

# ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСЦЕВИХ СПОЖИВАЧІВ ПОТУЖНОЇ ВІТРЯНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

**Матеєнко Ю.П., к.т.н., доцент, Шевченко І.С., магістрант**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії*

**Вступ.** В умовах постійного зростання дефіциту та підвищення вартості енергоресурсів використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним з напрямків забезпечення екологічної та енергетичної безпеки України. Функціонування їх в електроенергетичних системах (ЕЕС), за певних умов, може забезпечити суттєву економію енергоресурсів. Економія досягається в результаті використання відновлюваних джерел первинної енергії та децентралізації вироблення електроенергії і, як наслідок, зменшення витрат на її транспортування та розподіл. В останні десятиліття у світі спостерігається стійке зацікавлення проблемами використання ВДЕ, особливо у контексті їх роботи в електричних мережах (ЕМ) енергосистем.

Питання дослідження надійності електричних мереж з ВДЕ є основним. Часті аварії в електроенергетичній системі призводять до значного недовідпуску електроенергії. Зважаючи на це, оцінка надійності елементів енергосистеми та пошук можливих шляхів підвищення надійності під час експлуатації і при проектуванні нових об'єктів стає першочерговим завданням. Провівши оцінку збитків, що завдаються споживачам перервою електропостачання, збитків, які завдаються аварійними ремонтами, витрат, пов'язаних із заходами по підвищенню надійності, можна говорити про оптимальний рівень надійності елементів електроенергетичної системи [1].

**Мета роботи.** Моделювання математичної моделі надійності та визначення показників надійності системи електропостачання місцевих електроспоживачів потужної вітряної електростанції.

**Матеріали і результати досліджень.** Електричні станції, підстанції, лінії електропередача, системи електропостачання – є елементами електроенергетичної системи. Електроенергетична система відноситься систем штучного типу, оскільки відповідає наступним ознакам:

- цілеспрямованість функціонування при змінних умовах;
- взаємодія елементів, включаючи і людину, для досягнення необхідної мети;
- велика кількість змінних параметрів, які визначають характер і результат функціонування системи;
- управління функціонуванням і розвитком системи в умовах неоднозначності поведінки самої системи та її оточення;
- розвиток в часі цілей, можливостей системи та організації управління нею;
- наявність багатьох критеріїв для оцінки рішень щодо управління функціонуванням і розвитком системи.

Із сказаного вище випливає, що для вивчення великих систем потрібен особливий системний підхід. Системний підхід полягає в комплексному

багатосторонньому розгляданні об'єкту дослідження з врахуванням множини його властивостей і невизначеності наявної інформації. Одним із основних способів підвищення надійності систем електропостачання є резервування, тобто введення надлишкової кількості елементів. Тому використання ВЕС є одним із способів підвищення надійності системи електропостачання [2].

Під час аналізу надійності складної системи особливі труднощі виникають при визначенні ймовірності знаходження системи в різних станах. Кількість станів різко зростає при врахуванні станів передчасних відмикань елементів для ремонту, огляду тощо. Тому для будь-якої реальної системи необхідно усунути з розгляду малоімовірні стани, що призведе до скорочення кількості станів. Отже, для будь-якої реальної системи оцінка показників надійності є проблемою, навіть, при достовірних вихідних даних [3, 4, 5].

З точки зору надійності, паралельне з'єднання відновлюємих елементів означає, що при відмові одного з елементів система продовжує виконувати свої функції, тобто передбачається автоматичне резервування кожного елемента з пропускнуою спроможністю, достатньої для повного забезпечення потужності споживача. Коли система при такому резервуванні складається з  $n$  незалежних елементів, число можливих станів системи буде дорівнює  $2^n$ , якщо вважати, що кожен елемент може бути в двох станах – робочому і неробочому. Відмова системи настає тільки тоді, коли всі елементи виявляються в неробочому стані.

Розглянемо більш детально випадок, найбільш часто зустрічаємий в електричних системах, - паралельне з'єднання двох елементів (два ланцюги лінії електропередач, двотрансформаторні підстанції і т.д.). Така система може перебувати в чотирьох станах:

- 1) система працездатна (працюють обидва елемента);
  - 2) система працездатна, але відмовив перший елемент;
  - 3) система працездатна, але відмовив другий елемент;
  - 4) система непрацездатна – обидва елементи знаходяться в стані відмови;
- Відповідні ймовірності цих станів приймаємо:  $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t)$ .

