

Р.З.Подолець
канд. техн. наук, с.н.с.

О.А.Дячук
канд. екон. наук,

М.Г.Чепелєв

ДУ "Інститут економіки та прогнозування НАНУ"

ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

Вступ

В Україні енергетична політика виступає вагомим фактором розвитку економіки, одночасно створюючи значні загрози та уособлюючи ресурсний потенціал покращення ситуації. При цьому особливість енергетичного сектору полягає в комплексності впливу на всі основні групи суб'єктів економічної діяльності, який одночасно проявляється в соціальних, економічних та екологічних аспектах.

Так енергоносії належать до товарів першої необхідності, займаючи в середньому 8,9% споживчого кошика вітчизняних домогосподарств [1, С. 181-183], виступають ключовими ресурсами при виробництві багатьох видів продукції — на них припадає 22,5% всього проміжного споживання [2, С. 67] та посідають провідне місце в структурі зовнішньої торгівлі України: за січень-листопад 2013 р. 27% всієї імпортованої продукції становили паливно-енергетичні ресурси [3]. Не менш суттєвий вплив енергетичного сектору і на стан навколишнього середовища: щороку його підприємства викидають понад 300 млн тонн парникових газів (ПГ) в еквіваленті CO₂, що складає 77% загальної емісії ПГ в Україні [4, С. 71]. Враховуючи, що кожна тонна викидів діоксиду вуглецю наносить збитки на суму від \$7 до \$150 [5, Р. 69], економічна шкода від емісії цієї речовини (262 млн тонн в 2011 р.) становить від \$1,8 млрд. до \$39,3 млрд.

Така багатогранність та мультиагентний характер соціальних, економічних та екологічних наслідків розвитку національної енергетичної системи зумовлює актуальність розробки та використання комплексного модельного інструментарію, який би з певним рівнем абстракції враховував структурну складність об'єкту моделювання та взаємозв'язки між його ієрархічними рівнями.

Теоретичні аспекти моделювання енергетичних систем

Хоча з технічної точки зору функціонування енергетичних систем і відбувається за фізичними, детермінованими законами, більшість процесів, що становлять інтерес для цієї роботи, відбуваються в економічній площині під дією соціальних законів. Тому поняття "енергетична система країни", яке буде нами використовуватися, у цьому контексті є більш економічним, ніж технічним, і по аналогії із англійською термінологією є ширшим від загальноживаних "енергетична галузь", "паливно-енергетичний комплекс" або "енергетичний сектор", оскільки охоплює весь комплекс економіко-господарських відносин, пов'язаних з оборотом енергоносіїв.

Галузі паливно-енергетичного комплексу забезпечують видобуток енергоресурсів, їх переробку, транспортування та постачання енергії у зручних для споживання формах. В інших секторах економіки різні форми енергії у вигляді енергетичних послуг використовуються для задоволення енергетичних попитів. Структура цих попитів є

різною і залежить від характеру потреб кожної категорії споживачів: перевезення, зберігання, виробництво продукції, освітлення, охолодження, житлові умови, приготування їжі тощо. Метою функціонування енергетичної системи, таким чином, є задоволення попиту на енергетичні послуги, або енергетичного попиту.

На рис. 1 наведено приклад енергетичної системи, де потоки енергоресурсів за декілька послідовних етапів проходять трансформацію від своєї первинної форми до втілення у кінцевій продукції або послугі.

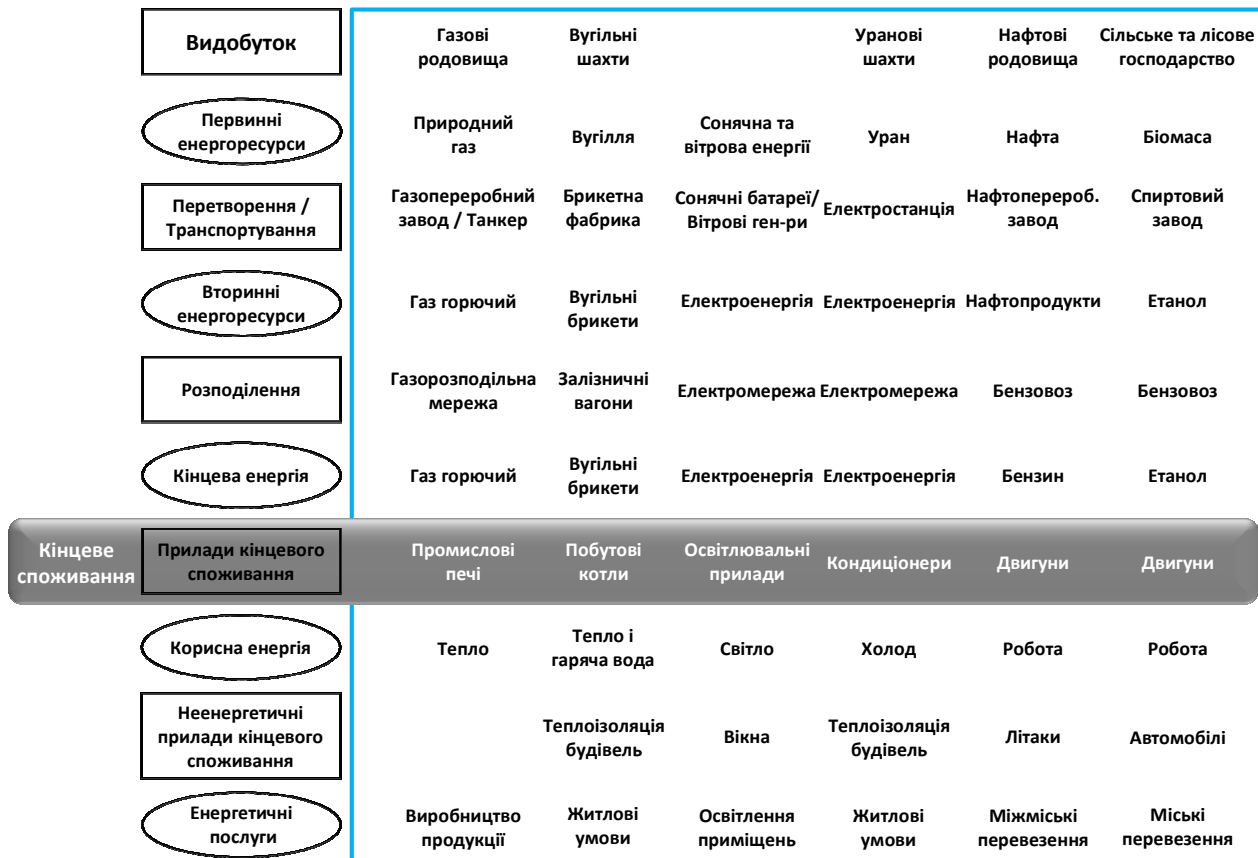


Рис. 1. Блок-схема енергетичної системи

Джерело: розроблено авторами

На відміну від моделей керованих (технічних) систем, результати моделювання енергетичної системи не можуть бути перевірені за допомогою фізичних експериментів, а побудова точного довгострокового прогнозу практично не можлива. Випадкові чинники розвитку енергосистем в значній мірі спотворюють результати, отримані на базі детермінованих моделей. Навіть калібрування за базовим роком не гарантує достовірність результатів моделювання на великому проміжку часу. Отримані таким чином результати по суті є проєкціями множини варіантів "що буде, якщо ...", а не безпосередньо прогнозами розвитку. Слід враховувати, що за будь-якої складності і повноти відображених взаємозв'язків, моделі залишатимуться лише абстрактним, спрощеним і формалізованим описом реальних об'єктів. Тому експериментальні дослідження, характерні для технічних систем, для енергетичних систем країн проводяться у вигляді сценарного аналізу, де кожен зі сценаріїв містить набір припущень щодо екзогенних параметрів моделі.

