

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ TIMES З УРАХУВАННЯМ НЕГАРАНТОВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Отримано 13 жов. 2023 р.; рекомендовано до публікації 20 груд. 2023 р.
Доступно онлайн 30 груд. 2023 р.

М. П. Кузнєцов¹, О. В. Лисенко²

Автор для кореспонденції: Микола Кузнєцов,
e-mail: renewable@ukr.net

¹ д-р. техн. наук.
<https://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

² д-р. техн. наук.
<https://orcid.org/0000-0001-7085-7796>

¹ Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна

² Таврійський державний агротехнологічний університет; Шведський інститут досліджень довкілля, Готенберг, Швеція

Анотація. Метою цієї роботи є аналіз можливостей використання моделі довготермінового прогнозування розвитку енергетики для адекватного відображення особливостей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) негарантованої потужності (сонячної, вітрової) з урахуванням часової мінливості та рівня невизначеності. Задачі довготермінового моделювання розвитку енергетики вимагають комплексного підходу з урахуванням усіх особливостей різних джерел енергії. Поєднання енергетичних систем вимагає узгодженого підходу до планування їх розвитку. Одним із засобів оптимального планування є програмний комплекс TIMES, застосований також в Україні. Однак зростання частки відновлюваних джерел негарантованої потужності накладає додаткові вимоги до математичного апарату. Модулі врахування клімату й стохастичності програми TIMES не розраховані на випадкову природу ВДЕ. В роботі пропонується використати наявні можливості програми, спрямовані на забезпечення гнучкості підходів, доповнивши їх факторами невизначеності ВДЕ. Вкладається новий зміст у деякі атрибути товарів, товарних потоків та процесів, що дає змогу врахувати ймовірні відхилення від очікуваних значень. Випадковий характер ВДЕ може бути описаний через показники дисперсії значень та щільності розподілу. Фактор ризику використовується як технічний параметр, завдяки чому можна отримати діапазон рішень з заданою достовірністю. Це дозволяє врахувати ймовірність незбалансованості поточних енергетичних потоків, забезпечивши певний запас стійкості енергосистеми в розумних межах. Бібл. 12, рис. 1.

Ключові слова: програмний комплекс TIMES, відновлювані джерела енергії, негарантована потужність, фактор ризику.

POSSIBILITIES OF USING THE TIMES SOFTWARE TAKING INTO ACCOUNT THE NON-GUARANTEED RENEWABLE ENERGY

Received Nov. 13, 2023; accepted Dec. 20, 2023
Available online Dec. 30, 2023

М. Kuznietsov¹, О. Lysenko²

Author for correspondence: Mykola Kuznietsov,
e-mail: renewable@ukr.net

¹ Doc. of Tech. Sciences.
<https://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

² Doc. of Tech. Sciences.
<https://orcid.org/0000-0001-7085-7796>

¹ Institute of Renewable Energy NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Tavria State Agrotechnological University, Swedish Environmental Research Institute, IVL Svenska Miljöinstitutet, Gothenburg, Sweden

Abstract. The purpose of this paper is to analyze the possibilities of using the model of long-term energy development forecasting to adequately reflect the features of renewable energy sources (RES) of non-guaranteed power (solar, wind), as temporal variability and the level of uncertainty. The tasks of long-term modeling of energy development require a comprehensive approach, taking into account all the features of various energy sources. The combination of energy systems requires a coordinated approach to planning their

development. One of the means of optimal planning is the TIMES software complex, which has also some application in Ukraine. However, the growth of the renewable sources share of non-guaranteed capacity imposes additional requirements on the mathematical apparatus. The TIMES climate and stochasticity modules are not designed for the random nature of RES. The work proposes to use the available capabilities of the program aimed at ensuring the flexibility of approaches, supplementing them with RES uncertainty factors. New content is added to some attributes of commodities, commodity flows and processes, which allows us to take into account possible deviations around expected values. The random nature of RES can be described through indicators of dispersion of values and probability density distribution. The risk factor is used as a technical parameter, by which it is possible to obtain a range of solutions with a given reliability. This allows us to consider the probability of imbalance of current energy flows, providing a certain margin of stability of the energy system within reasonable margins. Bible 12, fig. 1.

Keywords: TIMES software, renewable energy sources, non-guaranteed capacity, risk factor.

Використані позначення та скорочення

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

СЕС – сонячна електростанція

ВЕС – вітрова електростанція

ОЕС – Об'єднана енергосистема

Вступ

Підсумковим документом Саміту ООН зі сталого розвитку від 2015 року «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» було затверджено так звані Цілі сталого розвитку [1] й низка окремих завдань. Значна частина з 17 формалізованих цілей певним чином стосується енергетики. До таких безпосередньо належить ціль 7: «Чиста та відновлювана енергія». Вона передбачає забезпечення доступу для всіх до недорогих, надійних, відновлюваних та сучасних джерел енергії. Значною мірою від енергетики залежить ціль 11 «Сталий розвиток міст та громад», що передбачає забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості й екологічної стійкості міст і населених пунктів. Від відновлюваної енергетики безпосередньо залежить ціль сталого розвитку 13: «Боротьба зі зміною клімату», тобто вжиття невідкладних заходів щодо боротьби зі змінами клімату та його наслідками. На виконання цих та інших цілей (зокрема, збереження ресурсів планети) орієнтовано нову парадигму безвуглецевої економіки та, відповідно, декарбонізації енергетики. Україна, як і інші країни – члени ООН, приєдналася до глобального процесу забезпечення сталого розвитку. Для встановлення стратегічних меж національного розвитку України на період до 2030 року було започатковано процес адаптації Цілей сталого розвитку з урахуванням специфіки національного розвитку. Для України ці питання набувають особливої гостроти в умовах відбудови економіки та досягнення енергетичної безпеки.

