

СЕКЦІЯ 6 ЕКОНОМІКА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 330.4:504.06

Гальчинський Л.Ю.
*кандидат технічних наук,
доцент кафедри математичного моделювання економічних систем
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Вишневська А.О.
*студентка
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ МОДЕРНІЗАЦІЇ СУПУТНЬОГО ВИКОРИСТАННЯ ВОДНОГО ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСІВ У ТЕПЛОЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ

MODELING DYNAMICS OF MODERNIZATION NEXUS USE OF WATER AND ENERGY IN COMBINED HEAT AND POWER OF UKRAINE

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто питання оцінки процесу реалізації реконструкції і оновлення сектора теплової електроенергетики України в рамках нової Енергетичної стратегії України до 2035 р. з урахуванням сукупного використання водного та енергетичного ресурсів України. Запропоновано та реалізовано модель динаміки модернізації та реконструкції на основі методу системної динаміки. Проведено сценарні розрахунки в середовищі Powersim, на основі яких зроблено оцінки обсягу інвестицій, необхідних для реалізації вказаної програми, а також оцінки обсягу зниження витрат води, та вираховано межі зміни рівноважних цін на ринку електроенергії України.

Ключові слова: тепла електроенергетика, супутнє використання водного ресурсу, стратегія модернізації, інвестиції, витрати води, рівноважна ціна, системна динаміка.

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы оценки процесса реализации реконструкции и обновления сектора тепловой электроэнергетики Украины в рамках новой Энергетической стратегии Украины до 2035 г. с учетом совокупного использования водного и энергетического ресурсов Украины. Предложена и реализована модель динамики модернизации и реконструкции на основе метода системной динамики. Проведены сценарные расчеты в среде Powersim, на основе которых сделаны оценки объема инвестиций, необходимых для реализации указанной программы, а также оценки объема снижения расхода воды, и вычислены пределы изменения равновесных цен на рынке электроэнергии Украины.

Ключевые слова: тепловая электроэнергетика, смежное использование водного ресурса, стратегия модернизации, инвестиции, расходы воды, равновесная цена, системная динамика.

ANNOTATION

The questions assess the implementation of reconstruction and upgrade thermal power sector of Ukraine under the new Energy Strategy of Ukraine till 2035 in view of the total use of water and energy resources of Ukraine. Proposed and implemented model of the modernization and reconstruction based on system dynamics approach. Scenario calculations conducted among Powersim, on which the estimates made by the volume of investment required

to implement the said program as assessments of reducing water consumption and calculated equilibrium boundary changes in market prices of electricity Ukraine.

Keywords: thermal power, concomitant use of water resources, the strategy of modernization, investment, water consumption, the equilibrium price, system dynamics.

Постановка проблеми. Реформування енергетики, без сумніву, є однією з найбільш важливих і гострих для України проблем. Модернізація електроенергетики, зокрема теплових електростанцій, є одним з ключових моментів вказаної проблеми. Опублікований у кінці 2016 р. проект нової Енергетичної стратегії України до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [1, с. 7] підкреслює, що теплові електростанції були і залишаються головним джерелом виробництва необхідної енергії для забезпечення життєдіяльності країни. Це, до речі, далеко не перший документ, мета якого – намітити шлях виходу енергетики України з кризи, яка почалася задовго до опублікування нової Енергетичної стратегії України (НЕС), розробленої низкою наукових колективів. Після ознайомлення із цим документом можна стверджувати, що автори суттєво змінили погляди на парадигму розвитку енергетики України, відмовилися від філософії простого нарощування потужностей на базі традиційних технологій, приймають до уваги інноваційні фактори в технологіях виробництва електроенергії, враховують ринкові тенденції та вимоги до зниження негативного впливу енергетики на навколишнє середовище. Нині проект НЕС винесений на розгляд громадськості, передусім експертів

та науковців, він досить значний за обсягом і потребує оцінки та аналізу спеціалістами в різних сферах енергетики. У статті ми пропонуємо розглянути тільки один, на нашу думку, важливий аспект, а саме визначений в Додатку 3 «Дорожня карта» реалізації НЕС ЦІЛЬ 5: ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНИЙ РІВЕНЬ ВПЛИВУ ЕНЕРГЕТИКИ НА ДОВКІЛЛЯ. Можна констатувати, що проблему сукупного використання водного та енергетичного ресурсу в даному документі ігноровано на відміну від інших екологічних, передусім проблему зниження шкідливих викидів у повітряне середовище.

