

Економіко-математичні методи і моделі прогнозування

Подолець Р.З., канд. екон. наук
Інститут економіки та прогнозування НАН України

ЕНЕРГЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ: ІНОЗЕМНИЙ ДОСВІД І НАПРЯМИ ПЕРСПЕКТИВНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В УКРАЇНІ

Наукове обґрунтування пріоритетів енергетичної політики неможливе без застосування відповідних інструментів аналізу – математичних моделей. Точність зроблених оцінок у тому числі залежить від коректності вибору методологічного підходу відповідно до цілей досліджень і наявної інформації про об'єкт моделювання. Аналізуючи міжнародний досвід розробки та використання прикладних моделей енергетичних систем, автор робить висновки щодо практичної доцільності розробки моделі енергетичної системи України, прийняттого методологічного та організаційного підходу при вирішенні цього завдання.

Важливою закономірністю розвитку світової економіки минулого сторіччя стало неперервне та швидке зростання виробництва та споживання енергії, в першу чергу, за рахунок енергоресурсів органічного походження – нафти, природного газу та вугілля. Незважаючи на щорічне зростання обсягів інвестицій в науково-дослідницькі розробки щодо використання поновлюваних джерел енергії, ймовірно, що протягом наступних десятиріч світовий попит на енергію буде задовольнятися переважно за рахунок традиційних джерел. Звичайно, структура споживання енергії залежатиме від технологічного вдосконалення промислового виробництва, проте сам попит, за оцінками міжнародних організацій, нестримно зростатиме, і вже за 20 років може подвоїтися [1]. Враховуючи тісний взаємозв'язок між обсягами енергоспоживання та рівнем економічного та соціального розвитку, можна стверджувати, що зростання світового споживання відбуватиметься, в першу чергу, за рахунок країн з перехідною економікою; водночас, найбільшими споживачами енергії залишатимуться індустріально розвинені країни – сьогодні частка країн Організації економічного співробітництва і розвитку (ОЕСР) у загальному споживанні енергії становить близько 52%, а кількість населення в цих країнах – лише п'яту частину від світової [2].

Енергетичні кризи 70-х рр. минулого сторіччя різко загострили питання доступу до запасів енергетичних ресурсів [3, с. 27–33]. Причини зростання цін (у першу чергу, на нафту) були суто політичними – і сьогодні обмеження поставок енергоресурсів на світові та регіональні ринки окремими країнами-імпортерами використовується як фактор політичного тиску. Проте додатковий фактор конкурентної переваги економіки країни, отриманий внаслідок



нерівномірності розподілу енергоресурсів по земній кулі, є доволі нестійким і обмеженим у часі. За оцінками експертів, при нинішніх обсягах споживання енергії підтверджених світових запасів нафти вистачить лише на 40 років, запасів природного газу – на 70 років [4]. Зростання світового енергоспоживання, а з іншого боку – фактична вичерпаність старих родовищ "дешевої" сировини – зумовлюють не лише активізацію геологорозвідувальних робіт, але й переоцінку комерційної привабливості родовищ, що ще донедавна визнавалися неперспективними. Брак фінансових і технічних можливостей спонукає національні енергетичні компанії до співпраці з транснаціональними корпораціями з метою створення нових потужностей для транспортування та переробки енергоресурсів. За таких умов забезпеченість енергією економіки країни стає першочерговим завданням національної політики.

Спалювання органічних видів енергоресурсів супроводжується викидами двоокису вуглецю (CO_2), що, на думку багатьох експертів, є головною причиною глобального потепління. Емісія CO_2 та інших парникових газів перешкоджає відображенню теплового випромінювання в атмосферу Землі, що призводить до збільшення середньорічної температури. У звіті Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC) стверджується, що протягом наступних 100 років середня температура на планеті може збільшитися від 1°C до 4°C , що неминуче вплине на природні екосистеми та соціально-економічні умови життя [5]. За таких обставин глобальне потепління та його можливі наслідки розглядаються як одна з найбільших світових загроз.

Вплив енергетичних процесів на навколишнє середовище спостерігається і на регіональному рівні: в результаті емісії двоокису сірки (SO_2) та окису азоту (NO_x) відбувається окислення ґрунтів і підземних вод. Емісія SO_2 є побічним продуктом спалювання викопних видів енергоресурсів і може бути суттєво зменшена шляхом впровадження енергоефективних технологій та переходом на види палива з меншим вмістом сірки. Основними джерелами емісії NO_x є транспортування та спалювання енергоресурсів при виробництві електроенергії. Особлива увага до питань охорони довкілля виникає при експлуатації атомних електростанцій. Хоча за нормальної роботи атомних енергоблоків та суворим дотриманням правил експлуатації і заходів безпеки цей вид виробництва енергії є найбільш екологічно прийнятним. Аварії на АЕС можуть мати довготривалі екологічні наслідки. З цієї причини більшість європейських країн відмовились від перспективного розвитку атомної галузі енергетики.