У цей час увага до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) зростає як серед економічно розвинених країн, які воліють змінити джерела енергії на більш екологічні, так і серед країн слабкіших економічно, які хочуть отримати дешевші ВДЕ та скоротити імпорт енергоносіїв. Хоча процес переходу на такі джерела є доволі дорогим і тривалим, усе-таки багатьма країнами були створені програми переходу до загальнодоступних, надійних,

стійких та сучасних джерел енергії, які пропонує відновлювана енергетика. Була навіть названа орієнтовна дата, до якої відновлювані джерела мали запанувати в енергосистемах певних країн, – 2030 рік, а 2050–2060 роки вважають часом повного переходу на відновлювані ресурси. Так, Європейський парламент у 2023 році проголосував за резолюцію про збільшення частки відновлюваної енергії в загальному енергетичному балансі країн-членів до 42,5 % до 2030 року. Згідно з оновленою Директивою про відновлювані джерела енергії країни-члени також повинні прагнути збільшити кількість ВДЕ у своєму енергетичному балансі до 45 %.

Дослідження Інституту відновлюваної енергетики НАН України (ІВЕ НАНУ) [2] вказують на високий потенціал вітчизняних відновлюваних енергоресурсів, а сучасні технології дозволяють його використання. Однак безпечний і сталий розвиток потребує гармонійного розвитку всіх галузей, і особливо енергетики як підґрунтя економіки та безпосереднього забезпечення добробуту. Відновлювана енергетика відрізняється від традиційних енергетичних галузей тим, що більшою мірою залежить від географічних і особливо кліматичних (погодних) чинників як факторів невизначеності. В Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України стрімке зростання обсягів впровадження вітрових (ВЕС) і сонячних (СЕС) електростанцій нерідко відбувалося без належного наукового супроводу, без гарантій надійного забезпечення нормативних вимог щодо стабільності частоти й потужності в енергосистемі при тому, що практично за три роки загальна потужність ВДЕ у складі ОЕС України виросла майже вдвічі [3]. Сьогодні зростає увага до забезпечення ефективного функціонування ВДЕ як у складі енергосистем, так і в формі розподіленої генерації, оскільки Україна інтегрувалася до європейської континентальної мережі ENTSO-E і має дотримуватися додаткових умов. Тому особливої важливості набувають технології довготермінового прогнозування та планування для узгодженого

розвитку енергетики в цілому й окремих її напрямів. Розробка національних планів і стратегій розвитку має ґрунтуватися на інноваційні підходи, проте базуватися на якісних і апробованих математичних моделях. Питання вибору адекватного програмного апарату та вмілого використання має передувати власне розрахунок, особливо на тривалу перспективу зі значним рівнем невизначеності в майбутньому.

Плани розвитку всіх галузей економіки мають бути скоординованими, і в кожен момент часу всі можливості та потреби мають бути збалансованими та узгодженими з кінцевим результатом. Враховуючи такі вимоги, широко вживаною моделлю для виконання довгострокового планування є програмний комплекс TIMES [4], який створено як генератор економічних моделей для локальних, національних, мультирегіональних або глобальних енергетичних систем з урахуванням їх динаміки за багатоперіодний часовий горизонт. Зазвичай його застосовують для аналізу всього енергетичного сектору, але також можуть застосовувати для вивчення окремих секторів, таких як електроенергетика та централізоване теплопостачання. Як вхідні дані розглядаються оцінки потреб кінцевого споживача для кожного регіону, оцінки існуючих запасів енергетичного обладнання в усіх секторах, а також характеристики доступних майбутніх технологій та потенціал джерел первинного енергопостачання. Модель TIMES оптимізує рішення щодо інвестицій, первинного енергопостачання й обміну енергією між регіонами. Вибір моделі генерувального обладнання (тип і паливо) базується на аналізі характеристик альтернативних технологій, економічних та екологічних критеріях. Модель TIMES є вертикально інтегрованою моделлю всієї розширеної енергетичної системи й особливо підходить для дослідження можливого енергетичного майбутнього на основі контрастних сценаріїв для тривалих часових горизонтів. У TIMES повний сценарій складається з чотирьох типів вхідних даних: кривих попиту на енергетичні послуги, кривих пропозиції первинних ресурсів, налаштування політики та опису повного набору технологій. Кількість і ціни різних товарів перебувають у рівновазі, тобто в кожен період часу такі, що постачальники виробляють саме ту кількість, якої потребують споживачі. Ця рівновага спрямована на максимізацію загальних економічних результатів.

Основні параметри (базові змінні) моделі TIMES поділяють на три типи. *Процеси* (технології) – це установки, транспортні засоби чи інші пристрої, які перетворюють одні товари на інші. Наприклад: первинний (видобуток), перетворення (енергетика), обробка. *Товари* – зазвичай енергоносії, енергетичні послуги, матеріали, грошові потоки, емісія. Товар виробляється одним або кількома процесами та/або споживається іншими процесами. *Товарні потоки* – зв'язки між процесами й товарами; те саме, що й товар, але приєднаний до певного процесу та представляє один вхід / вихід цього процесу. Зазначені параметри використовуються як координати задачі оптимізації, за їх допомогою можна забезпечити

адаптивність та гнучкість моделі. Середовище моделювання TIMES містить оператори управління GAMS [5] (це мова моделювання). Програмне забезпечення VEDA [6] використовується для аналізу результатів моделей.