Граф переходів цієї системи має вигляд, який показаний на рис. 1.

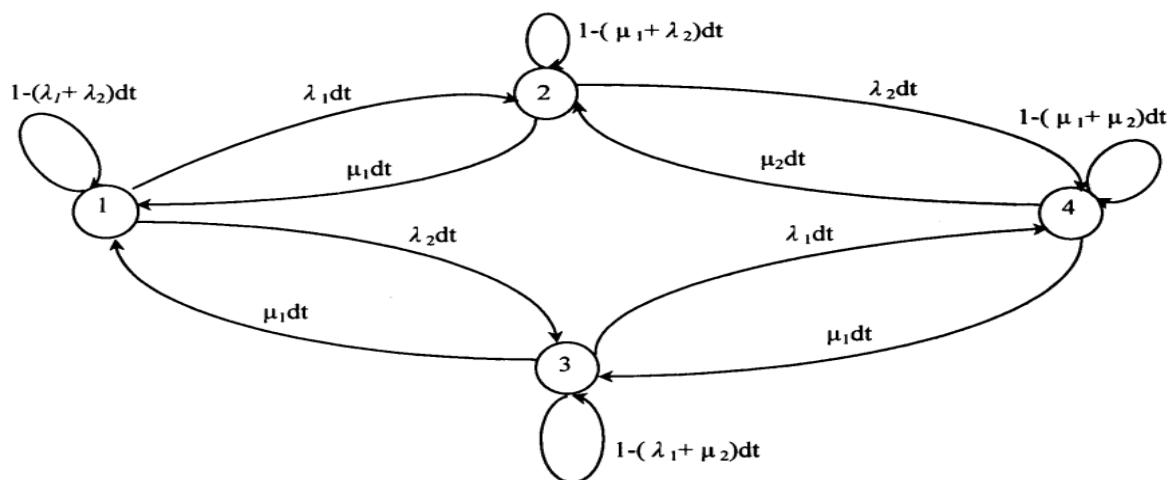


Рисунок 1 – Граф переходів схеми

На основі графа переходів складаємо систему диференціальних рівнянь, яка описує ймовірність станів у часі, має вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 &= -(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot P_1(t) + \mu_1 \cdot P_2(t) + \mu_2 \cdot P_3(t); \\ \dot{P}_2 &= -(\lambda_2 + \mu_1) \cdot P_2(t) + \lambda_1 \cdot P_1(t) + \mu_2 \cdot P_4(t); \\ \dot{P}_3 &= -(\lambda_1 + \mu_2) \cdot P_3(t) + \lambda_2 \cdot P_1(t) + \mu_1 \cdot P_4(t); \\ \dot{P}_4 &= -(\mu_1 + \mu_2) \cdot P_4(t) + \lambda_1 \cdot P_3(t) + \lambda_2 \cdot P_2(t); \end{aligned}$$

де  $P_1, P_2, P_3, P_4$  – похідні від ймовірностей станів;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – інтенсивності відмов відповідних станів;

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$  – інтенсивності відновлення працездатності.

Розв'язок рівняння запишемо так:

$$P_k(t) = \sum_{k=1}^N a_k^{(i)} \cdot e^{-p_i \cdot t},$$

де  $k = 1, 2, \dots, N$  – стани системи;

$a_k^{(i)}$  – постійні коефіцієнти;

$p_i$  – корені характеристичного рівняння.

У даному випадку ймовірності всіх станів описуються суперпозицією експонент з постійними складовими, яку можна наближено замінити однією експонентною з еквівалентним коефіцієнтом загасання, обернено пропорційним еквівалентному часові переходу їх стану відмови в працездатний стан.