Мінімізація шкідливого впливу енергетичних процесів на навколишнє середовище, поряд із забезпеченням енергетичної безпеки, розвитком конкурентних ринків енергоресурсів стали базисами енергетичної політики європейських країн. Посилення інтеграційних процесів у Європі обумовили відхід від концепції національної та проведення країнами ЄС спільної енергетичної політики, принципами якої стали [6]:

– повне енергозабезпечення економіки та населення (енергетична незалежність);



- екологічна прийнятність функціонування енергетичного сектора;
- розвиток прозорих і конкурентних ринків енергоресурсів;
- створення умов і стимулювання раціонального використання енергоресурсів;
- забезпечення доступу до енергоресурсів і створення резервів.

Способи досягнення поставлених цілей часто є взаємно суперечливими, що робить завдання стратегічного планування енергетичного сектора комплексним, яке потребує пошуку допустимих компромісів. Висока капіталомісткість енергетичних об'єктів і екологічні ризики, що їм притаманні, загальна інерційність енергетики, її соціальна важливість у поєднанні з переважно низькою енергоефективністю промислового виробництва обумовлюють необхідність пошуку оптимального сценарію розвитку. Для визначення оптимальних напрямів та обсягів інвестування енергетичної галузі прийнято використовувати спеціальні *економіко-математичні моделі*.

Доцільність використання економіко-математичних моделей обумовлена можливістю визначення за їх допомогою взаємозв'язків і залежностей між різними елементами системи, що інакше залишилися б не виявленими, визначення впливу зовнішніх факторів на стан системи, аналізу альтернатив її розвитку. Складність реальних процесів унеможливує їх бездоганне вираження у моделі, природним є певне спрощення їх математичної проекції. Такі спрощення і обмеження, можливі неточності щодо певних параметрів, а з іншого боку – будь-які непрогнозовані явища реального життя, безумовно, зменшують достовірність моделі. *Проте використання моделей слід радше розглядати не як пошук чітких відповідей для прийняття рішень, але як спосіб вивчення тих процесів, які відбуваються в системі. Часто інформація та досвід, набуті в процесі побудови та експлуатації моделі, набагато важливіші за безпосередні результати модельних розрахунків.*

Спектр використання економіко-математичних моделей в енергетиці є досить широким, а сам термін *енергетичне моделювання* є доволі загальним. Відповідно до об'єкта моделювання, найперше слід виділити клас *енерго-економічних моделей* та безпосередньо *моделей енергетичних систем*¹. Інакше, з певним допуском, така класифікація енергетичних моделей відповідає так званим методологічним підходам *top-down* ("зверху-вниз") і *bottom-up* ("знизу-вверх"). Моделі енергетичних систем детально описують зв'язки всередині енергетичного сектора, дизагредовану номенклатуру енергоресурсів, повний набір технологій обробки та споживання енергії. У свою чергу, типова енерго-економічна модель розглядає повністю всю економіку країни, наслідком чого представлення енергетичного сектора є дещо спрощеним. Базуючись на експертних значеннях цінової перехресної еластичності, модель розраховує точки ринкової рівноваги факторів виробництва. Необхідною умовою такого макроекономічного підходу є припущення щодо раціональної

¹ В іноземній літературі під енергетичною системою розуміють весь комплекс економіко-господарських відносин, пов'язаних із виробництвом, постачанням і кінцевим споживанням енергоресурсів (наприклад [7]).



поведінки суб'єктів ринку та існування прозорих конкурентних ринків факторів виробництва. Використовують енерго-економічні моделі переважно для оцінки впливу енергетичної політики на економіку країни і навпаки [8].

У моделях енергетичних систем всі технології описуються набором параметрів – такими як ціна, експлуатаційні витрати, експлуатаційний термін і термін окупності, доступність, ефективність та ін. Фактично, технології представлені процесом трансформації енергоресурсу в продукт. Так, на вході процес когенерації отримує вугілля, на виході – електроенергію, тепло та викиди парникових газів. 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 попиту 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, що вплине на її достовірність. Крім того, деякі параметри, необхідні для перспективних розрахунків (наприклад, світові ціни на енергоресурси), точно оцінити доволі важко.

Моделі енергетичних систем можна поділити на **моделі часткової рівноваги** та **моделі з фіксованим попитом**. Моделі часткової рівноваги², як і енерго-економічні моделі розраховують ціну на енергію за допомогою кривих попиту та пропозиції, тобто попит на енергію обернено залежить від ціни на неї. У моделях із фіксованим попитом рівень попиту на корисне споживання енергії визначається дослідником і в подальшому не змінюється³.

Залежно від цілей досліджень застосовують **оптимізаційні** або **імітаційні** моделі енергетичних систем. Аналіз поведінки системи при різних комбінаціях її параметрів проводять з використанням імітаційних моделей⁴. Результат повністю залежить від коректності вхідної інформації: оскільки число невідомих у моделі відповідає кількості рівнянь, тобто рівень свободи дорівнює нулю, отримане рішення не обов'язково буде найкращим, оскільки воно повністю визначається дослідником. Високий рівень свободи в оптимізаційній моделі дає можливість вибрати кращий стан системи з множини допустимих рішень у рамках встановлених обмежень і цільової функції. На локальному рівні це може бути завдання пошуку оптимальної інвестиційної стратегії або виробничого плану окремого підприємства; моделювання муніципальної системи тепlopостачання. При моделюванні національної енергетич-

² Ці моделі називають моделями часткової рівноваги, оскільки до системи включено лише енергетичний сектор.

