

УДК 621.311.1.018.3

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; В. М. Лагутін, к. т. н., доц., В. О. Комар, к. т. н., доц.**КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ КРИТЕРІАЛЬНОЇ МОДЕЛІ**

У статті запропоновано методику визначення критерію якості функціонування розподільних електричних мереж. Показано залежність якості функціонування від зміни показників надійності та якості електроенергії на прикладі двоколової системи електропостачання.

***Ключові слова:** розподільні мережі, якість функціонування, надійність електропостачання, якість електроенергії, марковські процеси, критеріальне моделювання.*

Вступ

Сучасне виробництво з його складними технологічними комплексами, з широким застосуванням засобів автоматичного керування й контролю процесами не можливе без чіткої роботи всіх технічних засобів. Це вимагає дотримання особливо жорстких вимог до їх надійності. Однак очевидно, що створювати високонадійні технічні агрегати немає сенсу, якщо не забезпечується відповідна надійність їх електропостачання з відповідними показниками якості електроенергії. Побудова нових розподільних мереж та модернізація існуючих потребує оцінки їх якості.

Як зазначається в [1], загальними вимогами до критерію якості функціонування складної системи, до яких належать і розподільні електричні мережі, є: відображення об'єктивної реальності; оцінка ефективності, якості та оптимальності; можливість фізичного та абстрактного тлумачення; можливість обчислення, хоча б з використанням ЕОМ; нормування й відображення "крайніх" станів системи з урахуванням потенційно та реально можливих; критерій повинен бути до певної міри узагальнюючим (характеризувати окремі підсистеми і системи в цілому в усіх життєвих циклах); критерій повинен легко розкладатись на часткові показники та об'єднуватись в узагальнені; критерій повинен мати теоретичну основу й дозволяти розробляти нову теорію або розвивати стару; критерій володіти евристичністю, дозволяти приймати рішення на підставі досвіду та інтуїції тощо. Для розподільної мережі якість функціонування визначається сукупністю властивостей системи, які зумовлюють її придатність задовольняти графік навантаження певного споживача з відповідними до [2] показниками якості електричної енергії [3].

Останнім часом активізувався процес переходу на електроопалення [4], що вимагає реконструкції розподільних електричних мереж. В умовах обмеженого фінансування для можливості проведення об'єктивного й повного порівняння можливих варіантів виконання систем електропостачання необхідно при їх оцінці враховувати показники, які визначають якість електропостачання споживачів. До них відносять: надійність системи електропостачання, яка визначається такими показниками, як: безперебійність, живучість, безвідмовність елементів схеми, ремонтпридатність, довговічність, конфігурація схеми; якість електроенергії, яка характеризується показниками якості частоти та напруги.

Отже, є актуальним моделювання якості функціонування з метою кількісної оцінки функціональної готовності системи електропостачання.

Метою цієї статті є аналіз залежності критерію якості функціонування, оціненого за критеріальною моделлю, від зміни показників надійності та якості електроенергії.

Критеріальна модель якості функціонування розподільної електричної мережі

У [5] запропоновано критеріальну модель, отриману під час поєднання теорії марковських процесів та критеріального методу. Загальний вигляд критеріальної моделі такий:

$$E = \sum_{i=1}^m P_i \prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ji}}, \quad (1)$$

де P_i – критерій подібності, який у цьому випадку є ймовірністю перебування системи в стані i (складова, яка враховує надійність системи); $\prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ji}}$ – показник ефективності стану i (складова, яка враховує якість електроенергії); x_{*j} – незалежні параметри, що характеризують основні властивості системи (імовірності відповідності показників якості електроенергії нормативним документам).

Для оцінки якості функціонування розподільної електричної мережі критеріальна модель матиме такий вид:

$$E = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \frac{1}{P_i [A_{min} \leq A \leq A_{max}]^{v_{ii}}} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_j [A_{min} \leq A \leq A_{max}]^{v_{ji}} - \sum_{i=n+1}^m P_i \prod_{j=1}^n P_j [A_{min} \leq A \leq A_{max}]^{v_{ji}}, \quad (2)$$

де m – загальна кількість можливих станів розподільної електричної мережі, $m=n+k$; n – кількість робочих станів; k – кількість неробочих станів; $P_j [A_{min} \leq A \leq A_{max}]$ – імовірність того, що показник якості електричної енергії A в допустимих межах при тому, що система перебуває в стані j ; A – значення показника якості електричної енергії; v^{ji} – елементи матриці переходів, які є алгебраїчними сумами інтенсивностей відмов λ та інтенсивностей відновлень μ .

