

УДК 330.46:620.92

Подолець Р.З., канд. екон. наук,

Дячук О.А., канд. екон. наук,

Чепелев М.Г., аспірант

Інститут економіки та прогнозування НАН України

ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

Представлено результати дослідження сучасних теоретико-методологічних підходів до моделювання розвитку енергетичних систем. Обґрунтовано доцільність використання інтегрованого модельного інструментарію для аналізу заходів енергетичної політики. На прикладі розроблених авторами моделей енергетичної системи "TIMES-Україна" та рекурсивної динамічної обчислюваної моделі загальної рівноваги проаналізовано можливості комплексної оцінки сценаріїв розвитку вітчизняного енергетичного сектора.

Ключові слова: енергетична система України, моделювання, інтегрований підхід, модель "TIMES-Україна", обчислювана модель загальної рівноваги.

R.Podolets, Sector Head

O.Diachuk, Senior Researcher

M.Chepeliev, Researcher

Institute for Economics and Forecasting, NAS of Ukraine

AN INTEGRATED APPROACH TO MODELLING THE DEVELOPMENT OF UKRAINIAN ENERGY SYSTEM

The article presents the results of a study of modern theoretical and methodological approaches to modeling energy systems. The authors justify the expediency of the use of integrated modeling tools for the analysis of energy policy measures. On the example of "TIMES-Ukraine" models of the energy system and recursive dynamic computable general equilibrium model, which are developed by the authors, they analyze the possibilities of comprehensive assessment of development scenarios of this country's energy sector.

Keywords: Ukrainian energy system, "TIMES-Ukraine" model, computable general equilibrium model, integrated approach.

JEL: C61, C68

Енергетична політика в Україні виступає вагомим фактором розвитку економіки, одночасно створюючи значні загрози та уособлюючи ресурсний потенціал покращення ситуації. При цьому особливість енергетичного сектора 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 домогосподарств¹, виступають ключовими ресурсами при виробництві багатьох видів продукції — на них припадає 22,5% усього проміжного споживання² та посідають провідне місце в структурі зовнішньої торгівлі України: за січень-листопад 2013 р. 27% всієї імпортованої продукції становили

паливно-енергетичні ресурси³. Не менш суттєвий вплив енергетичного сектора і на стан навколишнього середовища: щороку його підприємства викидають понад 300 млн т парникових газів (ПГ) у еквіваленті CO₂, що становить 77% загальної емісії ПГ в Україні⁴. Враховуючи, що кожна тонна викидів діоксиду вуглецю наносить збитки на суму від 7 до 150 дол. США⁵, еко-

³ Товарна структура зовнішньої торгівлі за 2012 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 12.02.2014).

⁴ Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990–2011 гг. [Електронний ресурс] / Национальний центр обліку викидів парникових газів. – К., 2013. – 577 с. – С. 71.– Режим доступу: <http://nci.org.ua/ua/oblik-vykydiv-ta-absorbtsii-parnykovykh-haziv/nats-kadastr-nir> (дата звернення: 15.02.2014).

⁵ General Equilibrium Model for Economy – Energy – Environment: Model Manual [Електронний ресурс] // E³M-Lab. – 186 р. –Р. 69.–Режимдоступу : <http://147.102.23.135/e3mlab/GEM%20-%20E3%20Manual/Manual%20of%20GEM-E3.pdf> (датазвернення: 12.02.2014).

¹ Индексы потребительских цен за 2012 рік : стат. зб. / за ред. Н.С. Власенко. – К. : Державна служба статистики України, 2013. – 184 с. – С. 181–183.

² Национальні рахунки України за 2011 рік : стат. зб. / за ред. І.М. Нікітіної. – К. : Державна служба статистики України, 2013. – 165 с. – С. 67.

номічна шкода від емісії цієї речовини (262 млн т у 2011 р.) становить від 1,8 млрд до 39,3 млрд дол. США.