Структура електроенергетики України мало змінилася після розпаду Радянського Союзу. Застарілі технології виробництва електроенергії на електростанціях, передусім теплових, стали причиною погіршення екологічної ситуації в Україні, причому це торкнулося всіх сфер: повітря, землі та води.

Проблема супутнього використання водного та енергетичного ресурсу стоїть не менш гостро, ніж забруднення повітря [2, с. 22].

Обсяг водних ресурсів України, досить обмежений і становить 52 км³/рік, із них на поверхневі води припадає до 39 км³/рік. Величина водоспоживання в країні наблизилася до межі ресурсів і досягає 30–36 км³/рік. 88% основних рік мають екологічний стан басейнів, що оцінюються як «поганий», «дуже поганий» і «катастрофічний». Якість води 2/3 річок України має оцінку «сильно забруднена», і тільки 3% річок мають воду задовільної чистоти; за експертними даними, якість вод має стійку тенденцію до погіршення. При цьому електроенергетика України, зокрема тепла, робить помітний внесок у погіршення стану водного ресурсу. З одного боку, у НЕС закладена ідея зростання споживання електроенергії, яке, своєю чергою, пов'язане зі зростанням споживання води. З іншого боку, зростання економіки викличе відповідне зростання споживання води, наприклад в аграрному секторі. Дефіцит води як глобального ресурсу за такими тенденціями спрогнозувати неважко, тому проблеми зниження води в енергетиці України треба вирішувати. Очевидно, правильним вирішенням було системно врахувати проблему сукупного використання водного та енергетичного ресурсів у межах нової Енергетичної стратегії України. З урахуванням складності, довготривалості та витратності процесу модернізації електроенергетики, на нашу думку, необхідно побудувати модель, яка могла врахувати різноманітні аспекти цього складного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ще на початку 2000-х років стан теплоенергетики викликав тривогу [3, с. 31]. Сучасний стан ТЕС України слід розглядати як критичний. Накопичення застарілого обладнання призводить до зростання витрат на ремонт. У результаті витрати на багаторазове продовження ресурсу стають порівняними з вартістю нового облад-

нання. Так, у 2002 р. витрати на ремонт обладнання ТЕС становили 348 млн. грн. (за плану 567 млн. грн.), або 12% від собівартості виробленої ними електроенергії.

У роботі О.Ю. Черноусенко [4, с. 3] аналізувалися структурні зміни в електроенергетиці, а саме встановлено, що в 1991–2014 рр. відбулася суттєва зміна структури енергетичних ресурсів у виробництві електричної енергії на ТЕС і ТЕЦ України. Так, застосування вугілля як палива збільшилося з 31,3% у 1991 р. до 83,5% у 2014 р. Природний газ зменшився у структурі енергетичних ресурсів з 49,7% у 1991 р. до 16,3% у 2014 р., а мазут – з 20,8% у 1991 р. до 03,2% у 2014 р. відповідно.

Стан теплової енергетики України незадовільний [5, с. 16]. Згідно з інформаційними матеріалами Міненерговугілля, близько 80% енергоблоків ТЕС та ТЕЦ перевищило межю фізичного зношення у 200 тис. годин. Отже, докорінна її модернізація та будівництво нових потужностей є вкрай актуальними.

Питання ефективного використання водного ресурсу під час виробництва електроенергії на електростанціях досить добре розроблені в технологічному аспекті і вкрай недостатньо – в економічному.

Щодо наукових публікацій на тему довгострокового моделювання змін у теплоенергетиці, то у вітчизняній літературі їх українською мало, хоча моделюванню енергетичних систем присвячено значну кількість наукових праць, зокрема роботи Сауха та Борисенка [6].

Нагомість значна кількість західних дослідників проводить у цій галузі масштабні дослідження [7; 8]. Крім академічних моделей, створені комерційні моделі довгострокового планування розвитку, які застосовуються в промисловості і соціально-політичному секторі. Відзначимо дві розробки. Модель Національної енергетичної системи (НЕМС), розроблена Департаментом енергетики США, є системою моделювання економіки енергетики, побудованої з кількох модулів, що дає змогу проектувати виробництво, споживання і ціни на енергоносії для США на 25 років і може додатково використовуватися для аналізу впливу політики у сфері енергетики.

