

УДК 621.311.1.018.3

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; В. О. Комар, к. т. н.; К. І. Кравцов, к. т. н.**КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ**

У статті проводиться аналіз властивостей, які мають враховуватись у критерії якості функціонування розподільних мереж. Пропонується метод його визначення, який ґрунтується на поєднанні теорії марковських процесів та критеріального методу.

Ключові слова: *якість функціонування, розподільні мережі, надійність, економічність, безпечність.*

Вступ

Стабільне, якісне постачання електроенергією населення і промисловості є однією з визначальних умов економічного розвитку країни. На сьогодні техніко-економічні проблеми електроенергетики полягають у прогресуючому процесі старіння обладнання. Стан електроенергетики після тривалого періоду недостатнього інвестування характеризується серйозним зносом як генерувального, так і мережевого обладнання. Зокрема, в результаті експлуатації розподільних мереж за останні 15 років, коли розвиток, відновлення та модернізація відстали від процесу фізичного старіння, а коефіцієнт дефектності розподільних електромереж України досяг 13 %, відносно надійне постачання електроенергією може стати ненадійним і незадовільним щодо якості електроенергії [1].

Через обмеженість ресурсів електропостачальних компаній постає задача раціонального розподілу коштів з метою вибору пріоритетних ділянок реконструкції й модернізації обладнання. Прийняття рішень про заходи, що фінансуються, повинно базуватись на даних про якість функціонування електромережевого господарства. Тобто на оцінці проведених заходів, а саме: наскільки покращилось функціонування розподільних мереж.

Метою цієї статті є аналіз характеристик розподільних мереж для розв'язання задачі визначення критерію оцінки якості функціонування.

Характеристика об'єкта дослідження

Електрична мережа представляє собою комплекс електрообладнання та пристроїв, які призначені для передачі й розподілу електричної енергії. Сучасні електричні мережі за своєю структурою, організацією експлуатації і принципами управління належать до складних технічних комплексів (систем). Під час прийняття рішення щодо управління такою системою важливими є оцінка її функціональної готовності або якості функціонування.

Розподільна мережа – "складний" об'єкт, який складається з різних елементів – трансформаторних підстанцій, кабельних і повітряних ліній електропередач тощо. Якість функціонування такого "складного" об'єкта залежить від надійності кожного елемента мережі й структурних зв'язків між ними.

Під якістю функціонування складної системи розуміють сукупність властивостей, які визначають здатність системи виконувати задачі, поставлені під час її створення [2, 3]. Основною задачею розподільної мережі є забезпечення надійного постачання якісною електроенергією споживачів, які під'єднанні до цієї мережі.

Певна функціональна надлишковість у структурі розподільних мереж призводить до того, що поява відмови окремих елементів або незначна зміна тих або інших робочих параметрів можуть призвести не до повної відмови системи електропостачання, а лише до певного погіршення якості функціонування й зниження ефективності її в цілому. Тому для оцінки

якості функціонування розподільної мережі доцільним є введення кількісного показника, який враховував би вплив таких відмов.

Очевидно, що вибір відповідного показника якості функціонування в кожному конкретному випадку визначається типом системи, її призначенням, видом виконуваної задачі, характером різних зовнішніх факторів [4]. Для розподільної мережі показник якості повинен враховувати надійність електропостачання споживачів енергією відповідної якості. Іншою важливою властивістю є економічність, яка характеризується показниками використання коштів, які вкладаються в електричну мережу [3].

Останнім часом великого значення набуває властивість безпечності системи. У проблемі безпеки складних технічних комплексів треба виділити два напрямки. Перший з них належить до їх нормальної експлуатації. Неминучі техногенні впливи на людину й природне середовище. Другий напрямок пов'язаний з технологічними порушеннями, тобто промислова безпека. Під промисловою безпекою технічного об'єкта розуміють його здатність забезпечити захист людини, природного середовища і власності від небезпечних впливів, які виникають під час аварій і інцидентів на цьому об'єкті [3].

Під час дослідження промислової безпеки виявляються причинно-наслідкові зв'язки виникнення аварій і інших порушень з їхніми наслідками (соціальними, екологічними, економічними). Показниками промислової безпеки є ризики наслідків аварій і інцидентів, які демонструють міру небезпеки наслідків від порушень за певний період часу.

Оцінка надійності, економічності і безпеки дає досить повне уявлення щодо якості функціонування системи в нормальних умовах (рисунок 1).

