

УДК 519.218.82

DOI: 10.32626/2308-5878.2021-22.55-62

О. А. Дячук, канд. техн. наук

ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України», м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ПОТУЖНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Робота присвячена математичному моделюванню процесу введення генеруючих потужностей різного типу при вирішенні задач стратегічного планування, в тому числі на довгострокову перспективу, і управління розвитком електроенергетичних систем. Актуальність роботи полягає в тому, що згідно останніх міжнародних досліджень та домовленостей задля обмеження зростання глобальної температури до $1,5^{\circ}\text{C}$ понад доіндустріальні рівні усі країни мають досягнути нетто-нульових викидів ПГ в 2050-2060 рр., що вимагатиме, в тому числі, суттєвих змін в управлінні та стратегічному плануванні розвитку електроенергетики, які мають базуватися на детальних розрахунках з використанням математичних моделей і комп'ютерних засобів.

У роботі запропоновано до застосування інтегральний метод моделювання з використанням інтегральних рівнянь типу Вольтера із змінними межами для розробки стратегії введення різних генеруючих потужностей електроенергетичних систем на досить віддалену перспективу з урахуванням обмежень на паливо і капітальних вкладень, строків експлуатації електростанцій, а також заміни застарілих технологій новими.

Метод може бути також застосований для інших практичних задач, таких як максимізація надійності електроенергетичних систем, оптимізація часу їх модернізації та ін.

Ключові слова: *електроенергетична система, розвиток, інтегральна модель, планування, управління.*

Вступ. На 26-й Конференції ООН зі зміни клімату (COP26) в листопаді 2021 року майже 200-ма країнами було підтверджено ціль Паризької угоди [1] щодо докладання спільних зусиль для обмеження зростання глобальної температури до $1,5^{\circ}\text{C}$ понад доіндустріальні рівні. Більшістю офіційних та неофіційних делегацій формально і неформально було оголошено, що в 2050-2060 рр. їхні країни мають досягнути нетто-нульових викидів ПГ. Це означає, що кількість викидів ПГ не має перевищувати рівень їх природнього (ліси, океани тощо) та технологічного (спеціальні технології вловлювання вуглецю в промислових процесах або безпосередньо з повітря, або інше) поглинання.

Україна офіційно на міжнародному рівні оголосила, що вітчизняна економіка досягне нетто-нульових викидів ПГ не пізніше

2060 року [2], що вимагатиме суттєвих структурних зрушень, зокрема, в електроенергетичному секторі. Згідно спільних модельних математичних розрахунків Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України та ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України», викиди парникових газів до 2030 року в секторі виробництва енергії та тепла повинні зменшитися приблизно на 26% від рівня 2019 року [3], що в свою чергу вимагає зміни управління та шляхів розвитку електроенергетичних комплексів з врахуванням сучасних глобальних трендів.

Напрями розв'язання проблеми. Для вирішення задач управління і оцінки наслідків вибору варіантів розвитку електроенергетичних комплексів в Україні використовуються різного роду математичні моделі і комп'ютерні засоби (наприклад, Plexos [4, 5], Optimal Dispatch Model [6], TIMES [7]) як системи підтримки розрахунку стратегій та планів введення в експлуатацію нових різних генеруючих потужностей електроенергетичної системи (ЕЕС) в довгостроковому періоді.

Перспективною для використання в цій сфері також може бути інтегральна модель введення нових потужностей в енергетичній системі. У змістовному плані нас будуть цікавити допустимі (або оптимальні в якомусь сенсі) стратегії введення різних генеруючих потужностей ЕЕС на досить віддалену перспективу з урахуванням обмежень на паливо і капітальних вкладень, строків експлуатації електростанцій, а також заміни застарілих технологій новими. Крім того, інтерес також становить представлення інтегральними моделями механізму напрацювання і складування вторинного ядерного палива.