За початкових умов для непрацездатної системи  $p_1(0) = 0, p_2(0) = 0, p_3(0) = 0, p_4(0) = 1$  ймовірність відмови становитиме:

$$\begin{aligned} P_4(t) &= k_{п1} \cdot k_{п2} + k_{г1} \cdot k_{г2} \cdot e^{-(\lambda_1 + \mu_1 + \lambda_{12} + \mu_2) \cdot t} - \\ &- k_{г1} \cdot k_{п2} \cdot e^{-(\lambda_1 + \mu_1) \cdot t} - k_{п1} \cdot k_{г2} \cdot e^{-(\lambda_2 + \mu_2) \cdot t} \end{aligned}$$

де  $k_{г1}, k_{г2}$  – коефіцієнт готовності першого і другого елементів;

$k_{п1}, k_{п2}$  – коефіцієнт простою першого і другого елементів.

За умови  $T_i \gg t_{вi}, \lambda_i \ll \mu_i$  одержуємо

$$\begin{aligned} P_4(t) &\approx k_{п1} \cdot k_{п2} + k_{г1} \cdot k_{г2} \cdot e^{-(\mu_1 + \mu_2) \cdot t} - k_{г1} \cdot k_{п2} \cdot e^{-(\mu_1) \cdot t} - k_{п1} \cdot k_{г2} \cdot e^{-(\mu_2) \cdot t} = \\ &= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2} + c e^{\mu_{екв}(t)} \end{aligned}$$

де  $c e^{\mu_{екв}(t)} = k_{г1} \cdot k_{г2} \cdot e^{-(\mu_1 + \mu_2) \cdot t} - k_{г1} \cdot k_{п2} \cdot e^{-(\mu_1) \cdot t} - k_{п1} \cdot k_{г2} \cdot e^{-(\mu_2) \cdot t}$   
 $c$  – постійний коефіцієнт

Звідки,

$$\mu_{екв}(t) = \left[ \frac{1}{c} \cdot (e^{-(\mu_1 + \mu_2) \cdot t} - \frac{\lambda_2}{\mu_2} \cdot e^{-(\mu_1) \cdot t} - \frac{\lambda_1}{\mu_1} \cdot e^{-(\mu_2) \cdot t}) \right]$$

Отримання інтенсивності відмов безпосередньо зі статистичних даних в загальному випадку важко, так як необхідна інформація про передісторію кожного елемента. Якщо,  $\omega(t) = \bar{\omega} = const$ , то  $\lambda(t) = \lambda = \bar{\omega}$ .

Розглядаючи резервовану систему, як один елемент, можна записати  $k_{п.с.} = \lambda_c \cdot t_{в.с.}$ , звідки параметр потоку відмов системи з двох резервуючих один одного елементів:

$$\lambda_c = \frac{k_{п.с.}}{t_{в.с.}} = \frac{\lambda_1 t_{в1} \lambda_2 t_{в2} (t_{в1} + t_{в2})}{t_{в1} + t_{в2}} = \lambda_1 k_{п1} + \lambda_2 k_{п2}$$

Показники надійності резервних систем з урахуванням ремонтних станів і передчасних відмикань:

$$k_{п.с.} = \lambda_1 t_{в1} \lambda_2 t_{в2} + \lambda_{пр1} t_{пр1} k_{пр1} \lambda_2 t_{в2} + \lambda_{пр2} t_{пр2} k_{пр2} \lambda_1 t_{в1}$$

$$\lambda_c = \lambda_1 (\lambda_2 t_{в2}) + \lambda_2 (\lambda_1 t_{в1}) + \lambda_1 (\lambda_{пр2} t_{пр2}) + \lambda_2 (\lambda_{пр1} t_{пр1})$$

Для системи з  $n$  взаєморезервованих елементів:

$$k_{п.с.} = \prod_{i=1}^n \lambda_i t_{вi} + \sum_{i=1}^n \lambda_{прi} t_{прi} k_{прi} \prod_{j=1, j \neq i}^n \lambda_j t_{вj}$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i \prod_{j=1, j \neq i}^n (\lambda_j t_{вj} + \lambda_{прj} t_{прj})$$

Час відновлення працездатності системи:

$$t_{вс} = \frac{k_{пс}}{\lambda_c}$$

*Приклад.* Оцінимо надійність системи електропостачання місцевих електроприймачів з двох джерел живлення (потужна вітрова електростанція та еквівалентна система), зображеної на рис. 2.