Така багатогранність і мультиагентний характер соціальних, економічних та екологічних наслідків розвитку національної енергетичної системи зумовлює актуальність розроблення та використання комплексного модельного інструментарію, який би з певним рівнем абстракції враховував структурну складність об'єкта 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.

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 потреб. Структура цих потреб 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.

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 неможлива. Випадкові чинники розвитку енергосистем значною мірою 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 значною мірою визначається станом зовнішнього середовища (економічної системи), частина параметрів моделі залишатиметься екзогенною, тобто напряду задаватиметься 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 ендегенними змінними і будуть розраховані моделлю з огляду на оптимальний стан всієї системи. Більше того, характер ендегенності чи екзогенності параметрів часто залежить від способу побудови моделі, зокрема методів її замикання. Наприклад, у запропонованій авторами роботи⁶ обчислюваній моделі загальної рівноваги (ОМЗР) дослідник сам визначає, які змінні покладаються фіксованими, а які отримуються у 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 нанавколишнє 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 ендегенними та керованими екзогенними змінними.

Одним із найскладніших завдань при моделюванні енергетичної системи є оцінка величини екзогенних параметрів, що визначатимуть технологічну структуру енергетичного сектора. У макроекономічних моделях основні групи технологій представлені виробничими функціями,

⁶ Lofgren H., Harris R. L., Robinson S. A Standard Computable General Equilibrium (CGE) Model in GAMS [Електронний ресурс] / International Food Policy Research Institute. – 2002. – 79 р. – Режим доступу :<http://www.ifpri.org/sites/default/files/pubs/pubs/microcom/5/mc5.pdf> (дата звернення: 12.02.2014).