Оскільки розвиток енергетичної системи в значній мірі визначається станом зовнішнього середовища (економічної системи), частина параметрів моделі буде залишатися екзогенною, тобто напряду задаватися дослідником. Залежно від границь системи одні й ті ж змінні можуть бути як екзогенними, так і ендегенними, оскільки при розширенні границь системи параметри, що задавалися дослідником, можуть бути включені до розрахункового алгоритму як шукані змінні. Наприклад, при чітко

визначених обсягах попиту на енергетичні послуги розв'язком задачі буде оптимальна за встановленим критерієм структура енергоресурсів для покриття цього попиту. При формулюванні в моделі макроекономічних залежностей та визначенні правил формування енергетичного попиту, його обсяги стануть ендогенними змінними і будуть розраховані моделлю з огляду на оптимальний стан всієї системи. Більш того, характер ендогенності чи екзогенності параметрів часто залежить від способу побудови моделі, зокрема методів її замикання. Наприклад, в запропонованій авторами роботи [6] обчислюваній моделі загальної рівноваги (ОМЗР) дослідник сам визначає змінні величини яких покладаються фіксованими, а яких — знаходяться в результаті розрахунків.

Для визначення рівня керованості енергетичної системи та можливостей впливу на неї, і відповідно — розуміння причинно-наслідкових зв'язків при аналізі модельних розрахунків варто розрізняти керовані та некеровані екзогенні змінні. Так, облікова ставка, тарифи на енергетичні ресурси та послуги або норми викидів регулюються відповідними державними органами, а їхні сценарні значення можуть бути чітко обґрунтовані. На відміну від них, обсяги підтверджених запасів викопних видів палива або потенціал альтернативних джерел енергії, термічний ККД електростанцій або вплив парникових газів на навколишнє середовище не можуть бути "нормативно" встановлені. Динаміку зміни цих параметрів можна оцінити лише експертно. Таким чином, рівень керованості енергетичної системи обумовлений кількістю і силою зв'язків між ендогенними та керованими екзогенними змінними.

Одним з найскладніших завдань при моделюванні енергетичної системи є оцінка величини екзогенних параметрів, що визначатимуть технологічну структуру енергетичного сектору. У макроекономічних моделях основні групи технологій представлені виробничими функціями, проте у моделях виробничого типу, якою є модель енергетичної системи, кожна група технологій характеризується конкретними технічними та вартісними параметрами, зокрема, терміном експлуатації, ККД, потужністю, постійними і змінними витратами тощо. Зроблені припущення щодо зміни цих показників можуть суттєво вплинути на набір задіяних в оптимальному розв'язку технологій та інтенсивність їх використання. Між тим, лише удосконалення параметрів технологій не може забезпечити їх реальне впровадження — для цього модельні сценарії повинні також включати відповідні припущення щодо наявності інвестиційних ресурсів, податкової і тарифної політики, державних дотацій тощо.

В процесі моделювання енергетичних систем також виникає задача оцінки майбутнього попиту на енергію за категоріями споживачів. Такий прогноз може бути складений на основі регресійного аналізу ретроспективних даних та визначення залежностей між попитом і його "керуючим параметром" (КП). В якості керуючого параметру, зокрема, обирають ВВП, додану вартість, обсяги виробництва промислової продукції, кількість і доходи населення, обсяги житлового фонду та інші макропоказники. Значення попиту розраховується за формулою:

$$D = КП^{\sigma_{КП}} \times P^{\sigma_P},$$

де D — величина попиту, $\sigma_{КП}$ — еластичність керуючого параметру, P — ціна одиниці продукції, σ_P — цінова еластичність. В наведеній формулі керуючий параметр (КП) є некерованою екзогенною змінною, а ціна енергії — керованою, тому попит на енергію через цінову еластичність є "частково керованою" змінною. Особливість такого способу обрахунку попиту полягає в тому, що коректною є лише оцінка попиту на корисну енергію або енергетичну послугу (рис. 1), а, введення в модель енергетичної системи попиту на первинну або кінцеву енергію є некоректним саме по собі, оскільки в такому разі первинна економічна задача втратить свій сенс і перетвориться на звичайну задачу транспорту.

При побудові енерго-економічних моделей, які описують економіку країни як замкнуту цілісну систему, основна складність полягає у специфікації виду виробничої функції та оцінці величини її параметрів. При цьому найбільш критичним виступає

оцінка значень еластичностей заміщення (трансформації), які показують як будуть змінюватись відносні кількості споживання товарів при зміні відносних цін цих товарів. Величини еластичностей можуть суттєво впливати на результати розрахунків і навіть порушувати порядок пріоритетності досліджуваних сценаріїв [7, С. 73]. При цьому провести якісну оцінку цих параметрів за емпіричними даними майже не можливо, а якщо і вдається, то для дуже обмеженої множини випадків. Відтак найбільш доцільним варіантом представляється проведення ґрунтовного аналізу чутливості побудованої моделі для кожного визначеного сценарію.

Моделні сценарії, в яких досліджується стан системи при зміні керованих екзогенних змінних, називають базовими сценаріями або сценаріями політики; до кожного базового сценарію можуть бути розроблені альтернативні сценарії, що міститимуть різні припущення щодо некерованих змінних. Загалом, послідовність кроків модельного експерименту є наступною:

- формулювання базового (найбільш імовірного або бажаного) варіанту розвитку енергетичної системи без принципової зміни умов її функціонування;
- аналіз траєкторій альтернативних варіантів розвитку енергосистеми за різних припущень щодо неконтрольованих екзогенних змінних; метою опрацювання альтернативних сценаріїв є проведення аналізу чутливості моделі до зроблених припущень для оцінки ефекту від невизначеності екзогенних змінних та встановлення найбільш вагомих факторів впливу на майбутній стан енергетичного сектору;
- внесення змін до альтернативних сценаріїв для спрямування траєкторії розвитку системи у бажаному напрямку та розробка на їх основі переліку відповідних регуляторних заходів (стратегій);
- вибір стратегій, що найчастіше дозволяли досягти бажаної мети (стійкі стратегії), а також розробка стратегій попередження відхилення розвитку системи від бажаної траєкторії (стратегії хеджування).

Основні методологічні підходи

Спектр використання економіко-математичних моделей в енергетиці є досить широким, як і сам термін енергетичне моделювання є доволі загальним. Найсуттєвіші розбіжності між моделями полягають у рівні деталізації енергетичних потоків та технологій, тому відповідно до об'єкта моделювання, розрізняють класи енерго-економічних моделей та безпосередньо моделей енергетичних систем. З певним припущенням, така класифікація енергетичних моделей відповідає так званим методологічним підходам top-down ("зверху-вниз") і bottom-up ("знизу-вгору"). Моделі енергетичних систем детально описують зв'язки всередині енергетичного сектору, дезагреговану номенклатуру енергоресурсів, повний набір технологій обробки та споживання енергії. В свою чергу, типова енерго-економічна модель розглядає повністю всю економіку країни, враховує основні міжгалузеві зв'язки, структуру проміжного та кінцевого споживання, дає можливість описувати поведінку багатьох економічних агентів, включаючи домашні господарства, підприємства та уряд. Водночас енергетичний сектор представлений у дещо спрощеному вигляді, як наслідок, такі моделі не надають можливість детально враховувати зміни технологій та вартості виробництва енергії в часі [8, С. 1]. В основі більшості енерго-економічних моделей (зокрема ОМЗР) лежить збалансований набір економічних даних, який описує основні вартісні та матеріальні потоки за певний період. Ця інформація виступає основним джерелом даних для оцінки значень екзогенних змінних моделі та реалізації процедури калібрування. При цьому побудова динамічних моделей, як правило, передбачає висування припущень щодо майбутніх змін обсягів використання факторів виробництва, відносних цін продукції, ефективності використання ресурсів в процесі виробництва та інших показників. Побудований базовий сценарій, який у випадку ОМЗР представляє собою набір положень рівноваги, можна верифікувати шляхом порівняння отриманих значень ендогенних показників та існуючих прогнозних даних. Альтернативні сценарії передбачають певні зміни в економічній системі, умови функціонування якої визначаються величинами екзогенних параметрів. Зміна значень цих параметрів призводить до порушення умов

рівноваги і змушує економічних агентів (домогосподарства, виробників, інвесторів, державу тощо) змінювати свою поведінку.

