

*На макроекономічних даних 2001 р. для провідних держав світу показано вищу потужність дискримінації енергоефективності параметричного рубіжного підходу порівняно з непараметричним.*

© В.М. Горбачук, Г.О. Шулінок,  
А.А. Сирку, 2019

УДК 519.8

В.М. ГОРБАЧУК, Г.О. ШУЛІНОК, А.А. СИРКУ

## ДО ВИМІРЮВАННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЕРЖАВ

**Вступ.** Пропонується параметричний рубіжний підхід для оцінювання результату (performance) загальнооекономічної енергоефективності з точки зору виробництва, використовуючи функцію енерговідстані Шепарда (Shephard) для визначення індексу енергоефективності й застосовуючи метод стохастичного рубіжного аналізу для оцінювання такого індексу [1]. Цей підхід ілюструється на прикладі вибірки, що включає 21 державу Організації економічного співробітництва та розвитку (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD). При високих цінах енергії та громадському занепокоєнні проблемами глобального потепління і стійкого розвитку енергоефективність стає життєвою складовою енергетичної стратегії багатьох держав і регіонів. Авжеж, поліпшення енергоефективності часто визнавалося одним з найбільш економічних шляхів зниження викидів двоокису вуглецю, підвищення безпеки енергопостачання, покращення промислової конкурентоздатності. Тому зростає інтерес до розробки відповідних індикаторів результативності для моніторингу часових трендів енергоефективності у державі чи регіоні і для порівняльного аналізу результатів загальнооекономічної енергоефективності серед держав чи регіонів. Прийнята практика отримання загальнооекономічних індикаторів енергоефективності полягає в агрегуванні впливів змін енергоінтенсивності на рівні кінцевого використання енергії чи підсектора економіки, щоб дати комбінований індекс результату енергоефективності [2]. Основою цієї практики є метод аналізу декомпозиції індексу (index decomposition analysis, IDA).

IDA може використовуватися для того, щоб розкласти часову зміну енергоспоживання сектора на кілька наперед визначених ефектів, включаючи ефекти енергоінтенсивності. Оснований на IDA підхід прийнятий великою кількістю держав (зокрема, Канадою, Новою Зеландією, США), щоб відстежувати свої часові тренди загальноекономічної енергоефективності. Можна порівнювати головні риси існуючих основаних на IDA систем обліку енергоефективності.

Серед досліджень енергоефективності, основаних на інших підходах, можна виділити підхід аналізу охоплення даних (data envelopment analysis, DEA) для порівняння результатів енергоефективності різних держав чи регіонів з точки зору виробничої ефективності [3, 4]. DEA став обґрунтованим методом непараметричного рубіжного аналізу для оцінювання ефективності [5]. Цей метод поширений у дослідженнях енергетики на довкілля [6]. Незважаючи на свої переваги, DEA є непараметричним підходом математичного програмування, що не бере до уваги статистичні шуми [7].

Щоб включити статистичні шуми в аналіз енергоефективності, дослідимо параметричний рубіжний підхід до вимірювання результатів енергоефективності на загальноекономічному рівні [8]. Цей підхід використовує функцію відстані Шепарда для визначення індексу енергоефективності й застосовує метод стохастичного рубіжного аналізу (stochastic frontier analysis, SFA) для оцінювання такого індексу. Теоретично SFA має спільні риси з регресійним аналізом, який є поширеним засобом для зіставлення (benchmarking) енергоефективності будівель. Якщо регресійний аналіз відбиває поведінку центральної тенденції для всіх спостережень, то SFA – рубіжну поведінку для найкращих за результатами статистичних спостережень

SFA застосовувався для зіставлення енергоефективності будівель і промислових заводів. Наприклад, модель SFA Кобба – Дугласа (Cobb – Douglas) використовувалася для аналізу енергоефективності промисловості Іспанії [9]. SFA застосовувався для вивчення динаміки енергоефективності у розрізі (cross-section) комерційних будівель Канади. Запропоновано використання стохастичного рубіжного регресійного аналізу для оцінювання ефективності енерговикористання на рівні заводів. Дана робота зосереджується на вимірюванні енергоефективності на макрорівні та пропонує параметричний рубіжний підхід для оцінювання результату загальноекономічної енергоефективності.