AURORAхmp від EPIS Inc. – комерційна модель електричного сектора. Вона розкладає горизонт на блоки із двох тижнів. Кожен блок спочатку обраховує попит, а потім використовується як модель реалізації.

Ця модель враховує погодинний кліринг, зональний або вузловий дизайн ринку. AURORAхmp приймає інвестиційні рішення як для енергогенераторів, так і мереж передачі, а також рішення про ремонт.

Крім того, на увагу заслуговує модель планування розширення виробництва електроенергії на довгостроковий період [9, с. 55], що позначається як PGER, що постулює короткострокову відповідь попиту, тобто у міру зростання цін

на електроенергію споживачі скорочують свій попит. Щодо моделювання системної модернізації теплоенергетики з урахуванням модернізації систем водопостачання, то таких публікацій не виявлено.

Головне питання маловитратного використання води для електростанцій лежить у площині організації забору і відведення води для використання в турбінах електростанцій. Окрім цього, важливо врахувати ще один важливий фактор – географічний. Так, річка Дніпро є домінуючим джерелом водопостачання України [10, с. 31], де зосереджено більше 60% усіх водних ресурсів України і не менший відсоток енергетичних ресурсів. До найважливіших чинників впливу на Дніпро і водночас використання річки належить забір води, який здійснюється в десятках тисячах місць і в цілому є дуже значним. Найбільших обсягів (20–22 млрд. м³) він сягав у середині 1980-х років і був співвідносним зі стоком річки. В останні роки цей обсяг зменшився і в цілому набув ознак стабільності. Проте саме зарегульованість стоку Дніпра суттєво знижує природні можливості для очищення, тому збільшення забору води, особливо в маловодні роки, може мати вкрай негативні наслідки.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Згідно з НЕС, Україна планує нарощувати споживання енергії та будувати нові вугільні та атомні станції. Питання використання водних ресурсів у даному документі взагалі не розглядається. У 2015 р. загальний попит на електроенергію разом із втратами та чистим експортом становив ~158 млрд. кВт/год.

У 2035 р. чисте споживання електроенергії становитиме 180 млрд. кВт/год. (+/- 15%). Із них 62 млрд. кВт/год. буде припадати на теплові електростанції. Основні фактори, що впливають на динаміку чистого попиту:

- ріст споживання в промисловості за рахунок зростання випуску продукції (у т. ч. металургії, сфери послуг);
- зниження споживання населення, у т. ч. завдяки росту енергоефективності у використанні побутових приладів;
- ріст проникнення електромобілів, що призведе до додаткового споживання понад 3 млрд. кВт/год./рік.

Слід зазначити, що через особливості енергоринку України (наявність значних потужностей атомних електростанцій) теплові електростанції повинні мати надлишкові потужності для реалізації маневру із-за сезонних та добових факторів. Це означає, що в новій Енергетичній стратегії треба передбачити не тільки просту заміну відпрацьованих енергоблоків, але дещо нарощувати потужність. Своєю чергою, це викликає збільшення навантаження на водний ресурс, що, як уже зазначалося, вкрай небажано в довгостроковій перспективі. З огляду на те, що така масштабна реконструкція потребує відповідних інвестицій, причому з урахуван-

ням проблеми сукупного використання води і електроенергії, треба оцінювати не тільки обсяг додаткових інвестицій, але і зниження забору води. Крім того, у процесі реконструкції має бути забезпечений енергетичний баланс, а також цінова рівновага на енергоринку. Реалізація довготривалої стратегії розвитку електроенергетики України потребує певного плану. Очевидними фактами є значна множина варіантів необхідної модернізації електроенергетики України й оцінка різних сценаріїв із точки зору величини бюджету та екологічних показників, зокрема витрат водних ресурсів на отримання визначених енергетичних потужностей. Саме тому постає актуальність завдання моделювання та супутнього використання водних і енергетичних ресурсів в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1 схематично показано взаємозв'язок водних та енергетичних потоків.

Відповідно, розглядати перспективу розвитку електроенергетики без урахування енергозбереження і водо збереження, на нашу думку, неправомірно.

