^{теор} = \sum_{k_3}^{K_3} \sum_j^J \left(1 - \frac{Ex_{qjk_3}^{від}}{L_{k_3}}\right) u_j W^0_{k_3j під} ; \quad (10)$$

– абсорбційного типу:

$$P_{k_3}^{\text{теор}} = \sum_{k_3}^{K_3} \sum_j^J \left(1 - \frac{Ex_{qjk_3}^{\text{від}}}{Ex_{qjk_3}^{\text{під}}}\right) u_j W_{k_3,j}^0 \text{ під} \cdot \quad (11)$$

Для процесів з хімічними перетвореннями теоретичний потенціал визначається:

$$P_{k_3}^{\text{теор}} = \sum_{k_3}^{K_3} \sum_j^J \left(1 - \frac{\prod_{e_{k_3}}''}{\prod_{e_{k_3}}''}\right) u_j W_{k_3,j}^0 \text{ під} \cdot \quad (12)$$

де $\prod_{e_{k_3}}''$, $\prod_{e_{k_3}}'$ – ексергетична продуктивність системи відповідно на виході та вході.

При визначенні теоретичного потенціалу енергозбереження на рівні галузі розглядається пряме галузеве енергоспоживання без урахування витрат палива на перетворення в інші види енергії, використання його як сировини, а також втрат. Величина галузевого теоретичного потенціалу енергозбереження визначається сумою теоретичних потенціалів енергозбереження на рівні виробництва за всіма видами виробленої продукції:

$$P_{\Gamma}^{\text{теор}} = \sum P_{ei}^{\text{теор}}, \quad (13)$$

або

$$P_{ei}^{\text{теор}} = \sum P_{eim}^{\text{теор}}, \quad (14)$$

де $P_{eim}^{\text{теор}}$ – потенціал енергозбереження на рівні m -их технологічних процесів, з яких складається виробництво i -ої продукції.

Розраховується $P_{eim}^{\text{теор}}$ за формулою (6), а η_{ex} , що входить до формули (6), є ексергетичним ККД технологічного ланцюга виробництва продукції, який визначається за формулою:

$$\eta_{ex} = \eta_{ex m_1} \eta_{ex m_2} \eta_{ex m_3} \dots \eta_{ex m_n}, \quad (15)$$

де $\eta_{ex m_1}$, $\eta_{ex m_2}$, $\eta_{ex m_3}$, ..., $\eta_{ex m_n}$ – ексергетичний ККД технологічних агрегатів або процесів, що використовуються технологічному процесі або технологічному ланцюгу для виробництва продукції.

Визначити $P_{ei}^{\text{теор}}$ по всіх виробництвах продукції галузі іноді неможливо через їх велику кількість.

Узагальнена економіко-математична модель визначення теоретичного потенціалу енергозбереження на рівні галузі в t -ому році у k -ій енергоспоживаючій системі ($k_2 \in K_2$) – $P_{k_2}^{\text{теор}}$ має вигляд:

$$P_{k_2}^{\text{теор}} = \sum_{k_2}^{K_2} \sum_{k_3}^{K_3} \sum_{j=1}^J (\eta_{jk_3}^{\text{ід}} - \eta_{jk_3}^{\text{ex}}) u_j W_{k_3,j}^0 \text{ під} \cdot \quad (16)$$

Для визначення теоретичного потенціалу енергозбереження на рівні галузі можливо використовувати показники енергоемності валової доданої

вартості або випуску продукції. Величину теоретичного енергозаощадження пропонується визначати як різницю показника енергоемності в базовому році за умови завантаження виробничого обладнання на 100%, уникнення його простоїв; використання прогресивного технологічного обладнання з передовими технологіями; відсутності технічно усунених втрат матеріальних і енергетичних ресурсів та реального показника енергоемності валової доданої вартості (випуску продукції) в розрахунковому році за обсягів валової доданої вартості (валового випуску) у t -ому році.

Теоретичний потенціал енергозбереження на рівні галузі $P_{k_2}^{\text{теор}}$ пропонується визначати за формулою:

$$P_{k_2}^{\text{теор}} = (e_1^0 - e_2^t) V_t, \quad (17)$$

де e_1^0 – енергоемність валової доданої вартості (валового випуску) за умови завантаження виробничого обладнання майже на 100%, уникнення його простоювання, використання прогресивного технологічного обладнання з передовими технологіями, відсутності технічно усунених втрат матеріальних і енергетичних ресурсів; e_2^t – реальна енергоемність валової доданої вартості (валового випуску) галузі в t -ому році; V_t – валова додана вартість (валовий випуск) у t -ому році.