Нехай існує вибірка держав чи регіонів, результати загальноекономічної енергоефективності яких мають порівнюватися. У неокласичній односекторній моделі агрегованого виробництва капітал (capital)  $K$ , праця (labor)  $L$ , енергія (energy)  $E$  вважаються входами, а валовий внутрішній продукт  $Y$  вважається виходом. Подібна модель широко використовувалася для вивчення причинно-наслідкових взаємозв'язків між енергоспоживанням й економічним зростанням [10], а також між споживанням електрики й економічним зростанням [11]. Методологічно технологія (technology)  $T$  виробництва означає множину комбінацій  $(K_i, L_i, E_i)$ , кожній з яких відповідає певний рівень  $Y_i$ .  $T$  часто зображається графічно, вказуючи всі допустимі вектори входів і виходів. У теорії

виробництва множина  $T$  часто вважається замкнутою й обмеженою. Крім того, часто припускають, що входи і вихід мають властивість строгої наявності у розпорядженні (strong disposability):

$$\{ \text{вектор } (K_1, L_1, E_1) \text{ не менший вектора } (K_2, L_2, E_2) \} \wedge \{ Y_1 \leq Y_2 \} \Rightarrow \\ \Rightarrow \{ (K_1, L_1, E_1, Y_1) \in T \}.$$

Для вимірювання енергоефективності з точки зору ефективності виробництва визначимо функцію відстані (distance) Шепарда підвектора входу для енерговикористання (функцію енерговідстані Шепарда)

$$D_E(K, L, E, Y) = \sup \left\{ \alpha : \left( K, L, \frac{E}{\alpha} \right) \in T \right\}, \quad (1)$$

яка є лінійно однорідною за  $E$ : якщо  $E$  зростає у певній пропорції, то значення цієї функції теж зростатиме у такій пропорції. Ця властивість функції відповідає енергоінтенсивності, що на макрорівні часто визначається як споживання енергії на одиницю валового внутрішнього продукту (ВВП).

Чим більше значення функції (1), тим менше використання енергії при збереженні технології виробництва. Тому відношення  $\frac{E}{D_E(K, L, E, Y)}$  відбиває

гіпотетичне енерговикористання держави, коли вона стає енергоефективною, а відношення  $[D_E(K, L, E, Y)]^{-1}$  гіпотетичного енерговикористання до фактичного енерговикористання можна вважати індексом загальноекономічної енергоефективності (economy-wide energy efficiency index, EEI).

За визначенням, значення EEI рівне 1, якщо в координатах  $Y(E)$  дана держава має значення  $\bar{E}$  та  $\bar{Y}$  на рубежі найкращої практики, бо інакше значення EEI менше 1. При фіксованих  $K = \bar{K}$ ,  $L = \bar{L}$  величина

$$D_E(\bar{K}, \bar{L}, E, Y(\bar{K}, \bar{L}, E)) = \sup \left\{ \alpha : \left( \bar{K}, \bar{L}, \frac{E}{\alpha} \right) \in T \right\}$$

є відношенням  $\frac{E}{\bar{E}}$ , де  $\bar{Y} \equiv Y(\bar{K}, \bar{L}, \bar{E}) = Y(\bar{K}, \bar{L}, E)$ . Емпірично функцію енерговідстані Шепарда можна обчислювати параметрично чи непараметрично.

При непараметричному обчисленні спочатку на основі вибірки спостережень будується кусково-лінійний ізоквант виробництва, а потім обчислюється функція енерговідстані Шепарда шляхом розв'язання послідовності моделей DEA. Багато досліджень застосовувало непараметричні моделі DEA для вимірювання результатів енергоефективності. Використання DEA для вимірювання результатів енергоефективності при спільному виробництві бажаних і небажаних випусків стає поширеним.

Однак при параметричному обчисленні небагато досліджень застосовувало моделі оцінювання енергоефективності з точки зору ефективності виробництва.

Наприклад, застосовувався SFA для оцінки енергоефективності у комерційних спорудах Канади. Пізніше використовувалася стохастична рубіжна регресія для розробки засобу статистичного зіставлення, відомого як індекс енергорезультативності (energy performance index, EPI). Цей індекс був прийнятий програмою Energy Star Агентства США захисту довкілля (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) для оцінки енергоефективності промислових заводів. У роботі [2] запропоновано використовувати SFA для дослідження результатів загальноекономічної енергоефективності.

