

УДК 004.942:620.9

Микола Каплін*, к.т.н., <https://orcid.org/0000-0001-9328-4257>

Тетяна Білан, к.т.н., <https://orcid.org/0000-0002-0280-6716>

Ігор Новицький, <https://orcid.org/0000-0002-3304-7492>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;

e-mail: info@ienergy.kiev.ua

* Автор-кореспондент: nicko.dropper@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КРАЇНИ ЗА СТРУКТУРОЮ ДАНИХ ПРОДУКТОВОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ В ФОРМАТІ МІЖНАРОДНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АГЕНЦІЇ

Анотація. Досліджено можливості побудови моделей виробничого типу за Л.В. Канторовичем з використанням розширеної номенклатури продуктового енергетичного балансу, а також показників енергетичних балансів МЕА для України, яка дозволила визначити взаємоузгоджені й збалансовані обсяги виробництва і постачання енергоносіїв за використання мінімального обсягу регламентованих чинним законодавством країни відкритих інформаційних джерел. Створення структури згаданих моделей у відповідності до структури системи показників згаданих балансів дає можливість оцінювання множини показників витрат і випусків цих звітних статистичних документів на повноту й узгодженість, зокрема з метою виявлення невірно врахованих, необлікованих, втрачених або викрадених обсягів паливно-енергетичних ресурсів. З огляду на це, в роботі основну увагу приділено формулюванню основних вимог до моделей енергозабезпечення щодо цілей їх застосування, розробленню методичного підходу до побудови структури і розрахунку технологічних коефіцієнтів (коефіцієнтів випуску і витрат) економіко-математичної моделі виробничого типу за номенклатурою напрямів надходження, перетворення й кінцевого споживання, регламентованих продуктовим енергетичним балансом України, застосуванню згаданого підходу до розроблення низки моделей енергозабезпечення різного рівня агрегування, призначених для вирішення задач прогнозування структури й обсягів постачання енергоносіїв, а також дослідження їх доцільних варіантів, аналізу якості статистичних енергетичних балансів, виявлення обсягів необлікованого споживання енергетичних ресурсів.

Ключові слова: енергозабезпечення, продуктовий енергетичний баланс, модель виробничого типу.

1. Вступ

Постачання енергоносіїв в економіці переважної більшості країн світу перебуває на цей час у стані докорінних змін, пов'язаних як з бурхливим розвитком технологій відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), так і численними геополітичними викликами сучасності, за яких паливо і енергія все частіше використовуються як інструменти впливу при вирішенні гострих міждержавних конфліктів. Особливо значимим є безпечне і повноцінне задоволення енергетичних потреб для України, яка зазнає істотного дефіциту практично всіх викопних видів вуглецевмісного палива за повільних темпів впровадження ВДЕ, викликаних необхідністю значних інвестицій для розвитку цього процесу, який, в свою чергу, передбачає глибоку реконструкцію й модернізацію об'єктів традиційної енергетики. Тому об'єктом дослідження цієї роботи є система енергозабезпечення економіки паливно-енергетичними ресурсами в умовах

інтенсивного розвитку ВДЕ і зростання частки їх генерації в енергетичному балансі країни. Це сукупність видобувних галузей, підприємств генерування електричної та теплової енергії, об'єктів та підсистем їх зберігання, накопичення й транспортування, споживачів енергетичних ресурсів, що разом здійснюють виробництво, постачання і споживання енергоносіїв в економіці країни. Кінцевим результатом дослідження, частиною якого є викладене нижче у цій статті, мають бути розраховані за допомогою економіко-математичної моделі енергозабезпечення прогнозні варіанти структури та обсягів надходження первинних і вторинних енергоносіїв в економіку країни за загальносвітової тенденції розвитку відновлюваної енергетики та пов'язаних з нею істотних змін світових ринків традиційних видів палива за умови гарантування енергетичної безпеки, дотримання європейських екологічних стандартів функціонування паливно-енергетичного комплексу (ПЕК), а також із врахуванням технологічних вимог щодо інтеграції ВДЕ в системи постачання

© М. КАПЛІН, Т. БІЛАН, І. НОВИЦЬКИЙ, 2022

енергетичних продуктів. Зокрема метою цієї роботи є формулювання основних вимог до моделей енергозабезпечення, оцінка можливостей їх побудови в класі економіко-математичних моделей виробничого типу (за Л.В. Канторовичем), рівня деталізації та забезпечення вихідними даними в умовах сучасного законодавства щодо захисту ділової інформації, а також викладення попередніх результатів тестових розрахунків енергетичного балансу, виконаних за використання мінімального обсягу структурованих статистичних даних, отриманих виключно з відкритих джерел.

2. Методи та матеріали

Використані у цій роботі матеріали складаються із загальнодоступних інформаційних джерел та програмних засобів. Для побудови економіко-математичної моделі виробничого типу [1–3] автори послуговувалися наступними звітними статистичними документами:

– Продуктовий енергетичний баланс України за 2017 та 2020 рр. [4, 5];

– Енергетичний баланс МЕА для України за 2017 р. [6];

– Продуктовий енергетичний баланс МЕА для України за 2017 р. Електрична і теплова енергія [7].