Програмний комплекс TIMES досить широко використовується вітчизняними фахівцями, зокрема адаптована версія TIMES-Ukraine. Моделювання TIMES застосовували, зокрема, Інститут економіки та прогнозування, Інститут загальної енергетики, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова, Інститут електродинаміки (всі НАН України), ДП НЕК Укренерго та інші. Як переваги комплексу зазначають міжнародне застосування та значний накопичений досвід, можливість детального опису енергосистеми, комбінування технічних та економічних вимог, а також впливу на екологію. Як недолік – система досить складна, потребує підготовлених фахівців та значного обсягу вхідних даних. Особливості використання TIMES-Ukraine описано, зокрема, експертами Інституту економіки та прогнозування НАН України в низці публікацій [7–10].

Результати застосування моделі було використано при розробці ряду вітчизняних стратегічних програм, зокрема Міністерством енергетики України, Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів, Мінінфраструктури, Мінекономіки та іншими для створення довготермінових сценаріїв розвитку відповідних галузей (зокрема, стратегій, національних планів дій). Представлені результати стосувались комплексного аналізу сталого розвитку енергетики, економічно обґрунтованих шляхів задоволення енергетичних потреб, ефективного використання власних енергетичних ресурсів, посилення енергетичної безпеки, забезпечення доступного та надійного енергопостачання, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, оцінки окремих заходів та політичних рішень тощо. Отже, зважаючи на широке застосування моделі, варто оцінити її можливості для вирішення актуальних задач енергетики України. Приклад застосування моделі TIMES-Ukraine (фрагмент звітної матеріалу) зображено на рисунку.

Постановка завдання

Результатом моделювання має бути оптимальний (за економічними, екологічними чи іншими критеріями соціального значення) склад генерувальних потужностей і розподілу потоків енергії як на кінцевому, так і на проміжних часових інтервалах, з постійним забезпеченням енергетичного балансу. Однак для отримання коректного результату потрібно належним чином сформулювати склад вхідних даних. До них насамперед належить деагрегований національний енергетичний баланс чи баланс електроенергії. Для цього потрібні детальна статистика з виробництва і споживання енергетичних ресурсів, технічні та економічні параметри роботи існуючих і перспективних на конкретному часовому горизонті потужностей. Бажано мати графіки електричних

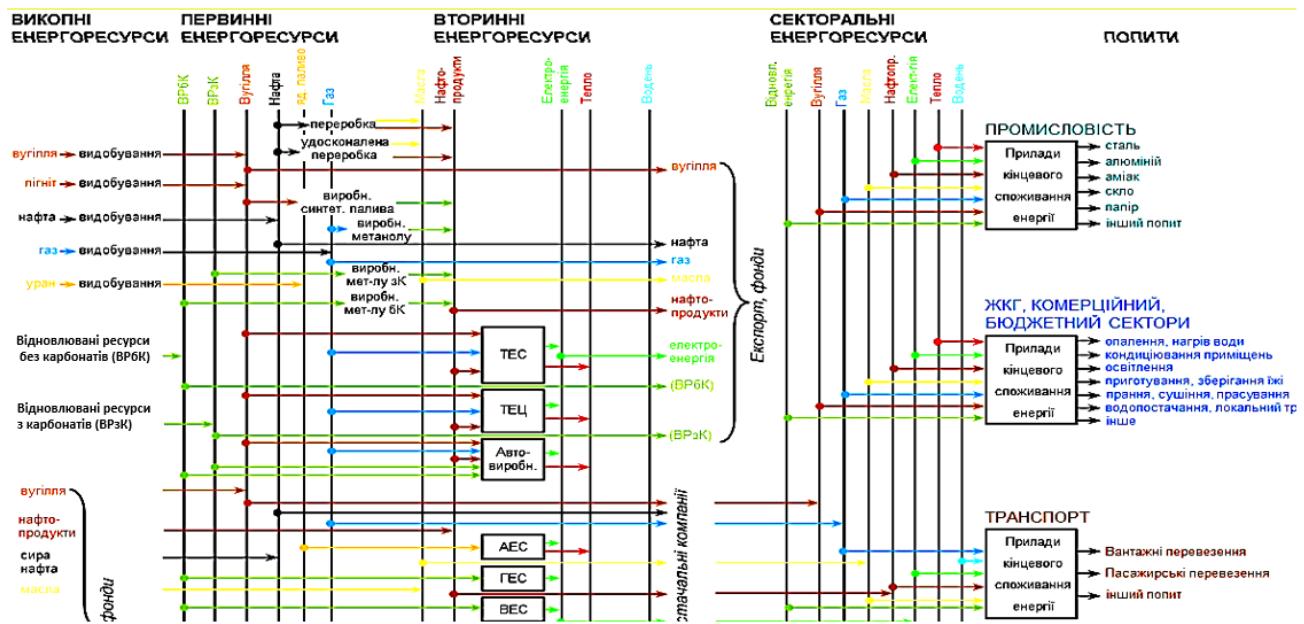


Рисунок. Модель енергетичної системи – специфікація структури (джерело: матеріали Інституту економіки та прогнозування НАН України)

Figure. Energy system model – structure specification (source: materials of the Institute of Economics and Forecasting of the NAS Ukraine)

навантажень, обсяги, вартості та джерела надходження палива, інші макроекономічні показники, зокрема прогнозовані, прогноз цін та інших вартісних показників. Для екологічної оцінки потрібно задати коефіцієнти обчислення шкідливих викидів від різних видів палива та технологій. Тут якість розрахунку залежить від якості прогнозу цих даних на тривалий час (десять років). Це само собою є непростю задачею; наявність додаткової невизначеності у вигляді ВДЕ, залежних від погодних факторів, значно ускладнює задачу оптимізації. Метою роботи є аналіз можливостей використання моделі довготермінового прогнозування розвитку енергетики для адекватного відображення особливостей ВДЕ негарантованої потужності (сонячної, вітрової) з урахуванням часової мінливості та рівня невизначеності поточних значень у кожний момент часу.