проте у моделях виробничого типу, якою є модель енергетичної

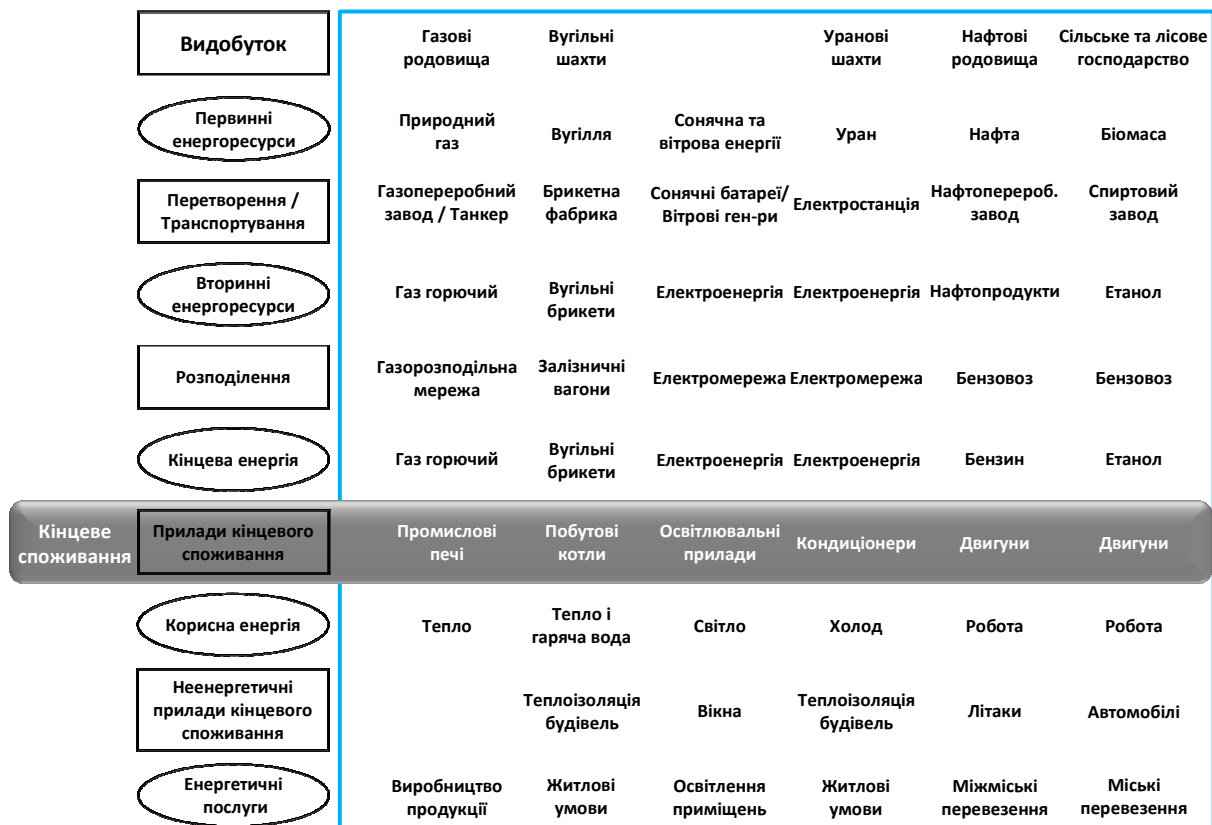


Рис. 1. Блок-схема енергетичної системи

Джерело: розроблено авторами.

системи, кожна група технологій характеризується конкретними технічними та вартісними параметрами, зокрема, терміном експлуатації, ККД, потужністю, постійними і змінними витратам 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.

У процесі моделювання енергетичних систем також виникає завдання 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). Як керуючий параметр, 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 параметра, P – ціна одиниці продукції, σ_P – цінова еластичність. У 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 втрапить свій сенс і перетвориться на звичайну транспортну задачу.

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 складною є оцінка значень еластичностей заміщення (трансформації), що показують, як змінюватимуться відносні кількості споживання товарів при зміні відносних цін цих товарів. Величини еластичностей можуть суттєво впливати на результати розрахунків і навіть порушувати

порядок пріоритетності досліджуваних сценаріїв⁷. Провести якісну оцінку цих параметрів за емпіричними даними майже неможливо, а якщо і вдається, то для дуже обмеженої множини випадків. Тому найбільш доцільним варіантом ми вбачаємо проведення ґрунтовного аналізу чутливості побудованої моделі для кожного визначеного сценарію.

Моделльні 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 такою:

- 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 сектора;

- внесення змін до альтернативних сценаріїв для спрямування траєкторії розвитку системи у бажаному напрямі та розроблення на їх основі переліку відповідних регуляторних заходів (стратегій);

- вибір стратегій, що найчастіше дозволяли досягти бажаної мети (стійкі стратегії), а також розроблення стратегій попередження відхилення розвитку системи від бажаної траєкторії (стратегії хеджування).

Основні методологічні підходи

Спектр використання економіко-математичних моделей в енергетиці досить широкий. Найсуттєвіші розбіжності між моделями полягають у рівні деталізації енергетичних потоків і 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 сектора, дезагреговану номенклатуру енергоресурсів, повний набір технологій обробки та споживання енергії. У свою чергу типова енерго-

економічна модель розглядає всю економіку країни загалом, 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 дають можливості детально враховувати зміни технологій та вартості виробництва енергії в часі⁸.

Побудований базовий сценарій, який у випадку ОМЗР представляє собою набір положень рівноваги, можна верифікувати шляхом порівняння отриманих значень ендегенних 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.

У процесі пошуку нових рівноважних станів використовуються припущення щодо однакових як попиту, так і 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 навпаки⁹.

У моделях енергетичних систем усі 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, входом процесу когенерації є вугілля, а виходом – електрична та теплова енергія, а також викиди парникових газів та шкідливих речовин. Визначення цього методологічного підходу як "знизу-вгору" 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 енерге-

⁷ Taylor L., von Arnim R. Computable General Equilibrium Models of Trade Liberalization: The Doha Debate [Електронний ресурс] / New School for Social Research. – N.Y., 2006. – 89 р. – Р. 73. – Режим доступу :https://www.academia.edu/2804166/Computable_General_Equilibrium_Models_of_Trade_Liberalization_The_Doha_Debate (дата звернення: 12.02.2014).