Практична реалізація структури моделі енергозабезпечення, а також розрахунки енергетичного балансу виконувались у середовищі електронної таблиці Microsoft Excel пакету програм для офісу Microsoft Office 2016–2021. Крім того, з метою застосування симплекс-методу для розв'язування великих за обсягом (>200 невідомих) задач змішаної лінійної оптимізації з частково цілочисельними змінними, використано спеціалізоване зовнішнє програмне забезпечення, а саме

– додаток до електронної таблиці Microsoft Excel з відкритим програмним кодом OpenSolver 2.9.3 [8];

– бібліотека програм змішано-цілочисельної оптимізації Ipsolve 5.5.2.11 [9] та її інтерфейсний модуль до Microsoft Excel.

Основними методами досліджень є економіко-математичне моделювання, зокрема моделі виробничого типу, системний аналіз.

Розвиток ВДЕ здійснює істотний вплив на прогностичну структуру, обсяги виробництва і рівноважні ціни в паливно-енергетичному комплексі, системі енергозабезпечення економіки країни. Не дивлячись на об'єктивно наявну необхідність певної структурної декомпозиції окремих видів економічної діяльності, переваги теорії міжпродуктового балансу в дослідженні цього впливу полягають у:

– застосуванні моделей «витрати-випуск», які утворюють замкнену формальну структуру по-

дання загальноекономічного балансу, що надає можливість аналізу взаємозалежностей обсягів випуску й рівноважних цін;

– первинній орієнтації на стандартизовані набори вихідних даних – таблиці «витрати-випуск», разом із наявністю в методичному забезпеченні підходу розвинених інструментів структурної і обсягової декомпозиції моделей МПБ;

– наданні можливостей кількісної оцінки загальноекономічних наслідків впровадження нових видів економічної діяльності, визначення їх прямого, непрямого та індукованого впливів на обсяги випуску й ціни всіх секторів економіки, зокрема за допомогою таких інструментів, як матриця повних витрат (множники), аналіз цін шляхом екзогенізації секторів впливу, ітеративні способи розрахунку цін внаслідок опосередкованої зміни обсягів в попередніх станах балансу економічної системи та ін.;

– структурній та змістовній подібності до оптимізаційних моделей виробничого типу, а також моделей загальноекономічної рівноваги, які використовуються в межах аналізу «витрати-випуск» для первинного визначення та корегування рівноважних цін, врахування обсягових і цінових показників окремих виробників та споживачів в секторах економіки.

Моделі та методи теорії витрати-випуск наразі інтенсивно використовуються для досліджень впливу системи цін на попит на товари і послуги або їх виробництво у секторах економіки за умови адміністративного керування рівнем цін в окремих галузях. Зокрема застосування цінових моделей витрати-випуск (ВВ) розглядається міжнародним науковим співтовариством в контексті аналізу взаємного впливу цін на енергію на промислові та енергетичні структури, що значно підвищує необхідність вивчення їх зв'язків.

Разом з тим, інтенсивне впровадження технологій ВДЕ в енергетичному секторі істотно позначиться як на прогностичній структурі та обсягах виробництва, так і на рівноважних цінах у самих енергетичних галузях економіки країни. Дослідження цих процесів доцільно здійснювати на основі застосування теорії витрати-випуск, яка надає замкнену формальну структуру подання загальноекономічного балансу, що дозволяє розглядати різноманітні задачі аналізу взаємозалежностей обсягів випуску й рівноважних цін в масштабі всієї економіки країни.

Проте таблиці витрати-випуск, які є інформаційною базою теорії міжпродуктового балансу (МПБ), й надаються національними та міжнародними статистичними агенціями, створюються на основі стандартизованих у країні та світі класифікаторів видів економічної діяльності. Для

переважної більшості згаданих вище напрямків досліджень вони є незастосовними у первинному вигляді, оскільки містять баланси вартостей значною мірою агрегованих товарів і послуг, які за структурою та обсягами агрегування не відповідають вимогам розглядуваних задач. Вони є недостатньо детальні для вивчення впливу на економічну систему навіть великих її підсистем, таких як окремі сектори, чи групи подібних технологій, якщо такі одиниці групування не містяться в КВЕД. У випадках, коли існує необхідність оцінити непрямі ефекти, а також прямі наслідки змін у технології виробництва, яка була узагальнена з іншими, такі таблиці зазвичай не дозволяють безпосередньо отримати відповідь щодо впливу на економіку цих змін.

Тому в цьому напрямку досліджень особливо актуальною є проблема дезагрегації, успішне вирішення якої є необхідною і достатньою умовою застосування математичного підходу теорії витрати-випуск для аналізу впливу на економіку будь-якої підсистеми з її специфічними структурними, обсяговими, ціновими показниками як виду економічної діяльності.

З метою більш детального вивчення впливу на економіку технологічних інновацій в енергетичному секторі, її забезпечення первинними видами палива і енергії, часток окремих енергоносіїв у кінцевій продукції, аналізу цінових чинників енергетичного балансу розроблено спеціалізовані енергетичні моделі витрати-випуск, у яких виділяються прямі й опосередковані витрати в межах самого ПЕК, галузях проміжного споживання та кінцевого використання. Ці моделі послуговуються додатковою, порівняно із зазначеною в КВЕД, інформацією щодо функціонування ПЕК, мають блокову структуру, і для опису енергетичних потоків використовують натуральні або змішані (як натуральні так і вартісні) одиниці виміру. Можливості розробки й застосування моделей такого типу в значній мірі залежать від наявного інформаційного забезпечення, яке, очевидно, можна вважати достатнім у країнах ЄС, зокрема внаслідок створення й підтримки баз даних структурованої ділової статистики, законодавчо забезпеченому доступу до значного обсягу необхідної галузевої оперативної й статистичної інформації тощо.