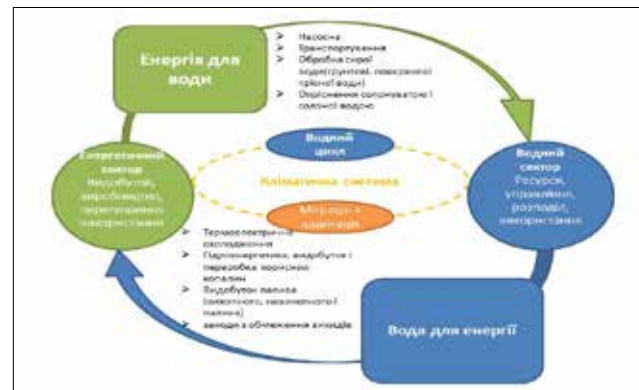


Рис. 1. Водно-енергетичний зв'язок

Джерело: розроблено на основі [2]

Основне джерело, що породжує дефіцит прісної води в енергетиці, полягає у застарілій схемі прямого забору і відведення води. Ця схема, незважаючи на різні варіанти схем водовідведення, зрештою зводиться до одного: вода для вироблення електроенергії відбирається з природнього джерела (як правило, річки), а відпрацьована скидається нижче за течією. Така схема водопостачання і водовідведення довгі роки вважалася найкращою, бо є дешевою і діє на більшості електростанцій України.

На противагу цьому найбільш розповсюдженою технологією охолодження турбін електростанцій в Євросоюзі є технологія оборотного водопостачання. Оборотно-водопостачання – це багаторазове використання води в промисловості для запобігання нераціональному споживанню природних вод і їх забрудненню. Така технологія дасть змогу скоротити споживання води та створить умови для збереження водного ресурсу та підтримки екологічного фактора. Менш уживаною є технологія із сухим циклом, яка не вико-

ристовує водний ресурс взагалі. За зарубіжним досвідом встановлення технологій, альтернативних технологіям прямого контуру водозабезпечення, було оцінено вартість витрат на встановлення технологій оборотного водозабезпечення та технології із сухим циклом. Установлено, що технологія із сухим контуром є дорожчою за прямию на 860%, а технологія оборотного водозабезпечення (із замкненим контуром) буде дорожчою лише на 47%. Таким чином, можна було б розглядати сценарій модернізації української електроенергетики шляхом заміни застарілих енергоблоків на нові, при цьому передбачаючи очисні технології для води.

Методологія моделювання

Для побудови кількісного аналізу такого складного і масштабного процесу необхідно скористатися релевантним підходом. На нашу думку, саме таким є метод системної динаміки.

Методологія системної динаміки, розроблена Форрестером та його учнями, із самого початку спрямована на прикладне застосування і, відповідно, зорієнтована на комп'ютерне моделювання. Базовим елементом системної динаміки є представлення досліджуваного процесу у вигляді діаграми, яка складається з петель позитивних і від'ємних зворотних зв'язків. У методі системної динаміки в центрі уваги є взаємодія ендогенних факторів. Головні положення цієї методології викладені в роботах Форрестера та Медоуз [11; 12]. Як математичний об'єкт, динаміка системи являє собою систему диференціальних рівнянь. Змінні стану в системі, називаються запасами, тоді як керуючі змінні залежать від стратегії прийняття рішень і структури інформації контурів зворотного зв'язку в системі. Модель динаміки системи, як правило, вирішується чисельно і може обробляти як затримки, так і нелінійності. Тобто

моделі такого вигляду є системами диференціальних рівнянь:

$$dx/dt = f(x, u, t),$$

де $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ – вектор станів; $u = (u_1, \dots, u_m)^T$ – вектор виходів; t – символ часу.

Моделі, які застосовуються в математичній теорії систем, окрім рівнянь стану, містять ще й рівняння вигляду

$$y = H(x, u),$$

в якому змінна $y = (y_1, \dots, y_q)^T$ – вектор виходів системи, u – управляючі змінні.

Під час складання диференціальних моделей проводиться вибір змінних стану і встановлюються зв'язки між цими змінними у вигляді функцій правих частин рівнянь станів.

Існує низка спеціалізованих програмних засобів, які були розроблені спеціально для моделі системної динаміки. Можливості включення оптимізації та невизначеностей у моделі досить обмежені, тому стратегії рішення, які передбачають оптимізацію, досить важко реалізувати в рамках системної динаміки. Проте мета розроблення моделі динаміки системи саме і полягає в тому, щоб покращити розуміння про реальні варіанти поведінки системи залежно від початкових умов та прийнятих рішень. Як зазначалося вище, реальні особи, які приймають рішення, рідко повністю раціонально усвідомлюють свої рішення, тому імітаційні моделі, засновані на динаміці системи, є цінним інструментом для описового аналізу, який, своєю чергою, може призвести до підвищення рівня знань і тим самим поліпшення процесу прийняття рішень.