На рівні галузі можливо розглянути структурне енергозбереження – зменшення частки енергоемних технологій виробництва з подальшим їх повним виведенням з виробничого циклу та зниження енергоемності технологічних процесів шляхом їх модернізації.

Розрахунок теоретичного потенціалу енергозбереження на рівні країни можливо здійснити, насамперед, при підсумовуванні теоретичних потенціалів енергозбереження галузей. Проте розрахувати цей показник для всіх галузей економіки неможливо. Тож, якщо обирати цей шлях для визначення теоретичного потенціалу енергозбереження країни, то потрібно виділити групу енергоемних галузей, в яких можливо оцінити цей потенціал, а решту визначити за укрупненими показниками на основі методу експертних оцінок. При визначенні теоретичного потенціалу енергозбереження на рівні країни шляхом підсумовування галузевих слід розглядати пряме галузеве енергоспоживання без урахування витрат палива на перетворення в інші види енергії, використання його як сировини, а також втрат. Тоді узагальнена економіко-математична модель, що дозволяє визначити теоретичний потенціал енергозбереження на рівні країни в t -ому році у k -ій

енергоспоживаючій системі ($k_1 \in K1$) – $P_{k_1}^{\text{теор}}$ матиме вигляд:

$$P_{k_1}^{\text{теор}} = \sum_{k_1}^{K1} \sum_{k_2}^{K2} \sum_{k_3}^{K3} \sum_j^J (\eta_{j k_3}^{\text{лд}} - \eta_{j k_3}^{\text{ex}}) u_j W_{k_3 j}^{t0} \quad (18)$$

Окрім того, на рівні країни теоретичний потенціал енергозбереження рекомендуємо розраховувати за різницею енергоємності валового випуску продукції (ВВП) у базовому та розрахунковому роках при обмеженнях щодо базового року, які зумовлено тим, що за енергоємність ВВП у базовому році слід обрати енергоємність ВВП передової розвинутої країни, модель економічного розвитку якої є близькою або співпадає з моделлю України.

Якщо використати цей підхід для розрахунку теоретичного потенціалу енергозбереження на рівні країни – визначення через макроекономічні показники, а саме енергоємність валового внутрішнього продукту та валової доданої вартості, то можна скласти такий алгоритм:

– через енергоємність ВВП країни:

$$P_{k_1}^{\text{теор}} = \sum_{k_1}^{K1} (e_{\text{ВВП}_{k_1}}^0 - e_{\text{ВВП}_{k_1}}^t) V_{k_1}^t; \quad (19)$$

– через підсумовування галузевих теоретичних потенціалів енергозбереження, що розраховуються через енергоємність ВДВ:

$$P_{k_1}^{\text{теор}} = \sum_{k_1}^{K1} \sum_{k_2}^{K2} (e_{\text{ВДВ}_{k_2}}^0 - e_{\text{ВДВ}_{k_2}}^t) V_{k_2}^t; \quad (20)$$

– через підсумовування галузевих теоретичних потенціалів енергозбереження, що розраховуються через підсумовування теоретичних потенціалів енергозбереження на рівні технології, який оцінено через енергоємність товарної продукції, що виробляються в галузях:

$$P_{k_1}^{\text{теор}} = \sum_{k_1}^{K1} \sum_{k_2}^{K2} \sum_{k_3}^{K3} (e_{k_3}^0 - e_{k_3}^t) V_{k_3}^t. \quad (21)$$

Таким чином, до наукової новизни роботи слід віднести:

1. Визначення факторів, що впливають на оцінку величини теоретичного потенціалу енергозбереження.

2. Обґрунтування методів і розробку алгоритмів та моделі визначення теоретичного потенціалу енергозбереження на різних рівнях управління економікою: технологія (виробництво), галузь, країна.

1. В.С. Степанов. Анализ энергетического совершенства технологических процессов. – Новосибирск: СО "Наука", 1984. – 272 с.

2. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалец К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 286 с.