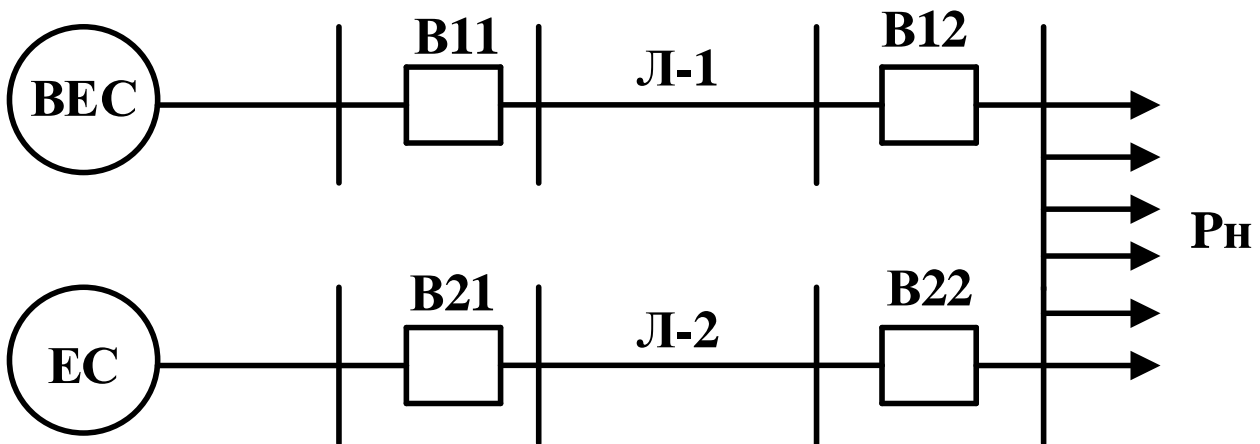


Рисунок 2 – Система електропостачання з двома джерелами живлення:  
1 – потужна вітрова електростанція; 2 – еквівалентна система.

Кожне коло даної мережі може передавати всю необхідну потужність.

Параметр потоку відмов і передчасних відмикань елементів системи електропостачання, середні часи відновлення і тривалість передчасних відмикань наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Елемент					
	B11	Л1	B12	B21	Л2	B22
$\lambda, 1/\text{км} \cdot \text{рік}$	0.099	0.023	0.048	0.137	0.019	0.137
$l, \text{км}$	-	80	-	-	30	-
$t_{\text{в}}, \text{год}$	10	30	10	15	30	15
$\lambda_{\text{пр}}, 1/\text{рік}$	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4
$t_{\text{пр}}, \text{год}$	60	50	60	80	20	80

При розрахунку вважаємо, що передчасні вимкнення послідовно з'єднаних елементів мережі суміщаються в часі.

Знаходимо параметри потоку відмов першого і другого кола, кожне з яких включає три послідовно з'єднані елементи:

$$\lambda_I = \lambda_{\text{л-1}} \cdot l_1 + \lambda_{\text{B11}} + \lambda_{\text{B12}} + \lambda_{\text{пр.в.12}} = 0.023 \cdot 80 + 0.099 + 0.048 + 0.4 =$$

$$= 2.387 \left( \frac{1}{\text{рік}} \right)$$

$$\lambda_{II} = \lambda_{\text{л-2}} \cdot l_1 + \lambda_{\text{B21}} + \lambda_{\text{B22}} + \lambda_{\text{пр.в.21}} = 0.019 \cdot 30 + 0.137 + 0.137 + 0.4 =$$

$$= 1.244 \left( \frac{1}{\text{рік}} \right)$$

Параметр потоку відмов системи:

$$\lambda_c = \lambda_I \cdot q_{II} + \lambda_{II} \cdot q_I + \lambda_I \cdot q_{\text{пр11}} \cdot \lambda_{II} \cdot q_{\text{пр1}} =$$

$$= \frac{2.387 \cdot 2.43 \cdot 10^{-3} + 1.244 \cdot 6.47 \cdot 10^{-3} + 0.844 \cdot 0.4 \cdot 60 + 1.987 \cdot 0.4 \cdot 80}{8760} =$$