Корисне для вимірювання результату загальноекономічної енергоефективності поняття  $EEI = [D_E(K, L, E, Y)]^{-1}$  можна обчислювати чи оцінювати за допомогою SFA. Нехай державі чи регіону  $i = 1, 2, \dots, n$  відповідає вектор входу і виходу  $(K_i, L_i, E_i, Y_i)$ , якому, в свою чергу, відповідає функція енерговідстані Шепарда  $D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i)$ . Щоб оцінювати цю функцію за допомогою SFA, треба вказати її функціональну форму. В економетриці використовують різні функціональні форми, наприклад, форму Кобба – Дугласа (Cobb – Douglas), трансцендентальної логарифмічної форми (транслог-форми) [12], квадратичної форми. Використання простої функціональної форми Кобба–Дугласа дозволяє виразити логарифм згаданої функції як лінійну функцію логарифмів капіталу, праці, енергії та ВВП [9]:

$$\ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln E_i + \beta_Y \ln Y_i + v_i,$$

де  $v_i$  – випадкова змінна, що враховує статистичний шум і похибки наближення (нормальна випадкова змінна з нульовим середнім). Оскільки згадана функція лінійно однорідна за  $E$ , то

$$D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = E_i D_E(K_i, L_i, 1, Y_i),$$

$$\beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln E_i + \beta_Y \ln Y_i + v_i =$$

$$= \ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = \ln E_i + \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln 1 + \beta_Y \ln Y_i + v_i,$$

$$\beta_E \ln E_i = \ln E_i, \quad \beta_E = 1,$$

$$\ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \ln E_i + \beta_Y \ln Y_i + v_i,$$

$$-\ln E_i = \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_Y \ln Y_i + v_i - \ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i),$$

$$\ln[(E_i)^{-1}] = \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_Y \ln Y_i + v_i - u_i, \quad (2)$$

де  $u_i = \ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = -\ln(EEI_i)$  – невід’ємна змінна, пов’язана з енергетичною неефективністю. Отримане рівняння (2) – це фактично вихід-орієнтована модель SFA, де вихід – це  $(E_i)^{-1}$ . Оскільки  $u_i$  стосується енерговикористання, то неявне припущення моделі (2) полягає у тому, що значення решти входів  $(K_i, L_i)$  перебувають на ефективних рівнях.

Крім того, використання функціональної транслог-форми дозволяє застосувати модель SFA для оцінювання згаданої функції:

$$\begin{aligned} \ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = & \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln E_i + \beta_Y \ln Y_i + \\ & + \beta_{KL} \ln K_i \ln L_i + \beta_{KE} \ln K_i \ln E_i + \beta_{KY} \ln K_i \ln Y_i + \beta_{LE} \ln L_i \ln E_i + \\ & + \beta_{LY} \ln L_i \ln Y_i + \beta_{EY} \ln E_i \ln Y_i + v_i. \end{aligned}$$