Натомість, в Україні дослідження енергетичного сектора в межах підходу міжпродуктового балансу ускладнюються як низькою якістю самих таблиць витрати-випуск, так і об'єктивно обмеженим доступом до обсягових та вартісних показників виробничої діяльності видобувних (паливних) галузей, зокрема, і в першу чергу – нафто- і газодобувних. Проте, можна з певністю стверджувати, що єдиним джерелом до певної міри

узгодженої інформації щодо обігу енергетичних ресурсів у країні є продуктивний енергетичний та енергетичний баланси, які зараз щорічно складаються в стандартизованому форматі Міжнародної енергетичної агенції (МЕА). Не зважаючи на те, що жоден з цих документів не надає вичерпної взаємоузгодженої інформації про баланси всіх видів палива і енергії, їх певна комбінація, доповнена з деяких міжнародних енергетичних баз даних, а також даними галузей ПЕК України з відкритих джерел, можуть служити основою для створення структури системи умов та обмежень математичної моделі виробничого типу, з якої, як буде показано нижче, шляхом відповідних операцій агрегування, можуть бути отримані матриці прямих витрат теорії витрати-випуск В.В. Леонтєва в натуральних одиницях виміру. За відомої системи цін на час створення моделі, або певний базовий рік, з таких матриць, очевидно, можна отримати «розширені» таблиці витрати-випуск енергетичного сектора, які потенційно, в свою чергу, можуть бути «вбудовані» або інтегровані до загальних таблиць витрати-випуск економіки в цілому. Цей підхід можна розглядати як своєрідну альтернативу дезагрегуванню енергетичного сектора стандартних таблиць міжпродуктового балансу.

Крім того, однією з найбільш вагомих переваг моделей виробничого типу, що будуються на основі поняття технологічного способу Л.В. Канторовича є їх належність до класу оптимізаційних моделей. Ця важлива обставина відкриває щонайменше три основних напрями їх використання в межах економіко-математичних досліджень енергетичного сектора. По-перше, це врахування розвитку нових технологій енергетики, особливо ВДЕ і подібних і відповідне коректування таблиць витрати-випуск енергетичного сектора на основі оптимальних розв'язків таких моделей. По-друге, більш деталізоване представлення попиту (кінцевого використання) у таких моделях, наприклад математичними об'єктами, що подають криві попиту (залежності обсягів попиту від ціни), дозволяє використовувати їх як моделі (загальної) рівноваги, які є основним інструментом балансування й відомим джерелом досліджень взаємозалежностей між обсягами й рівноважними цінами в економіці. І зрештою, побудова структури згаданих моделей відповідно до структури системи показників продуктового енергетичного та енергетичного балансів країни дає можливість оцінювання самої множини показників витрат і випусків цих звітних статистичних документів на повноту й узгодженість, зокрема й з метою виявлення невірно врахованих, необлікованих, втрачених, або викрадених обсягів первинних і вторинних паливно-енергетичних ресурсів.

З огляду на це, в роботі, що подається нижче, основну увагу приділено

- розробленню методичного підходу до створення структури та розрахунку технологічних коефіцієнтів (коефіцієнтів випуску і витрат) агрегованої моделі виробничого типу за номенклатурою напрямів надходження, перетворення й кінцевого споживання, регламентованих продуктовим енергетичним балансом України;

- застосуванню згаданого підходу до розроблення низки моделей енергозабезпечення, взаємоузгодженого за продуктами енергетичного балансу, й різного рівня агрегування, призначених для вирішення задач прогнозування структури й обсягів постачання енергоносіїв, а також дослідження їх варіантів, аналізу якості статистичних енергетичних балансів, виявлення обсягів неврахованого, необлікованого споживання енергетичних ресурсів на основі розрахунку взаємоузгоджених збалансованих обсягів виробництва і постачання енергетичних продуктів за використання мінімального обсягу регламентованих чинним законодавством країни відкритих інформаційних джерел.

Структура і особливості подання енергетичного балансу в моделі енергозабезпечення економіки країни. Вимоги до моделей енергозабезпечення в сучасних умовах розвитку енергетичного сектора. Основними напрямками застосування моделей енергозабезпечення економіки, які у тій чи іншій формі подають баланси виробництва, перетворення і споживання паливно-енергетичних ресурсів, зазвичай є

- прогнозування структури та обсягів постачання енергетичних продуктів за їх видами, технологіями виробництва, перетворення, споживання на різні терміни в залежності від вирішуваних задач – оперативного планування, розробки довгострокових стратегічних програм розвитку, що передбачають будівництво об'єктів генерування енергії, тощо;

- дослідження варіантів розвитку енергетичного сектора, аналіз наслідків впровадження різноманітних новітніх технологій, які передбачають відстеження змін у всіх ланках системи енергозабезпечення, врахування обмежень природоохоронного законодавства, або викликаних геополітичними чинниками;