В процесі пошуку нових рівноважних станів використовуються припущення щодо рівності попиту та пропозиції продукції, доходів та витрат економічних агентів та відсутності надлишкового прибутку у виробників. При цьому виконуються умови одночасної максимізації прибутку виробників та корисності споживачів, а в більшості ОМЗР і фактично умови досконалої конкуренції.

Загалом, енерго-економічні моделі використовуються переважно для оцінки впливу енергетичної політики на економіку країни і навпаки [9].

В моделях енергетичних систем всі технології описуються набором параметрів, такими як ціна, експлуатаційні витрати, терміни експлуатації та окупності, доступність, ефективність та інші. Фактично технології представлені процесом трансформації енергоресурсу в продукт. Так, на вході процес когенерації отримує вугілля, а на виході виробляє електроенергію, тепло та викиди шкідливих речовин. Визначення цього методологічного підходу як "знизу-вверх" пояснюється тим, що остаточне рішення моделі приймається після аналізу економічних процесів на мікрорівні, іншими словами – технологічних змін на рівні кінцевих споживачів енергії. Такий підхід застосовують для визначення оптимальної стратегії забезпечення енергетичними послугами на національному та міжнародному рівнях. Завдяки особливостям топології, прикладна модель енергетичної системи може бути легко скоригована, тобто непередбачені наперед зміни у попиті та пропозиції енергії, або параметри нової технології можуть бути у будь-який час внесені до моделі. Щоправда, велика кількість технологій з унікальними технічними характеристиками вимагатиме їх уніфікації, тобто додаткового спрощення моделі. Крім того, деякі параметри, необхідні для перспективних розрахунків (наприклад, світові ціни на енергоресурси), точно оцінити доволі важко.

З розвитком інформаційних технологій принципові відмінності в описаних класах енергетичних моделей стають все менш очевидними. Так, в окремих прикладних енерго-економічних моделях (наприклад MEGRE [10] або SGM [11]) основні підгалузі енергетичного сектору (електроенергетика, нафтогазовий сектор) представлені в максимально дезагрегованому вигляді як по технологічній, так і товарній структурі. З іншого боку, деякі моделі енергетичних систем (такі як EFOM [12] та TIMES [13]) можуть враховувати вплив макроекономічних ефектів та ринкового середовища на стан енергосистеми. Наприклад, кінцевий попит на продукцію виробничих секторів в моделі TIMES залежить від величини цінової еластичності, тобто вплив зміни ціни на енергоресурси на стан економіки є кількісно вимірюваним. Більше того, останні розробки міжрегіональних моделей енергетичних систем дозволяють оцінити також вплив на міжнародну торгівлю, причому якщо в енерго-економічних моделях торгівля переважно представлена невеликою кількістю умовних агрегованих товарних груп, то в моделях енергетичних систем товарні потоки (включаючи різні схеми торгівлі) можуть бути представлені на найнижчому рівні агрегації.

Взаємозв'язок енерго-економічних моделей та моделей енергетичних систем

Найбільш поширеним методологічним підходом до побудови прогнозів енергетичного балансу є розробка оптимізаційної моделі енергетичної системи, а досвід аналогічних досліджень також показав доцільність використання алгоритму лінійного програмування, що дозволяє відносно доступно та точно відтворити структурні зміни в дезагрегованій моделі. Такий інструментарій дозволяє проводити комплексний аналіз постачання, переробки та споживання енергетичних ресурсів та досліджувати вплив технологічних та цінових чинників на структуру енергосистеми. Водночас, в моделях енергетичної системи досить важко враховувати повні витрати на впровадження нових технологій або зворотні економічні зв'язки, наприклад, такі, як вплив зростання вартості енергоресурсів на сукупний попит або структуру економіки. Відповідно, макроекономічні показники (ВВП, зайнятість) представлені в моделі екзогенними змінними. Тому при значних трансформаціях структури економіки неврахування макроекономічних та частини міжгалузевих взаємозв'язків може знизити реалістичність та повноту отриманих результатів моделювання. Для уникнення цього, моделі

енергетичної системи часто поєднують з bottom-up моделями з розширеним енергетичним сектором (енерго-економічні моделі).

Для врахування специфіки паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) в bottom-up моделях (зокрема ОМЗР) прийнято виділяти окремі групи енергетичних ресурсів і визначати міжгрупові еластичності заміщення. Наприклад, виробничу функцію з постійними еластичностями заміщення (ПЕЗ) для опису зв'язків між вхідними енергетичними ресурсами (E_{ij}), працею (L_j), капіталом (K_j) та випуском (Y_j) j -ї галузі в найпростішому вигляді можна записати як

$$Y_j = B_j \left(\tilde{\alpha}_{1j} E_{1j}^{\tilde{\rho}} + \dots + \tilde{\alpha}_{nj} E_{nj}^{\tilde{\rho}} + \tilde{\alpha}_j^K K_j^{\tilde{\rho}} + \tilde{\alpha}_j^L L_j^{\tilde{\rho}} \right)^{\frac{1}{\tilde{\rho}}},$$

де еластичність заміщення рівна $\tilde{\sigma} = 1/(1 - \tilde{\rho})$. Припускаючи, що еластичність заміщення між енергетичними ресурсами відрізняється від еластичності заміщення між працею та капіталом, функцію з ПЕЗ можна переписати у вигляді

$$Y_j = B_j \left(\beta_{1j} \left[\bar{\alpha}_{1j} E_{1j}^{\rho_1} + \dots + \bar{\alpha}_{nj} E_{nj}^{\rho_1} \right]^{\frac{\rho_3}{\rho_1}} + \beta_{2j} \left[\bar{\alpha}_j^K K_j^{\rho_2} + \bar{\alpha}_j^L L_j^{\rho_2} \right]^{\frac{\rho_3}{\rho_2}} \right)^{\frac{1}{\rho_3}},$$

де $\sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_{ij} = 1$, $\bar{\alpha}_{ij} \geq 0$, $\bar{\alpha}_j^K + \bar{\alpha}_j^L = 1$, $\bar{\alpha}_j^K \geq 0$, $\bar{\alpha}_j^L \geq 0$, $\beta_{1j} + \beta_{2j} = 1$, $\beta_{1j} \geq 0$, $\beta_{2j} \geq 0$.

Таким чином, в новій функції з ПЕЗ наявні три еластичності заміщення:

$\sigma_1 = 1/(1 - \rho_1)$ – еластичність заміщення між енергетичними ресурсами,

$\sigma_2 = 1/(1 - \rho_2)$ – еластичність заміщення між працею та капіталом,

$\sigma_3 = 1/(1 - \rho_3)$ – еластичність заміщення між енергетичними ресурсами та складовими валової доданої вартості (праця та капітал).