Під час практичних розрахунків якості функціонування E суттєвим є вирішення питання щодо тих показників якості електричної енергії, які повинні й можуть бути враховані у (2).

На частоту в системі окремих споживач вплинути не може, тому показники якості частоти можна виключити з розгляду.

Імовірність відхилення напруги визначається режимами роботи споживачів, які мають імовірнісний характер. Тому врахування цього показника під час визначення якості функціонування розподільної електричної мережі є обов'язковим.

Для визначення імовірності відповідності відхилень напруги ГОСТ $P_j [V_{min} \leq V \leq V_{max}]$ необхідно побудувати залежність $V_{II}(t)$ [6]. Графік зміни відхилень напруги можна побудувати за таким співвідношенням:

$$V_{II} = \frac{U_{*II} U_{\delta} - U_n}{U_n},$$

де U_n – номінальна напруга мережі, яка розглядається; U_{δ} – базове значення напруги; U_{*II} – відносне значення напруги пункту споживання, визначене за кривою $U_{*II} = f(S)$.

Оскільки повний опір лінії z_n і відношення активного та реактивного опорів лінії r_n/x_n різні для кожного з станів системи $i = 0, 1, 2$, то для кожного з них повинен бути побудований графік $V_{II}(t)$ (рис. 1). На цьому ж рисунку зображується область допустимих значень відхилення напруги в місці приєднання навантаження (заштрихована смуга). Ділянки кривих $V_{II}(t)$, які знаходяться в межах допустимих відхилень, є ділянками ефективними, з огляду на забезпечення режиму напруги. Тоді

$$P[V_{min} \leq V \leq V_{max}] = \frac{T_e}{T}, \quad (3)$$

де T_e – проміжок часу, протягом якого дотримується умова $V_{min} \leq V \leq V_{max}$; T – число годин роботи системи електропостачання протягом року.

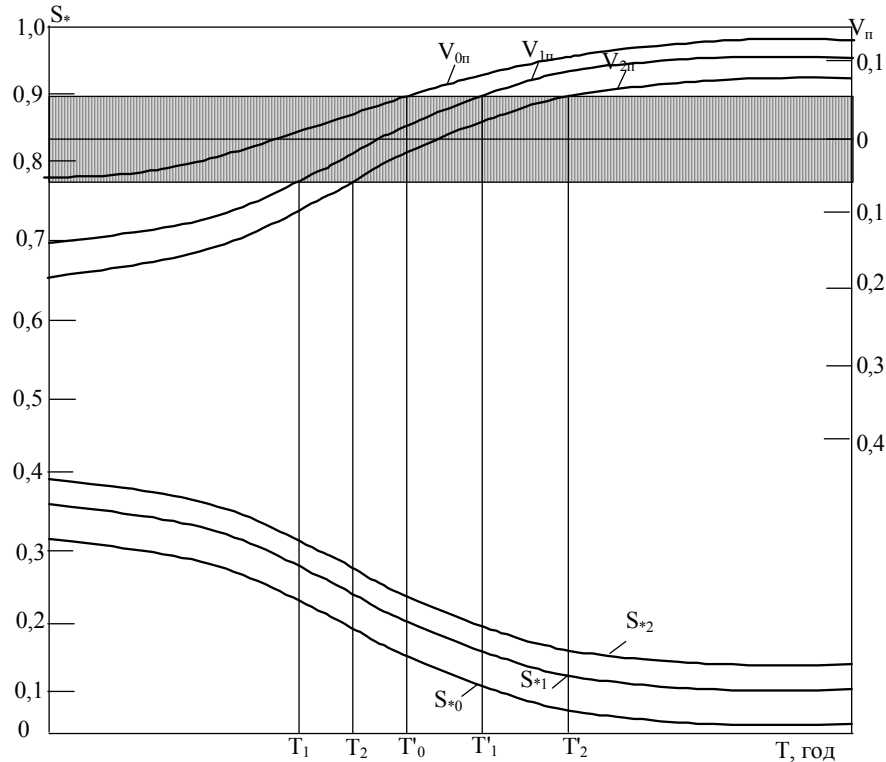


Рис. 1. Залежність відхилень напруги в часі від графіка навантаження

Оцінка якості розподільної електричної мережі

Проілюструємо кількісну оцінку якості функціонування мережі на прикладі схеми, наведеної на рис. 2. Оцінку якості цієї системи будемо проводити з урахуванням відхилення напруги у вузлі живлення.