- аналіз економічної доцільності функціонування різних видів технологій виробництва вторинних енергоносіїв, їх оптимальних часток в загальному обсязі енергозабезпечення із врахуванням обмежень на обсяги паливозабезпечення первинними енергетичними ресурсами, встановлену потужність виробників електричної і теплової енергії, а також показників енергетичної без-

пеки, можливостей диверсифікації постачання енергоносіїв;

- дослідження загальноекономічних та соціальних наслідків змін в енергетичному секторі, зокрема впливу прогнозованих технологічних інновацій на систему цін в економіці, забезпечення позитивної динаміки макроекономічних показників та умов сталого розвитку суспільства;

- виявлення небалансів енергозабезпечення, тобто обсягів необлікованого, неврахованого обігу первинних і вторинних енергоносіїв, у тому числі викликаних технологічними чинниками, пов'язаними з незадовільним технічним станом енергетичної інфраструктури, засобів обліку тощо, а також можливими випадками їх приховування та викрадання.

Очевидна складність, багатофакторність цих задач висуває низку вимог до моделей енергозабезпечення, які мають з необхідністю задовольнятися з метою отримання якісних і надійних оцінок показників гарантованого постачання всіх видів енергії за різних станів енергетичного комплексу й економіки в цілому і їх взаємного впливу, у тому числі прогнозованих на відділену перспективу, або таких, що матимуть місце за певних рівнів впровадження ВДЕ. Серед таких вимог важливо згадати

- забезпечення балансу кожного окремого виду палива або енергії, первинного чи вторинного, із врахуванням всіх можливих джерел їх надходження, напрямів перетворення й кінцевого, зокрема неенергетичного, використання;

- підтримання правдивого та адекватного в процесі технологічних змін взаємного узгодження балансів різних видів енергетичних ресурсів за обсягами випуску і витрат у галузях їх перетворення – при виробництві вторинних енергоносіїв і використанні на власні технологічні потреби енергетичного сектора;

- наявність структурної та обсягової надлишковості в множині модельованих видів діяльності з виробництва або перетворення енергоносіїв для врахування всіх наявних, а також новітніх технологій енергетики, зокрема ВДЕ, а також надання можливості визначення їх економічно доцільних часток в «енергетичній суміші» країни;

- достатній рівень деталізації напрямків кінцевого використання паливно-енергетичних ресурсів з метою дослідження перспективних заміщень видів палива/енергії в галузях її остаточного споживання, а також можливостей розгляду в частині таких галузей видів діяльності з виробництва / перетворення енергоносіїв, зокрема з ВДЕ, і забезпечення відповідних змін їх подання в структурі моделі;

- належне формальне представлення видів діяльності енергетичного сектора в структурі ма-

трично-векторних об'єктів моделі, що дозволяє виконувати їх перетворення як у напрямку деталізації, так і агрегування до рівня подання чинними документами статистичної звітності у галузі балансів палива і енергії.

Модель енергозабезпечення на основі відкритих даних щодо енергетичного балансу країни

Економіко-математична модель енергозабезпечення, що задовольняє ці вимоги, може вважатися засобом прогнозування та контролю обігу ПЕР, надаючи разом з тим важливий розрахунковий інструмент оцінювання якості наявної статистичної інформації із врахуванням можливих взаємоузгоджених змін фізичних обсягів енергетичних потоків, які мають місце внаслідок технологічного розвитку економіки країни. Поєднання розрахункової та контрольної функцій моделі енергозабезпечення, в свою чергу, забезпечується взаємною відповідністю та сумісністю її типу, який надає необхідну множину внутрішньо притаманних властивостей представлення модельованих об'єктів, до структурованих наборів вихідних даних, які, з одного боку, слугують основними джерелами ідентифікації параметрів – інформаційного наповнення моделі, а з іншого – задають структуру та рівень детальності множини показників енергозабезпечення, у тому числі статистичного походження, які підлягають контролю. Зокрема, для створення моделі енергозабезпечення, окремі фрагменти якої наведено в табл. 1 і 2, використано структуру даних, тобто номенклатуру продуктів і видів технологій чинного на даний час Продуктового енергетичного балансу країни (ПЕБ) [4, 5], разом із наявними також у відкритому доступі Енергетичним балансом (ЕБ) [6] та продуктовим енергетичним балансом МЕА для України (ПЕБМЕА) [7]. Ці документи слугували джерелами структури технологічної матриці моделі виробничого типу, заснованої на понятті технологічного способу Л.В. Канторовича, і, разом з тим, надали мінімально необхідну сукупність обсягових показників щодо витрат і випусків енергетичного сектора і кінцевого споживання економіки в цілому.