⁸ Bohringer C., Rutherford T. F. Combining Top-Down and Bottom-up in Energy Policy Analysis: A Decomposition Approach [Електронний ресурс] // Discussion Paper No. 06-007. – 2006. – 23 р. – Р. 1. – Режим доступу :<http://www.mpsge.org/qpedecomp.pdf> (дата звернення: 12.02.2014).

⁹ Joseffson A., Johnsson J., Wene C.-O. Community-based regional energy-environmental planning. – Milano : Fondazione Eni Enrico Mattei, 1994.

тичної системи може бути легко скоригована, тобто непередбачені наперед зміни у попиті та пропозиції енергії, або параметри нової технології, у будь-який час можуть бути 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 важко.

З розвитком інформаційних технологій принципові відмінності в описаних класах енергетичних моделей стають дедалі менш очевидними. Так, в окремих прикладних енерго-економічних моделях (наприклад MEGRE¹⁰ або SGM¹¹) основні підгалузі енергетичного сектора (електроенергетика, нафтогазовий сектор) представлені в максимально дезагрегованому вигляді як щодо технологічної, так і товарної структури. З іншого боку, деякі моделі енергетичних систем (такі як EFOM¹² та TIMES¹³) можуть враховувати вплив макроекономічних ефектів та ринкового середовища на стан енергосистеми. Наприклад, кінцевий попит на продукцію виробничих секторів у 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 і досліджувати вплив технологічних та цінових чинників на структуру енергосистеми. Водночас у 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 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

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

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

$$Y_j = B_j \left(\beta_{1j} \left[\bar{\alpha}_{1j} E_{1j}^{\rho_1} + \dots + \bar{\alpha}_{nj} E_{nj}^{\rho_1} \right]^{\frac{\rho_1}{\beta_1}} + \beta_{2j} \left[\bar{\alpha}_j^K K_j^{\rho_2} + \bar{\alpha}_j^L L_j^{\rho_2} \right]^{\frac{\rho_2}{\beta_2}} \right)^{\frac{1}{\beta_1}},$$

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, у 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

¹⁰ Manne A. S., Richels R.G. MERGE: An Integrated Assessment Model for Global Climate Change [Електронний ресурс] / Stanford University, 2004. – 17 р. – Режим доступу: <http://www.stanford.edu/group/MERGE/GERAD1.pdf> (дата звернення: 12.02.2014).

¹¹ Edmonds J., Pitcher H., Sands R. Second Generation Model 2004: An Overview [Електронний ресурс]. – Battelle Memorial Institute, 2004 – 40 р. – Режим доступу: http://www.globalchange.umd.edu/data/models/SGM_2004Overview.pdf (дата звернення: 12.02.2014).

¹² Grohnheit P.E. Economic interpretation of the EFOM model // Energy Economics. – 1991. – Vol. 13, Is. 2 – P. 143–152.

¹³ Loulou R., Labriet M. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure [Електронний ресурс] // Springer-Verlag, 2007. – P. 7–40 – Режим доступу: <http://home.eng.iastate.edu/~jdm/ee590-Old/TIMES1.pdf> (дата звернення: 12.02.2014).

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, як правило, визначаються експертно.

Підходи до інтеграції енерго-економічних моделей і 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 входною 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 урахуванням зміни обсягів випуску, споживання енергії за галузями в базовому році, значень цінових еластичностей та еластичностей за доходами, зміни кількості населення тощо).

4. Отриманий на третьому кроці попит на енергетичні ресурси використовується як входні параметри моделі TIMES для знаходження оптимальної структури виробництва та споживання енергії за галузями.

