

Олексій ЖУКОВ¹
Сергій БОЙКО²
Дмитро ЛУНИКА¹

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ ДО ВДЕ

¹Вінницький Національний Технічний Університет

²Національний Університет «Запорізька політехніка»

Анотація

Запропоновано розширену логістичну модель, яка одночасно описує зростання частки ВДЕ та узгоджене виведення традиційних джерел з урахуванням динамічного фактора безпеки. На відміну від базового підходу, додатково враховано узгоджене зниження частки традиційної генерації, що дозволяє більш повно описувати процес заміщення джерел енергії в енергобалансі. Модель базується на модифікованому логістичному рівнянні зростання [1] та запропонованому рівнянні керованого виведення карбонових джерел.

Ключові слова: енергетичний перехід, відновлювані джерела енергії, математична модель, логістична модель, енергобезпека.

Abstract

An extended logistic model is proposed that simultaneously predicts the growth of the share of renewables and the coordinated withdrawal of traditional sources, taking into account the dynamic energy security factor. Unlike the basic approach, a coordinated decrease in the share of traditional generation is additionally taken into account, which allows for a more complete description of the process of replacing energy sources in the energy balance. The model is based on the modified logistic growth equation [1] and the proposed equation for coordinated reduction of conventional generation.

Key words: energy transition, renewable energy sources, mathematical model, logistic model, energy security.

Вступ

Енергетичний перехід до відновлюваних джерел енергії є одним із ключових напрямів розвитку сучасної енергетики. Його успішна реалізація пов'язана, зокрема із забезпеченням належного рівня стійкості та безпеки енергосистем [1-3]. У наявних підходах до моделювання розвитку ВДЕ значна увага приділяється прогнозуванню зростання їх частки, однак динамічні обмеження, пов'язані з резервом потужності та ризиками дефіциту електроенергії, часто недостатньо враховуються [2, 4].

Метою роботи є розробка математичної моделі енергетичного переходу до ВДЕ з урахуванням фактора енергобезпеки та узгодженого виведення традиційних джерел енергії.

Об'єктом дослідження є процес енергетичного переходу до відновлюваних джерел енергії.

Предметом дослідження є математична модель зростання частки ВДЕ та виведення традиційних джерел.

Основна частина

Базою моделі є логістичне рівняння, яке описує S-подібну динаміку зростання частки ВДЕ та відповідає характерним етапам поширення нових технологій – від повільного початкового впровадження до насичення [3, 4]. Для врахування інженерних обмежень у модель введено динамічний фактор енергобезпеки $S_b(t)$, що виконує роль обмеження швидкості переходу залежно від співвідношення доступного та нормативно необхідного резерву потужності [1].

Основне рівняння зростання частки ВДЕ:

$$\frac{dR(t)}{dt} = k \cdot R(t) \cdot (R_{\max} - R(t)) \cdot S_b(t), \quad (1)$$

де $R(t)$ – частка ВДЕ в енергобалансі; $R_{\max}$ – максимально можлива частка ВДЕ; k – коефіцієнт швидкості зростання; $S_b(t)$ – фактор енергобезпеки.

$$S_b(t) = \min \left(1, \frac{P_{\text{рез}}(t)}{\rho \cdot P_{\text{нік}}(t)} \right), \quad (2)$$

де $P_{\text{рез}}$ – доступний резерв потужності; $P_{\text{нік}}$ – пікове навантаження; ρ – нормативний коефіцієнт резерву. У такому вигляді модель враховує зменшення темпу переходу в умовах зниження резерву або зростання навантаження [1].

Для розширення моделі врахуємо додатково узгоджене зниження частки традиційної генерації:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -\mu \cdot k \cdot C(t) \cdot R(t) \cdot S_b(t), \quad (3)$$

де $C(t)$ – частка традиційних джерел енергії; μ – коефіцієнт узгодженого виведення традиційних джерел.

Рівняння (3) є простим розширенням моделі і дозволяє описувати не лише зростання ВДЕ, а й узгоджене в часі заміщення традиційних джерел енергії, враховуючи обмеження за рівнем енергобезпеки системи. Такий підхід дає змогу описувати процес енергопереходу більш гнучко, ніж у випадку пропорційного зменшення $C(t)$.

Висновки

Розширено математичну модель енергетичного переходу до ВДЕ, яка поєднує логістичне зростання частки відновлюваних джерел із динамічним фактором енергобезпеки. Модель доповнено рівнянням узгодженого зниження частки традиційної генерації, що дозволяє формалізувати процес заміщення джерел енергії в енергобалансі. Такий підхід може бути використаний для порівняння сценаріїв енергопереходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhukov O., Boiko S., Koval A., Kotov O., Vyshnevs'kyi S. Development of a logistic model for energy transition to renewable energy sources with energy security consideration. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. Vol. 5, No. 1(85). P. 54–60.
2. Мокін Б.І., Шалагай Д.О., Мазурук О.В. Синтез наближених до реалій воєнного сьогодення математичних моделей процесу відновлення та розвитку джерел відновлювальної енергетики України [Електронний ресурс] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2024. – № 1(172). – С. 17-24. – DOI: 10.31649/1997-9266-2024-172-1-17-24.
3. Plazas-Niño, F. A., Ortiz-Pimiento, N. R., & Montes-Páez, E. G. (2022). National energy system optimization modelling for decarbonization pathways analysis: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112406>
4. Castro, J. F. C., Marques, D. C., Tavares, L., et al. (2022). Energy and Demand Forecasting Based on Logistic Growth Method for Electric Vehicle Fast Charging Station Planning with PV Solar System. *Energies*, 15(17), 6106. <https://doi.org/10.3390/en15176106>.

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: alex4444_2004@ukr.net.

Бойко Сергій Миколайович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національний університет «Запорізька політехніка», ел. пошта: boikosn2017@gmail.com

Луника Дмитро Андрійович – студент групи ЕМСА-22б, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: dimalunika12@gmail.com

Zhukov Oleksii A. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alex4444_2004@ukr.net

Boiko Serhii M. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Transport Technologies, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», e-mail: boikosn2017@gmail.com

Lunya Dmytro A. – student of group EMSA-22b, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: dimalunika12@gmail.com