³ Корисне споживання енергії – частина кінцевого споживання енергії, що залишилася після кінцевої трансформації. Під час кінцевої трансформації електроенергія може перетворитися на світло, механічну або теплову енергію.

⁴ В іноземній літературі можна зустріти термін "експериментальні моделі".



ної системи критеріями оптимізації автоматично стають завдання енергетичної політики, наприклад, мінімізація загальних витрат, мінімізація або досягнення визначеного рівня викидів парникових газів, максимізація споживання окремого виду енергоресурсу. Незважаючи на фактично багатокритеріальний характер поставленої в такий спосіб задачі, при моделюванні енергетичних систем намагаються уникати багатокритеріальної оптимізації, оскільки при використанні стандартних математичних алгоритмів рішення багатокритеріальних задач (лінійне звертання вагових коефіцієнтів, Парето-оптимальність та інші) розв'язок моделі не завжди може бути якісно інтерпретовано⁵.

Лінійне програмування є найбільш поширеним математичним апаратом в оптимізаційних моделях. Енергетичні *моделі лінійного програмування* використовують як при складанні виробничих програм окремих енергокомплексів [11], так і при довгостроковому плануванні національної енергетики [12]. Якщо взяти до уваги, що узгоджені показники видобутку, імпорту, експорту, перетворення та споживання енергоресурсів складають таблицю енергетичного балансу країни, з певним допуском можна стверджувати, що при оптимізації національної енергосистеми розв'язується задача оптимізації зведеного енергетичного балансу: "В розрахунку оптимального паливного балансу розглядається не окреме виробництво, а весь господарчо-виробничий комплекс, що охоплює сфери виробництва, транспорту і споживання палива" [13, с. 124]. Включення до моделей лише лінійних рівнянь гарантує існування абсолютного оптимуму. Використанням *нелінійних моделей* можна досягти відображення більш складних взаємозв'язків системи, проте, на відміну від лінійної оптимізації, абсолютний оптимум існуватиме лише за умови, що цільова функція та обмеження є випуклими. Більшість задач нелінійної оптимізації розв'язуються із застосуванням методу (релаксацій) Лагранжа, алгоритму імітації випалу [14] або генетичного алгоритму. Базуючись на підходах лінійного програмування, було розроблено нові математичні методи, що пізніше застосовувалися в енергетичному моделюванні – змішане цілочислове програмування [15], полілінійне програмування [16].

Для визначення необхідної потужності нового енергетичного об'єкта проводять аналіз енергопостачання під час максимальних навантажень системи, що робиться з використанням *статичної* оптимізаційної моделі. Така модель вивчає стан системи в конкретний момент, нехтуючи змінами системи в часі. Оскільки математичний алгоритм статичних моделей порівняно з динамічними є відносно нескладним, технічні параметри енергетичної системи можуть бути описані в них максимально детально. Водночас енергетична система країни є об'єктивно складнішою, в ній присутні сезонні коливання попиту на нафтопродукти, добові коливання споживання електроенергії та ін. Відстежувати та аналізувати зміни системи протягом певного періоду часу

⁵ Доцільність використання багатокритеріальної оптимізації в енергетичному моделюванні проаналізовано в [9]. В сучасних прикладних комп'ютерних моделях енергетичних систем багатокритеріальний підхід використано в моделі LEAP (лінійне звертання вагових коефіцієнтів) та одній з версій моделі MESSAGE (метод гарантованого результату). Детально з методом гарантованого результату можна ознайомитись в [10].



можна за допомогою *динамічних і квазідинамічних моделей*. У квазідинамічних моделях весь часовий горизонт розбивається на декілька послідовних періодів, не обов'язково рівних між собою; розв'язок оптимізаційної задачі для першого періоду стає початковою інформацією для другого часового проміжку, і так для всіх наступних періодів. На відміну від цього, в динамічних моделях цільова функція охоплює весь часовий горизонт, тобто ставиться задача оптимізації відразу всього періоду. Як наслідок, початковою інформацією для квазідинамічної моделі є поточний стан системи, в той час як робота з динамічною моделлю потребує чіткого уявлення про можливі перспективні зміни стану системи. Набір підходів для обчислення динамічних моделей прийнято об'єднувати під терміном *динамічне моделювання*.

Всі описані вище моделі є *параметричними* – вони переважно використовуються для середньо- та довгострокового моделювання енергетичної системи, структура та параметри якої можуть із часом змінюватися. Вхідною інформацією для таких моделей є як офіційна статистика, так і експертні оцінки самих дослідників. При складанні короткострокових прогнозів поряд з параметричними часто використовують *економетричні моделі*. Наприклад, прогноз погодинного споживання електроенергії на наступний день, тиждень або навіть рік, як правило, складається за допомогою саме економетричних моделей. Основою такого підходу є припущення, що існуючі в минулому в середині системи взаємозв'язки з часом не змінилися. На базі статистичного аналізу часових рядів, встановлених статистичних залежностей і трендах проводиться коригування ретроспективних статистичних даних. Іншим прикладом застосування економетричних моделей є аналіз чутливості споживачів до цін на енергоресурси [17].

Коректність відображення енергетичної системи в моделі, вибір способу моделювання напряму залежать від типу системи, що вивчається, повноти та якості інформації про неї, часового горизонту моделювання та, безпосередньо, самих цілей досліджень. З іншого боку, не завжди кожна енергетична модель може бути строго категоризована, а мати характеристики різних класів моделей. Крім того, при моделюванні суміжних систем поширеною практикою стала розробка системи моделей різних класів.