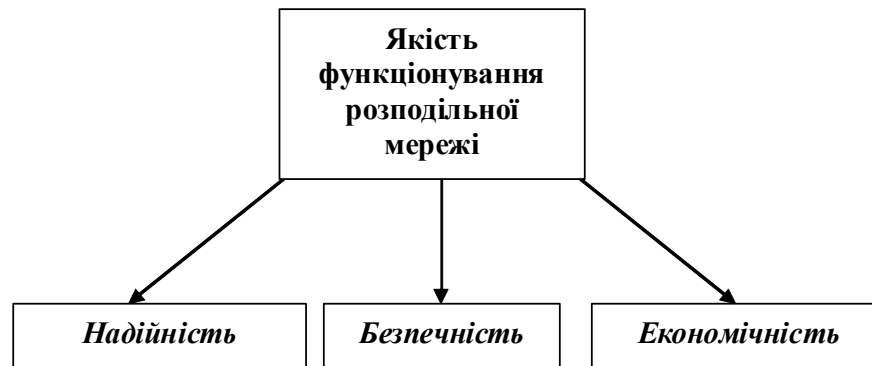


Рис. 1. Властивості, які є визначальними для якості функціонування розподільної мережі

Концентрування уваги, наприклад, лише на показниках економічності не гарантує дотримання допустимих рівнів соціальної й екологічної безпеки або виконання договірних зобов'язань з надійності електропостачання споживачів. У свою чергу, надійна електрична мережа в частині виконання необхідних функцій може бути не економічною і не відповідати вимогам безпеки.

Показник якості функціонування складної системи

З плином часу складна система переходить із стану в стан через зміну стану елементів, з яких вона складається (відмови елементів, їх відновлення, різні зовнішні впливи тощо). Кожний конкретний стан системи може бути охарактеризований певним умовним показником якості функціонування. Цей показник характеризує результат виконання функцій системою, яка перебуває саме в цьому стані.

Якщо позначити через p_i імовірність того, що система в момент часу t перебуває в i -му стані, а через Φ_i – коефіцієнт цього стану (умовний показник якості функціонування системи

в і-му стані), то показник якості функціонування системи може бути визначений за формулою [4]

$$E(t) = \sum_{i=1}^m p_i(t) \Phi_i, \quad (1)$$

де додавання виконується за всіма станами системи.

Найбільш трудомістким і принципово складним питанням під час оцінки ефективності систем є визначення коефіцієнтів ефективності конкретних станів системи. До основних методів отримання необхідних коефіцієнтів належать [4]:

1. Аналітичний метод. У ряді випадків коефіцієнти можна визначити аналітичним шляхом. Наприклад, коефіцієнт може бути явною функцією кількості працюючих елементів певного типу. Певні труднощі виникають з визначенням коефіцієнтів для траєкторії. Однак і тут іноді можливі відносно прості вирази.

2. Метод моделювання. Для визначення коефіцієнтів може бути застосований метод фізичного і математичного моделювання станів та траєкторій. Цей метод може мати самостійне значення під час дослідження принципів функціонування систем, а також застосовуватись для уточнення і коригування коефіцієнтів якості, які отримані наближено аналітичним методом.

Для визначення коефіцієнтів якості (особливо для класів траєкторій) може бути застосований і метод статистичного моделювання.

3. Метод безпосереднього експерименту з використанням дослідного зразка. Цей метод фактично представляє собою фізичне моделювання на реальному об'єкті. Стани й траєкторії системи імітуються відключенням у відповідні моменти часу певних елементів. Цей метод зазвичай використовується для перевірки якості системи.

Коефіцієнт ефективності стану може мати будь-який фізичний зміст, наприклад, умовна ймовірність, абсолютна або відносна похибка, збиток, потужність тощо.

Використання ненормованого коефіцієнта ефективності дозволяє порівняти за середнім значенням вихідного ефекту навіть різні системи.

Показник якості функціонування розподільної мережі

Під час оцінки якості функціонування розподільної мережі можна використати всі підходи, викладені вище, як для складної системи.