Структура та складові енергетичних балансів, як вони подаються у згаданих вище документах, дозволяють розробити найбільш відповідну структуру технологічної матриці моделі виробничого типу. Дійсно, наявність у секторі ПЕБ «Внутрішнє постачання» обсягових показників виробництва (випуску) всіх енергоносіїв, а в секторах «Перетворення» і «Власне споживання енергосектором», а також в рядку «Втрати» – відповідних витратних показників у технологіях виробництва вторинних видів палива і енергії,

вже дозволяють побудувати замкнену відносно переліку енергоносіїв ПЕБ множину технологічних способів такої моделі. Технологічна матриця, утворена цими техспособами, виявляється квадратною й визначає систему умов-обмежень алгебраїчної моделі міжпродуктового балансу енергоносіїв в натуральному вираженні їх обсягів. Водночас, сектор «Перетворення» ПЕБ містить показники витрат енергоносіїв, диференційовані за групами технологій енергетичного сектора, зокрема за типами об'єктів генерування електричної і теплової енергії. Це дозволяє побудувати відповідні групи технологічних способів, що виробляють згадані продукти, перетворивши таким чином алгебраїчну модель до оптимізаційної моделі виробничого типу. Проте ПЕБ містить лише сукупні обсяги виробництва енергетичних продуктів, зокрема й вторинних енергоносіїв. Тому для побудови техспособів генерування електричної й теплової енергії, диференційованих за групами основних технологій енергетичного сектора можна скористатися ПЕБМЕА, зокрема таблицею балансу електроенергії й тепла [7]. Наведені тут показники виробництва з наявних видів первинного палива та інших ресурсів дозволяють виокремити сукупний обсяг генерування в тепловій енергетиці, – на теплових електростанціях (ТЕС) та теплоелектроцентралях (ТЕЦ), і, крім того, безпосередньо надають їх значення для атомних (АЕС), гідро (ГЕС, ГАЕС), геотермальних електростанцій та відновлюваних джерел енергії. В свою чергу, для розподілення обсягів виробництва електроенергії в тепловій енергетиці – між ТЕС і ТЕЦ, а також теплової енергії – між ТЕЦ і теплоелектроцентралями можна використати відповідні показники ЕБ [6]. Таким чином, всі величини обсягів випуску і витрат, необхідні для побудови множини технологічних способів моделі виробничого типу, що описує виробництво первинних енергоносіїв, а також електричної і теплової енергії основними групами енергетичних технологій, вдалося дістати лише з трьох згаданих вище відкритих інформаційних джерел. Номенклатуру продуктів такої моделі наведено в послідовних у вертикальному напрямку аркушах подання її технологічної матриці, вміщених до табл. 1 і 2. Табл. 3 і 4 подають агрегований варіант моделі, побудований на основі обсягових даних енергетичного балансу 2017 р., у якому витрати на власні потреби енергетичного сектора і технологічні витрати (втрати) продуктів враховуються в технологічних коефіцієнтах їх випуску. Крім того, згадані таблиці також містять результати розрахунку обсягів виробництва енергоносіїв за даними потреби 2020 р. та їх розбіжності з фактичними показниками ПЕБ цього року.

Таблиця 1. Вихідна модель енергозабезпечення за структурою продуктового енергетичного балансу, аркуш 1 (1, 1)

№ з/п	Продукти	Технологічні способи						
		Вугілля енергетичне, видобуток	Природний газ, видобуток	Мазут, виробництво	Біопаливо, виробництво	E/E, TЭС	E/E, АЕС	E/E, ГЭС, ГАЭС
1	Вугілля енергетичне	1						
2	Природний газ	1	1					
3	Мазут			1				
4	Біопаливо				1			
5	Електрична енергія, ТЭС						1	
6	Електрична енергія, АЕС							1
7	Електрична енергія ГЭС, ГАЭС							1
8	Електрична енергія, ТЕЦ							
9	Електрична енергія, ВЕС							
10	Електрична енергія, СЕС							
11	Електрична енергія, БіоЕС							
12	Електрична енергія, підсумування							
13	Електрична енергія, всього							
14	Теплова енергія, ТЕЦ							
15	Теплова енергія, котельні							
16	Теплова енергія, котельні на біопаливі							
17	Теплова енергія, підсумування							
18	Теплова енергія, всього							
19	Вугілля, підприємства з видобування вугілля	-0,000649						
20	Вугілля, електростанції, ТЕЦ, теплоцентралі	-0,006596						
21	Вугілля, втрати	-0,000216						
22	Природний газ, видобування нафти й газу		-0,037225					
23	Природний газ, електростанції, ТЕЦ, теплоцентралі		-0,000827					
24	Природний газ, інші енергетичні підприємства		-0,023953					
25	Природний газ, втрати		-0,032455					
26	Мазут, електростанції, ТЕЦ, теплоцентралі							-0,004504

Таблиця 3. Результати розрахунку енергетичного балансу основних паливно-енергетичних ресурсів у 2020 р. за допомогою агрегованої моделі 2017 р., аркуш 1 (1, 1)