Проведення розрахунків складних енергетичних моделей з сотнями рівнянь і тисячами невідомих неможливе без застосування обчислювальної техніки. Більше того, *сьогодні розробка нової моделі або нового математичного алгоритму передбачає подальшу прикладну реалізацію*. Першою іноземною комп'ютерною моделлю вважається Брукгавенська модель оптимізації енергетичних систем (BESOM), розроблена американською Брукгавенською національною лабораторією в 1974 р. Взагалі, *робота над створенням комп'ютерних енергетичних моделей ніколи не була цільовою, вона проводилася комплексно з іншими дослідженнями*. В цьому контексті для України може виявитися корисним досвід Німеччини.

На початку 1990-х рр. Міністерством освіти, науки, досліджень і технологій колишньої ФРН було розпочато проект IKARUS (Instrumente für Klima-



gasreduktionsstrategien, Інструментарій для розробки стратегій зменшення викидів парникових газів). Метою проекту було створення бази даних та системи моделей для розробки та кількісного обчислення енергетичних та екологічних сценаріїв. Крім макроекономічної, база даних включає детальну інформацію щодо кінцевого попиту на енергію, характеристику існуючих технологій обробки та споживання енергії, ціни на всіх трансформаційних стадіях та ін. (таблиця).

Таблиця

Проект IKARUS

Рівень аналізу	Вхідні дані	Метод моделювання	Результати
Національна економіка	- макроекономічні показники - параметри енергетичної політики - соціальні показники	Модель типу затрати/випуск з дизагрегованим енергетичним сектором	- міжгалузевий баланс - попит на енергію
Енергетичний сектор	- ціни на енергоресурси - попит на енергію - параметри технологій	Оптимізаційна модель	- енергетичний баланс - баланс емісії ПГ - вартісна форма енергетичного балансу
Окремі галузі	Кількісні показники галузевої політики	Імітаційні моделі: - промисловості - транспортного сектора - сектора теплопостачання	Секторальні енергетичний та екологічний баланси
База даних			

У рамках проекту було розроблено три енергетичні моделі:

- класична лінійна оптимізаційна модель енергетичного сектора;
- деталізована імітаційна модель теплопостачання з виокремленням типових житлових будинків і домогосподарств (сімей);
- імітаційна модель транспортного сектора з виокремленням пасажирського транспорту та вантажівок; облік споживання енергії, викидів парникових газів і витрат проводиться окремо залежно від типу поїздки та транспортного засобу.

Крім того, була розроблена макроекономічна динамічна модель типу затрати/випуск, що складається з 24 галузей, включаючи 9 підгалузей енергетичного комплексу. Для відображення ефекту взаємозаміщення факторів виробництва модель базується на використанні виробничої функції та секторального автономного технічного прогресу. Макроекономічна модель інтегрована з енергетичною оптимізаційною моделлю, тому розраховані технічні параметри енергетичних потоків, наприклад, використання вугілля вітчизняного виробництва або атомної енергії, а також показники структури капіталу у виробничому секторі використовуються у енерго-економічній моделі.

Розглянемо ще декілька прикладних моделей енергетичних систем, що набули широкого використання.

Модель **MARKAL** (MARKet ALlocation) є лінійною, квазі-динамічною оптимізаційною моделлю національної енергетичної системи. Перша її версія



була розроблена у 1983 р. в рамках Програми системного аналізу енергетичних технологій (ETSAP) на замовлення Міжнародного енергетичного агентства (IEA) спільно з Брукгавенською національною лабораторією (США) та науковим центром Kernforschungsanlage Jülich (Німеччина). Модель призначалася для визначення оптимальної, з економічної та екологічної точок зору, системи енергопостачання на національному, регіональному та локальному рівнях. Ставши базовою для цілої серії наступних модельних розробок, на сьогодні вона є найпоширенішою енергетичною моделлю і використовується у понад 40 країнах світу більше ніж 80 науково-дослідними центрами. Алгоритмічно, базуючись спочатку лише на теорії лінійного програмування, наступні версії цієї серії моделей вже розроблялися з використанням елементів нелінійного, динамічного, стохастичного та цілочислового програмування. Беззаперечною перевагою цієї моделі є те, що тіло комп'ютерної програми є відкритим (комп'ютерна програма моделі реалізована на мові GAMS (General Algebraic Modeling System)), що дає можливість користувачу зрозуміти математичний алгоритм моделі та, за потреби, внести до нього необхідні зміни.

MARKAL є моделлю з фіксованим попитом, тобто умовою рішення є повне задоволення попиту. При оптимізації цільової функції модель вибирає кращий набір енергоресурсів і технологій для покриття заданого попиту. Вхідними даними моделі є інформація щодо доступних енергоресурсів, економічні, технічні та екологічні характеристики технологій та прогноз попиту. В MARKAL вирізняють п'ять класів об'єктів: джерела (наприклад видобування), енергоносії (вугілля, вітер), процеси, трансформаційні системи та суб'єкти споживання. Перетворення одного енергоносія в інший описується процесом (нафтопереробка). Трансформаційні системи (електростанції, машини) перетворюють енергоносії у продукти кінцевого попиту (електроенергія, відстань подорожі). Визначені обсяги кінцевого та корисного споживання енергії дають можливість моделювання впливу на споживання, зокрема – через заходи з енергозбереження. Процеси, трансформаційні системи та суб'єкти споживання характеризуються ефективністю, доступністю, терміном експлуатації, початковими інвестиціями, постійними та змінними витратами. Витрати дисконтуються відносно поточної вартості відповідно до визначеної дисконтної ставки та ліквідаційної вартості існуючих потужностей.