Суть методології системної динаміки полягає не у прямому використанні змінних стану, бо ця ідея часто буває важкою в реалізації. Більш продуктивним виявився підхід, який базується на

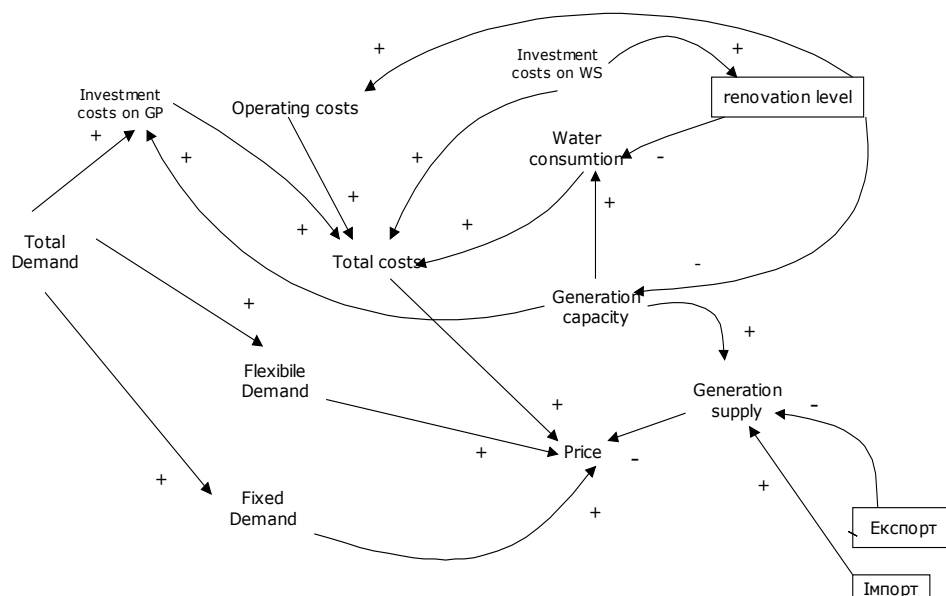


Рис. 2. Схема логічних зв'язків

детальному описі ланцюгів причинно-наслідкових зв'язків (Causal Loop) між факторами, які відображаються в моделі за допомогою змінних стану.

Розроблення таких ланцюгів часто потребує включення в модель певних змінних, спеціально призначених для явного визначення в моделі структури причинно-наслідкових взаємозв'язків між змінними стану, що доповнюють семантику предметної сфери.

На рис. 2 укрупнена логічна схема зв'язків енергетичних, водних та фінансово-економічних факторів у процесі функціонування теплоенергетичного сектора енергетики. Стрілками показано зв'язки, причому там, де стоїть плюс, це означає збільшення, а там, де мінус – відповідне зменшення.

Таким чином, модель являє собою інструмент для створення сценаріїв для аналізу того, що може статися за певних обставин (наприклад, за зміни цін на паливо, податків, технологічних інновацій).

Однак для отримання кількісної оцінки процесу модернізації та реконструкції теплоенергетики з урахуванням фактору сукупного використання тільки схеми логічних зв'язків недостатньо. Проте це «дорожня карта» для використання сучасних інструментальних засобів моделювання динамічних процесів, зокрема добре відомого пакету імітаційного моделювання Powersim Studio 10 Express [13]. Функціонально даний пакет являє собою систему візуального програмування, який дає змогу в зручній формі моделювати складні динамічні процеси. На рис. 3 представлено модель, яка деталізує та уточнює схему логічних зв'язків, представлених на рис. 2.

На цій діаграмі прямокутниками представлено змінні, які характеризуються змінами станів, а колами – допоміжні змінні,

що з'єднуються стрілками: подвійними – для випадків зв'язаних потоків та одинарними, це так звані інформаційні зв'язки.