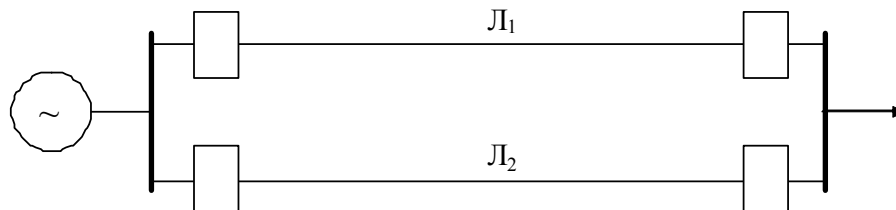


Рис. 2. Розподільна електрична мережа

Для цієї схеми граф зміни станів матиме вигляд, наведений на рис. 3. Пояснення станів такі:

- стан 1 – обидві лінії працюють;
- стан 2 – лінія L_1 відмовила, L_2 працює;
- стан 3 – лінія L_2 відмовила, L_1 працює;
- стан 4 – обидві лінії відмовили.

Під час побудови графу прийнято допущення щодо ідеальної надійності автоматики та Наукові праці ВНТУ, 2008, № 4

релейного захисту застосованого в цій системі.

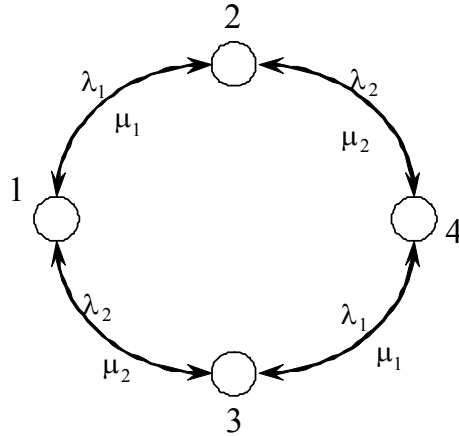


Рис. 3. Граф станів системи

За графом (рис. 3) складається система рівнянь (4), яка в загальному має такий вигляд:

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{b},$$

$$\text{де } \mathbf{v} = \begin{vmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \mu_1 & \mu_2 & 0 \\ \lambda_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 & \mu_1 \\ \lambda_2 & 0 & -(\mu_2 + \lambda_1) & \mu_2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{p} = \begin{vmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

$$\begin{cases} v_{11}P_1 + v_{12}P_2 + v_{13}P_3 = 0, \\ v_{21}P_1 + v_{22}P_2 + v_{24}P_4 = 0, \\ v_{31}P_1 + v_{33}P_3 + v_{34}P_4 = 0, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язавши систему рівнянь (4) відносно P_i , можна визначити ймовірності перебування системи у відповідних станах.

Для розглянутої розподільної мережі критеріальна модель матиме вигляд

$$\begin{aligned} E = & P_1 \cdot \frac{1}{P_1[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{11}}} P_2[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{21}} P_3[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{31}} + \\ & + P_2 \cdot P_1[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{12}} \frac{1}{P_2[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{22}}} P_3[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{32}} + \\ & + P_3 \cdot P_1[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{13}} P_2[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{23}} \frac{1}{P_3[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{33}}} - \\ & - P_4 \cdot P_1[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{14}} P_2[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{24}} P_3[V_{min} \leq V \leq V_{max}]^{v_{34}}. \end{aligned} \quad (5)$$