№ з/п	Продукти	Вугілля енергетичне, видобуток		Природний газ, видобуток		Мазут, виробництво		Біопаливо, виробництво		E/E, TЭС		E/E, АЕС		E/E, TЭС, ГАЕС	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Вугілля енергетичне	0,9925388	0	0	0	-0,4883	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Природний газ	0	0,9055405	0	0	-0,00371	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Мазут	0	0	0,9954964	0	-0,0012164	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Біопаливо	0	0	0	1	-0,000000011	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Електрична енергія, ТЭС	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	Електрична енергія, АЕС	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	Електрична енергія ГЭС, ГАЕС	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	Електрична енергія, ТЕЦ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Електрична енергія, ВЕС	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Електрична енергія, СЕС	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Електрична енергія, БіоЕС	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Електрична енергія, всього	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Теплова енергія, ТЕЦ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Теплова енергія, котельні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Теплова енергія, котельні на Біопаливі	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	Теплова енергія, всього	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Обмеження, пропорції задачі оптимізації (ЗО)														
Код	Назва														
CO100	ЕЕ/ТЕ ТЕЦ														
	Продукти, коеф. критерію ЗО	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Продукти, верхня межа	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99	999999,99
	Продукти, змінні	18,495784	20,582423	0,4440882	147400,2828	46,069331	85,57617	46,069331	85,57617	46,069331	85,57617	46,069331	85,57617	46,069331	85,57617
	Продукти, нижня межа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Розв'язок агрегованої системи (транспонований), 3-й етап агрегування, продукти	18,495784	20,582423	0,4440882	147400,2828	46,069331	85,57617	46,069331	85,57617	46,069331	85,57617	46,069331	85,57617	46,069331	85,57617

Таблиця 4. Результати розрахунку енергетичного балансу основних паливно-енергетичних ресурсів у 2020 р. за допомогою агрегованої моделі 2017 р., аркуш 2 (1, 2)

Е/Е, ТЕЦ	Е/Е, ВЕС	Е/Е, СЕС	Е/Е, ВюЕС	Е/Е, Всього	Т/Е, ТЕЦ	Т/Е, котельні	Т/Е, котельні на біопаливі	Теплова енергія, Всього	Роз'язок агрегованої системи	Права частина, Всього, баланс по-трехи	Виробництво 2020, факт	Виробництво 2020, (фактичне - порівняно) / фактичне * 100%
8	9	10	11	12	13	14	15	16	100	101	102	
-0,135589	0	0	0	0	0	-0,015202	0	0	27,2612	3,0410	24,17	-12,8
-0,332266	0	0	0	0	0	-0,124861	0	0	18,4841	6,7893	20,20	8,5
-0,03907	0	0	0	0	0	-0,000545	0	0	0,5374	0,0021	0,08	-615,6
-886,119	0	0	-243,207	0	0	0	-3351,39	0	139188,3580	108211,5000	147860,00	5,9
0	0	0	0	-0,295248	0	0	0	0	44,4865	0,0000		
0	0	0	0	-0,548439	0	0	0	0	82,6359	0,0000		
0	0	0	0	-0,066496	0	0	0	0	10,0192	0,0000		
1	0	0	0	-0,076938	0	0	0	0	11,5927	0,0000		
0	1	0	0	-0,00613	0	0	0	0	0,9236	0,0000		
0	0	1	0	-0,004186	0	0	0	0	0,6307	0,0000		
0	0	0	1	-0,002564	0	0	0	0	0,3863	0,0000		
0	0	0	0	0,7853444	0	0	0	0	150,6748	118,3317	148,40	-1,5
0	0	0	0	0	1	0	0	-0,39007	34,3157	0,0000		
0	0	0	0	0	0	1	0	-0,540025	47,5078	0,0000		
0	0	0	0	0	0	0	1	-0,069905	6,1498	0,0000		
0	0	0	0	0	0	0	0	0,8157705	87,9733	71,7660	92,67	5,1
3,0926					-1							
100	100	100	100	100	100	100	100	100				
12,00516	0,956481	0,653138	0,4	999999,99	999999,99	51,4	999999,99	999999,99				
12,00516	0,956481	0,653138	0,4	156,036	37,127158	51,4	6,6536499	95,180808				
0	0	0	0,4	0	0	0	0	0				
12,00516	0,956481	0,653138	0,4	156,036	37,127158	51,4	6,6536499	95,180808				

3. Результати

Як видно з табл. 4, величини відхилень розрахованих за допомогою створеної моделі енергозабезпечення обсягів виробництва енергетичних продуктів у 2020 р. від їх фактичних значень, наведених у «Продуктовому енергетичному балансі України» за цей рік, є надто відмінними й знаходяться в проміжку від –616% до 13%, причому для переважної більшості розглянутих видів енергоносіїв вони не перевищують 10%. Наприклад, для вторинних енергоносіїв – електричної та теплової енергії згадані відхилення становлять лише –1,5% і 5,1% відповідно. Ці результати є очевидним свідченням, на перший погляд, недостатньої точності прогнозування, отриманої внаслідок застосування розробленої економіко-математичної моделі й потребують додаткового аналізу. Зокрема, розглядаючи набори даних «Продуктового енергетичного балансу України» за 2017 і 2020 рр., можна бачити, що витрати топкового мазуту, за яким спостерігається максимальне значення розбіжності розрахованих і фактичних обсягів, в окремих технологіях сектора перетворення відрізняються у 16 разів за порівняних значень вироблення електричної енергії. Відповідно, ці зміни мають бути враховані при обчисленні технологічних коефіцієнтів у випуску й витрат у технологічних способах моделі виробничого типу. Таким чином, значні похибки в розрахунках прогнозних обсягів надходження енергетичних продуктів мали місце внаслідок втрати актуальності її інформаційного наповнення в прогнозному періоді і не є спричинені певними внутрішньо притаманними особливостями цього підходу до моделювання систем енергозабезпечення. Тому належне оцінювання передбачуваних змін технологічних коефіцієнтів є невід’ємною умовою використання розробленої економіко-математичної моделі енергозабезпечення з метою прогнозування. Очевидним напрямком вирішення цієї проблеми може бути врахування до розгляду технічних показників питомих витрат перспективних новітніх технологій енергетичного сектора країни.