Горизонт моделювання в MARKAL можна розбити на шістнадцять однакових періодів. Відповідно до щойно введених і виведених з експлуатації старих потужностей, ці проміжки відрізнятимуться за складом технологій, що використовуються. Крім того, до моделі можна включити потужності з циклічним графіком роботи (гідроакумуючі електростанції). Обмеженнями моделі є річні баланси енергоресурсів, сезонні баланси теплопостачання, добові баланси електроенергії. Такі параметри, як загальна встановлена потужність, використання окремого енергоресурсу або загальні інвестиції можуть бути обмежені користувачем моделі.

Багатокритеріальний аналіз в MARKAL можна провести за допомогою восьми стандартних функцій, які *почергово* можуть виступати як критеріями



оптимізації, так і обмеженнями або розрахунковим блоком. Це такі критерії, як: витрати системи (з можливістю виключення витрат на окремі технології), екологічний вплив, використання органічних видів енергоресурсів, використання поновлюваних видів енергії, використання атомної енергії, структура первинної енергії та комбінації показників структури та витрат. При використанні критерія як обмеження, користувачем визначається максимальне або мінімальне значення показника; критерії, включені до розрахункового блоку, не впливають на оптимальне рішення; критерій структури первинної енергії може бути застосований для зменшення залежності від імпортованих енергоресурсів. Оптимальне рішення включає інформацію щодо встановлених потужностей на кожний модельний період, енергопотоків, набору процесів і трансформаційних технологій, загальних витрат і загальної емісії системи.

Додатково до моделі енергетичної системи MARKAL було розроблено допоміжні моделі: спрощена енерго-економічна модель MARKAL-MAKRO, що дозволяє оцінити взаємозв'язок ринкових механізмів, державної політики та технологічного розвитку; моделі часткової рівноваги MARKAL-MICRO та MARKAL ELASTIC DEMAND, в яких попит на корисну енергію було замінено, відповідно, на нелінійну та скачковидну криві попиту на енергію.

Модель **EFOM** (Energy Flow Optimisation Model, модель оптимізації енергетичних потоків) розроблялася в 1970-х рр. на замовлення Європейської Комісії. Ця лінійна оптимізаційна модель описує енергетичні потоки від поставок первинної енергії до сектору кінцевого споживання. Дослідження з використанням EFOM проводилися у всіх країнах ЄС за виключенням Австрії, а також у Росії, Мексиці та Китаї.

EFOM описує структуру енергетичної системи за допомогою орієнтованого графу (вузлів та орієнтованих зв'язків між ними). Зв'язки описують потоки енергії (матеріалів), вузли – умовні об'єкти, де енергетичні та матеріальні потоки зустрічаються та трансформуються. Модель враховує рівень використання вузлів, їх екологічні параметри, технічний та економічно доцільний термін їх експлуатації. Обмеженнями можуть виступати витрати енергосистеми, імпорт енергоресурсів, верхні та нижні границі енергопотоків і вузлів. EFOM є квазідинамічною моделлю – горизонт моделювання, що становить 40 років, може бути розбитий на періоди довільної довжини з можливістю визначення обмежень на енергопотоків, продуктивність енергосистеми та загальні витрати для кожного періоду окремо. Загальні витрати складаються з інвестицій, постійних витрат, пропорційних до продуктивності енергосистеми, та змінних витрат, що пропорційні до енергетичних і матеріальних потоків. Інвестиції, включаючи кредитну ставку, розбиваються на весь період економічно доцільного використання технології. З використанням модулю EFOM-ENV до моделі можна включити екологічні обмеження щодо використання певної технології, рівня емісії парникових газів як окремого сектора, так і повністю всієї енергосистеми. Економічний цикл у моделі розбитий на три сезонні періоди (зима, літо, осінь/весна) та три добових періоди (базове навантаження, підвищене та пікове навантаження). Попит на кінцеву енергію



можна змінювати завдяки можливості представлення у моделі заходів з енергозбереження, проте попит на енергію визначається екзогенно.