Основні результати

Найхарактернішою особливістю таких ВДЕ, як сонячна та вітрова генерація, є залежність від погодних умов, отже, залежність від слабо прогнозованих або цілком випадкових величин. Тому важливою здатністю моделі має бути можливість оперативного передбачення зміни параметрів та можливість представлення стохастичних процесів (у цьому разі процесів генерації енергії), для забезпечення поточного енергобалансу [11]. Розглянемо, які з можливостей моделювання можуть бути використаними.

Усі обмеження TIMES активуються та визначаються шляхом визначення деяких показників, іменованих

атрибути. Атрибути додаються до процесів, товарів, потоків або спеціальних змінних, які були створені для визначення нових функцій. Атрибути надають додаткову гнучкість моделювання. Атрибути можуть бути кардинальними (числа) або порядковими (списки, набори). Кардинальні (основні) атрибути називаються параметрами.

До технічних параметрів процесів можуть бути віднесені ефективність процесу, коефіцієнти доступності, споживання товару на одиницю діяльності, частки палива на одиницю діяльності, технічний термін експлуатації процесу, час виконання будівництва, час і тривалість демонтажу, кількість спожитих товарів (відповідно вивільнених) шляхом побудови (відповідно демонтажу) однієї одиниці процесу та внесок у забезпечення пікових потреб. Особливий вид обмежень полягає у встановленні верхніх або нижніх меж на швидкість розвитку технологій. Найчастіше такими обмеженнями є інвестиції, потужність і активність процесу. Обмеження зростання належать до класу динамічних границь, у них можуть бути кілька періодів. Динамічні межі визначаються користувачем.

Товарно-орієнтовані параметри належать до тих самих категорій, що й процеси. Технічні параметри, пов'язані з товарами, – це загальна ефективність (наприклад, загальна ефективність електричної мережі) і часові зрізи, протягом яких цей товар слід відстежувати. Крім того, для товарів попиту можна вказати криві річного прогнозованого попиту та навантаження (якщо товар має роздільну здатність до річного періоду). До економічних

параметрів належать додаткові витрати, податки та субсидії на загальне чи чисте виробництво товару.

Частина параметрів пов'язана з товарними потоками. Товарний потік (далі просто потік) – це кількість певного товару, виробленого або спожитого певним процесом. Деякі процеси мають кілька потоків, які входять або виходять з них, можливо, різних типів (паливо, матеріали, вимоги або викиди). У TIMES кожен потік має прикріплену до нього змінну, а також кілька атрибутів. Технічні параметри разом із деякими налаштованими атрибутами дозволяють повністю контролювати максимальну та/або мінімальну частку, яку може займати певний вхідний чи вихідний потік у межах однієї товарної групи. Інші параметри та набори визначають кількість певних відтоків по відношенню до відповідних супутніх потоків (наприклад, ефективність, рівень викидів).

Крім атрибутів, засобом збільшення гнучкості моделі відповідно до погодних умов є кліматичний модуль. Модуль орієнтований переважно на стан глобальних шкідливих викидів і послідовно обчислює зміни концентрацій CO₂, CH₄ та N₂O на тривалому часовому відтинку, загальну зміну (протягом доіндустріальних часів) радіаційного впливу на атмосферу, а також екзогенно визначений додатковий вплив, зумовлений іншими причинами (антропогенні та/або природні чинники), зміни температури (за доіндустріальний час) у двох рівнях водного середовища (поверхневому та глибинному). У кліматичному модулі TIMES зміна клімату представлена переважно глобальною середньою температурою, з різними або довгими інтервалами.

Для суто випадкових чинників передбачено застосування стохастичного програмування. Припускається, що певні ключові параметри моделі є випадковими, що вимагає використання стохастичного програмування, а не звичайного детермінованого алгоритму лінійного програмування. Стохастичне програмування в цій моделі – це метод прийняття оптимальних рішень в умовах ризику. Ризик полягає в невизначеності щодо значень деяких параметрів задачі (вартості, вагові коефіцієнти, обмеження). Кожен невизначений параметр вважається випадковою величиною, зазвичай з дискретним відомим розподілом імовірностей. Отже, цільова функція також стає випадковою величиною, і необхідно вибрати критерій оптимізації. Таким критерієм може бути очікувана вартість, очікувана корисність тощо.

У моделі прийнято, що невизначеність певного параметра вирішується (повністю або частково) у час вирішення, тобто на часовому зрізі, коли виявляється фактичне значення параметра. Різні параметри можуть мати різний час роздільних значень. Як час вирішення, так і розподіли ймовірностей параметрів можуть бути представлені на дереві подій. Кожна гілка дерева подій є окремим сценарієм (випадковою реалізацією) процесу, і розпочинається у час вирішення стосовно значення випадкового параметра. Це безпосередньо веде до наступної загальної багатоперіодної, багатоетапної стохас-

тичної програми в рівняннях моделі; це також лінійне програмування, але його розмір набагато більший, ніж у детермінованій моделі TIMES. Загальний вигляд рівнянь:

$$Z = \sum_t \sum_s C(t,s)X(t,s)p(t,s) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$A(t,s)X(t,s) \geq b(t,s), \quad \forall s \in S(T), \quad t \in T, \quad (2)$$

де t – часовий проміжок; T – множина інтервалів часу; s – індекс поточного стану (випадковий параметр); $S(t)$ – множина станів у часові проміжки t . Тут $X(t,s)$ – вектор шуканих змінних; $C(t,s)$ – показник вартості; $p(t,s)$ – імовірність події; $b(t,s)$ визначає обмеження в проміжку t відповідно до сценарію s . Решта коефіцієнтів – числові параметри моделі.