Загалом, при виборі структури блоків ОМЗР не існує єдиних правил чи загальних рекомендацій. З одного боку, чим більша розгалуженість структури, тим ширші можливості групування факторів виробництва та визначення специфічних еластичностей заміщення, з іншого, ускладнення структури не гарантує підвищення якості розрахунків, враховуючи, що величини еластичностей визначаються, як правило, експертно.

Підходи до інтеграції енерго-економічних моделей та моделей енергетичних систем умовно можна розділити на слабкі та сильні. При слабкому зв'язуванні фактично використовуються дві автономні моделі, результати розрахунків кожної з яких виступають вхідною інформацією для іншої моделі. Так для поєднання моделі енергетичної системи TIMES та ОМЗР GEM-E3 використовується така покрокова процедура, схематично зображена на рис. 2:

1. Задаються прогнози темпи приросту ВВП та обсягів кінцевого споживання, зміна кількості працюючих, ціни імпортованих енергетичних ресурсів, величини реальних відсоткових ставок.

2. Параметри (коефіцієнти технологічного прогресу при праці, капіталі, еластичності заміщення та трансформації) підбираються так, щоб відтворювати величини задані в пункті 1.

3. На базі розрахунків GEM-E3 (зокрема, за даними галузевих обсягів випуску та зміни цін на енергетичні ресурси) знаходиться попит на енергетичні ресурси за галузями (використовуються окремі формули перерахунку з врахуванням зміни обсягів випуску, споживання енергії за галузями в базовому році, значень цінових еластичностей та еластичностей за доходами, зміни кількості населення тощо).

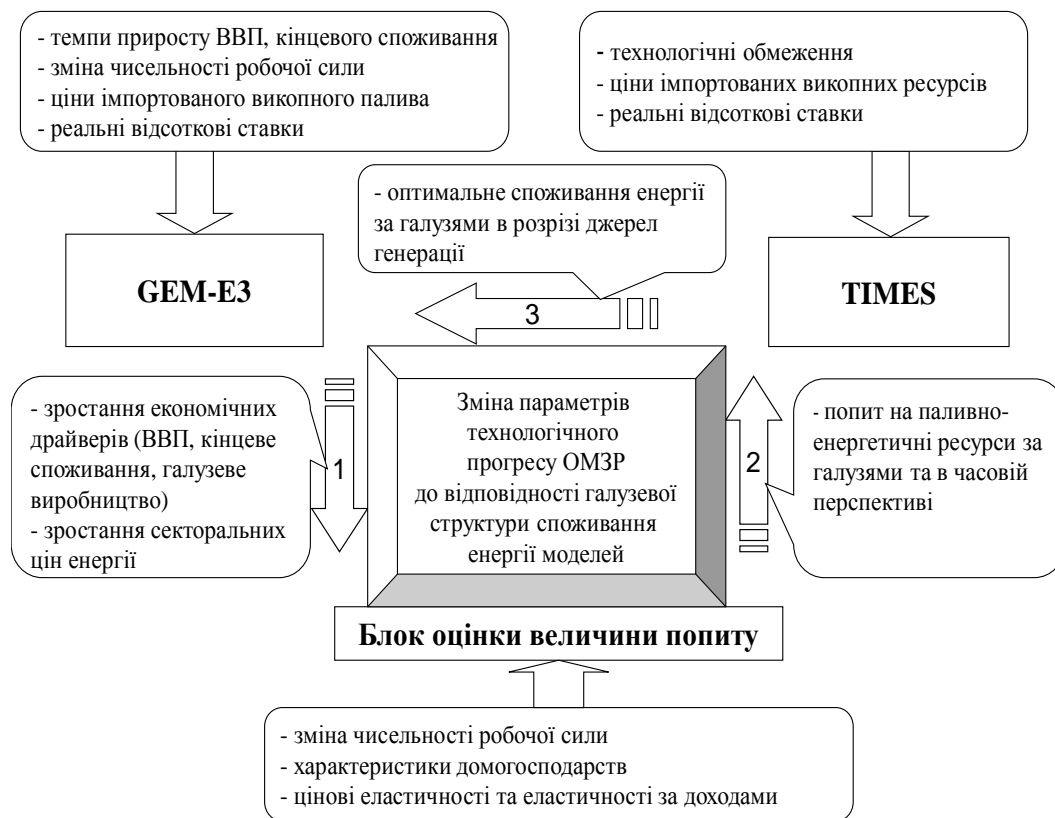


Рис. 2. Схема зв'язування GEM-E3 та моделі TIMES

Джерело: розроблено авторами на основі роботи [14]

4. Отриманий на 3-му кроці попит на енергетичні ресурси використовується в якості вхідних параметрів моделі TIMES для знаходження оптимальної структури виробництва та споживання енергії за галузями.

5. Порівнюється структура споживання енергії за галузями отримана на базі обох моделей. В разі її невідповідності (задається деяка допустима похибка) в GEM-E3 змінюється екзогенний параметр, що визначає технологічний прогрес (збільшення значення цього параметра призводить до зменшення питомих витрат енергії на виробництво продукції певного виду) таким чином, щоб структури споживання енергії за галузями отримані за кожною з моделей співпадали.

Сильний зв'язок передбачає встановлення прямої системної взаємодії між моделями економіки та енергетики, який може реалізуватись шляхом формування "монолітної програми". З точки зору практичної доцільності та враховуючи розмірності як макроекономічних, так і технологічних сучасних моделей, розробка комплексу моделей з сильним зв'язком вимагатиме або агрегування структури економіки, або відповідного спрощення енергетичної системи. Прикладами такого підходу є варіанти моделей енергетичної системи MARKAL та TIMES — моделі MARKAL-MACRO [15] та TIMES-MACRO [16] відповідно.

Загалом, спосіб поєднання макроекономічних та технологічних енергетичних моделей залежить від об'єкту і мети досліджень, а також обраного розрахункового алгоритму. Ієрархічна структура зв'язків між моделями різних класів наведена на рис. 3.

Мета досліджень зумовлює вибір конкретного методологічного підходу: оптимізаційні технологічні моделі визначають (як правило) мінімальні витрати на функціонування енергосистеми при різних сценаріях факторів впливу; імітаційний підхід використовують при пошуку критичних елементів енергосистеми, моделі міжгалузевого балансу доцільно використовувати в коротко- та середньостроковому періодах через припущення незмінності структури економіки, водночас ОМЗР можуть враховувати технологічний прогрес та структурні зрушення, що робить їх більш корисними при стратегічному плануванні.