Метод дослідження. Припустимо, що в складі ЕЕС функціонують 6 типів електростанцій: три типи станцій, які не використовують ядерного палива — базового навантаження на вугіллі, на нафтопродуктах і маневрені на газі, а також три типи атомних електростанцій — з реакторами на теплових нейтронах на урані, з реакторами на швидких і теплових нейтронах на плутонії. Будемо позначати їх номерами від 1 до 6 відповідно.

Для кожного типу електростанцій вважаються відомими наступні техніко-економічні характеристики:

- 1) $k_i(t)$ (грн./МВт) — питомі капітальні витрати в момент часу t ;
- 2) $b_i(t)$ (кг у.т./МВт·год) — питомі витрати палива в момент часу t ;
- 3) $\mu_i(t, s)$ — коефіцієнт інтенсивності використання в момент часу t одиниці потужності, введеної раніше в момент часу s ;
- 4) $c_i(t)$ — термін експлуатації електростанції як функція часу t ;
- 5) $\beta_i(t, s)$ — швидкість створення нових потужностей в момент часу t в розрахунку на одиницю потужності, введеної раніше в момент s

(функції β_i пов'язані з урахуванням впливу науково-технічного прогресу; стосовно економіки β_i відображають продуктивність праці або швидкість створення нових робочих місць [8, 9]).

Нехай $\varphi_i(t)$ потужність електростанції i -го типу, $i = \overline{1,6}$; $t \in [t_0, T]$, t_0 і T — відповідно початок і кінець прогнозного періоду, що вводиться в момент часу, t — момент введення самої старої електростанції, що розглядається в складі ЕЕС, функції $\varphi_i(t)$ на передісторії $t \in [t_0, T]$ вважаються відомими: $\varphi_i(t) = \varphi_i^0(t)$.

Якщо $E(t)$ — динаміка електроспоживання, що задається, $t \in [t_0, T]$, то з врахуванням введених позначень рівняння балансу енергії в системі має вигляд:

$$\sum_{i=1}^6 \int_{t-c_i(t)}^t \mu_i(t,s) \beta_i(t,s) \varphi_i(s) ds = E, \quad t \in [t_0, T]. \quad (1)$$

Нехай $\gamma(t)$ — частка маневрених потужностей від суми усіх введених до моменту t (зазвичай $\gamma(t) \approx 0.2$ або 20%), тоді:

$$\int_{t-c_3(t)}^t \mu_3(t,s) \beta_3(t,s) \varphi_3(s) ds = \gamma(t) E(t), \quad t \in [t_0, T]. \quad (2)$$

При заданій динаміці капітальних витрат на розвиток ЕЕС $K(t)$ відповідні обмеження визначаються нерівністю:

$$\sum_{i=1}^6 k_i(t) \varphi_i(t) \leq K(t), \quad t \in [t_0, T]. \quad (3)$$

Залишилося описати обмеження по витратам палива. Для неатомних електростанцій ($i = 1, 2, 3$)

$$\sum_{i=1}^3 b_i(t) \int_{t-c_i(t)}^t \mu_i(t,s) \beta_i(t,s) \varphi_i(s) ds \leq B(t), \quad t \in [t_0, T], \quad (4)$$

де $B(t)$ (кг у.п.) — задані сумарні витрати органічного палива.

Для АЕС на урані:

$$q_4 \varphi_4(t) + b_4(t) \int_{t-c_4(t)}^t \mu_4(t,s) \beta_4(t,s) \varphi_4(s) ds \leq B_U(t), \quad t \in [t_0, T]. \quad (5)$$

Тут q_4 — питоме критичне завантаження (кг у.п./кВт) ядерним паливом, необхідне для початкового запуску АЕС; $B_U(t)$ — задана динаміка видобутку природного урану.

Найбільш складним є врахування обмежень витрат плутонію, який є продуктом напрацювання вторинного ядерного палива в АЕС типів 4-6 (рис. 1).