Результатом продовження досліджень у рамках проекту Міжнародного енергетичного агентства ETSAP стала розробка динамічної лінійної оптимізаційної моделі *TIMES* (The Integrated MARKAL-EFOM System) з цільовою функцією мінімізації зведених витрат енергосистеми при обмеженнях на річні або кумулятивні (наростаючим підсумком) викиди парникових газів. Завдяки розширенню можливостей моделі, з використанням *TIMES* можна провести аналіз питань, що не могли бути адекватно представлені в попередніх розробках (MARKAL та EFOM). Так, шкала часу є більш гнучкою: горизонт моделювання може бути розбитий на довільну кількість довільних за величиною послідовних періодів, а календарний рік може бути представлений довільною кількістю періодів трьох ієрархічних рівнів. Для оцінки майбутньої потреби у міжнародних транспортних потужностях або ефектів від міжнародної торгівлі дозволами на викиди ПГ можна створити модель міжрегіональної енергетичної системи. Залежно від строку давності введення енергетичних об'єктів і моральної застарілості використаних технологій модель розраховує поточну вартість і технічні характеристики процесів. Наприклад, необхідні інвестиції для побудови нової вітрової електростанції з часом можуть зменшуватися, а постійні експлуатаційні витрати на існуючій електростанції з часом можуть зростати. Крім того, передбачено, що характеристики процесів можуть змінюватися і миттєво. Наприклад, така функція може бути використана для моделювання зростання постійних експлуатаційних витрат через зростання витрат на оплату праці. Можливість моделювання регулювання виробництва гідроелектроенергії порівняно з попередніми моделями в *TIMES* значно краща завдяки введенню в модель поняття сезонних і добових сховищ. Сезонне сховище може бути заповнене як виробленими щойно продуктами енергосистеми, так і специфічними сезонними носіями первинної енергії, наприклад потоками води, що заповнює водосховище для подальшого виробництва електроенергії. У *TIMES* економічно доцільний та технічно можливий терміни експлуатації задаються окремо, завдяки чому можна встановити різний амортизаційний період. Інвестиції у великі проекти (будівництво електростанції) протягом всього періоду будівництва розбиваються на рівні частини і переносяться на економічно доцільний термін експлуатації технології. Обсяги корисного споживання енергії можуть бути встановлені дослідником або визначені розрахунково на базі еластичних кривих попиту та пропозиції.

Лінійна оптимізаційна модель енергосистеми *MESSAGE* (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental impact) розроблена в Міжнародному Інституті прикладного системного аналізу (IIASA, Австрія) в рамках Глобальної Енергетичної Моделі (GEM), що складається з трьох локальних моделей: модель енергетичних перетворень (*MESSAGE*), модель енергетичного попиту та модель економічних зв'язків (*IMPACT*). Цільовою функцією моделі є мінімізація загальних дисконтованих витрат енер-



госистеми для покриття попиту на енергію для заданого проміжку часу. Важливими додатковими умовами є: будівництво нових потужностей, доступність ресурсів, технологічні зв'язки. Модель враховує графік електричних навантажень, диференціацію ресурсів за категоріями витрат, а також вплив на навколишнє середовище.

MESSAGE описує всі процеси енергетичної системи: видобуток, імпорт та експорт, обробку, транспортування та кінцеве споживання енергії. Аналогічно до EFOM, горизонт моделювання (50 років) можна розбити на довільні періоди з відповідними сезонними та добовими виробничими циклами. Спеціальні виробничі графіки в MESSAGE регламентують послідовність використання різних технологій. Наприклад, можна визначити базовий режим роботи атомних електростанцій або період роботи електроустановок, що працюють на сонячних батареях. Технології кінцевого споживання енергії розділяються в моделі на обладнання для термальної конверсії, попит на електроенергію, що не може бути заміщена на будь-який інший енергоресурс або продукт кінцевого попиту, транспорт та неенергетичне використання. Сучасні версії моделі доповнені можливостями використання цілочислових змінних, нелінійних функцій, багатокритеріальної оптимізації та стохастичного програмування. Крім оптимізації загальних витрат, MESSAGE використовують для побудови кривої граничних витрат, пошуку оптимальних технологій та оцінки перспективних інвестицій.

Висока інерційність ПЕК, пов'язана з довготривалими циклами проектування та спорудження нових енергетичних об'єктів, обумовила необхідність охоплення енергетичним моделюванням інтервалу від 10 до 30 років. Проте набагато триваліший період розпаду (поглинання) двоокису вуглецю в атмосфері (50-150 років) та низька динаміка зміни структури споживання енергоресурсів у світі вимагають подовження горизонту енергетичного моделювання. Вимушене подовження горизонту визначило нові важливі питання, що потребують математичної формалізації та внесення у довгострокові енергетичні моделі:

– рівень доступності традиційних видів енергоресурсів (насамперед – вуглеводнів), коректність оцінки їх запасів, технічно можливого та економічно доцільного їх видобутку;

– довготривалі тенденції зміни кон'юнктури світового енергетичного ринку: закономірності формування перспективних світових цін і попиту на різні види енергоресурсів; закономірності характеру взаємовпливу між цінами й обсягами міжнародного обміну енергії; закономірності еволюції світового енергетичного ринку;

– адекватність формалізації загальних технологічних змін із урахуванням економічних, екологічних факторів і взаємозамінності енергоресурсів.