З урахуванням (3), перепишемо (5)

$$\begin{aligned} E = & P_1 \cdot \left(\frac{T}{T_1'}\right)^{v_{11}} \left(\frac{T_2' - T_2}{T}\right)^{v_{21}} \left(\frac{T_3' - T_3}{T}\right)^{v_{31}} + P_2 \cdot \left(\frac{T_1'}{T}\right)^{v_{12}} \left(\frac{T}{T_2' - T_2}\right)^{v_{22}} \left(\frac{T_3' - T_3}{T}\right)^{v_{32}} + \\ & + P_3 \cdot \left(\frac{T_1'}{T}\right)^{v_{13}} \left(\frac{T_2' - T_2}{T}\right)^{v_{23}} \left(\frac{T}{T_3' - T_3}\right)^{v_{33}} - P_4 \cdot \left(\frac{T_1'}{T}\right)^{v_{14}} \left(\frac{T_2' - T_2}{T}\right)^{v_{24}} \left(\frac{T_3' - T_3}{T}\right)^{v_{34}}. \end{aligned}$$

Необхідно зазначити, що під час розв'язання практичних задач необхідно наносити не одну, а дві області допустимих значень відхилення напруги: одну для стану $i = 1$ й іншу для стану $i \neq 1$, при цьому друга область буде більша за першу, оскільки чинне нормативне положення допускає збільшення меж відхилення напруги в післяаварійних режимах.

Вихідні дані для розрахунку якості функціонування наведені в таблиці 1. Дані наведені для трьох ситуацій: розподільна мережа тільки введена в експлуатацію; проведено реконструкцію мережі; мережа потребує повної заміни.

Таблиця 1

Вихідні дані

	Параметри надійності	Кабельна лінія Л1	Кабельна лінія Л2
1. Обидві лінії на початку експлуатації	λ (1/рік)	0,0122	0,0122
	μ (1/рік)	292	292
2. Перша лінія після певного терміну експлуатації	λ (1/рік)	10	0,0122
	μ (1/рік)	292	292
3. Лінії потребують повної заміни	λ (1/рік)	100	100
	μ (1/рік)	100	100

Результати розрахунків з урахуванням зміни ймовірності відхилення напруги в стані 1 наведені на рисунку 4. Проаналізувавши його, можна зробити висновок, що при надійній системі зміна якості електроенергії практично не впливає на якість функціонування (випадок 1). Аналогічний висновок можна зробити і при ненадійній системі (випадок 3). Для проміжного варіанта за надійністю (варіант 2) якість функціонування системи електропостачання визначається не лише надійністю, але й якістю електроенергії.