$$= 23.41 \cdot 10^{-3}$$

де

$$q_I = q_{\text{в11}} + q_{\text{л1}} + q_{\text{в12}} = \lambda_{\text{в11}} \cdot t_{\text{в11}} + \lambda_{\text{л1}} \cdot t_{\text{вл1}} + \lambda_{\text{в12}} \cdot t_{\text{вв12}} =$$

$$= \frac{0.099 \cdot 10 + 1.84 \cdot 30 + 0.048 \cdot 10}{8760} = 6.47 \cdot 10^{-3};$$

$$q_{II} = q_{\text{в21}} + q_{\text{л2}} + q_{\text{в22}} = \lambda_{\text{в21}} \cdot t_{\text{в21}} + \lambda_{\text{л2}} \cdot t_{\text{вл2}} + \lambda_{\text{в22}} \cdot t_{\text{вв22}} =$$

$$= \frac{0.137 \cdot 15 + 0.57 \cdot 30 \cdot 10 + 0.137 \cdot 15}{8760} = 2.43 \cdot 10^{-3};$$

Середній час безвідмовної роботи:

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{23.41 \cdot 10^{-3}} = 42.7 \text{ (рік)}$$

При  $\alpha = 0.1$  розрахунковий час безвідмовної роботи:

$$T_{\text{ср}} = -\ln(1 - \alpha) \cdot T_c = -\ln(1 - 0.1) \cdot 42.47 = 4.48 \text{ (рік)}$$

Середні часи аварійного відновлення ланцюгів:

$$t_{\text{в1}} = \frac{q_I}{\lambda_I - \lambda_{\text{прв2}}} = \frac{6.47 \cdot 10^{-3}}{1.987} \cdot 8760 = 28.5 \text{ (год)}$$

$$t_{\text{в2}} = \frac{q_{II}}{\lambda_{II} - \lambda_{\text{прв22}}} = \frac{2.43 \cdot 10^{-3}}{0.844} \cdot 8760 = 25.2 \text{ (год)}$$

Середня ймовірність стану відмови системи:

$$q_c = q_I \cdot q_{II} + k_{np1} \cdot \lambda_{np1} \cdot t_{np1} \cdot q_{II} + k_{np2} \cdot \lambda_{np2} \cdot t_{np2} \cdot q_I = \\ = \frac{6.47 \cdot 10^{-3} \cdot 2.43 \cdot 10^{-3} + 0.9075 \cdot 0.4 \cdot 60 \cdot 2.43 \cdot 10^{-3} + \\ + 0.939 \cdot 0.4 \cdot 80 \cdot 6.47 \cdot 10^{-3}}{8760} = 49.53 \cdot 10^{-6}$$

де

$$k_{np1} = 1 - e^{-\frac{t_{пв11}}{t_{в2}}} = 1 - e^{-\frac{60}{25.2}} = 0.9075$$

$$k_{np2} = 1 - e^{-\frac{t_{пв22}}{t_{в1}}} = 1 - e^{-\frac{80}{28.5}} = 0.939$$

Середній час відновлення системи:

$$t_{в.с} = \frac{49.53 \cdot 10^{-6}}{23.41 \cdot 10^{-3}} \cdot 8760 = 16.43 \text{ (год)}$$

**Висновок:** Обґрунтовано доцільність використання Марковських процесів для дослідження надійності системи електропостачання з потужною ВЕС. Запропоновані основні вирази для оцінки надійності системи електропостачання. За одержаними показниками надійності можна оцінити техніко-економічну післядію від недовідпуску електроенергії і перерв електропостачання, а також визначити показник ефективності, який буде зростати внаслідок введення в енергетичну систему нетрадиційних відновлювальних джерел електричної енергії, що призведе до зменшення техногенного навантаження енергетики на довкілля.

#### Перелік посилань

1. Г. Півняк. Основи вітроенергетики / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циценков. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015.
2. Волков Н.Г. Надежность функционирования систем электроснабжения. Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005 – 157 с.
3. Лук'яненко Ю.В., Остапчук Ж.І., Кулик В.В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 116 с.
4. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. – Київ. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с.
5. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю.Б. Гук. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ие, 1988. – 244 с.