Змінні даної моделі. Змінні станів (Level):

Інтегральний_попит – попит на електроенергію на даний період часу;

ІнвЕнерПопит – обсяг інвестицій у модернізацію енергогенеруючих потужностей;

ІнвВводопостач – інвестиції в модернізацію водопостачання;

ОбСпВоди – обсяг спожитої оборотної води на виробництво електроенергії;

ЗагСума – загальна сума коштів на модернізацію;

ЧасткаМодерн – частка модернізованої системи водопостачання;

Пропозиція – постачання електроенергії, визначене енергоринком;

Змінний_попит – попит, що змінюється від сезонних, добових, погодних та інших факторів;

Фіксований_попит – попит на електроенергію, який вважається незмінним на протязі року;

ОперацВитрати – сукупні витрати на експлуатацію.

Допоміжні змінні (Auxillary):

ДинПопиту – прогнозована в НЕС швидкість зростання попиту електроенергії на період дії НЕС;

ДинІнвВод – значення динаміки надходжень інвестицій на модернізацію системи водопостачання;

СумВНВ – сума коштів на модернізацію системи водопостачання;

ТемпОсвІнв – енергетичне виробництво електроенергії значення динаміки надходжень інвестицій на модернізацію теплоенергетики;

ТемпІнвВод – значення динаміки надходжень інвестицій на модернізацію системи водопостачання;

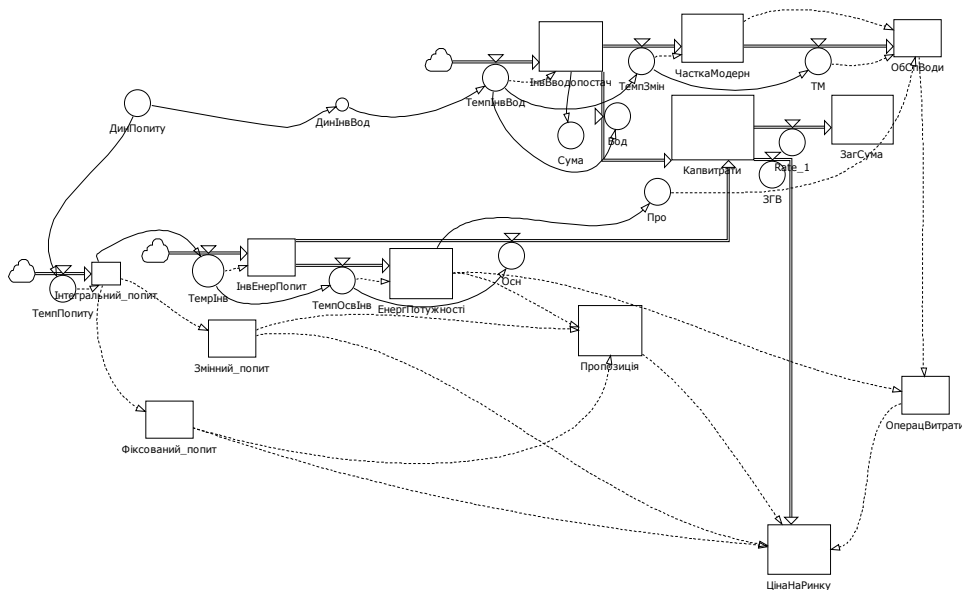


Рис. 3. Потоківа модель системної динаміки процесу модернізації теплоенергетики України

ЧастНаПот – енергетичне виробництво електроенергії, значення динаміки надходжень інвестицій на модернізацію енергетичних потужностей;

ТемпОсвІнв – значення динаміки освоєння;

ТемпЗмін – темп змін системи водопостачання;

ТемпОприход – темп оприходування коштів;

ЗГВ – сума загальних витрат;

ПотЕнер – значення потужності енергосистеми;

ТемпПопиту – темп попиту на інвестиції;

ЗВНМП – темпи загальних витрат на модернізацію;

ТМ – темп зміни частки нових схем водопостачання;

Кожна змінна типу Level є сумою потоків вхідних і різницею вихідних потоків вигляду $temp_1 * dx_1 + \dots + temp_n * dx_n - temp_1 * de_1 - \dots - temp_p * dy_p$.

Окреме питання в даній моделі займає питання рівноважної ціни на електроенергію. Нині не існує єдиновизнаної теорії про ціноутворення на ринку електроенергії, навіть для стаціонарного ринку, тобто там, де не відбувається масштабна модернізація. Щодо ціноутворення у разі розширення та модернізації енергоринку, то це питання нині інтенсивно вивчається. Найбільш ґрунтовний підхід запропонований у роботі Лохмана [14, с. 36]. Ідея цього підходу така.