Для опису процесу функціонування розподільної мережі можна використати теорію марковських процесів. Принципове допущення, зроблене при моделюванні, – це експоненційний закон розподілу виникнення подій, пов'язаних з відмовами та відновленнями елементів системи електропостачання. Є відомості [5, 6], які свідчать про більш складний характер закону розподілу часу виникнення відмов і часу відновлень, ніж експоненційний, однак використання саме експоненційного розподілу під час розрахунку ймовірності безвідмовної роботи цих елементів можна вважати загальноприйнятим. Пояснити це можна тим, що:

- поки немає єдиного погляду щодо дійсного закону розподілу часу відмов та відновлень;
- застосування експоненційного закону розподілу часу між відмовами призводить до похибок у сторону певного заниження розрахункової ймовірності безвідмовної роботи порівняно з фактичною, тобто не може бути причиною створення ненадійної системи;
- існують праці, наприклад [7], у яких розглянуті системи, які мають елементи, час відмов і відновлень яких є комбінацією експоненційного, вейбулівського і нормально-логічного розподілу, і де показано, що на досить значному проміжку часу ці системи поведуться так, ніби всі їх елементи мали експоненційний розподіл часу відмов та відновлень.

Процес функціонування можна зобразити у вигляді графу (рис. 2), за яким можна скласти

систему диференційних рівнянь Колмогорова [8]. Взявши до уваги допущення про неврахування динаміки перехідних процесів між окремими станами ($\frac{dp_i}{dt} = 0$), система диференційних рівнянь матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m v_{ji} p_i &= 0, \quad j = \overline{2, n} \\ \sum_{i=1}^m p_i &= 1, \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де p_i – вектор ймовірностей станів досліджуваної системи; v_{ij} – елементи матриці \mathbf{v} , яка є матрицею інтенсивностей переходів з одного стану в інший; m – кількість можливих станів досліджуваної системи; n – кількість напрямків зміни станів, що виходять з робочого стану 1 (див. рисунок 2).

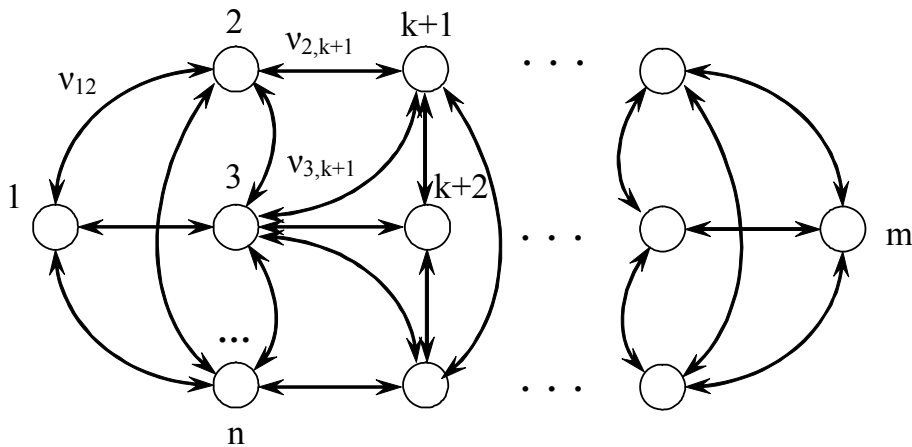


Рис. 2. Граф зміни станів системи

Для визначення ймовірностей робочих станів і оцінки якості функціонування досліджуваної системи необхідно розв’язати алгебраїчну систему рівнянь (2), яка в більш загальному вигляді записується

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{b}. \quad (3)$$

У критеріальному програмуванні систему рівнянь ортогональності та нормування можна записати [9]

$$\mathbf{\alpha} \cdot \boldsymbol{\pi} = \mathbf{b}, \quad (4)$$

де $\boldsymbol{\alpha}$ – матриця показників; $\boldsymbol{\pi}$ – вектор критеріїв подібності.

Проаналізувавши системи рівнянь (3) та (4), можна відзначити, що матриця коефіцієнтів \mathbf{v} системи рівнянь (3) є аналогічною до матриці розмірностей $\boldsymbol{\alpha}$ системи рівнянь (4), що застосовується в теорії подібності [8, 9, 10], а вектор \mathbf{p} , компоненти якого є по суті ваговими коефіцієнтами станів досліджуваного процесу, за своїм змістом відповідає вектору критеріїв подібності $\boldsymbol{\pi}$, елементи якого є безрозмірними співвідношеннями параметрів системи і в тому випадку, коли вони визначаються методом інтегральних аналогів, також є ваговими коефіцієнтами складових цільової функції (пронормовані до одиниці) [9]. Отже, можна провести аналогію між системою рівнянь (3) та (4).

Для підтвердження аналогії (одного з видів подібності) між системою рівнянь ортогональності та системою рівнянь Колмогорова використаємо теореми теорії подібності. Для цього побудуємо багаточлени від матриць $\boldsymbol{\alpha}$ та \mathbf{v} .