Рівняння (1) визначає цільову функцію, тобто критерій оптимізації; система нерівностей (2) встановлює обмеження, визначені розробником задачі (користувачем). Аналогічно (2) може бути задано обмеження також на кумулятивні показники (накопичувальний баланс).

Альтернативне (але еквівалентне) формулювання полягає у визначенні одного сценарію на шляху від початкового до кінцевого періоду та різних змінних $X(t,s)$ для кожного сценарію та кожного періоду часу.

Такий опис стохастичного програмування припускає, що користувач приймає очікувану вартість як свій критерій оптимізації. Це еквівалентно тому, що він нейтральний до ризику. В багатьох ситуаціях припущення про нейтральність ризику є лише наближенням справжньої цільової функції для особи, яка приймає рішення.

Інший підхід базується на класичній моделі E-V (Expected Value-Variance). У підході E-V передбачається, що дисперсія вартості є прийнятною мірою ризику, пов'язаного зі стратегією за наявності невизначеності. Обчислюється певним чином дисперсія вартості даної стратегії. Підхід E-V замінює критерій очікуваної (осередненої) вартості EC_k для сценарію k такою функцією для мінімізації:

$$U_k = EC_k + \lambda \sqrt{\text{Var}(C_k)}, \quad (3)$$

де $\lambda > 0$ – міра уникнення ризику для особи, яка приймає рішення; $\text{Var}(C_k)$ – варіація (дисперсія) відповідної множини можливих значень вартості. Для $\lambda = 0$ виходить звичайний критерій очікуваної вартості. Більші значення λ вказують на збільшення неприйняття ризику. Врахування уникнення ризику за допомогою цього формулювання призвело б до нелінійної, невикуклої моделі з усіма відповідними обчислювальними обмеженнями. Це накладе серйозні обмеження на розмір моделі.

Загальні багатоетапні задачі стохастичного програмування описаного вище типу можна розв'язувати стандартними алгоритмами шляхом вирішення детермінованого еквівалента стохастичної моделі. Однак детермінована проблема може стати дуже великою і,

отже, важкою для вирішення, особливо якщо вводяться цілі змінні, а також у випадку лінійних моделей з великою кількістю стохастичних сценаріїв.

Оцінімо, наскільки описані можливості моделювання дозволяють врахувати реальну поведінку ВДЕ негарантованої потужності.

Сезонність. Як свідчить опис можливостей моделі TIMES, там передбачено змінні в часі потоки товарів та процеси. Ці зміни характерні для традиційної енергетики. Крок по часу в річному масштабі чи навіть по сезонах відповідає можливим змінам встановленої потужності, а не поточним коливанням через зміну погодних умов. Кліматичний модуль стосується лише середньорічних характеристик. На додаток до річних періодів часу (які можуть мати змінну довжину), існують часові поділки в межах року, звані часовими зрізами, які користувач може задавати за бажанням. Часові зрізи особливо важливі, коли умови в різні пори року істотно відрізняються. Існують різні фактори доступності або вартості енергоносія: річні чи сезонні. Кожен може бути визначений через максимальний коефіцієнт, точний або навіть мінімальний (щоб забезпечити мінімальне використання деякого обладнання). При цьому для кожного періоду часу t і для кожного регіону має бути достатньо встановленої потужності, щоб перевищити необхідну потужність у сезон найбільшого попиту на товар. Часовим зрізам потрібно бути гнучкими з багаторівневою ієрархією. У TIMES будь-який товар і процес можуть мати власні часові проміжки, вибрані користувачем. Ці гнучкі часові проміжки розділені на три групи: сезонні (або щомісячні), тижневі (будні та вихідні) і щоденні (день / ніч або погодинна), де будь-який рівень можна розширити (скоротити) або опустити. Наприклад, використовують чотири часові зрізи, що поєднують два сезони (зима і літо) і два внутрішньодобові періоди (день і ніч). Зрозуміло, що збільшення кількості часових зрізів призводить до зростання розрахунків, і робить застосування моделі більш громіздким.

У зазначених прикладах сезонність вважається однаковою в різні роки, по суті, постійне впродовж року значення замінюють ламаною лінією ступінчастого типу як багатоступеневою кривою пропозиції. Це допоможе відобразити характерний річний хід вітрової чи сонячної потужності. Оскільки номінальна потужність джерела є фіксованим товаром з моменту введення в експлуатацію до виведення, бажано мінливість генерації описувати як зміну властивості товару, якщо товар – це встановлена потужність.

Можливий також шлях відображення сезонності у вигляді атрибутів до відповідного товарного потоку (якщо потік – це наслідок процесу перетворення потужності установки у надходження енергії). Оскільки атрибутів процесу може бути декілька, можна описати їх як властивості внутрішньодобових періодів (день–ніч), та сезонних (зима–літо, або краще помісячно). Тоді сезонні показники будуть одночасно пропорційними

встановленій потужності певного джерела енергії, але матимуть різні вагові коефіцієнти. Інтервали день–ніч (а краще погодинні) особливо важливі для сонячної енергетики, для вітрової – лише в разі вираженого добового ходу швидкості вітру. Тижневий інтервал істотний лише для навантаження, ВДЕ не стосується.

