

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

В. Ю. Рамш, кандидат технічних наук, доцент

М. В. Потапенко, кандидат технічних наук, доцент

В. Л. Шаршонь, асистент

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і
природокористування України "Бережанський агротехнічний інститут"*

E-mail: m.potapenko19@gmail.com

Анотація. Гібридні енергосистеми поєднують декілька енергетичних джерел: сонячні батареї, вітряні електроустановки, міні-ГЕС, джерела на органічному паливі (дизель-генератори) тощо. Ці джерела енергії доповнюють одне одного з метою забезпечення безперебійного електропостачання споживачів незалежно від погодних умов та пори року.

У міру безперервно зростаючого ускладнення гібридних систем стає актуальною взаємодія між логічними компонентами і безперервними фізичними процесами, що описуються конкретним видом математичних моделей.

Тому важливим завданням є прогнозування залишкового ресурсу гібридних систем з відновлювальними джерелами енергії на стадії їх експлуатації. Цю проблему доводиться вирішувати, наприклад, при заміні обладнання, яке відпрацювало призначений ресурс, а також у випадку продовження термінів його експлуатації.

Метою дослідження є розробка математичної моделі та інструментарію для оцінки залишкового ресурсу гібридних систем з відновлювальними джерелами енергії.

Контроль технічного стану систем полягає в оцінці змін діагностичних параметрів.

Вибір та обґрунтування функції, що описує процес зміни параметра, є важливим моментом при розробці методів прогнозування. Від вибору апроксимуючої функції в кінцевому випадку залежать похибка та трудомісткість прогнозування.

Отримані співвідношення для моделі зношування гібридної системи з відновлювальними джерелами енергії, що ґрунтуються на припущенні про авто модельність даного процесу. У загальному випадку процес зміни параметрів системи може мати ділянки, як сповільнення, так і прискорення зношування.

Запропоновано математичну модель прогнозування залишкового ресурсу гібридної системи з відновлювальними джерелами енергії за результатами спостережень за її станом у процесі експлуатації.

Цей метод дозволяє організувати профілактичне обслуговування та ремонт системи з урахуванням її поточного технічного стану, що дасть можливість знизити експлуатаційні витрати.

Ключові слова: прогнозування, гібридна енергосистема, діагностичний параметр, зношування, залишковий ресурс

Актуальність. Ефективний спосіб переходу від традиційної енергосистеми до енергобалансу з високою часткою відновлюваних джерел енергії – гібридні системи генерації, які ґрунтуються на використанні переваг традиційних та альтернативних джерел енергії.

Виробництво енергії з відновлювальних джерел залежить від пори року та погодних умов, що зумовлює проблеми зі стабільністю енергозабезпечення. Впроваджено значну кількість розробок, які дозволяють забезпечувати стійке енергопостачання об'єктів за допомогою гібридних енергетичних систем на основі відновлювальних джерел енергії. Гібридні енергосистеми поєднують декілька енергетичних джерел: сонячні батареї, вітряні електроустановки, міні-ГЕС, джерела на органічному паливі (дизель-генератори) тощо [1]. Ці джерела енергії доповнюють одне одного з метою забезпечення безперебійного електропостачання споживачів незалежно від погодних умов та пори року.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У міру безперервно зростаючого ускладнення гібридних систем стає актуальною взаємодія між логічними компонентами і безперервними фізичними процесами, що описуються конкретним видом математичних моделей.

Тому важливим завданням є прогнозування залишкового ресурсу гібридних систем з відновлювальними джерелами енергії на стадії їх експлуатації. На реальний процес зміни параметрів технічного стану впливає значна кількість технологічних та експлуатаційних факторів.

Вибір та обґрунтування функції, що описує процес зміни параметра, є важливим моментом при розробці методів прогнозування [2]. Від вибору апроксимуючої функції в кінцевому випадку залежать похибка та трудомісткість прогнозування.

Мета дослідження – розробка математичної моделі та інструментарію для оцінки залишкового ресурсу гібридних систем з відновлювальними джерелами енергії.