Нехай функція попиту $F(x) = b$. Тоді її зворотна функція F^{-1} існує в точці b , неперервна і строго монотонно спадає. Існування зворотної функції $F^{-1}(x)$ дає змогу переписати умову рівності *попит* = *пропозиція* еквівалентно з точки зору величини Q як зворотної функції попиту. Далі підбирається відповідна функція, що задо-

вольняє цим умовам, наприклад частково логарифмічна $Q = a - b \log P$.

Тоді зворотна їй буде:

$$P = e^{(a-Q)/b} \quad a > 0; \quad b > 0.$$

Ураховуючи особливості самого методу системної динаміки, за якого не ставиться задача з самого початку досягати граничної точності моделі, ми обрали спрощений варіант функції попиту і скористалися лінійним наближенням. Калібрування параметрів моделі проводилося на основі довідкових даних та на основі експертних даних про функціонування систем теплоелектроенергетики [15, с. 25].

Проведення імітаційних експериментів

За допомогою представленої моделі було промодельовано різні сценарії розвитку модернізації. Розглянемо сценарій без модернізації водопостачання, так званий нульовий.

Результати імітаційного прогону відображено в табл. 1 та на рис. 4.

На рисунку рис. 5 представлено розрахунок сценарію розвитку програми реконструкції за припущеннями, що зміна та модернізація енергогенеруючих потужностей відповідає індикативним цифрам НЕС, а зміна водопостачання на теплоелектростанції реалізована лише на 55%. У табл. 2 надано укрупнені значення ключових показників проходження модернізації та реконструкції теплоелектроенергетики України на період із 2017 по 2035 р.

Аналіз результатів

Вивчення результатів прорахунків варіантів проведення модернізації теплоенергетики України, який передбачається проектом НЕС, за різними сценаріями показує, що сума інвестицій у деяких варіантах може перевищувати індикативну більш ніж на 40%. При цьому додаткові

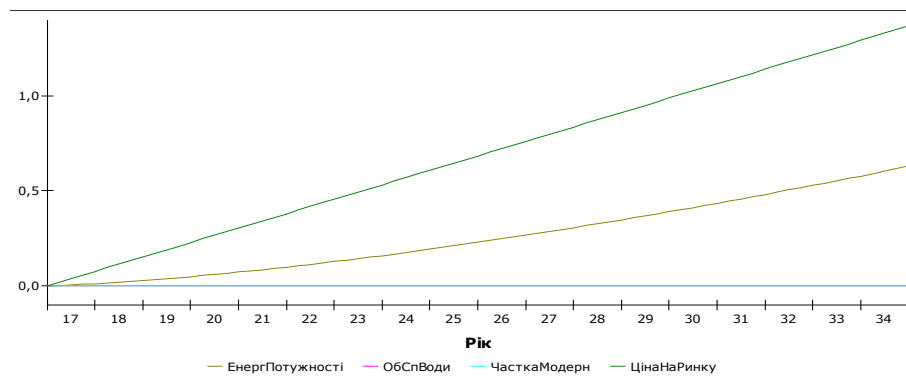


Рис. 4. Зміна параметрів енергосистеми без модернізації системи водопостачання

Таблиця 1

Показники параметрів енергосистеми без модернізації системи водопостачання

Час	Ціна-НаРинк	Енерг-Потужності	Частка модерн	СумВНВ	Капвитрати	Зміна-ОбСпВоди	ЗагСума
01.01.2022	0,15	0	0	0	10,22	0	10,22
01.01.2029	1,45	0,19	0	0	20,83	0	20,83
01.01.2029	1,83	0,29	0	0	31,71	0	31,71

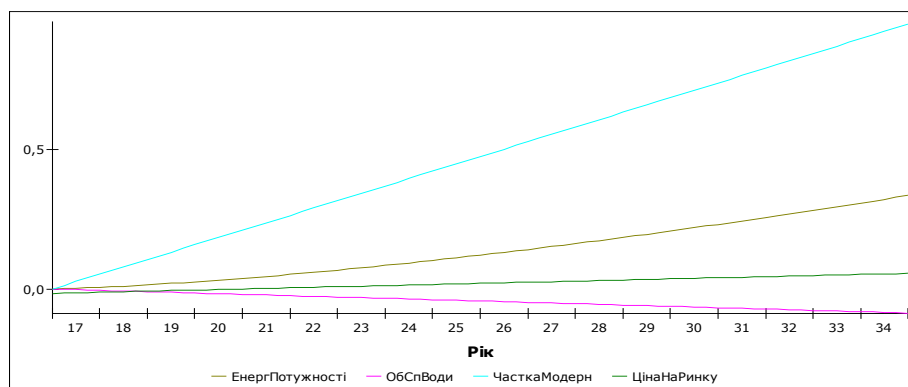


Рис. 5. Динаміка модернізації теплоенергетичного сектору з урахуванням сукупного використання на рівні 55%