5. Порівнюється структура споживання енергії за галузями, отримана на базі обох моделей. У 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 макроекономічних, так і технологічних сучасних

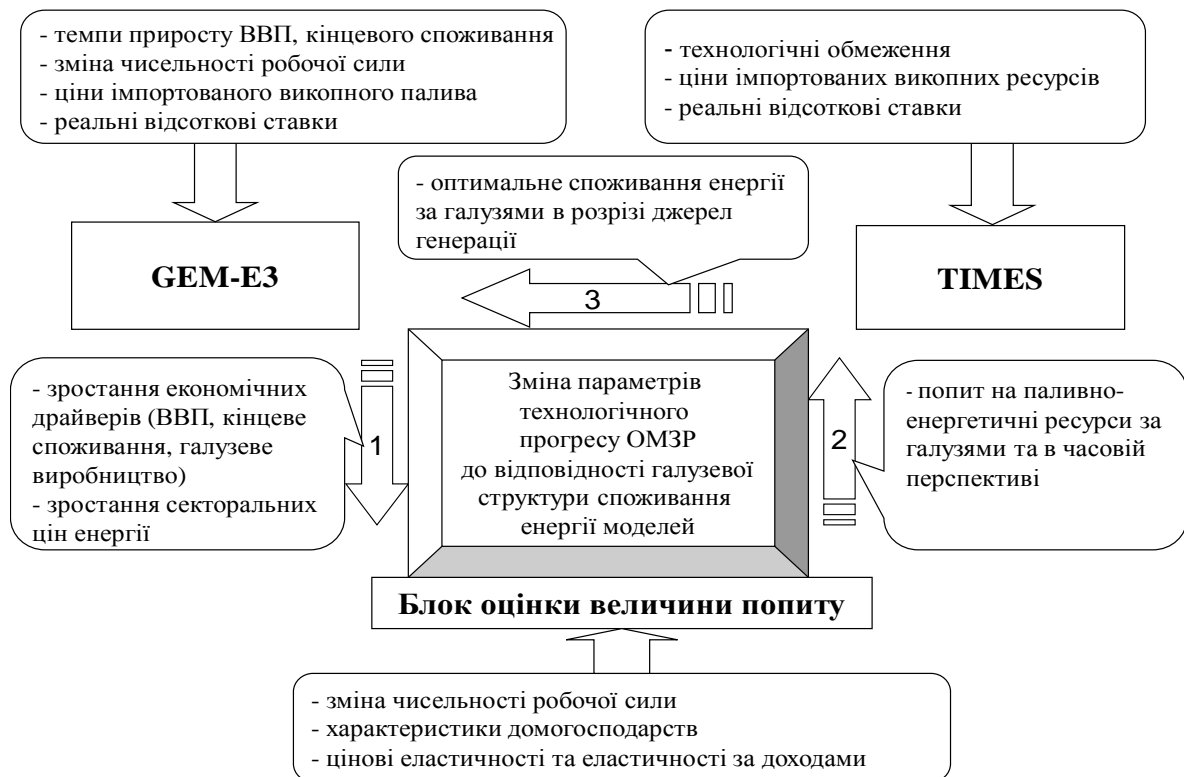


Рис. 2. Схема зв'язування GEM-E3 та моделі TIMES

Джерело: розроблено авторами на основі роботи FortesP., SimoesS., SeixasJ., vanRegemorterD. Top-downvs. Bottom-upModelingtoSupportClimatePolicy – ComparativeAnalysisforthePortugueseEconomy [Електронний ресурс]. – 18 р. – Режим доступу :http://www.aeee.at/2009-IAEE/uploads/fullpaper_iaee09/P_422_Fortes_Patricia_31-Aug-2009,%2015:52.pdf (дата звернення: 12.02.2014).

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-MACRO¹⁴ та TIMES-MACRO¹⁵ відповідно.

Загалом спосіб поєднання макроекономічних та технологічних енергетичних моделей залежить від об'єкта 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 міжгалузєвого 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.

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 таких глобальних питань, як зміна клімату, для врахування екологічних та кліматичних процесів досліджувані період має охоплювати до 50–100 років.