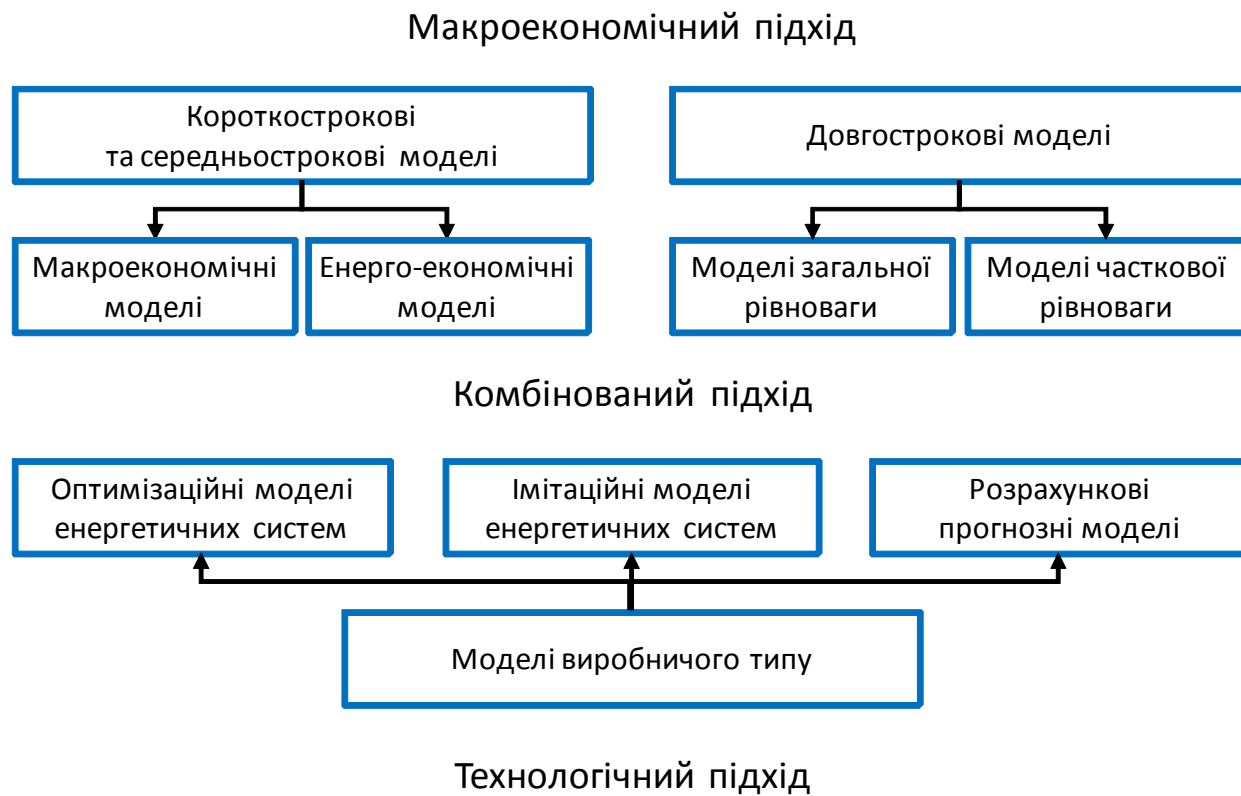


Рис. 3. Зв'язок енерго-економічних та моделей енергетичних систем

Джерело: розроблено авторами на основі роботи [17]

Адекватний горизонт моделювання знову ж таки залежить від мети досліджень. Аналіз ефективності застосування інструментів енергетичної політики для досягнення намічених цілей, враховуючи інерційність енергетичного сектора та життєвий цикл енергетичних технологій, доцільно проводити на період не менше як 2–20 років. Для стратегічного планування економічного розвитку, енергетичної та екологічної політики горизонт моделювання повинен бути розширений до 5–30 років. Насамкінець, для вивчення глобальних питань, такі як зміна клімату, для врахування екологічних та кліматичних процесів досліджуваній період має охоплювати до 50–100 років.

Модель "TIMES-Україна" [18] була розроблена в ДУ "Інститут економіки та прогнозування НАН України" для дослідження сценаріїв розвитку національної енергетичної системи. Створена на базі моделі інформаційно-аналітична підсистема разом із статистичною базою даних утворюють прикладний інструментарій, що дозволяє ефективно вирішувати задачі з аналізу, моделювання та прогнозування можливих шляхів розвитку енергетики України. Розроблений інструментарій є оптимізаційною моделлю усіх енергетичних потоків України і відповідає методичним рекомендаціям міжнародних організацій з розробки енергетичних й екологічних прогнозів, зокрема, рекомендаціям секретаріату Рамкової Конвенції ООН зі зміни клімату стосовно розробки національних повідомлень.

Об'єктом дослідження в моделі оптимізації енергетичних потоків та енергетичного балансу є вся енергетична система країни. Обсяги виробництва енергетичних послуг залежать від комбінації та вартості використання логістичної інфраструктури і технологій (капітал), трудових ресурсів, а також матеріальних та енергетичних ресурсів. У більшості випадків фактори виробництва є взаємозамінними у своїх категоріях. Зокрема, вартість енергетичної сировини залежить від доступності джерел первинної енергії та технологій її видобування, переробки і транспортування. Ціна ж на енергетичну послугу формується з огляду на існуючий попит на неї та власні споживчі властивості, незалежно від форми та обсягів енергії, витрачених на її виробництво, тобто вона лише опосередковано залежить від вартості конкретного енергоресурсу. Тому, якщо при дослідженнях енергетичної галузі необхідно виявити поточні тенденції та розробити прогнозні оцінки,

то тісна взаємодія факторів, що визначають вартість енергії та енергетичних послуг, вимагає аналізувати весь процес формування енергетичних потоків.

У моделі "TIMES-Україна" енергетична система України представлена єдиним регіоном. Структура моделі побудована з урахуванням існуючих статистичних класифікаторів (КВЕД та НПП) на інформаційній базі первинних статистичних форм Державного комітету статистики України з пографною розбивкою. Для дезагрегації моделі, оцінки виробничих і вартісних параметрів енергетичних технологій були також використані статистичні дані профільних міністерств, державних комітетів і промислових підприємств, які згодом були відкалібровані у відповідності з даними Держкомстату.

База даних моделі містить інформацію про обсяги і сезонні коливання попиту на енергію, вираженого у вигляді потреб за секторами і регіонами енергетичної системи; ціни, обсяги і сезонну доступність різних видів енергії і палива на міжнародних і національних ринках, а також вартість і обсяги власного видобутку первинних енергоресурсів; техніко-економічні характеристики енергетичних технологій; графіки споживання електроенергії тощо, що відповідають реальним статистичним даним за 2005-2010 роки.

Енергетична система України розділена в моделі на сім секторів: сектор постачання енергоресурсів; сектор виробництва і постачання електроенергії та тепла; промисловість; населення; комерційний і бюджетний сектори; транспорт; сільське господарство. Ці сектори забезпечують видобуток, переробку, транспортування, постачання енергоресурсів та надання енергетичних послуг для задоволення потреб кінцевих споживачів.

Енергетичні потреби по кожній групі споживачів були ідентифіковані в такий спосіб, щоб із врахуванням альтернативних енергетичних технологій виробництва продукції або послуг можна було зробити оцінки попиту по окремим енергоресурсам. Під енергетичною технологією тут розуміється будь-яка установка або пристрій, що виробляє, перетворює, розподіляє або споживає енергію. Ще однією обов'язковою умовою при ідентифікації потреб була можливість їх адекватного обліку, і, відповідно, їх кількісної і вартісної оцінки.

Додаткові умови, які допомагають у розробці альтернативних сценаріїв діляться на чотири категорії: технологічні, політичні, бюджетні та екологічні. Технологічні умови відповідають сценаріям зміни технічних параметрів чи характеристик енергетичних технологій — збільшення виробничих потужностей, зниження споживання електроенергії за рахунок модернізації, сезонності і т.д. Політичні умови, введені у відповідності з пріоритетами і політикою заходів — введення пільгових тарифів для окремих категорій споживачів, підтримка проникнення на ринок окремих видів технологій тощо. Бюджетні обмеження визначають наявність інвестицій в модернізацію та установку нових виробничих потужностей з розподілом у часі і типах енергетичних технологій. Екологічні обмеження можуть бути введені на підставі діючої системи державного управління або в рамках міжнародних зобов'язань зі скорочення викидів парникових газів прийнятих Україною.