Інший спосіб – урахування змін процесу (коефіцієнтів ефективності товару, по суті, сезонного коефіцієнта використання встановленої потужності). Тоді крива надходження товару буде аналогічним чином відповідати середньому ходу. Додатковою можливістю є встановлення верхніх та нижніх меж як динамічних границь, їх можна розглядати як довірчі інтервали випадкового процесу. Це вже стосується певного опису стохастичності процесу. Змінними параметрами процесу можуть бути потужність процесу, його активність, а саме річні та проміжні значення за певний період. Однак значення меж насправді використовуються для обмежень оптимальної траєкторії, тобто такий атрибут враховує можливе диспетчерське керування поточною потужністю.

Стохастичність. Зазначені атрибути дозволяють врахувати змінну природу ВДЕ, але в сенсі математичного очікування в різний час. Модель працює власне з детермінованими параметрами як координатами задачі оптимізації. Стохастичність у моделі TIMES передбачена в такий спосіб: припускається, що певні ключові параметри моделі є випадковими (це вимагає використання стохастичного програмування); обмежене (у часі) передбачення, що вимагає використання послідовного лінійного програмування, а не однієї глобальної лінійної оптимізації; використання змішаного цілочисельного програмування замість лінійного; припущення, що витрати на деякі технології є спадними функціями кумулятивної кількості, тобто передбачається крива навчання. Стохастичне програмування в цій моделі – це прийняття оптимальних рішень в умовах ризику, який полягає в невизначеності щодо значень деяких параметрів. Кожен невизначений параметр вважається випадковою величиною, зазвичай з дискретним відомим розподілом імовірностей. Такий підхід стосовно поточної ефективності товару чи обсягів потоку дозволив би врахувати природну випадкову природу ВДЕ. Однак модель передбачає, що випадкова зміна параметра можлива лише в певні моменти часу. Це безпосередньо веде до загальної багатоперіодної, багатоетапної стохастичної програми в рівняннях моделі. Це також лінійне програмування, але його розмір набагато більший, ніж у детермінованій моделі TIMES. По суті, одна траєкторія розрахункового процесу замінюється деревом подій, кожна гілка якого відповідає новому значенню випадкового параметра. Кожен шлях уздовж дерева подій представляє іншу реалізацію випадкових параметрів. Кількість таких гілок обмежена можливостями математичного процесора та власними обмеженнями програмного комплексу (моделі). Отже, випадкові параметри можуть мати дискретний набір значень, а

кількість випадкових змін рахується одиницями (в описі моделі такі зміни передбачено на двох часових зрізах з двома можливими значеннями параметра – високим або низьким, тобто дерево подій матиме на виході чотири гілки. Натомість реальна стохастична задача мала б передбачити континуальну множину значень параметрів (чи дискретну, відповідну до заданих довірчих рівнів або квантилів розподілу ймовірності), а кількість часових зрізів (моментів зміни поточної потужності ВДЕ) в ідеалі також континуальна, реально дискретна з малим часовим інтервалом (кілька хвилин). Зрозуміло, така модель потребувала б надто великої кількості розрахунків, і цією моделлю TIMES не передбачена. Якби ми розглядали часовий горизонт розбитим на n часових інтервалів, тобто зрізів, а на кожному зрізі передбачали k можливих значень, то результуюча кількість гілок на останньому кроці досягла б k^n . Наприклад, для доби, розбитої на погодинні значення (це досить груба дискретність), для кожної години передбачали лише середнє, низьке та високе значення (як базовий, песимістичний та оптимістичний сценарії), і на кінець доби отримали б $3^{24} \approx 28 \cdot 10^{10}$ (282 млрд) сценаріїв, кожен з яких потребує розв'язання окремої задачі оптимізації. Навіть якби добу розбили на чотири пори (ніч–ранок–день–вечір), отримали б 81 задачу оптимізації для доби, що належить певному місяцю. Насправді для опису сонячної та вітрової генерації застосовують інтервали порядку 10–15 хв, а ймовірний розподіл значень для часового зрізу доцільно описувати гістограмою по хоча б десяти градаціях. Зрозуміло, що такий підхід не є реалістичним при наведеному вище формулюванні роботи моделі.

$$P(t, \varepsilon) = \omega(t) + U(t, \varepsilon),$$

Отже, стохастична модель оптимізації містить вектори шуканих змінних та матриці коефіцієнтів, залежні від часу t та поточного стану s , де множина інтервалів часу ($t \leq T$, всього n значень) та індексів поточного стану ($s \leq k$) обмежена. До векторних величин можуть належати показники вартості, ймовірності станів у кожному із сценаріїв (гілок дерева подій), решта коефіцієнтів зазвичай – детерміновані параметри моделі. Альтернативне (але еквівалентне) формулювання полягає у визначенні одного сценарію та визначення різних змінних $X(t, s)$ для кожного сценарію та кожного періоду часу. Однак кількість змінних зростатиме аналогічно, і для кожної має бути своя система обмежень. Припущення, що змінна є однаковою на всіх часових інтервалах, рівносильне твердженню, що, наприклад, низьке значення притаманне кожному інтервалу часу. Ймовірність такого сценарію рівна добутку ймовірностей отримати низьке значення, і при значній кількості часових інтервалів є зникаюче малою. Можна однак стверджувати, що таким чином можна оптимізувати сценарії базовий, теоретично (з малою ймовірністю) найгірший і найкращий. Це визначатиме діапазон значень, але щільність розподілу

в ньому буде за означенням зосередженою в районі середнього значення (базового сценарію). Такий розрахунок можна виконати для окремої доби відповідного сезону (чи місяця), і різницю між базовим та винятковими сценаріями враховувати як постійну поправку (сезонні поправки) до розрахунку на повному часовому горизонті.