Модель "TIMES-Україна"¹⁶ 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 зі статистичною базою даних утворюють прикладний інструментарій, що дозволяє ефективно вирішувати завдання аналізу, моделювання та прогнозування можливих шляхів розвитку енергетики України. Розроблений інструментарій є оптимізаційною моделлю всіх енергетичних потоків України і відповідає методичним рекомендаціям міжнародних організацій з розроблення енергетичних та екологічних прогнозів, зокрема, рекомендаціям секретаріату Рамкової Конвенції ООН зі зміни клімату стосовно розроблення 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.

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 кожної групи споживачів були ідентифіковані в такий спосіб, щоб з урахуванням альтернативних енергетичних технологій виробництва продукції або послуг можна було оцінити попит на окремі енергоресурси. 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 та вартісної оцінки.

Додаткові умови, які допомагають у розробленні альтернативних сценаріїв, діляться на чотири категорії: технологічні, політичні, бюджетні та

¹⁴ Loulou R., Goldstein G., Noble K. Documentation for the MARKAL Family of Models. Part 2: MARKAL-MACRO [Електронний ресурс] // Energy Technology Systems Analysis Program. – 2004 – 32 р. – Режим доступу: http://www.etsap.org/web/MrklDoc-II_MARKALMACRO.pdf (дата звернення: 12.02.2014).

¹⁵ Remme U., Blesl M. Documentation of the TIMES-MACRO mode: Draft Version [Електронний ресурс] // Energy Technology Systems Analysis Program. – 2006 – 59 р. – Режим доступу: http://www.iea-etsap.org/web/Docs/MACRO_Draft_010206.pdf (дата звернення: 12.02.2014).

¹⁶ Подолець Р.З. Стратегічне планування у паливно-енергетичному комплексі на базі моделі "TIMES-Україна": наук. доп. / Р.З. Подолець, О.А. Дячук. – НАН України, Ін-текон. та прогноз. – К., 2011. – 150 с.

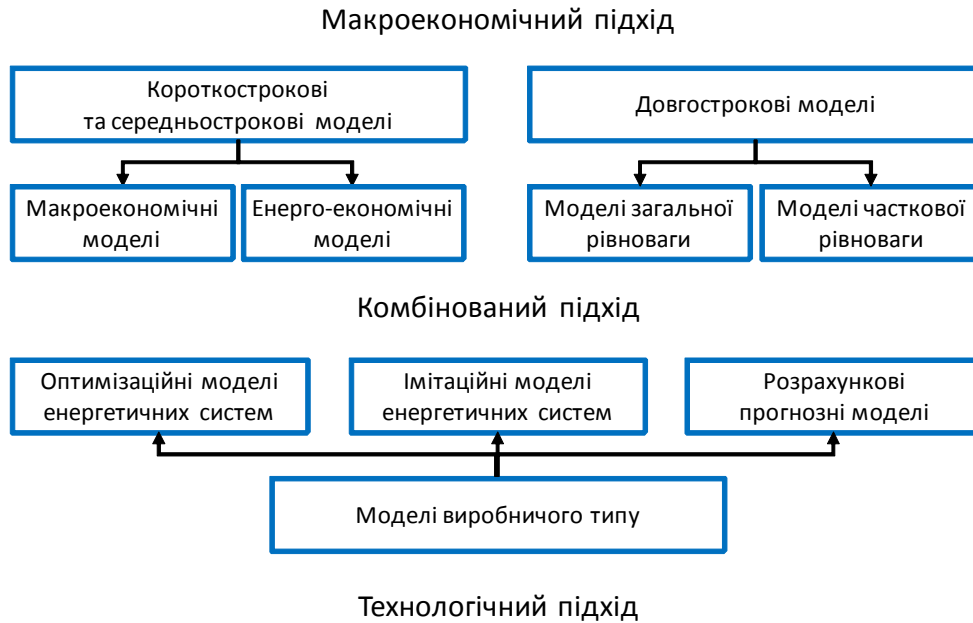


Рис. 3. Зв'язок енерго-економічних та моделей енергетичних систем

Джерело: розроблено авторами на основі роботи Christensen J.M., Halsnas K.; Lim C.J.C. et al. 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, 1992.–157 p.