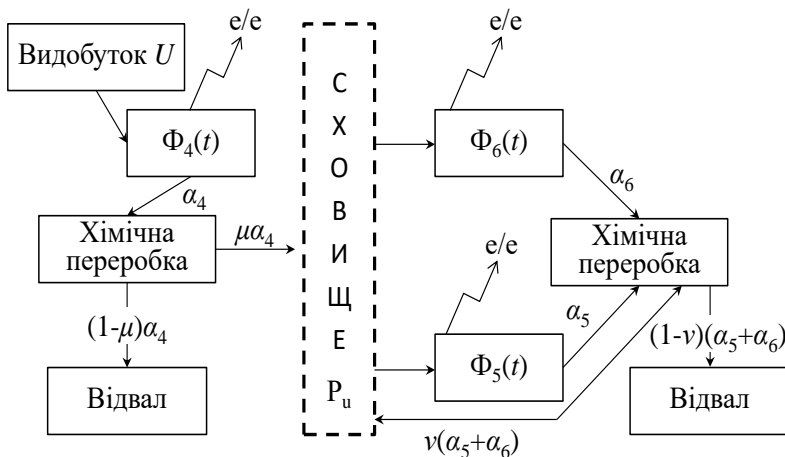


Рис. 1. Спрощена схема ядерного паливного циклу

На рис. 1 наведена спрощена схема ядерного паливного циклу, де введені наступні позначення: $\alpha_{4,6}$ — питоме вивантаження вторинного ядерного палива, μ і ν — частки вторинного ядерного палива, що надходить з АЕС типів 4 і 5, і відповідно, які йдуть на сховище плутонію після хімічної переробки; $\Phi_i(t)$, $i = \overline{4,6}$ — сумарна потужність АЕС i -го типу.

Оскільки в момент часу t витрати плутонію не можуть перевищувати його кількість, яка надійшла до цього часу на сховище після хімічної переробки, то:

$$\sum_{i=5}^6 \left[q_i \varphi_i(t) + b_i(t) \int_{t-c_i(t)}^t \mu_i(t,s) \beta_i(t,s) \varphi_i(s) ds \right] \leq$$

$$\leq \mu \alpha_4 \int_{t-c_4(t)}^{t-\tau_1} \mu_4(t,s) \beta_4(t,s) \varphi_4(s) ds +$$

$$+ \nu \sum_{i=5}^6 \alpha_i \int_{t-c_i(t)}^{t-\tau_2} \mu_i(t,s) \beta_i(t,s) \varphi_i(s) ds. \quad (6)$$

В нерівності (6) q_5 і q_6 мають той же зміст, що й q_4 , а τ_1 і τ_2 — час затримки надходження на сховище плутонію, напрацьованого АЕС 4-го або 5, 6-го типів.

Формули (1)-(6) разом з умовою:

$$\varphi_i(t) \geq 0, \quad i = \overline{1,6} \quad (7)$$

задають систему інтегро-функціональних лінійних співвідношень відносно шуканих функцій $\varphi_i(t)$, $t \in [t_0, T]$, що визначають траєкторію руху ЕЕС до точки в шестивимірному фазовому просторі.

При побудові моделі передбачалося, що вся вироблена електроенергія використовується зовнішньою по відношенню до ЕЕС системою, тобто електроенергія є продукт II роду [8, 9]. Цим пояснюється відсутність в моделі функцій $\lambda(t, s)$ і $a(t, s)$ в позначеннях [8, 9], за допомогою яких описується динаміка відтворення продуктів I роду — в даній моделі тієї частини електроенергії, яка витрачається на розвиток самої ЕЕС.

Припустимо для простоти, що протягом всього терміну експлуатації електростанцій вони використовуються на 100% ($\mu_i(t, s) \equiv 1$), а самі терміни їх експлуатації не залежать від t : $c_i(t) \equiv c_i$, при цьому функції $\beta_i(t, s)$ залежать лише від різниці аргументів. Переходячи в (1)-(6) від нерівностей до рівностей, отримаємо відносно $\varphi_i(t)$ замкнуту систему лінійних інтегро-функціональних рівнянь Вольєрра наступного виду:

$$\sum_{i=1}^6 \int_{t-c_i}^t \beta_i(t-s) \varphi_i(s) ds = E(t); \quad (1')$$

$$\sum_{i=1}^6 k_i \varphi_i(t) = K(t); \quad (2')$$

$$\sum_{i=1}^3 b_i(t) \int \beta_i(t-s) \varphi_i(s) ds = B(t) \quad (3')$$

$$\int_{t-c_3}^t \beta_3(t-s) \varphi_3(s) ds = v(t) E(t); \quad (4')$$

$$q_4 \varphi_4(t) + b_4(t) \int_{t-c_4}^t \beta_4(t-s) \varphi_4(s) ds = B_U(t); \quad (5')$$

$$\begin{aligned} & \mu \alpha_4 \int_{t-c_3}^{t-\tau_1} \beta_4(t-s) \varphi_4(s) ds + v \sum_{i=5}^6 \alpha_i \int_{t-c_i}^{t-\tau_2} \beta_i(t-s) \varphi_i(s) ds = \\ & = \sum_{i=5}^6 \left[q_i \varphi_i(t) + b_i(t) \int_{t-c_i}^t \beta_i(t-s) \varphi_i(s) ds \right], \quad t \in [t_0, T]. \end{aligned} \quad (6')$$

Якщо функції $E(t)$, $B(t)$, $\gamma(t)$, $b_i(t)$, $\beta_i(t)$ неперервно диференційовні на $[t_0, T]$, функції $K(t)$, $B_U(t)$, $k_i(t)$ неперервні на $[t_0, T]$, $\beta_3(0) = 0$ і, крім того, $\det A(t) \neq 0$, $t \in [t_0, T]$, де

$$A(t) = \begin{bmatrix} \beta_1(0) & \beta_2(0) & \beta_5(0) & \beta_6(0) \\ k_1(t) & k_2(t) & k_5(t) & k_6(t) \\ b_1(t)\beta_1(0) & b_2(t)\beta_2(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_5 & q_6 \end{bmatrix},$$

то система (1)-(6) має єдиний неперервний розв'язок $\varphi(t) = (\varphi_1(t), \dots, \varphi_6(t))$, $t \in [t_0, T]$. Цей розв'язок, взагалі кажучи, не обов'язково задовольняє умові (7), порушення якої означає наявність в системі «вузьких місць». Їх виявлення можна здійснити, змінюючи вхідні дані та проводячи багатоваріантні розрахунки.

На базі даної моделі можлива постановка різноманітних оптимізаційних задач, що мають важливе прикладне значення [10-12].

Так, задача оптимізації зовнішньої функції системи [8, 9] стосовно ЕЕС може бути записана як задача максимізації функціоналу:

$$I = \int_{t_0}^T \left[\sum_{i=1}^6 \int_{t-c_i}^t \beta_i(t,s) \varphi(s) ds \right] dt \quad (8)$$

при обмеженнях (2)-(6) і додаткових обмеженнях:

$$\varphi_i(t) \geq \underline{\varphi}_i(t), \quad i = \overline{1,6}; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^6 \int_{t-c_i}^t \beta_i(t-s) \varphi_i(s) ds \geq \underline{E}(t), \quad t \in [t_0, T]. \quad (10)$$

Тут $\underline{\varphi}_i(t)$ і $\underline{E}(t)$ — границі мінімально допустимих норм функціонування ЕЕС.

Завдання деякого тимчасового кроку дискретизації h і апроксимація інтегралів будь-якою квадратурою зводять дану оптимізаційну задачу до задачі лінійного програмування.

Задачу оптимізації зовнішньої функції системи можна сформулювати й по іншому, якщо задати деяку «бажану» динаміку електроспоживання $E^*(t)$, $t \in [t_0, T]$ і мінімізувати функціонал:

$$\hat{I} = \int_{t_0}^T p(t) \left[\sum_{i=1}^6 \int_{t-c_i}^t \beta_i(t-s) \varphi_i(s) - E^*(t) \right]^2 dt, \quad (11)$$

де $p(t) \geq 0$ — вагова функція, розглядаючи тим самим замість задачі лінійного програмування відповідну задачу квадратичного програмування.