Інший підхід базується на внесенні поправок на нестабільність ВДЕ як міру ризику, зважаючи на потребу оптимізувати витрати на цілорічних часових інтервалах. Якщо в підході E-V передбачається, що дисперсія вартості призводить до зростання ризику і відповідного зростання ймовірної вартості, то таким же чином можна вважати нестабільність ВДЕ фактором ризику, притаманного всьому часовому горизонту моделі. Тоді розрахункова потужність ВДЕ враховувалась би аналогічно (3):

$$X(t, s) = X(t) + \lambda(t) \text{StD}[X(t, s)], \quad (4)$$

де $X(t)$ – осереднена (детермінована) характеристика товарного потоку (генерації ВДЕ);

$\lambda(t)$ – міра ризику, допустима для вибраного часового інтервалу (в разі нестаціонарності);

$\text{StD}(\dots)$ – стандартна девіація характеристики (середньоквадратичне відхилення).

Тут має бути враховано представлення поточної потужності ВДЕ як композиції детермінованої лінії тренду та випадкових відхилень від тренду [12]:

$$u_i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} U(t) dt = \alpha \cdot u_{i-1} + \sigma \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

де $U(t) = U\{u_i\}$ – випадкові відхилення як неперервна функція або множина дискретних значень на елементарному часовому інтервалі Δt ;

ε – стандартна нормальна випадкова величина;

α і σ – числові параметри дрейфу й волатильності відповідно.

Параметр $\lambda(t)$ як міра ризику може вибиратися з розрахунку довірчого інтервалу при відомому розподілі ймовірності випадкової величини. Для швидкості вітру як функції щільності розподілу зазвичай вибирають розподіл Вейбулла, для сонячної радіації – бета-розподіл або композицію розподілів. Однак для потужності електростанцій на базі цих ВДЕ, враховуючи велику кількість установок, можна використовувати нормальний розподіл на підставі центральної граничної теореми теорії ймовірності, як у формулі (5). Як параметр $\lambda(t)$ можна застосовувати квантиль відповідного розподілу, де залежність від часу має враховувати сезонність поведінки ВДЕ. Так, для нормального розподілу квантиль 1,96 відповідає симетричній ймовірності 0,95 – з ймовірністю 0,95 (або 95 % часу) випадкова величина може відхилитися від середнього в межах $\pm 1,96 \text{ StD}$. На відміну від підходу E-V,

де девіація включена до критерію оптимізації й тому призводить до нелінійної та невивпуклої моделі з відповідними обчислювальними обмеженнями, в цьому підході задача оптимізації лишається лінійною. Недоліком такого підходу є дещо завищена потреба в генерувальній потужності ВДЕ як плата за ризик. Зменшити надлишкову потужність можна, якщо враховувати одностороннє обмеження (наприклад, лише нестачу потужності), тоді квантиль рівня надійності 0,95 дорівнює 1,645. Інший шлях – вимоги до надійності вважати менш жорсткими; так, наприклад, половина очікуваних значень коливається в межах $\pm 0,675 \cdot \text{Std}$.

Висновки

Програмний комплекс TIMES має широке застосування для побудови оптимального сценарію розвитку енергосистеми, з урахуванням можливостей та потреб різних галузей економіки. Коректні результати можуть бути отримані за наявності достатньої кількості початкових даних, поточних та прогнозованих, в тому числі ймовірних з певним рівнем достовірності. Математична модель комплексу оперує із значними часовими відрізкамі, поділеними на інтервали. При цьому основним кроком по часу є рік, можливо сезон. Коротші часові проміжки (тиждень, доба) розглядаються лише як типові для року чи сезону. Параметри процесу вважаються детермінованими, визначеними як середні значення на часовому інтервалі, а врахування випадкового чинника виконується як побудова множини ймовірних сценаріїв. Кількість сценаріїв обмежена можливостями програмного комплексу і зазвичай перебуває в межах десятка.

Відновлювана генерація враховується в TIMES нарівні з традиційною, як певна встановлена потужність та осереднена продуктивність. Таке представлення допустиме для економічних розрахунків на тривалу перспективу, однак не враховує поточної варіативності ВДЕ, яка потребуватиме не врахованих системою резервних засобів. При цьому основна умова роботи комплексу – забезпечення балансу споживання та пропозиції на кожному часовому інтервалі – може не виконуватись всередині інтервалу. Це потребує додаткових заходів з використання TIMES за наявності значної частки (10 % і більше) відновлюваної генерації.