екологічні. Технологічні умови відповідають сценаріям зміни технічних параметрів чи характеристик енергетичних технологій – збільшення виробничих потужностей, зниження споживання електроенергії за рахунок модернізації, сезонності тощо. Політичні – відображають пріоритети тих, хто перебуває при владі, – це введення пільгових тарифів для окремих категорій споживачів, підтримка проникнення на ринок окремих видів технологій тощо. Бюджетні обмеження визначають наявність інвестицій у 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, попиту тощо, тобто тих елементів, які є або входом, або виходом для відповідних технологій, становить близько 700; кількість обмежень, що задають умови розрахунку математичної моделі, – близько 220; ненульових значень в математичній моделі, які є параметрами будь-яких її елементів, нараховується більше мільйона.

ОМЗР економіки України являє собою типovu 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, сек-

тор загального державного управління та домашні господарства. Останні розділені за децильними (10%-ми) групами залежно від розміру середньодушових еквівалентних загальних доходів. У 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.

Виробники в моделі розділені за 40 "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, у виробничому процесі як сировина та матеріали (проміжне споживання) та експортується.

Отримані підприємствами гроші від продажу товарів і послуг ідуть 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, трансферти від підприємств та інших домогосподарств, різноманітні форми державних трансфертів (пільги,

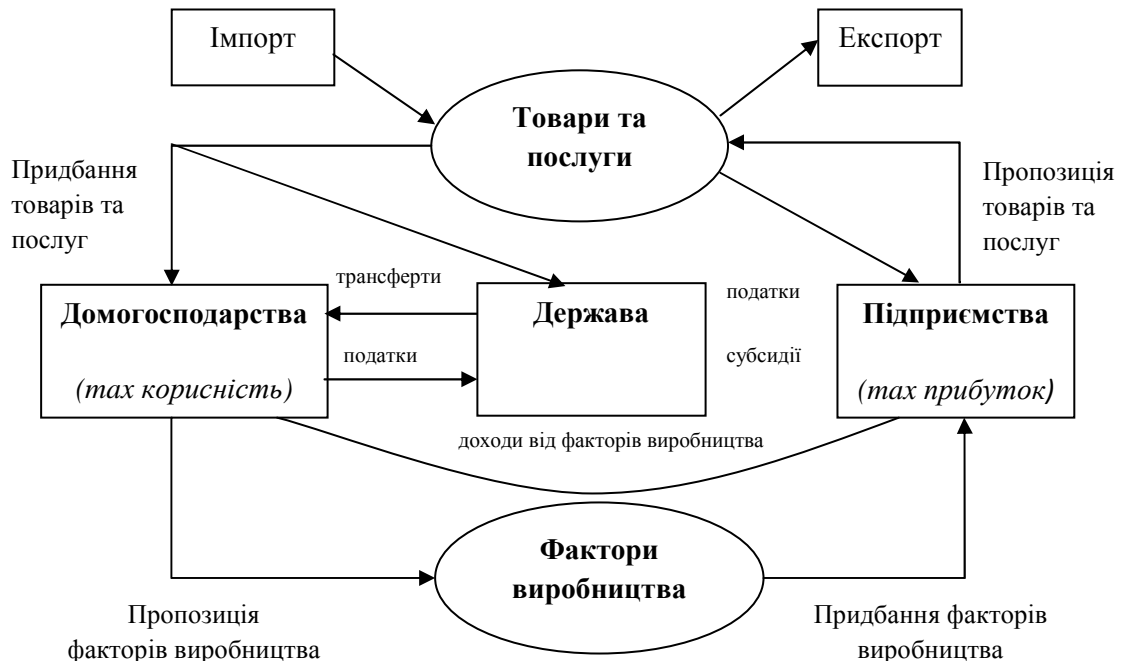


Рис. 4. Кругообіг потоків в ОМЗР економіки України

Джерело: розроблено авторами.