Мають прикладний інтерес й інші екстремальні задачі, наприклад, задача максимізації надійності роботи ЕЕС, задача на швидкість і ряд інших [8-12].

Висновки. Враховуючи складність структури та процесу функціонування електроенергетичних систем, проблему їх декарбонізації, що передбачає практично повну заміну генеруючих потужностей, неможливо ефективно вирішити без використання детальних математичних моделей. Враховуючи обсяги інвестиційних потреб які необхідні для декарбонізації електроенергетики (сотні мільярдів доларів США для України), адекватність та точність математичного моделювання має надважливе значення. Використання різного типу математичних моделей, в тому числі, запропонованої в даній статті інтегральної моделі, дозволяє суттєво підвищити ефективність прийняття рішень при стратегічному плануванні та оптимізації капіталовкладень розвитку електроенергетики.

Список використаних джерел:

1. Паризька угода / Організації Об'єднаних Націй, 2015. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/995_161.
2. Оновлений національно визначений внесок України до Паризької угоди [англ.]. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату, 2021. URL: https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/-Ukraine%20First/Ukraine%20NDC_July%2031.pdf.
3. Аналітичний огляд Оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди // Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, липень 2021 р. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/klimatychna_polityka/Аналітичний_огляд_HBV_липень_2021.pdf
4. Проект звіту з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей — 2020. Київ: НЕК «Укренерго», 2020. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2021/11/ERAA-UA-2021-v6.pdf> (дата звернення: 06.12.2021).
5. The optimal path forward for Ukraine's power system: White paper on power system optimization. Wärtsilä Corporation, 2020. URL: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/white-papers/europe/the-optimal-path-forward-for-ukraine-s-power-system.pdf>
6. Meißner F. Optimal Dispatch Model: A model of the Ukrainian electricity system. *Low Carbon Ukraine Project*. Берлін, червень 2020. URL: <https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/ODM-Description.pdf>.
7. Petrovič S., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A., Bühler F., Grandal R., Boucenna M., Balyk O. Exploring the Long-Term Development of the Ukrainian Energy System. *Energies*. 2021. 14. 7731. <https://doi.org/10.3390/en14227731>
8. Глушков В. М. Об одном классе динамических макроэкономических моделей. *Упр. системы и машины*. 1977. № 2. С. 3-6.
9. Глушков В. М., Иванов В. В., Яненко В. М. и др. О средствах моделирования развивающихся систем. Киев, 1980. 58 с. (Препринт / АН УССР, Ин-т кибернетики; №80-37).
10. Апарцин А. С. Об интегральных уравнениях Вольтерра первого рода в теории развивающихся систем. *Численные методы оптимизации и анализа*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. С. 58-67.

11. Апарцин А. С., Тришечкин А. М. Применение моделей В. М. Глушкова для моделирования долгосрочных стратегий развития ЕЭЭС. *Тез. докл. Всесоюз. конф. «Курс-4»*. Рига, 1986. С. 17-19.
12. Яценко Ю. П. Интегральные модели систем с управляемой памятью. Киев: Наук. думка, 1991. 218 с.

MODELING OF A PROCESS OF CAPACITY DEVELOPMENT IN POWER SYSTEMS

The paper is devoted to mathematical modeling of the process of installation of different types of electricity generating capacities for solving planning issues, including for the long term period, and management of development of power systems. The topicality of the work is that according to the latest international research and agreements to limit global temperature rise to 1.5 °C above pre-industrial levels, all countries must achieve net zero GHG emissions in 2050-2060, which will require, including, significant changes in the management and strategic planning of power sector development, which should be based on detailed calculations using mathematical models and computer tools.

This paper proposes the use of an integrated modeling method using integrated Voltaire-type equations with variable limits to develop a strategy for introducing different generating capacity of power systems in the long term periods, taking into account fuel and capital constraints, power plant life, and replacing obsolete technologies with new ones.

The method can be also applied to other practical issues, such as maximizing the reliability of power systems, optimizing the time of their modernization, etc.

Key words: *power system, developing, integrated model, planning, management.*

Отримано: 26.10.2021