Точне врахування властивостей таких джерел, як сонячна та вітрова генерація, неможлива в межах існуючої моделі. Кліматичний модуль враховує середні річні показники, а стохастичність враховується як обмежена кількість сценаріїв відомої ймовірності. Однак використання передбачених засобів гнучкості дозволяє покращити моделювання джерел негарантованої потужності. Використання атрибутів для таких змінних моделі з різними часовими зрізами, як товар (тут це енергоносії), чи товарний потік (надходження енергоносія), дає можливість описати різну ефективність джерела відновлюваної енергії в різні пори року. Аналогічно можна використати атрибути процесу як показників ефективності перетворення енергії. Таким чином враховуються лише

середні значення потоків енергії, притаманні різним видам ВДЕ та різним сезонам. Для врахування поточної стохастичності можна застосувати такий підхід, як запровадження фактора ризику до зазначених атрибутів, аналогічно до цінового ризику. Як показник ризику може виступати дисперсія (девіація) технічних параметрів, які стосуються поточних значень потужності ВДЕ; завдяки цьому можна оцінити не лише діапазони можливих значень, але й ступінь їх достовірності. Отже, результатом моделювання може бути визначення оптимального сценарію розвитку енергосистеми за умови дотримання заданої надійності як імовірнісної оцінки. Така модель лишається лінійною та детермінованою, проте дозволяє врахувати притаманні ВДЕ випадкові властивості. Звичайно, врахування ризиків призведе до дещо завищених потреб у потужностях генерації, проте користувач має змогу наперед задавати рівень ризиковості, шляхом оцінки допустимості виходу за межі балансу чи визначення довірчого інтервалу для оптимізованих рішень.

Стаття підготовлена в межах виконання науково-технічних робіт Національної академії наук України: НДР «Комплекс-Інтегро» (КПКВК 6541030) та українсько-шведського проєкту «Українські стійкі енергетичні системи» (Ukrainian Sustainable Energy Systems), фінансованого Шведським інститутом (SI – Svenska institutet).

ПОСИЛАННЯ

1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С. О. Кудрі. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 2020. 82 с. ISBN 978-966-999-034-1. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>.
3. Огляди стану та проблем ПЕК. Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України. URL: <https://www.ntseu.net.ua/news/review-ntseu>.
4. Energy Technology Systems Analysis Programme. URL: <http://www.iea-etsap.org/web/Documentation.asp>.
5. GAMS. The General Algebraic Modeling System. URL: <http://www.gams.com/download>.
6. VEDA2.0. URL: <https://github.com/kanors-emr/Veda2.0-Installation>.
7. Chepeliev M., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A. Can Ukraine go “green” on the post-war recovery path? Joule (2023). URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.007>.
8. Petrović S., Diachuk O. et al. Exploring the Long-Term Development of the Ukrainian Energy System. Energies 2021, 14, 7731. URL: <https://doi.org/10.3390/en14227731>.

9. Diachuk O., Podolets R., Yukhymets R. et al. (2019) Long-term Energy Modelling and Forecasting in Ukraine: Scenarios for the Action Plan of Energy Strategy of Ukraine until 2035 [Electronic resource]. Kyiv-Copenhagen. 2019. 52 p. URL: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/long-term_energy_modelling_and_forecasting_in_ukraine_english.pdf
10. Diachuk O. et al. (2017) Decarbonization of Ukraine's energy sector / Ukraine 2050: Low Emission Development Strategy. United Nations Framework Convention on Climate Change. URL: <https://unfccc.int/node/181275>.
11. Kuznetsov M., Lysenko O., Chebanov A., Zhuravel D. Ensuring power balance in a hybrid power system with a standby generator. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. № 6/8 (114). Pp.6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245557.
12. Kuznetsov M., Vyshnevskaya Yu., Brazhnyk I., Melnyk O. Modeling of the Generation-Consumption Imbalance in the Heterogeneous Energy Systems with Renewable Energy Sources / 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Pp. 196–200. DOI: 10.1109/ess.2019.8764189, ISBN: 9781728121604.
1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
2. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine] ed. by S. Kudrya. K.: Institute of Renewable Energy of the NAS Ukraine. 2020. 82 p. ISBN 978-966-999-034-1. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>. (Ukr.)
3. Ohliady stanu ta problem PEK. Naukovo-tekhnichna spilka enerhetykiv ta elektrotekhniv Ukrainy [Reviews of the state and problems of PEK. Scientific and technical union of energy workers and electrical engineers of Ukraine]. URL: <https://www.ntseu.net.ua/news/review-ntseu>. (Ukr.)
4. Energy Technology Systems Analysis Programme. URL: <http://www.iea-etsap.org/web/Documentation.asp>.
5. GAMS. The General Algebraic Modeling System. URL: <http://www.gams.com/download>.
6. VEDA2.0. URL: <https://github.com/kanors-emr/Veda2.0-Installation>.
7. Chepeliev M., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A. Can Ukraine go “green” on the post-war recovery path? Joule (2023). URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.007>.
8. Petrović S., Diachuk O. et al. Exploring the Long-Term Development of the Ukrainian Energy System. Energies. 2021. 14. 7731. URL: <https://doi.org/10.3390/en14227731>.
9. Diachuk O., Podolets R., Yukhymets R. et al. (2019) Long-term Energy Modelling and Forecasting in Ukraine: Scenarios for the Action Plan of Energy Strategy of Ukraine until 2035 [Electronic resource]. Kyiv-Copenhagen. 2019. 52 p. URL: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/long-term_energy_modelling_and_forecasting_in_ukraine_english.pdf
10. Diachuk O. et al. (2017) Decarbonization of Ukraine's energy sector / Ukraine 2050: Low Emission Development Strategy. United Nations Framework Convention on Climate Change. URL: <https://unfccc.int/node/181275>.
11. Kuznetsov M., Lysenko O., Chebanov A., Zhuravel D. Ensuring power balance in a hybrid power system with a standby generator. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. № 6/8 (114). Pp. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245557.
12. Kuznetsov M., Vyshnevskaya Yu., Brazhnyk I., Melnyk O. Modeling of the Generation-Consumption Imbalance in the Heterogeneous Energy Systems with Renewable Energy Sources / 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Pp. 196–200. DOI: 10.1109/ess.2019.8764189, ISBN: 9781728121604.

REFERENCES