Якщо скористатись інтерполяційним багаточленом [11], то матрицю \mathbf{a} системи рівнянь ортогональності (3) критеріального програмування і матрицю переходів \mathbf{v} системи рівнянь (4) можна привести до матричного багаточлена. Використаємо для цього експоненційну функцію $f(z) = e^{zt}$. Якщо мінімальний багаточлен (у даному випадку це характеристичний багаточлен $\Delta(z)$) складається тільки з лінійних множників $(z - z_k)$, то достатньо визначити функцію $f(z)$ в характеристичних точках z_1, z_2, \dots, z_m . При цьому система рівнянь для коефіцієнтів інтерполяційного багаточлену має вигляд:

$$f(z_k) = a_0 + a_1 z_k + \dots + a_{m-1} z_k^{m-1}, \quad (5)$$

або в матричній формі

$$\begin{bmatrix} f(z_1) \\ f(z_2) \\ \dots \\ f(z_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^{m-1} \\ 1 & z_2 & z_2^2 & \dots & z_2^{m-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_m & z_m^2 & \dots & z_m^{m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_{m-1} \end{bmatrix}.$$

Розв'язавши цю систему відносно a_0, a_1, \dots, a_{m-1} , отримаємо

$$f(A) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i A^i.$$

Отже, в загальному вигляді матриця \mathbf{a} матиме багаточлен виду:

$$f(\mathbf{a}) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i \mathbf{a}^i. \quad (6)$$

А матриця \mathbf{v} :

$$f(\mathbf{v}) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i \mathbf{v}^i. \quad (7)$$

Зробивши таке перетворення, можна використовувати всі властивості скалярних багаточленів, в тому числі й наслідки теорем теорії подібності.

Відомо [12], що для встановлення подібності між оригіналом і моделлю замість умов

$$\pi_i = \frac{a_i \prod_{j=1}^n u_j^{\alpha_{ji}}}{f} = \text{idem} \quad (8)$$

можуть використовуватися рівнозначні їм вирази

$$\mu_i = \frac{\mu_{a_i} \prod_{j=1}^n \mu_{u_j}^{\alpha_{ji}}}{\mu_f} = 1, \quad (9)$$

де π_i – критерії подібності, визначені способом інтегральних аналогів; μ_i – індикатори подібності, які визначаються масштабами відповідних коефіцієнтів та параметрів моделі.

Використавши ці умови, можна довести подібність матричних багаточленів і відповідних їм матриць.

Для матричних багаточленів (6) та (7) умову (9) можна записати:

$$\frac{\mu_{a_1}}{\mu_f} = 1; \frac{\mu_{a_2} \mu_{\alpha/v}}{\mu_f} = 1; \frac{\mu_{a_3} \mu_{\alpha/v}}{\mu_f} = 1 \text{ і т. д.,}$$

$$\text{де } \mu_{a_i} = \frac{a_{ia}}{a_{iv}}; \mu_{\alpha/v} = \alpha \cdot v^{-1}; \mu_f = \frac{e^{|\alpha|t}}{e^{|\nu|t}}.$$

У теорії матриць є розділ матричних перетворень [11]. Згідно з ним еквівалентне перетворення можна розглядати як переходи до нових координатних базисів для вектора \mathbf{x} та \mathbf{y} , тобто $\mathbf{x}' = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{x}$ і $\mathbf{y}' = \mathbf{P}\mathbf{y}$. Тобто перетворення $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{Q}$ відповідає незалежним перетворенням координат, які визначаються матрицями \mathbf{Q}^{-1} та \mathbf{P} (неособливі квадратні матриці).

Якщо вектори \mathbf{x} та \mathbf{y} перетворюються до одного координатного базису, то можна записати $\mathbf{P} = \mathbf{Q}^{-1}$. Тобто переходимо до перетворення подібності $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{Q}$. Важливою властивістю перетворення подібності є те, що визначник матриці інваріантний відносно цього перетворення:

$$\det \tilde{\mathbf{A}} = \det \mathbf{A}.$$

Отже, таке перетворення не змінює власних значень матриці, тому можна записати

$$\det[\mathbf{zE} - \tilde{\mathbf{A}}] = \det[\mathbf{zE} - \mathbf{A}].$$

Результат розв'язку системи рівнянь (5) для матриць $\tilde{\mathbf{A}}$ і \mathbf{A} буде однаковим.