4. Обговорення

Не зважаючи на обмежену цінність сильно агрегованих моделей енергозабезпечення малої розмірності щодо можливостей визначення ефектів впливу окремих технологій на обсягову структуру паливно-енергетичного балансу, вони цілком успішно виконують контрольну функцію відносно виявлення необлікованих обсягів енергоносіїв, або значних змін структури виробничих потужностей енергетичного сектора, яка, в свою чергу впливає на структуру обсягів енергозабезпечення. Цілком зрозуміло, що розширення області засто-

сування таких моделей, зокрема у напрямках прогнозування, досліджень технологічних впливів тощо, лежить у площині їх деталізування, що супроводжується необхідністю залучення галузевої інформації про функціонування підсистем ПЕК. Наразі автори розглядають такі можливості переважно для вуглевидобувної галузі, а також сподіваються на плідну співпрацю з колегами щодо розробки відповідного інформаційного забезпечення для інших підсистем енергетичного сектора економіки країни.

5. Висновки

1. Запропоновано структуру моделі виробничого типу за Л.В. Канторовичем з використанням розширеної номенклатури продуктового енергетичного балансу України, а також показників енергетичних балансів МЕА для України, яка дозволила визначити взаємоузгоджені й збалансовані обсяги виробництва і постачання енергоносіїв за використання мінімального обсягу регламентованих чинним законодавством країни відкритих інформаційних джерел.

2. Виконано розрахунковий аналіз обсягових показників енергозабезпечення економіки України основними паливно-енергетичними ресурсами у 2020 р. за допомогою агрегованої економіко-математичної моделі виробничого типу (за Л.В. Канторовичем), побудованої з використанням відкритих джерел даних щодо структури та обсягів енергетичного балансу 2017 р. Порівняння результатів розрахунку обсягів енергозабезпечення за вихідними даними попиту 2020 р. з фактичними обсягами енергозабезпечення згідно з продуктовим енергетичним балансом цього року показали що:

– розбіжності розрахованих обсягів виробництва енергетичних продуктів і їх фактичних значень сильно відрізняються і становлять: –12,8; 8,5; –615,6; 5,9% за вугіллям енергетичним, природним газом, мазутом і біомасою відповідно; Відмінності розрахованих і фактичних обсягів виробництва вторинних енергоносіїв – електричної і теплової енергії є значно меншими й дорівнюють –1,5 і 5,1% відповідно;

– найбільше серед вказаних значень розбіжностей –615,6%, що відповідає мазуту, пояснюється значним скороченням його використання у секторі перетворення – на ТЕС, ТЕЦ і в котельнях – з 0,056 млн т, 0,469 млн т і 0,028 млн т у 2017 р. до 0,018 млн т, 0,034 млн т і 0,017 млн т у 2020 р., відповідно, за співставних обсягів виробництва електричної і теплової енергії. Тобто, значне відхилення розрахованого («прогнозованого») значення обсягу та його фактичного відповідника має місце через різку зміну технологічних

коефіцієнтів витрат протягом 3-річного періоду. Такі відхилення можуть бути суттєво скорочені (усунуті) шляхом належного прогнозування розвитку/змін у використанні технологій енергетичного сектора і жодним чином не пов'язані з особливостями структури моделі енергозабезпечення чи порушенням її балансувальних властивостей;

– значне зростання обсягу виробництва електроенергії ВДЕ у 2020 р., порівняно з 2017 р., супроводжувалось скороченням її генерування АЕС. За цих умов загальний обсяг виробництва електричної і теплової енергії на ТЕС, ТЕЦ і в котельнях був співставним з обсягом 2017 р.. Тому зменшення споживання енергетичного вугілля у секторі перетворення на 17,3% призвело до підвищення використання природного газу на 15,1%. Ці технологічні зміни викликали появу розбіжностей між розрахованими та фактичними значеннями виробництва енергетичного вугілля й природного газу –12,8 і 8,5% відповідно.

Фінансування роботи

Фінансування досліджень цієї статті здійснюється в межах наукової роботи «Прогнозування структури та обсягів енергозабезпечення країни в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії в її енергетичному балансі» відомчої тематики (шифр «ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ-2»), яка виконується в ІЗЕ НАН України за рішенням Бюро ВФТПЕ НАН України, протокол від 25.06.2019 р. №11, державний реєстраційний номер 0120U100139.

Подяка

Автори висловлюють щирю подяку співробітникам відділу «Оптимізації розвитку паливних баз» Інституту загальної енергетики НАН України Макарову В.М., Перову М.О. – за цінні поради щодо особливостей деталізованого врахування видів вугільного палива, методів його збагачення в подальшому розвитку структури видобувного сектора моделі енергозабезпечення, Макортецькому М.М.

– за консультування при вирішенні проблем використання сторонніх програмних засобів оптимізації в робочому середовищі електронної таблиці Microsoft Excel, Шукало В.О. – за якісне оформлення ілюстративних матеріалів статті.