Матеріали і методи дослідження. Особливе місце в теорії надійності займає прогнозування ресурсу об'єктів на стадії експлуатації. На відміну від стадії проектування, коли прогнозу підлягає ресурс генеральної сукупності об'єктів, прогнозування ресурсу на стадії експлуатації виконується для конкретних об'єктів. Визначенню підлягає залишковий ресурс, значення якого є можливою тривалістю експлуатації об'єкта з даного моменту часу до досягнення параметром технічного стану його граничного значення [3]. Цю проблему доводиться вирішувати, наприклад, при заміні обладнання, що відпрацювало призначений ресурс, а також у випадку продовження його термінів експлуатації понад гарантійні.

Результати досліджень та їх обговорення. Контроль технічного стану систем полягає в оцінці змін діагностичних параметрів [4].

Розглянемо модель прогнозування, в якій використовується єдиний діагностичний параметр.

Позначимо через P значення параметра, що відповідає напрацюванню t . У загальному випадку функція P є випадковою, а її реалізація для конкретної системи залежить від ряду випадкових факторів як технологічних, так і експлуатаційних. Таким чином:

$$P(t) = P(t, q), \quad (1)$$

де q – вектор значень випадкових факторів.

Вважаючи, що параметр P повністю характеризує рівень зношування, складемо рівняння, яке описує зміну параметра P в часі.

Приймемо, що збільшення функції $P(t)$ на малому інтервалі часу $[t, t + dt]$ залежить лише від значення $P(t)$ на початку інтервалу та навантажень, що діють на даному відрізку. Тоді:

$$\frac{dP}{dt} = f(P, q). \quad (2)$$

Для того, щоб рівняння (2) описувало процес накопичення явищ зношення, функція $f(P, q)$ повинна бути невід'ємною. Крім того, на функцію f слід накласти обмеження, за яких розв'язок рівняння (2) існує і є єдиним.

Якщо для процесу зношування виконується властивість автотодельності, рівняння (2) можна конкретизувати [5]. З математичної точки зору, автотодель процесу накопичення пошкоджень (зношування) означає, що права частина рівняння (2) може бути представлена у вигляді добутку двох множників, один з яких залежить тільки від P , а інший тільки від q , тобто:

$$\frac{dP}{dt} = f_1(P) \cdot f_2(q). \quad (3)$$

У загальному випадку $q = q(t)$, тобто q є вектор-функцією. Розв'язок рівняння (3) знаходиться шляхом розділення змінних.

Умови, що накладаються на функції $f_1(P)$ і $f_2(q)$, зводяться до вимог існування інтегралів у лівій та правій частинах співвідношення:

$$\int_0^P \frac{dP}{f_1(P)} = \int_0^t f_2[q(\tau)] d\tau, \quad (4)$$

причому ліва частина має бути нормована до одиниці [6]:

$$\int_0^1 \frac{dP}{f_1(P)} = 1. \quad (5)$$

Якщо інтеграл (5) відрізняється від одиниці, необхідно виконати перенормування функцій $f_1(P)$ та $f_2(q)$ правої частини рівняння (3).

Проаналізуємо рівняння (2) за умови, що його права частина не залежить від параметра P . При заданому процесі навантаження $q(t)$ права частина такого рівняння – функція часу. Розв'язок рівняння з початковою умовою $P(0) = 0$ має вигляд:

$$P(t) = \int_0^t f[q(\tau)] d\tau. \quad (6)$$

Час T до досягнення граничного стану визначимо з умови $P(T) = 1$.

Ввівши позначення $T_B(q) = \frac{1}{f(q)}$, прийдемо до такого рівняння для визначення T :

$$\int_0^P \frac{d\tau}{T_B[q(\tau)]} = 1. \quad (7)$$

Якщо $q = \text{const}$, то $T = T_B(q)$. Це означає, що величина $T_B(q)$ рівна ресурсу при стаціонарному режимі експлуатації із заданим значенням вектор q .

Уведене поняття дозволяє конкретизувати рівняння (3). Припустимо, що залежність $P = P(t, q)$ при $q = \text{const}$, введенням безрозмірної змінної $z = t/T_B(q)$ можна привести до вигляду:

$$P_B = \varphi[t/T_B(q)]. \quad (8)$$

Функція $\varphi[z]$ має задовольняти умовам $\varphi[0] = 0$, $\varphi[1] = 1$. Крім того, при всіх розглянутих значеннях z функція $\varphi[z]$ має бути монотонною. Прийняте припущення гарантує існування зворотної функції $\varphi^{-1}[P_B]$.