У ролі перетворювальної матриці \mathbf{Q} виступає модальна матриця \mathbf{H} [11], тобто $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{H}$. Вона може бути визначена як сукупність стовпців $\mathbf{h}^{(i)}$, які є розв'язком однорідних рівнянь:

$$(\mathbf{z}_i\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{h}^{(i)} = 0 \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

де n – ранг матриці \mathbf{A} .

За побудовою матриць \mathbf{a} та \mathbf{v} можна відшукати таку матрицю \mathbf{H} , яка задовольняла б

систему однорідних рівнянь (10). Отже, $\mu_{a_i} = \frac{a_{ia}}{a_{iv}} = 1$; $\mu_{\alpha/v} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}^{-1} = 1$; $\mu_f = \frac{e^{|\mathbf{a}t|}}{e^{|\mathbf{v}t|}} = 1$, а тому

виконуються умови (9), які підтверджують подібність матриць ортогональності критеріального програмування та переходів системи рівнянь Колмогорова.

Подібність моделювання марковських процесів та критеріального моделювання дозволяє застосувати до системи рівнянь (3) принципи критеріального програмування [9].

У результаті можна отримати функцію, за якою можна оцінювати якість функціонування розподільної мережі. У критеріальній формі вона матиме вигляд [9]:

$$f(x_*) = \sum_{i=1}^m P_i \prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ij}}. \quad (11)$$

де P_i – критерій подібності, який у даному випадку є ймовірністю перебування системи в стані i ; $\prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ij}}$ – показник якості функціонування стану i ; x_{*j} – незалежні параметри, що

характеризують основні властивості системи у відповідних станах.

За базове значення приймається якість функціонування розподільної мережі в перший момент нормального періоду функціонування [7]. Отриманий таким чином критерій Наукові праці ВНТУ, 2008, № 3

дозволяє оцінювати зміну якості функціонування розподільної мережі і на його основі обґрунтовувати капітальні вкладення.

Висновок

У статті визначені основні властивості розподільної мережі, які безпосередньо впливають на якість її функціонування. Запропоновано метод визначення критерію оцінки якості функціонування розподільної мережі, який ґрунтується на поєднанні теорії марковських процесів та критеріального методу. Використовуючи такий підхід, можна розв'язувати такі задачі:

1. Визначити стратегію підвищення якості функціонування системи до заданого рівня в умовах природного старіння елементів та обмежень на ресурси.
2. Оцінювати необхідність та визначити черговість заходів з модернізації елементів.
3. Оцінювати необхідність та визначити склад заходів для реконструкції системи за критерієм якості функціонування.
4. Оцінювати необхідність і визначити черговість заходів для продовження терміну служби елементів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Надійне та безпечне електропостачання, розвиток електромереж - під контролем Держенергонагляду [Електронний ресурс] 12 липня 2007. Режим доступу: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/article?art_id=54905&cat_id=35981
2. Оценка надежности работы электрической сети (Трактат) [Електронний ресурс] / В. А. Скопинцев, В. И. Чемоданов, М. И. Чичинский // М.: – 2004. – 37 с. Режим доступу: www.oaoesp.ru/file/b2b72409/pub4.doc
3. Аналіз якості функціонування складних систем за допомогою критеріальних моделей [Електронний ресурс] / Комар В. О., Тептя В. В. // Наукові праці ВНТУ. – 2007. – №1. Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ukr/07kvoocm.pdf>
4. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
5. Мокін Б. І., Юхимчук С. В. Математичні моделі робастної стійкості та чутливості нелінійних систем. Монографія 1999. – 122 с.
6. Р. Биллингтон, Р. Аллан. Оценка надежности электроэнергетических систем / Пер. с англ. В. А. Туфанова, под ред. Ю. А. Фокина.: Энергоатомиздат. М. 1988. – 287 с.
7. Фокин Ю. А., Туфанов В. А. Оценка надёжности систем электроснабжения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
8. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений. –М.: Наука, 1977. – 176 с.
9. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение критериального метода в электроэнергетике. – К.: УМК ВО, 1989. – 137 с.
10. Лежнюк П.Д., Комар В.О. Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 108 с.
11. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. - К.: Техніка, 1977. – 768 с.
12. Лежнюк П.Д., Собчук Н.В. Параметрична подібність в задачах оптимізації електричних систем. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 100 с.

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

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

Кравцов Костянтин Іванович – к. т. н., начальник відділу розробки електронних вузлів ТОВ "Екстрем-Україна"