На сьогодні в моделі "TIMES-Україна" налічується близько 1500 технологій; кількість енергоресурсів, матеріалів, попитів тощо, тобто тих елементів, які є або входом або виходом для відповідних технологій, складає біля 700; кількість обмежень, що задають умови розрахунку математичної моделі, складає близько 220; ненульових значень в математичній моделі, які є параметрами будь-яких її елементів, нараховується близько 45 тисяч.

ОМЗР економіки України являє собою типову top-down модель. Базуючись на даних таблиць витрати-випуск (ТВВ), показниках системи національних рахунків, даних мікрофайлів опитувань домогосподарств та інших статистичних джерелах модель описує основні міжгалузеві та макроекономічні зв'язки, враховує поведінку таких економічних агентів, як підприємства, сектор загального державного управління та домашні господарства. Останні розділені за децильними (10%-ми) групами залежно від розміру середньодушових еквівалентних загальних доходів. В моделі враховано всі основні джерела податкових надходжень до Зведеного бюджету, Пенсійного фонду та фондів

соціального страхування. Окремими блоками представлені експорт та імпорт продукції. На рис. 4 зображено основні взаємозв'язки між економічними агентами, а також потоки товарів та послуг розробленої ОМЗР.

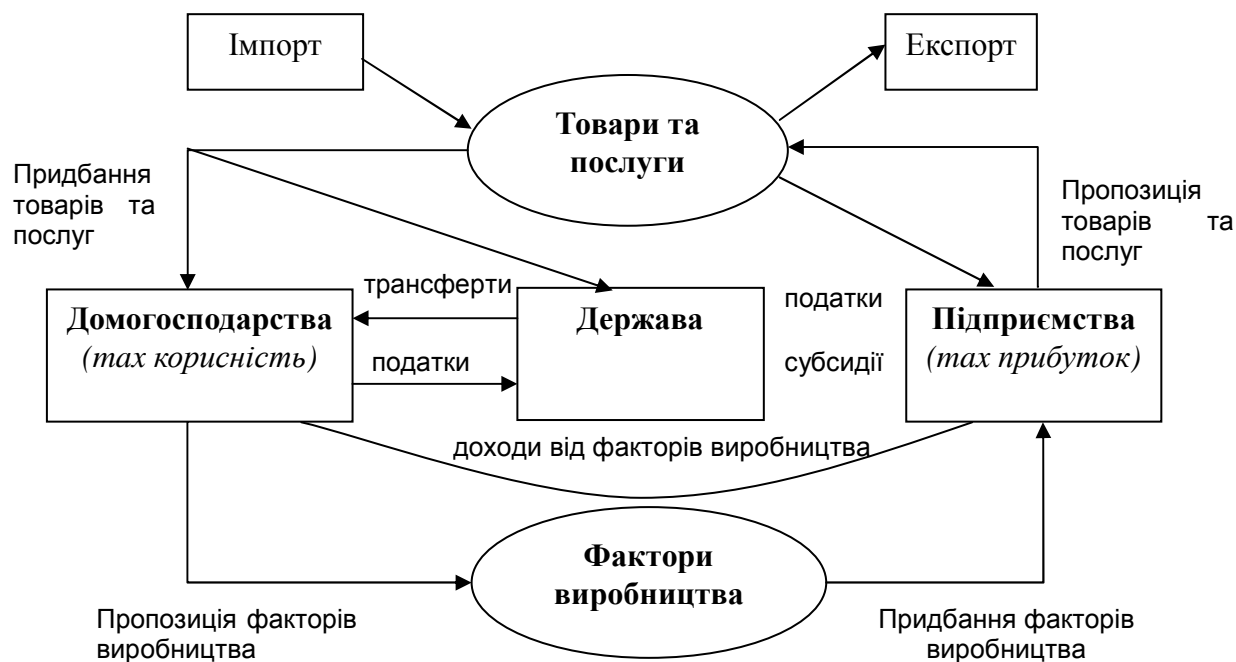


Рис. 4. Кругообіг потоків в ОМЗР економіки України

Джерело: розроблено авторами

Виробники в моделі розділені за 30 "чистими" галузями (видами економічної діяльності); підприємці визначають обсяги виробництва та продажу максимізуючи власний прибуток. Вироблена підприємствами продукція споживається домашніми господарствами, сектором загального державного управління, використовується для валового нагромадження капіталу, в виробничому процесі в якості сировини та матеріалів (проміжне споживання) та експортується. Отримані підприємствами гроші від продажу товарів та послуг йдуть на придбання сировини та матеріалів, факторів виробництва – праці та капіталу, інвестуються (придбання основних засобів) та сплачуються у вигляді податків та зборів до Державного бюджету, Пенсійного та інших фондів. Сировину та матеріали підприємства можуть купувати у національних виробників або імпортувати. Домашні господарства мають декілька джерел доходів: заробітна плата та змішаний дохід, пенсії, стипендії, трансфери від підприємств та інших домогосподарств, різноманітні форми державних трансфертів (пільги, допомоги, виплати) тощо. Отримавши доходи, домогосподарства витрачають гроші на придбання товарів (послуг) та заощадження (інвестування), намагаючись максимізувати власну корисність. Держава отримує податкові надходження, здійснює трансфери та інвестиції, виплачує субсидії та купує продукцію.

За базового сценарію припускається, що у вихідному році економіка знаходиться в положенні рівноваги, яке характеризується виконанням трьох умов:

"нульові" прибутки;

"очищення" ринку;

баланс доходів та витрат.

Згідно першої припускається, що підприємці продають товари за ціною, яка лише покриває їх витрати, при цьому власники отримують нормальний дохід на капітал, а працівники – заробітну плату. Умова "очищення" ринків забезпечує рівність попиту та пропозиції продукції. Остання умова стверджує, що доходи і витрати економічних агентів за певний період мають бути рівними, при цьому до витрат включається не лише кінцеве споживання, а і заощадження. Зазначимо, що положення загальної рівноваги не

слід сприймати як "знімок" економіки в певний момент часу, воно представляє баланс економічних потоків за певний період, в даному випадку – за рік.

Для визначення рівноважних обсягів випуску та цін розв'язується система нелінійних рівнянь. В процесі формування останньої для виробничих функцій блоків моделі вирішуються оптимізаційні задачі. Наприклад, при випуску продукції виробники мають обрати, яку її частку експортувати, а яку продавати на внутрішньому ринку. Вихідні величини часток оцінюються за даними базового року (їм відповідають ваги, що використовуються в функціях з ПЕЗ), в результаті розв'язання оптимізаційної задачі визначається, як будуть реагувати виробники (змінюючи обсяги експорту та поставок на внутрішній ринок) на зміни екзогенних параметрів моделі (наприклад, на зростання цін експортованої продукції).

Використана в дослідженні ОМЗР економіки України є рекурсивною моделлю, тобто ретроспективною за своєю природою. За такого підходу події майбутніх періодів не впливають на характеристики положення рівноваги попередніх років. Це означає, що траєкторію моделі можна будувати через покрокове знаходження положень рівноваги: рік за роком, не розв'язуючи систему рівнянь для знаходження всіх рівноважних станів одночасно.