Продиференціювавши співвідношення (8) по t та використавши зворотною функцією $\varphi^{-1}[P_B]$, отримаємо:

$$\frac{dP_B}{dt} = \frac{\varphi'[\varphi^{-1}(P_B)]}{T_B(q)}. \quad (9)$$

Співвідношення (9) отримано при умови $q = \text{const}$. Але оскільки воно зв'язує збільшення параметра P з його значенням та рівнем навантаження в аналізованій момент часу, то можна припустити, що це співвідношення є справедливим і в загальному випадку, коли $q = q(t)$. В результаті приходимо до рівняння:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{f_1(P)}{T_B(q)}, \quad (10)$$

де $f_1(P) = \varphi'[\varphi^{-1}(P)]$.

Розділивши в рівнянні (10) змінні та інтегруючи по t при початковій умові $P(0) = 0$, отримаємо:

$$\int_0^T \frac{dP}{f_1(P)} = \int_0^t \frac{d\tau}{T_B[q(\tau)]}. \quad (11)$$

Позначимо праву частину рівняння як:

$$P^*(t) = \int_0^t \frac{d\tau}{T_2[q(\tau)]}. \quad (12)$$

Відомо, що $q(t)$ є випадковою вектор-функцією, тому $P^*(t)$ – випадкова функція. Величина $P^*(t)$ характеризує зношування системи при напрацюванні t в умовах деякої реалізації $q(t)$.

Ліва частина співвідношення (12) задовольняє тотожності:

$$\int_0^P \frac{dP}{\varphi'[\varphi^{-1}(P)]} = \varphi^{-1}(P). \quad (13)$$

Із співвідношення (11) з урахуванням виразів (12) і (13) остаточно одержимо:

$$P(t) = \varphi[P^*(t)]. \quad (14)$$

Формула (14) є основним співвідношенням для моделі зношування гібридної системи з відновлювальними джерелами енергії, яка ґрунтується на припущенні про автономність даного процесу. Ця формула має важливе практичне значення, оскільки дозволяє цілеспрямовано формувати співвідношення, що зв'язують значення діагностичного параметра зі ступенями зношування.

Для апроксимації $\varphi[z]$ пропонується використовувати степеневу функцію. В цьому випадку вираз (4) представимо у вигляді:

$$P(t) = \varphi[P^*(t)] = \left(\int_0^t \frac{d\tau}{T_B[q(\tau)]} \right)^\gamma = \left(\frac{t}{T_B[q(t)]} \right)^\gamma, \quad (15)$$

де γ – додатній показник степені.

При $\gamma < 1$ дана формула описує процес зношування, який сповільнюється, а при $\gamma > 1$ – процес, що прискорюється.

Зафіксуємо значення $T_B[q(\tau)]$, прийнявши його рівним середньому значенню T_B . При зроблених припущеннях формула (15) набуде вигляду:

$$P(t) = \left(\frac{t}{T_B} \right)^\gamma. \quad (16)$$

Вважаючи, що $T = T_B = t + t_{\text{зал}}$, то після відповідних перетворень одержимо:

$$t_{\text{зал}} = t \left[\left(\frac{1}{P(t)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right]. \quad (17)$$

За виразом (17) можна прогнозувати залишковий ресурс системи $t_{\text{зал}}$ при відомому значенні діагностичного параметра P .

У загальному випадку процес зміни параметрів системи може мати ділянки, як сповільнення, так і прискорення зношування.

Для опису таких процесів необхідно удосконалити модель, яка описується виразом (17), замінивши постійний показник α деякою функцією, що залежить від поточного напрацювання t і режиму експлуатації q .

Для підвищення достовірності результатів прогнозування необхідно використовувати не один, а декілька діагностичних параметрів. Часто параметри, що використовуються при діагностуванні з достатньою точністю можна вважати незалежними. У цьому випадку визначення залишкового ресурсу всієї системи проводиться так. Спочатку визначається залишковий ресурс за кожним з параметрів, тобто знаходяться значення t_1, t_2, \dots, t_m . Далі обчислюється величина $t = \min\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$. Величина t приймається в якості прогнозованого залишкового ресурсу гібридної системи з відновлювальними джерелами енергії.