Таблиця 2

Модернізація теплоенергетичного сектору з урахуванням сукупного використання на рівні 55%

Час	Ціна- НаРинк	Енерг- Потужності	Частка модерн	СумВНВ	Капвитрати	Зміна- ОбСпВоди км ³	ЗагСума
01.01.2022	0,15	0,09	0,15	0,8	10,22	0,7	11,02
01.01.2029	1,49	0,19	0,35	1,6	20,83	1,21	22,43
01.01.2029	1,94	0,29	0,55	2,4	31,71	2,1	33,11

інвестиції на модернізацію системи водопостачання становлять від 5% до 8% прогнозованої суми інвестицій на модернізацію теплоенергетики в цілому. При цьому витрати на модернізацію системи водопостачання роблять певний внесок у збільшення рівноважної ціни розміром до 10%. Однак при цьому можна зберегти до 2 км³ /рік водного ресурсу.

Висновки. Проведене дослідження вказує на те, що така вкрай важлива проблема, як суттєва модернізація теплоенергетики, потребує реалізації з урахуванням фактору супутнього використання водного ресурсу. Своєю чергою, виконання такої програми потребує інструментарію для оцінки стану процесу реалізації в часі та прийняття відповідних рішень. Запропонована імітаційна модель модернізації теплоенергетики України, побудована на основі методології системної динаміки, може прийнятним наближенням оцінити результати той чи інший варіант розвитку програми залежно від прийнятого рішення. Проведені сценарні розрахунки в середовищі Powersim Studio 10 Express показують спроможність оцінювати виконання програми модернізації теплоенергетики України у взаємозв'язку фінансових, енергетичних та водних ресурсів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : mre.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245165790.
2. Гальчинський Л.Ю., Вишнеvsька А.О. Проблема супутнього використання водного та енергетичного ресурсів в електроенергетиці України / Л.Ю. Гальчинський, А.О. Вишнеvsька [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://market-infr.od.ua/journals/2016/2_2016_ukr/46.pdf.
3. Шеберстов О.М. Енергетика і електрифікація / О.М. Шеберстов Енергетика і електрифікація. – 2004. – № 12.
4. Черноусенко О.Ю. Стан енергетики України та результати модернізації енергоблоків ТЕС / О.Ю. Черноусенко // Проблеми загальної енергетики. – 2014. – № 4. – С. 20–26.
5. Карп І.М., Сміхула А.В. Проект концепції модернізації теплової енергетики України / І.М. Карп, А.В. Сміхула [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ntseu.net.ua/stories/211-concept>.
6. Борисенко А.В. Моделирование развития мощностей электростанций в условиях несовершенной конкуренции / А.В. Борисенко // Электронное моделирование. – 2009. – № 5. – С. 3–27.
7. Byers, E. A., Hall, J. W., & Amezcaga, J. M. (2014). Electricity generation and cooling water use: UK pathways to 2050. *Global Environmental Change*, 25, 16–30.
8. Botterud, A., Korpas, M., Vogstad, K., & Wangensteen, I. (2002). A dynamic simulation model for long-term analysis of the power market. 14th PSCC, Session, 12, 1–7.
9. Rutberg, M. J. (2012). Modeling water use at thermoelectric power plants (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
10. Вишнеvsький В. Чи потрібні водосховища? / В. Вишнеvsький // Персонал. – 2011. – № 11(416).
11. Донелла Х. Медоуз. Азбука системного мышлення / Х. Донелла. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 344 с.
12. Forrester J.W. *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge MA, 1961.
13. Powersim Software Services [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.powersim.com/main/download-support/technical-resources/free-downloads/>.
14. Lohmann, T., & Rebennack, S. (2016). Tailored Benders Decomposition for a Long-Term Power Expansion Model with Short-Term Demand Response. *Power Management Science*.
15. Довідкові матеріали до проекту «Енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»».