допомоги, виплати) тощо. Отримавши доходи, домогосподарства витрачають гроші на придбання товарів (послуг) та заощадження (інвестування), намагаючись максимізувати власну корисність. Держава отримує податкові надходження, здійснює трансферти та інвестиції, виплачує субсидії та купує продукцію.

За базового сценарію припускається, що у вихідному році економіка перебуває у положенні рівноваги, яке досягається дотриманням трьох умов: "нульовими" прибутками; "очищенням" ринку; балансом доходів та витрат.

Перша умова передбачає, що підприємці продають товари за ціною, яка лише покриває їх витрати, при цьому власники отримують нормальний дохід на капітал, а працівники – заробітну плату. "Очищення" ринків забезпечує рівність – однаковий як попит, так і пропозиції продукції. Остання умова передбачає, що доходи і витрати економічних агентів за певний період мають дорівнювати, при цьому до витрат включаються не лише кінцеве споживання, а й заощадження. Зазначимо, що положення загальної рівноваги не слід сприймати як "знімок" економіки в певний момент часу, воно представляє баланс економічних потоків за певний період, у нашому випадку – за рік.

Для визначення рівноважних обсягів випуску та цін розв'язується система нелінійних рівнянь. У 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, в результаті розв'язання оптимізаційної задачі визначається, як реагуватимуть виробники (змінюючи обсяги експорту та поставок на внутрішній ринок) на зміни екзогенних параметрів моделі (наприклад, на зростання цін експортованої продукції).

Використана в роботі динамічна 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 (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.

Для більш адекватного відображення зв'язків у середині енергетичної системи в моделі використано підхід деталізації виробничого блоку. Базуючись на моделях EMPAX-CGE¹⁷ та GTAP-E¹⁸, продукція проміжного споживання в ОМЗР економіки України виділяється в окрему групу та перебуває 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.

Базуючись на моделях GEMINI-E3¹⁹ та EMPAX-CGE, а також з огляду на доступність економетричних оцінок заміщення між працею та капіталом, додана вартість в ОМЗР економіки України виділена в окрему групу, еластичність заміщення між її складовими покладається рівною 0,3. В усіх розглянутих моделях з розширеним енергетичним блоком електроенергія виділяється як окрема складова. Як і в моделях GEM-E3 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 сектора. 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.

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

- дослідження шляхів оптимізації енергетичного балансу з метою забезпечення раціонального природокористування та низьковуглецевого розвитку економіки України з урахуванням 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 зі зміною клімату (наприклад, виконання Україною своїх зобов'язань в другому періоді Кіотського протоколу та перед європейським Енергетичним співтовариством) з урахуванням їх впливу на виробників, кінцевих споживачів, сектор загального державного управління та динаміку макроекономічних показників;

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

¹⁷EMPAX-CGE. Model Documentation: Interim Report [Електронний ресурс] // RTI International. –2008. – 112 p. – Режим доступу :http://www.epa.gov/tncas1/models/empax_model_documentation.pdf (дата звернення: 12.02.2014).

¹⁸ Burniaux J.-M., Truong T. P. GTAP-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model [Електронний ресурс] // GTAP Technical Paper No. 16. – 2002. – 69 p. – Режим доступу :<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/1203.pdf> (дата звернення: 12.02.2014).

¹⁹ Bernard A., Drouet L., Vielle M. GEMINI-E3, A General Equilibrium Model of International-National Interactions between Economy, Energy and the Environment, V5.3 [Електронний ресурс]. – 2008. – 36 p. – Режим доступу : <http://gemini-e3.epfl.ch/webdav/site/gemini-e3/shared/GEMINI-E3v53.pdf> (дата звернення: 12.02.2014).