Посилання

1. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: изд-во ЛГУ, 1939. (у зб. «Применение математики в экономических исследованиях». М.: Соцэкгиз, 1959. С. 235—275).
2. Каплін М.І. Оптимізація системи паливозабезпечення на основі мережного подання модифікованої моделі виробничого типу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси». Київ, 2015. 20 с.
3. Каплін М.І., Білан Т.Р. Економіко-математична модель паливозабезпечення теплової енергетики із врахуванням заміни штатного палива та обмежень на викиди. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 4(43). С. 24—30. <https://doi.org/10.15407/pge2015.04.024>
4. Продуктовий енергетичний баланс України за 2017 рік. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2014/energ/en_bal_prod/Bal_prod_2017_u.xls (дата звернення: 02.03.2021).
5. Продуктовий енергетичний баланс України за 2020 рік. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/energ/En_bal_prod/Bal_prod_2020_ue.xls (дата звернення: 18.05.2021).
6. Енергетичний баланс МЕА для України за 2017 рік. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/datatables?country=UKRAINE&energy=Balances&year=2017> (дата звернення: 18.05.2021).
7. Продуктовий енергетичний баланс МЕА для України за 2017 рік, електрична і тепла енергія. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/datatables?country=UKRAINE&energy=Electricity&year=2017> (дата звернення: 25.05.2021).
8. OpenSolver, the Open Source linear, integer and non-linear optimizer for Microsoft Excel. URL: <https://opensolver.org/> (дата звернення: 01.06.2021).
9. Lpsolve, Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver. URL: <https://sourceforge.net/projects/lpsolve/>, <http://web.mit.edu/lpsolve/doc/> (дата звернення: 14.06.2021).

MODELING OF COUNTRY ENERGY SUPPLY BY THE STRUCTURE OF PRODUCT ENERGY BALANCE DATA IN THE FORMAT OF THE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

Mykola Kaplin* PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0001-9328-4257>

Tetyana Bilan, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0002-0280-6716>

Ihor Novytskyi, <https://orcid.org/0000-0002-3304-7492>

Institute of General Energy of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha Str., Kyiv, 03150, Ukraine;
e-mail: info@ienergy.kiev.ua

* Corresponding author: nicko.dropper@gmail.com

Abstract. *The possibilities of construction of models of production type investigated according to L.V. Kantorovich using the expanded nomenclature of product energy*

balance, as well as indicators of energy balances of the IEA for Ukraine, which allowed to determine mutually agreed and balanced volumes for production and supply of the energy sources using the minimum amount of open-source information regulated by the current legislation of a country. Creating the structure of the aforementioned models in accordance with the structure of the system of indicators mentioned balances makes the possibility for assessing the set of input and output indicators of these reporting statistical documents for completeness and consistency, particularly with the aim to identify incorrectly taken into counted, unaccounted, lost or stolen amounts of fuel and energy resources. With this in mind, the following work focuses on formulating the basic requirements for energy supply models for purposes of their application, developing a methodological approach to building a structure, and technological coefficients calculation (input and output) of the economic-mathematical model of production type by the nomenclature of supply directions, transformation and final consumption regulated by the product energy balance of Ukraine, and also on the application of this approach to the development of a number of energy supply models of different aggregation levels, designed to solve problems of forecasting the structure and amounts supply of energy sources, and the research of their appropriate variants, analyze the quality of statistic energetic balances, and detection the volumes of unaccounted energy resource consumption.

Keywords: energy supply, product energy balance, production type model.

References

1. Kantorovich, L.V. (1939). Mathematical methods of organization and planning of production. L.: Publishing House of Leningrad State University (in the journal "Application of Mathematics in Economic Research". M.: Sotsekgiz, 1959. P. 235-275).
2. Kaplin, M.I. (2015). Optimization of the system of fuel supply on the basis of the network representation of the modified model of production type. *Extended abstract of candidate's thesis, spec. 05.14.01 – Energy systems and complexes*. Kyiv, 2015. 20 p. [in Ukrainian].
3. Kaplin, M.I., & Bilan T.R. (2015). Economic-mathematical model of fuel supply for thermal power sector taking into account the substitution of regular fuel and limits for emissions. *The Problems of General Energy*, 4(43), 24–30 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.04.024>
4. Product energy balance of Ukraine for 2017. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2014/energ/en_bal_prod/Bal_prod_2017_u.xls (Last accessed: 02.03.2021).
5. Product energy balance of Ukraine for 2020. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/energ/En_bal_prod/Bal_prod_2020_ue.xls (Last accessed: 18.05.2021).
6. IEA energy balance for Ukraine for 2017. URL: <http://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=UKRAINE&energy=Balances&year=2017> (Last accessed: 18.05.2021).
7. IEA product energy balance for Ukraine for 2017, electricity and heat energy. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=UKRAINE&energy=Electricity&year=2017> (Last accessed: 25.05.2021)
8. OpenSolver, the Open Source linear, integer and non-linear optimizer for Microsoft Excel. URL: <https://opensolver.org/> (Last accessed: 01.06.2021).
9. Lpsolve, Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver. URL: <https://sourceforge.net/projects/lpsolve/>, <http://web.mit.edu/lpsolve/doc/> (Last accessed: 14.06.2021).

Надійшла до редколегії: 16.02.2022