Зв'язок між послідовними періодами моделі (роками) враховується через зміни обсягів основних засобів, кількості зайнятих, ефективності використання ресурсів, цін експорту та імпорту продукції. Зокрема, динаміка зміни величини основного капіталу та трудових ресурсів описується відповідними рівняннями

$$KD_{i,t+1} = (1 - \delta)KD_{i,t} + Ind_{i,t},$$

$$LS_{t+1} = (1 + ng)LS_t,$$

де $KD_{i,t+1}$ - обсяг основних засобів на початок періоду $t+1$ в i -й галузі, δ - норма амортизації, $Ind_{i,t}$ - обсяг інвестицій вкладених в i -ту галузь протягом t -го року, LS_t - кількість зайнятих в t -му році, ng - темпи приросту робочої сили.

Оскільки в моделі процеси інвестування для кожної галузі описуються окремою виробничою функцією, немає потреби у визначенні додаткового правила розподілу інвестицій між галузями.

Для більш адекватного відображення зв'язків в середині енергетичної системи в моделі використано підхід деталізації виробничого блоку. Слідуючи моделям EMPAX-CGE [19] та GTAP-E [20], продукція проміжного споживання в ОМЗР економіки України виділяється в окрему групу та розташовується на найвищому рівні структури виробничого блоку. Між продукцією проміжного споживання припускається незначний рівень заміщення, еластичність покладається рівною 0,2, еластичність заміщення між групою продукції проміжного споживання та рештою факторів виробництва покладається рівною нулю, тобто використовується виробнича функція Леонтьєва.

Слідуючи моделям GEMINI-E3 [21] та EMPAX-CGE, а також виходячи з доступності економетричних оцінок заміщення між працею та капіталом, додана вартість в ОМЗР економіки України виділена в окрему групу, еластичності заміщення між її складовими покладаються рівні 0,3. В усіх розглянутих моделях з розширеним енергетичним блоком електроенергія виділяється в якості окремої складової. Як і в моделях GEM-E3 [4] та GEMINI-E3, в ОМЗР економіки України використовувалась однорівнева структура паливної складової, еластичності заміщення між її компонентами покладалась рівні 0,5.

Висновки

Оцінка середньо- та довгострокових наслідків розвитку енергетичної системи України пов'язана з необхідністю врахування багатьох факторів соціального, економічного та екологічного характеру. При цьому вплив енергетичної політики розповсюджується на всі основні групи економічних агентів, включаючи домогосподарства, підприємців та сектор загального державного управління.

Проведений аналіз показав, що адекватно враховувати широкий спектр наслідків за допомогою моделі одного класу не завжди можливо, оскільки за такого підходу акцент робиться виключно на технологічних або макроекономічних аспектах розвитку енергетичного сектору. З метою вирішення цієї проблеми в роботі досліджено теоретико-методологічні підходи до інтеграції енерго-економічних моделей та моделей енергетичних систем, а також представлено відповідний інструментарій для досліджень розвитку національної енергетичної системи.

В перспективі, інтегрований інструментарій, що включає розглянуті в даній роботі ОМЗР економіки України та модель "TIMES-Україна", може слугувати ефективним методологічним забезпеченням при розв'язанні ряду задач стратегічного планування в енергетиці, включаючи:

дослідження шляхів оптимізації енергетичного балансу з метою забезпечення раціонального природокористування та низьковуглецевого розвитку економіки України із врахуванням структури міжгалузевих зв'язків, реалізації заходів з енергоефективності та енергозбереження, розвитку відновлювальної енергетики, дотримання екологічних стандартів тощо;

дослідження впливу сценаріїв розвитку ПЕК на зміну макроекономічних показників, включаючи доходи та витрати домашніх господарств, ВВП, надходження до державного бюджету, показники зовнішньоекономічної діяльності тощо;

оптимізацію державних механізмів спрямованих на дотримання міжнародних зобов'язань щодо охорони навколишнього середовища та боротьби із зміною клімату (наприклад, виконання Україною своїх зобов'язань в другому періоді Кіотського протоколу та перед європейським Енергетичним співтовариством) із врахуванням їх впливу на виробників, кінцевих споживачів, сектор загального державного управління та динаміку макроекономічних показників;

коригування політики субсидіювання ПЕК, спрямованої на перехід до ринкових цін в соціально прийнятний спосіб та забезпечення економічної життєздатності енергетичних підприємств.

Список використаних джерел

1. Индексы потребительских цен за 2012 рік [стат. зб. / за ред. Н.С. Власенко]. – К.: Державна служба статистики України, 2013. – 184 с.
2. Національні рахунки України за 2011 рік [стат. зб. / за ред. І.М. Нікітіної]. – К.: Державна служба статистики України, 2013. – 165 с.
3. Товарна структура зовнішньої торгівлі за 2012 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 12.02.2014). – Назва з екрана.
4. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990-2011 гг. [Электронный ресурс] / Национальный центр обліку викидів парникових газів. – К., 2013. – 577 с. – Режим доступа: <http://nci.org.ua/ua/oblik-vykydiv-ta-absorbtsii-parnykovykh-haziv/nats-kadastr-nir> (дата обращения: 15.02.2014). – Загл. с экрана.
5. General Equilibrium Model for Economy – Energy – Environment: Model Manual [Electronic resource] // E3M-Lab. – 186 p. – Mode of access: <http://147.102.23.135/e3mlab/GEM%20-%20E3%20Manual/Manual%20of%20GEM-E3.pdf> (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
6. Lofgren H. A Standard Computable General Equilibrium (CGE) Model in GAMS [Electronic resource] / H. Lofgren, R. L. Harris, S. Robinson // International Food Policy Research Institute. – 2002. – 79 p. – Mode of access: <http://www.ifpri.org/sites/default/files/pubs/pubs/microcom/5/mc5.pdf> (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
7. Taylor L. Computable General Equilibrium Models of Trade Liberalization: The Doha Debate [Electronic resource] / L. Taylor, R. von Arnim // New School for Social Research. – N.Y., 2006. – 89 p. – Mode of access: https://www.academia.edu/2804166/Computable_General_Equilibrium_Models_of_Trade_Liberalization_The_Doha_Debate (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
1. State Statistics Service of Ukraine. Consumer price indices in 2012, 2013. Kiev: State Statistics Service of Ukraine.
2. State Statistics Service of Ukraine. National Accounts of Ukraine for 2011, 2013. Kiev: State Statistics Service of Ukraine.
3. State Statistics Service of Ukraine, 2013. Commodity structure of foreign trade in 2012 [Online] State Statistics Service of Ukraine. Available from: <http://www.ukrstat.gov.ua> (accessed: 12/2/2014)
4. State Environmental Investment Agency of Ukraine, 2013. National Inventory Report of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases in Ukraine for 1990-2011 [Online] State Environmental Investment Agency of Ukraine. Available from: <http://nci.org.ua/ua/oblik-vykydiv-ta-absorbtsii-parnykovykh-haziv/nats-kadastr-nir> (accessed: 12/2/2014)
5. E3M-Lab. General Equilibrium Model for Economy – Energy – Environment: Model Manual [Online] E3M-Lab. Available from: <http://147.102.23.135/e3mlab/GEM%20-%20E3%20Manual/Manual%20of%20GEM-E3.pdf> (accessed: 12/2/2014)
6. Lofgren H., 2002. A Standard Computable General Equilibrium (CGE) Model in GAMS [Online] International Food Policy Research Institute. Available from: <http://www.ifpri.org/sites/default/files/pubs/pubs/microcom/5/mc5.pdf> (accessed: 12/2/2014).
7. Taylor L., von Arnim R., 2006. Computable General Equilibrium Models of Trade Liberalization: The Doha Debate [Online] New School for Social Research. Available from: https://www.academia.edu/2804166/Computable_General_Equilibrium_Models_of_Trade_Liberalization_The_Doha_Debate (accessed: 12/2/2014).
8. Bohringer C., Rutherford T.F., 2006. Combining Top-Down and Bottom-up in Energy Policy Analysis: A Decomposition Approach. Centre for European Economic Research. Discussion Paper No. 06-007. Available from:

8. Bohringer C. Combining Top-Down and Bottom-up in Energy Policy Analysis: A Decomposition Approach [Electronic resource] / C. Bohringer, T. F. Rutherford // Discussion Paper No. 06-007. – 2006. – 23 p. – Mode of access: <http://www.mpsge.org/qpdecomp.pdf> (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
9. Joseffson A. Community-based regional energy-environmental planning / A. Joseffson, J. Johnsson, C.-O. Wene. – Milano: Fondazione Eni Enrico Mattei, 1994.
10. Manne A. S. MERGE: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change [Electronic resource] / A.S. Manne, R.G. Richels. – Stanford University, 2004 – 17 p. – Mode of access: <http://www.stanford.edu/group/MERGE/GERAD1.pdf> (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
11. Edmonds J. Second Generation Model 2004: An Overview [Electronic resource] / J. Edmonds, H. Pitcher, R. Sands. – Battelle Memorial Institute, 2004 – 40 p. – Mode of access: http://www.globalchange.umd.edu/data/models/SGM_2004_Overview.pdf (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
12. Grohnheit P.E. Economic interpretation of the EFOM model / P. E. Grohnheit // Energy Economics. – 1991. – Vol. 13, Issue 2 – P. 143-152.
13. Loulou R. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure [Electronic resource] / R. Loulou, M. Labriet. – Springer-Verlag, 2007. – P. 7-40 – Mode of access: <http://home.eng.iastate.edu/~jdm/ee590-Old/TIMES1.pdf> (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
14. Fortes P. Top-down vs. Bottom-up Modeling to Support Climate Policy – Comparative Analysis for the Portuguese Economy [Electronic resource] / P. Fortes, S. Simoes, J. Seixas, D. van Regemorter. – 18 P. – Mode of access: http://www.aee.at/2009-IAEE/uploads/fullpaper_iaee09/IAEE/uploads/fullpaper_iaee09/P_422_Fortes_Patricia_31-Aug-2009,%2015:52.pdf (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
15. Loulou R. Documentation for the MARKAL Family of Models. Part 2: MARKAL-MACRO [Electronic resource] / R. Loulou, G. Goldstein, K. Noble. – Energy Technology Systems Analysis Program, 2004 – 32 p. – Mode of access: http://www.etsap.org/web/MrklDoc-II_MARKALMACRO.pdf (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
16. Remme U. Documentation of the TIMES-MACRO mode: Draft Version [Electronic resource] / U. Remme, M. Blesl. – Energy Technology Systems Analysis Program, 2006 – 59 p. – Mode of access: http://www.iea-etsap.org/web/Docs/MACRO_Draft_010206.pdf (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
17. UNEP greenhouse gas abatement costing studies. Analysis of abatement costing issues and preparation of a methodology to undertake national greenhouse gas abatement costing studies. Phase one report / J.M. Christensen, K. Halsnas; C.J.C. Lim et al. – Riso National Laboratory, 1992. – 157 p.
18. Подолець Р.З. Стратегічне планування у паливно-енергетичному комплексі на базі моделі "TIMES-Україна" / Р.З. Подолець, О.А. Дячук – Наук. доп. НАН України; Ін-т екон. та прогнозів. – К., 2011. – 150 с.
19. EMPAX-CGE. Model Documentation: Interim Report [Electronic resource] // RTI International, 2008. – 112 p. – Mode of access: http://www.epa.gov/ttnecas1/models/empax_model_documentation.pdf (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
20. Burniaux J.-M. GTAP-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model [Electronic resource] / J.-M. Burniaux, T. P. Truong. – GTAP Technical Paper No. 16. – 2002. – 69 p. – Mode of access: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/1203.pdf> (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
21. Bernard A. GEMINI-E3, A General Equilibrium Model of International-National Interactions between Economy, Energy and the Environment, V5.3. [Electronic resource] / A. Bernard, L. Drouet, M. Vielle. – 2008. – 36 p. – Режим доступу: <http://gemini-e3.epfl.ch/webdav/site/gemini-e3/shared/GEMINI-E3v53.pdf> (date viewed: 12.02.2014). – Title from the screen.
- <http://www.mpsge.org/qpdecomp.pdf> (accessed: 12/2/2014).
9. Joseffson A., Johnsson J., Wene C.-O., 1994. Community-based regional energy-environmental planning. Milano: Fondazione Eni Enrico Mattei.
10. Manne A.S., Richels R.G. 2004. MERGE: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change [Online]. Stanford University. Available from: <http://www.stanford.edu/group/MERGE/GERAD1.pdf> (accessed: 12/2/2014).
11. Edmonds J., Pitcher H., Sands R. 2004. Second Generation Model 2004: An Overview [Online] Battelle Memorial Institute. Available from: http://www.globalchange.umd.edu/data/models/SGM_2004_Overview.pdf (accessed: 12/2/2014).
12. Grohnheit P.E., 1991. Economic interpretation of the EFOM model. Energy Economics. Vol. 13, Issue 2, pp. 143-152.
13. Loulou R., Labriet M., 2007. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure. Computational Management Science. Vol. 1, Issue 1-2, pp. 7-40. Springer [Online]. Available from: <http://home.eng.iastate.edu/> (accessed: 12/2/2014).
14. Fortes P., 2009. Top-down vs. Bottom-up Modeling to Support Climate Policy – Comparative Analysis for the Portuguese Economy [Online] Available from: http://www.aee.at/2009-IAEE/uploads/fullpaper_iaee09/P_422_Fortes_Patricia_31-Aug-2009,%2015:52.pdf (accessed: 12/2/2014).
15. Loulou R., Goldstein G., Noble K. 2004. Documentation for the MARKAL Family of Models. Part 2: MARKAL-MACRO [Online] Energy Technology Systems Analysis Program. Available from: http://www.etsap.org/web/MrklDoc-II_MARKALMACRO.pdf (accessed: 12/2/2014).
16. Remme U., Blesl M., 2006. Documentation of the TIMES-MACRO mode: Draft Version [Online] Energy Technology Systems Analysis Program. Available from: http://www.iea-etsap.org/web/Docs/MACRO_Draft_010206.pdf (accessed: 12/2/2014).
17. Christensen J.M., 1992. UNEP greenhouse gas abatement costing studies. Analysis of abatement costing issues and preparation of a methodology to undertake national greenhouse gas abatement costing studies. Phase one report. Riso National Laboratory. UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment, Roskilde.
18. Podolets R.Z., Diachuk O.A., 2011. Strategic planning in the energy sector based on the "TIMES-Ukraine" model. Kiev: Institute for Economics and Forecasting.
19. RTI International, 2008. EMPAX-CGE. Model Documentation: Interim Report [Online] RTI International. Available from: http://www.epa.gov/ttnecas1/models/empax_model_documentation.pdf (accessed: 12/2/2014).
20. Burniaux J.-M., Truong T.P., 2002. GTAP-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model. GTAP Technical Paper No. 16. Available from: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/> (accessed: 12/2/2014).
21. Bernard A., Drouet L., Vielle M., 2008. GEMINI-E3, A General Equilibrium Model of International-National Interactions between Economy, Energy and the Environment, V5.3. [Online] Available from: <http://gemini-e3.epfl.ch/webdav/site/gemini-e3/shared/GEMINI-E3v53.pdf> (accessed: 12/2/2014).