Оскільки згадана функція (1) однорідна ступеня 1 за  $E$ , то

$$\begin{aligned} & \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln E_i + \beta_Y \ln Y_i + \\ & + \beta_{KL} \ln K_i \ln L_i + \beta_{KE} \ln K_i \ln E_i + \beta_{KY} \ln K_i \ln Y_i + \beta_{LE} \ln L_i \ln E_i + \\ & + \beta_{LY} \ln L_i \ln Y_i + \beta_{EY} \ln E_i \ln Y_i + v_i = \\ & = \ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = \ln E_i + \ln D_E(K_i, L_i, 1, Y_i) = \\ & = \ln E_i + \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln 1 + \beta_Y \ln Y_i + \\ & + \beta_{KL} \ln K_i \ln L_i + \beta_{KE} \ln K_i \ln 1 + \beta_{KY} \ln K_i \ln Y_i + \beta_{LE} \ln L_i \ln 1 + \\ & + \beta_{LY} \ln L_i \ln Y_i + \beta_{EY} \ln 1 \ln Y_i + v_i, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_E \ln E_i + \beta_{KE} \ln K_i \ln E_i + \beta_{LE} \ln L_i \ln E_i + \beta_{EY} \ln E_i \ln Y_i = \ln E_i, \\ \beta_{KE} \ln K_i + \beta_{LE} \ln L_i + \beta_{EY} \ln Y_i = 1 - \beta_E, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln D_E(K_i, L_i, E_i, Y_i) = & \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_E \ln E_i + \beta_Y \ln Y_i + \\ & + \ln E_i (\beta_{KE} \ln K_i + \beta_{LE} \ln L_i + \beta_{EY} \ln Y_i) + \\ & + \beta_{KL} \ln K_i \ln L_i + \beta_{LY} \ln L_i \ln Y_i + \beta_{KY} \ln K_i \ln Y_i + v_i, \\ \ln[(E_i)^{-1}] = & \beta_0 + \beta_K \ln K_i + \beta_L \ln L_i + \beta_Y \ln Y_i + \\ & + \beta_{KL} \ln K_i \ln L_i + \beta_{LY} \ln L_i \ln Y_i + \beta_{KY} \ln K_i \ln Y_i + v_i - u_i. \end{aligned}$$

Оскільки отримане рівняння містить більше параметрів, ніж рівняння (2), то може давати краще наближення для  $(E_i)^{-1}$ .

Якщо індекс  $i$  держави в рівнянні (2) вказує на дані перерізу, то індекс  $t$  часу в цьому рівнянні вказуватиме на панельні дані. Тоді можна скористатися методом максимальної правдоподібності для оцінювання параметрів цього рівняння при певних припущеннях стосовно розподілів  $v_i$  та  $u_i$ . При цьому також можна оцінити компонент  $\hat{u}_i$  енергетичної неефективності держави чи регіону  $i$ . Одночасне оцінювання виробничого рубежу і технічної неефективності, властивої державі чи регіону, можна виконувати за допомогою відомого програмного забезпечення FRONTIER 4.1 [1]. Простим альтернативним індексом загальнооекономічної енергоефективності є  $\exp(-\hat{u}_i)$ .

Порівняємо застосування підходів SFA та DEA на прикладі даних 2001 р. для 21 держави OECD. Використовувалися дані про робочу силу (тис. осіб) і ВВП (млрд. дол. США 2000 р. за паритетом купівельної спроможності), основні фонди як добуток ВВП на відповідну частку ВВП, енергоспоживання (квадрлн., британська тепла одиниця (British thermal unit (Btu))).

Застосування підходу SFA вимагає певних припущень про розподіли випадкових змінних  $v_i$  та  $u_i$ . Звичайним припущенням є те, що  $v_i$  – незалежно й однаково розподілені нормальні випадкові змінні з нульовими середніми. Часто припускають, що змінні  $u_i$  – незалежно й однаково розподілені напівнормальні випадкові змінні з постійним параметром масштабу. Припущення про напівнормальний розподіл можна замінити припущенням про усічений (truncated) нормальний, експоненційний чи гама-розподіл. Вибір припущень залежить від обчислювальних і теоретичних характеристик. Використаємо припущення про напівнормальний та усічений нормальний розподіли  $u_i$ . Оскільки всі 21 держав можна розрізнити за допомогою рейтингів значень EEI, отриманих з моделей SFA при обох припущеннях про розподіл  $u_i$ , то потужність дискримінації моделей SFA досить висока: наприклад, при обох припущеннях Італія, Великобританія, Німеччина, Франція, Нідерланди, Австралія, США, Норвегія, Канада (серед яких 6 держав належать до G7) мають рейтинги 1, 8, 11, 12, 13, 15, 19, 20, 21 відповідно. Підхід SFA допускає, що значення EEI даної держави при різних припущеннях про розподіл  $u_i$  – різний.