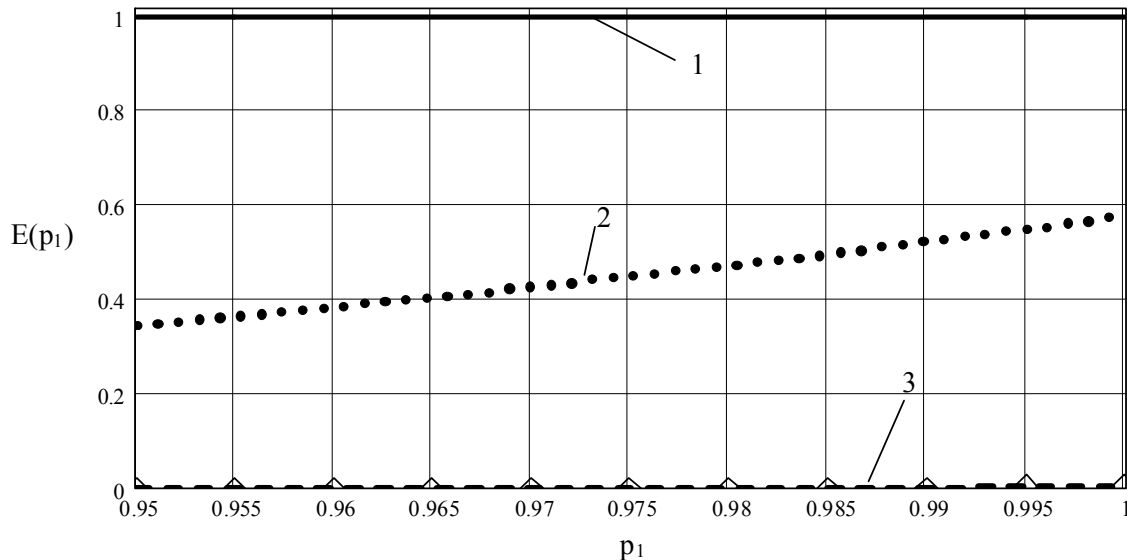


Рис. 4. Залежність показника якості функціонування від якості електроенергії

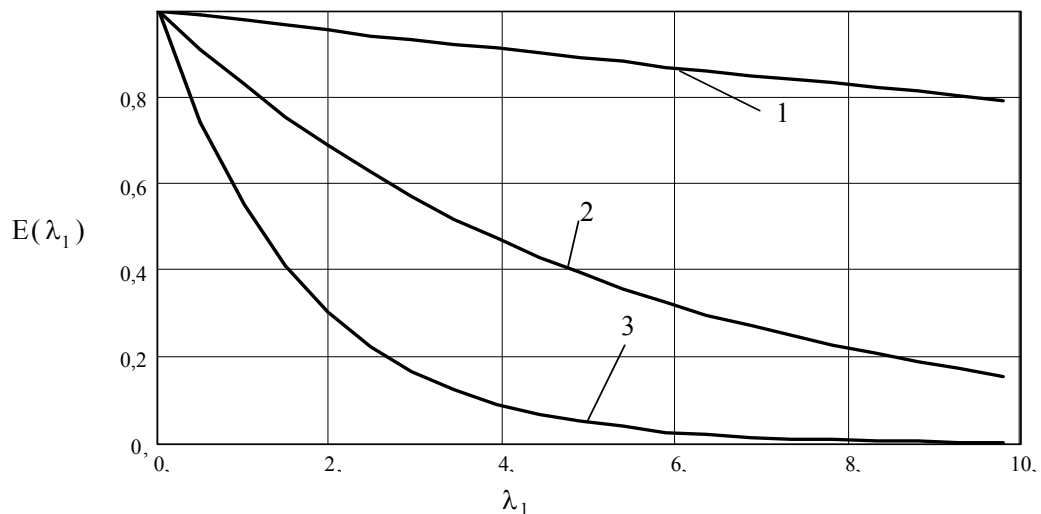


Рис. 5. Залежність показника якості функціонування від зміни інтенсивності відмов лінії Л1

За результатами розрахунку, наведеними на рисунку 5, можна зробити висновки щодо зміни якості функціонування в залежності від зміни інтенсивності відмов λ_1 кабельної лінії Л1. При цьому розглянуто три випадки, які відрізняються якістю електроенергії:

1 – імовірність відповідності відхилення напруги ГОСТ в стані 1, 2 та 3 відповідно 1; 0,98; 0,98;

2 – імовірність відповідності відхилення напруги ГОСТ в стані 1, 2 та 3 відповідно 0,98; 0,97; 0,97;

3 – імовірність відповідності відхилення напруги ГОСТ в стані 1, 2 та 3 відповідно 0,98; 0,95; 0,95.

Висновки

Отримана критеріальна модель дозволяє кількісно оцінити якість функціонування розподільної електричної мережі. Оцінка виконується по відношенню до "ідеальної" системи, тому порівняння різних варіантів систем електропостачання можна виконувати без визначення техніко-економічних показників. За отриманими результатами можна виконати розробку поетапного плану реконструкції розподільних електричних мереж, яка є необхідною для переходу на електроопалення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузьмін І. В. Критерії оцінки ефективності, якості та оптимальності складних систем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 1 (2). – 1994. – С. 5 – 9.
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97 (ИЕК, ИЕС). – [Чинний від 1997-11-21]. – Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997, 38 с.
3. Оценка надежности работы электрической сети (Трактат) [Электронный ресурс] / В. А. Скопинцев, В. И. Чемоданов, М. И. Чичинский. – М.: – 2004. – 37 с. Режим доступа: <http://www.oaoesp.ru/file/b2b72409/pub4.doc>
4. Ключко В. П. К вопросу о разработке схем развития распределительных электрических сетей энергоснабжающих компаний / В. П. Ключко // Новини енергетики. – 2008. – № 6. – С. 28 – 33.
5. Критерій оцінки якості функціонування розподільних мереж [Електронний ресурс] / Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравцов К. І. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – № 3. – 2008. Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-3.files/uk/08pdlodn_ua.pdf
6. Фокин Ю. А. Оценка надёжности систем электроснабжения / Ю. А. Фокин, В. А. Туфанов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.

Лежнюк Петро Дем'янович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електричних станцій і систем;

Лагутін Валерій Михайлович – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій і систем;

Комар В'ячеслав Олександрович – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій і систем.
Вінницький національний технічний університет.