Незважаючи на традиційність підходів при вирішенні задачі моделювання та оптимізації енергетичних систем, ряд особливостей цієї задачі виключають можливість створення універсальних методів і моделей, що забезпечували б отримання допустимих рішень для будь-якої конкретної

країни. Це обумовлено тим, що залежно від багатьох специфічних особливостей конкретної країни, а саме – системи управління економікою, механізмів, що використовуються для правового та державного регулювання енергетичного сектора, рівня економічного розвитку, існуючих та потенційних можливостей забезпечення енергетичними ресурсами, умов збору, обробки та якості статистичної інформації, мета і задачі можуть суттєво різнитися для різних країн, як і можливості та ефективність використання різних методів і моделей. Для точного трактування та коректного порівняння результатів розрахунків різних моделей надзвичайно важливо знати цілі та підходи, на основі яких ці моделі створювались, а відтак: які припущення та спрощення були зроблені при побудові моделей, яка якісна інформація використовувалася, які параметри були розраховані, а які – задавалися екзогенно. В одних випадках для визначення орієнтирів енергетичної (екологічної) політики достатньо з використанням імітаційних моделей встановити вплив певних регуляторних механізмів і заходів на стан енергосистеми⁶. В інших дослідженнях при пошуку кращого сценарію розвитку енергетичного сектора застосовують оптимізаційні моделі для визначення оптимальної перспективної структури енергетичної системи та її технічних параметрів, мінімальних витрат на її функціонування тощо. Наведений огляд прикладних модельних розробок свідчить, що стандартним методологічним підходом, що використовується при розробці національної енергетичної політики, є створення оптимізаційної лінійної квазі-динамічної моделі енергетичної системи з фіксованим попитом (або часткової рівноваги).

У Радянському Союзі такі дослідження проводилися доволі активно⁷. В Україні, де енергозабезпечення економіки країни було чи не найгострішим питанням національної політики, через ряд об'єктивних причин такі дослідження практично не проводились. У загальному випадку, в умовах дерегуляції в енергетиці моделювання розвитку ПЕК та його галузевих підсистем значно ускладнюється, особливо для країн, економіка яких знаходиться в перехідному стані від командно-адміністративного керування до методів ринкового регулювання. Крім того, порушення рядів даних, викликане неодноразовими змінами принципів збору та обробки економічної та енергетичної статистики, практично унеможливило використання цілих класів енергетичних моделей.

На сьогодні більшість вітчизняних розробок, на жаль, залишаються суто дослідницькими. Використання таких моделей є обмеженим як для поточного управління, так і для стратегічного планування галузі. З одного боку, вони не зорієнтовані на проведення короткострокових (помісячних) прогнозних розрахунків і, відповідно, не враховують поточний стан справ у галузі – реальних обсягів виробництва, розподілу та споживання енергоресурсів; обсягів накопичення первинних енергоресурсів на теплових електростанціях і

⁶ З метою вивчення впливу окремих державних регуляторних механізмів на обсяги викидів ПГ в Україні була створена імітаційна модель енергетичного балансу. Детальніше [18].

⁷ Наприклад, [19, 20, 21].



складах; рівня оплати споживачів та ін. З іншого – навіть "макроекономічні" моделі залишаються незатребуваними через недосконалий математичний апарат – застосування експертних оцінок і відповідних методів обробки експертної інформації або оціночних розрахункових моделей при плануванні розвитку енергетичного комплексу не дає конкретних кількісних науково обґрунтованих рішень на питання вибору орієнтирів національної енергетичної політики і є способом уникнення таких питань шляхом імітації наукового підходу. Ситуація, коли при розробці Національної енергетичної стратегії [22] питання розробки національної системи моделювання енергетичного комплексу навіть не ставилося на порядок денний, може викликати, як мінімум, подив. За таких умов на сьогодні в Україні єдине можливе є розроблення імітаційної енерго-економічної моделі. Цей підхід, хоча й не позбавлений недоліків відносно достовірності у довгостроковому періоді, дає придатний результат з точки зору сценарного аналізу та ключових факторів, що впливають на обсяги споживання енергії по окремих галузях та економіки в цілому. Водночас, протягом останніх років розробка моделей енергетичних систем країн Центральної та Східної Європи проводилася саме за оптимізаційним підходом⁸, що, окрім іншого, сприяло формуванню команд фахівців з енергетичного моделювання, створенню національної бази даних технологій виробництва, перетворення та споживання енергії, можливості складання вартісної форми енергетичного балансу і т. д.

Подальші дослідження у напрямку розробки енергетичних моделей мають набути комплексного характеру: такі моделі повинні відповідати певним важливим вимогам – бути достатньо гнучкими за структурою і дозволяти формувати та оперативно змінювати як початкову інформацію (сценарні умови), так і показники ефективності прийнятих рішень і критерії їх оцінки; допускати різні рівні деталізації представлення системоутворюючих складових енергетичної системи країни; враховувати особливості енергетичної галузі України в цілому і технічного, фінансового та економічного стану її складових (наприклад, несвоєчасну оплату за спожиту енергію); враховувати особливості вітчизняної практики збору та обробки відповідної статистичної інформації, проте, у будь-якому випадку, базуватися на офіційних статистичних даних профільних міністерств, комітетів і тих великих енергетичних компаній, що суттєво впливають на обсяги виробництва та споживання енергетичних ресурсів. Моделювання енергетичної системи слід проводити з використанням загальноприйнятих у світі методологічних підходів, оскільки після розробки методології складання звітного енергетичного балансу України відповідно до рекомендацій Міжнародного Енергетичного Агентства одразу ж стане проблема складання перспективного балансу, показники якого б адекватно сприймалися як вітчизняними, так і іноземними фахівцями. Прикладна реалізація моделі має виконуватися з використанням сучасних спеціалізованих програмних пакетів. Така робота буде неможлива без державної зацікав-

⁸ Дослідження енергетичних систем із використанням моделей MARKAL та TIMES проводилися в Естонії [23], Латвії [24], Польщі [25] та Чехії [26].