Висновки і перспективи. Оцінка залишкового ресурсу надійності складних технічних систем є важливим практичним завданням. Запропоновано математичну модель прогнозування залишкового ресурсу гібридної системи з відновлювальними джерелами енергії за результатами спостережень за її станом у процесі експлуатації.

Цей метод дозволяє організувати профілактичне обслуговування та ремонт системи з урахуванням її поточного технічного стану, що дасть можливість знизити експлуатаційні витрати.

Список використаних джерел

1. Кузнєцов М. П. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія. К.: ІВЕ, 2022. 142 с.
2. Єріна А. Статистичне моделювання і прогнозування. К.: КНЕУ, 2001. 215 с.
3. Берідзе Т.М., Сінчук І.О., Федотов В.О., Барановська М.Л., Пересунько І.І. Прогнозування терміну служби електрообладнання. Warsaw: iScience Sp. z.o.o, 2023. 254 с.
4. Абрамович О.О., Грібов В.М., Грищенко Ю.В., Ситнянських Л.М. Надійність і діагностика технічних систем. Навчально-методичний посібник. К.: НАУ, 2003. 121 с.
5. Szirtes T., Rozsa P. *Applied dimensional analysis and modeling*. Butterworth-Heinemann, 2007. 820 p.
6. Васілевський О. М., Ігнатенко О. Г. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2013. 160 с.

References

1. Kuznietsov, M. P. (2022). *Osoblyvosti kombinovanykh enerhosystem z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii: monohrafiia* [Features of combined energy systems with renewable energy sources: monograph]. Kyiv: IVE, 142.
2. Yerina, A. (2001). *Statystychne modeliuвання i prohnozuvannya* [Statistical modeling and forecasting]. Kyiv: KNEU, 215.

3. Beridze, T.M., Sinchuk, I.O., Fedotov, V.O., Baranovska, M.L., Peresunko, I.I. (2023). Prohnozuvannia terminu sluzhby elektroobladnannia. [Forecasting the service life of electrical equipment]. Warsaw: iScience Sp. z.o.o, 254.

4. Abramovych, O.O., Hribov, V.M., Hryshchenko, Yu.V., Sytnianskykh, L.M. (2003). Nadiinist i diahnostyka tekhnichnykh system. [Reliability and diagnostics of technical systems]. Kyiv: NAU, 121.

5. Szirtes, T., Rozsa, P. (2007). *Applied dimensional analysis and modeling*. Butterworth-Heinemann, 820.

6. Vasilevskyi, O. M., Ihnatenko, O. H. (2013). Normuvannia pokaznykiv nadiinosti tekhnichnykh zasobiv: navchalnyi posibnyk [Standardization of reliability indicators of technical means: study guide]. Vinnytsia: VNTU, 160.

FORECASTING THE REMAINING RESOURCE OF HYBRID SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

V. Ramsh, M. Potapenko, V. Sharshon

Abstract. *Hybrid energy systems combine several energy sources: solar panels, wind turbines, mini-hydropower plants, fossil fuel sources (diesel generators). These energy sources complement each other in order to ensure uninterrupted power supply to consumers regardless of weather conditions and time of year.*

With the continuously increasing complexity of hybrid systems, the interaction between logical components and continuous physical processes described by a particular kind of mathematical models becomes relevant.

It is therefore an important task to predict the remaining lifetime of hybrid renewable energy systems during their operational phase. This problem has to be solved, for example, when replacing equipment that has reached its end of life and when extending its service life.

The aim of the research is to develop a mathematical model and tools for residual life assessment of hybrid systems with renewable energy sources.

Controlling the technical condition of systems involves assessing changes in diagnostic parameters.

The choice and justification of the function describing the process of parameter change is an important point in the development of forecasting methods. The choice of the approximating function ultimately determines the error and labour intensity of forecasting.

The relations for the wear model of the hybrid system with renewable energy sources based on the assumption of the automodel of this process are obtained. In the general case, the process of changing the system parameters can have areas of both deceleration and acceleration of wear.

A mathematical model for predicting the residual life of a hybrid system with renewable energy sources based on the results of observations of its condition during operation is proposed.

This method allows to organise preventive maintenance and repair of the system taking into account its current technical condition, which will reduce operating costs.

Key words: *forecasting, hybrid power system, diagnostic parameter, wear, residual life*