Порівнюємо ці результати підходу SFA з результатами непараметричного підходу DEA. Оскільки технологія виробництва може виявляти постійні віддачі від масштабу (constant returns to scale, CRS) та змінні віддачі від масштабу (or variable returns to scale, VRS), то слід обчислювати значення EEI як в моделі CRS DEA мінімізації  $\theta$  при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j K_j \leq K_i, \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j L_j \leq L_i, \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j E_j \leq \theta E_i, \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j \geq Y_i, \quad (3)$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

так і в моделі VRS DEA мінімізації  $\theta$  при обмеженні (3) й обмеженні опуклості

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Мінімальній величині  $\theta$  відповідатиме значення  $EEI_i$ . В обох моделях DEA є множинні нев'язки (slacks) за входами і виходом, але тільки нев'язка за входом енергії використовується для обчислення EEI. Водночас модель (2) SFA має лише одну нев'язку входом енергії, неявно припускаючи, що значення решти входів ( $K_i$ ,  $L_i$ ) перебувають на ефективних рівнях. Значення EEI в моделі CRS DEA не більші, ніж в моделі VRS DEA; Італія, Ірландія, Норвегія мають рейтинги 1, 1, 1 відповідно в обох моделях, а Великобританія, Японія, США мають рейтинги 1, 1, 1 відповідно лише в моделі VRS DEA.

**Висновок.** Параметричний рубіжний підхід має вищу потужність дискримінації для вимірювання результату енергоефективності порівняно з непараметричними рубіжними підходами.

*В.М. Горбачук, А.Г. Шулинок, А.А. Сырку*

#### К ИЗМЕРЕНИЮ ОБЩЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОСУДАРСТВ

На макроэкономических данных 2001 г. для ведущих государств мира показано более высокую мощность дискриминации энергоеффективности параметрического рубежного подхода по сравнению с непараметрическим.

*V.M. Gorbachuk, A.G. Shulinok, A.A. Syrku*

#### TO MEASURING ECONOMY-WIDE ENERGY EFFICIENCY OF COUNTRIES

Based on the macroeconomic data of 2001 for leading countries in the world, higher discriminating power of the parametric frontier approach relative to the nonparametric approach is shown.

#### Список літератури

1. Zhou P., Ang B.W., Zhou D.Q. Measuring economy-wide efficiency performance: a parametric frontier approach. *Applied energy*. 2012. 90. P. 196 – 200.
2. Ang B.W. Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: from energy-GDP ratio to composite efficiency index. *Energy policy*. 2006. 34. P. 574 – 582.
3. Горбачук В.М. Енерговитрати галузей землекористування України, Білорусі, Молдови, Польщі, Румунії, Словаччини, Угорщини у 2006 – 2009 рр. *Розвиток бухгалтерського обліку, контролю та аналізу у сучасних концепціях управління*. Сімферополь: Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського; ДІАЙП, 2013. С. 211 – 213.
4. Горбачук В.М. Аналіз енергоспоживання галузей землекористування України і суміжних країн у 2006 – 2009 рр. *Культура народів Причорномор'я*. 2013. № 256. С. 92 – 96.
5. Горбачук В.М., Гаркуша Н.І. Вимірювання ефективності методами математичного програмування. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2005. № 3. С. 251 – 255.
6. Горбачук В.М., Любич О.О. Соціально-економічний розвиток ХХ сторіччя: цілі, моделі, дані, стратегії, міри ефективності. *Моделювання та інформатизація соціально-економічного розвитку України*. 2010. Вип. 11. С. 3 – 27.
7. Горбачук В.М., Сырку А.А., Сулейманов С.-Б. Модели анализу охоплення нестандартних даних. *Компьютерная математика*. 2017. № 1. С. 63 – 72.
8. Горбачук В.М., Сырку А.А., Сулейманов С.-Б. Основи аналізу охоплення даних. *Вісник Одеського національного університету. Економіка*. 2017. Т. 22. Вип. 1(54). С. 178 – 182.
9. Feijoo M.L., Franco J.F., Hernandez J.M. Global warming and the energy efficiency of Spanish industry. *Energy economics*. 2002. 24. P. 405 – 423.
10. Ozturk I. A literature survey on energy-growth nexus. *Energy policy*. 2010. 38. P. 340 – 349.
11. Payne J.E. A survey of the electricity consumption-growth literature. *Applied energy*. 2010. 87. P. 723 – 731.
12. Горбачук В.М., Пепеляев В.А. Макромодель енергетики і економічного росту. *Стохастическое программирование и его приложения в энергетике*. Иркутск: ИСЭ СО РАН, 2012. С. 278 – 306.

Одержано 04.03.2019