леності, оскільки її реалізація вимагатиме залучення широкого кола експертів з економіко-математичного моделювання, статистики, працівників енергетичної галузі.

Література

1. *International Energy Outlook*, April 2004. – www.eia.doe.gov/oiaf/index.html
2. *Energy Balances of OECD Countries, 2001–2002*. – Energy statistics of OECD Countries, IEA. – Paris: OECD, 2004. – P. 328.
3. Байков Н., Александрова И. Производство и потребление топливно-энергетических ресурсов в XX в. // *Мировая экономика и международные отношения*. – 2001. – № 9. – С. 27–33.
4. *BP Statistical Review of World Energy June 2004*. – www.bp.com/statisticalreview2004
5. *Ancillary benefits and costs of greenhouse gas mitigation*. Proceedings of an IPCC Workshop, Washington D.C. 27-29 March 2000 – Paris: OECD, 2000. – P. 592.
6. *Final report on the Green Paper "Towards a European strategy for the security of energy supply"*. – Brussels, 26.6.2002. COM(2002) 321 final.
7. Nikacenic N., Grubler A., Ishitani H., Johansson T., Marland G., Moreira J.R., Rogner H.H. *Energy primer*. – RR-97-1/January 1997. – IIASA, Laxenburg, Austria, 1997.
8. Kydes A.S., Shaw S.H., McDonald D.F. *Beyond the horizon: Recent directions in long-term energy modeling*. – Energy, 1995, #20(2).
9. Grauer M., Messner S., Strubegger M. An integrated programming package for multiple-criteria decision analysis, in M. Grauer, M. Thompson, A.P. Wierzbicki. *Plural Rationality and Interactive Decision Processes*, Vol. 248 of Lectures in Economics and Mathematical Systems, Springer-Verlag, Berlin, Germany. – 1985.
10. Красовский Н.Н. *Управление динамической системой. Задача о минимуме гарантированного результата*. – М.: Наука, 1985.
11. Joseffson A., Johnsson J., Wene C.O. *Community based regional energy-environmental planning*. – WP-78. – Fondazione Eni Enrico Mattei, Milano, Italy, 1994.
12. Ybema J.R., Lako P., Gielen D.J., Oosterheert R.J., Kram T. *Prospects for energy technology in the Netherlands*. – Netherlands Energy Research Foundation. – ECN-C-95-002., Petten, Netherlands, 1995.
13. Смертин А.А. *Линейное программирование в расчетах топливного баланса*. – М.: Изд-во эконом. литературы, 1963. – С. 121.
14. Vikko N., Lautala P. *Short-term electric power production scheduling using simulated annealing algorithm*. – Proceedings of the IASTED International Symposium. – ACTA Press, Anaheim, CA, USA, 1990.
15. Williams H.P. *Model building in mathematical programming*. – JohnWiley&Sons Ltd., Chichester, UK, 1991.
16. Шапот Д.В., Лукацкий А.М. Методы решения задач полилинейного программирования // *Журн. выч. математики и мат. физики*. – 2001. – Т. 41. – № 5.
17. Bhatja R., Rogner H.H., Khan A.M., Furlan G. *Econometric methods for energy planning and policy*. – Economics, modeling, planning and management of energy. – World Scientific Publishing Co., Singapore, 1990.
18. *The National Strategy of Ukraine for Joint Implementation and Emissions Trading*. Kiev, 2003. – <http://lnweb18.worldbank.org/ESSD/envext.nsf/46ByDocName/Ukraine>
19. *Имитационное моделирование развития систем энергетики* / Д.А.Арзамасцев, В.Р.Елохин, Л.Д.Криворуцкий и др.; Отв. ред. Арзамасцев Д.А. – Иркутск: СЭИ, 1988. – 196 с.



20. Вайк Л. Э., Рабкин Г.Б., Янимяги К.Э. Согласованная оптимизация топливно-энергетических балансов экономических районов: теория и методы. – Таллин: АН ЭССР, 1982. – 223 с.
21. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях. – К.: Наук. думка, 1987. – 198 с.
22. Концептуальні положення енергетичної стратегії України на період до 2030 року та подальшу перспективу. – <http://mpe.energy.gov.ua/minenergo/document/10000111704/zvit.doc>
23. Olev Liik, Mart Landsberg, Markko-Raul Esop. Analysis of Estonian power system development using MARKAL model. – Proceedings of IEA ETSAP Workshop, Torino, 28–31 October, 2002.
24. Gary A. Goldstein, Lorna A. Greening, Janis Rekis. Assessing the Latvia Energy Sector in the Context of Climate Change Economics. – Proceedings of World Bank Prototype Carbon Fund Workshop, Riga, 24–27 January 2000.
25. Marcin Jaskolski. Analiza aplikacji modelu MARKAL i opis modelu TIMES na podstawie literatury. Internal Report, Department of Electrical Power Engineering, Gdansk University of Technology, Gdansk, July 2002.
26. The Czech Republic's Second Communication on the National Process to Comply with the Commitments under the UN Framework Convention on Climate Change. – Ministry of the environment of the Czech Republic, Typesetting: EnviTypo, Prague, May 1997.