

УДК 621.311.1.018.3

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; В. М. Лагутин, к. т. н., доц., В. А. Комар, к. т. н., доц.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ПОМОЩИ КРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

В статье предложена методика определения критерия качества функционирования распределительных электрических сетей. Показана зависимость качества функционирования от изменения показателей надежности и качества электроэнергии на примере двухцепной системы электропитания.

Ключевые слова: *распределительные сети, качество функционирования, надежность электропитания, качество электроэнергии, марковские процессы, критериальное моделирование.*

Введение

Современное производство с его сложными технологическими комплексами, с широким использованием средств автоматического управления и контроля процессами не может без четкой работы всех технических средств. Это требует придерживания особенно жестких требований к их надежности. Однако очевидно, что создавать высоконадежные технические агрегаты нет смысла, если не обеспечивается соответствующая надежность их электропитания с соответствующими показателями качества электроэнергии. Построение новых распределительных сетей и модернизация существующих требует оценки их качества.

Согласно с [1], общими требованиями к критерию качества функционирования сложной системы, к которым относятся и распределительные электрические сети, является: отражение объективной реальности; оценка эффективности, качества и оптимальности; возможность физического и абстрактного объяснения; возможность вычисления, хотя бы с использованием ЭВМ; нормирование и отображение "крайних" состояний с учетом потенциально и реально возможных; критерий должен быть в определенной степени обобщающим (характеризовать отдельные подсистемы и системы в целом во всех жизненных циклах); критерий должен легко раскладываться на частные показатели и объединяться в обобщающие; должен иметь теоретическую основу и позволять разрабатывать новую теорию или развивать старую; критерий владеть эвристичностью, позволять принимать решения на основе опыта и интуиции и т. д. Для распределительной сети качество функционирования определяется множеством свойств системы, обуславливающих ее пригодность обеспечивать график нагрузок определенного потребителя с соответствующими [2] показателями качества электроэнергии [3].

В последнее время активизировался процесс по переходу на электрообогрев [4], что требует реконструкции распределительных электрических сетей. В условиях ограниченного финансирования для возможности проведения объективного и полного сравнения возможных вариантов выполнения систем электропитания необходимо при их оценке учитывать показатели, которые определяют качество электропитания потребителей. К ним относятся: надежность системы электропитания, которая определяется такими показателями, как: бесперебойность элементов схемы, ремонтпригодность, долговечность, конфигурация схемы; качество электроэнергии, характеризующейся показателями качества частоты и напряжения.

Таким образом, актуальным является моделирование качества функционирования с целью количественной оценки функциональной готовности системы электропотребления.

Целью данной статьи является анализ зависимости критерия качества функционирования, оцененного по критериальной модели, от изменения показателей надежности и качества

электроэнергии.

Критериальная модель качества функционирования распределительной электрической сети

В [5] предложена критериальная модель, которая получена при объединении теории марковских процессов и критериального метода. Общий вид критериальной модели такой:

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

где P_i – критерий подобию, являющихся в данном случае вероятностью нахождения системы в состоянии i (составляющая, которая учитывает надежность системы); $\prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ji}}$ – показатель эффективности состояния i (составляющая, которая учитывает качество электроэнергии); x_{*j} – независимые параметры, которые характеризуют основные свойства системы (вероятности соответствия показателей качества электроэнергии нормативным документам).

Для оценки качества функционирования распределительной электрической сети критериальная модель будет иметь такой вид:

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

где m – общее количество возможных состояний распределительной электрической сети, $m=n+k$; n – количество рабочих состояний; k – количество нерабочих состояний; $P_j [A_{min} \leq A \leq A_{max}]$ – вероятность того, что показатель качества электрической энергии A в допустимых пределах при нахождении системы в состоянии j ; A – значение показателя качества электрической энергии; v^{ji} – элементы матрицы переходов, которые являются алгебраическими суммами интенсивностей отказов λ и интенсивностей восстановлений μ .

При практических расчетах качества функционирования E существенным является решение вопросов по тем показателям качества электрической энергии, которые должны и могут быть учтены в (2).

На частоту в системе отдельный потребитель повлиять не может, поэтому показатели качества частоты можно исключить из рассмотрения.

Вероятность отклонения напряжения определяется режимами работы потребителей, которые имеют вероятностный характер. Поэтому учет этого показателя при определении качества функционирования распределительной электрической сети является обязательным.

Для определения вероятности соответствия отклонений напряжения ГОСТ $P_j [V_{min} \leq V \leq V_{max}]$ необходимо построить зависимость $V_{II}(t)$ [6]. График изменения отклонений напряжения можно построить при помощи такого соотношения:

$$V_{II} = \frac{U_{*II} U_{\sigma} - U_H}{U_H},$$

где U_H – номинальное напряжение рассматриваемой сети; U_{σ} – базовое значение напряжения; U_{*II} – относительное значение напряжения пункта потребления, определенное

по кривой $U_{*II} = f(S)$.

Поскольку полное сопротивление линии $z_{лi}$ и отношение активного и реактивного сопротивлений линии $r_{лi}/x_{лi}$ разные для каждого из состояний системы $i = 0, 1, 2$, поэтому для каждого из них должен быть построен график $V_{iII}(t)$ (рис. 1). На этом же рисунке изображается область допустимых значений отклонения напряжения в месте присоединения нагрузки (заштрихованная полоса). Участки кривых $V_{iII}(t)$, которые расположены в пределах допустимых отклонений, являются участками эффективными, с точки зрения обеспечения режима напряжения. Тогда

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

где T_e – промежуток времени, в течение которого выполняется условие $V_{min} \leq V \leq V_{max}$; T – число часов работы системы электропитания в течение года.

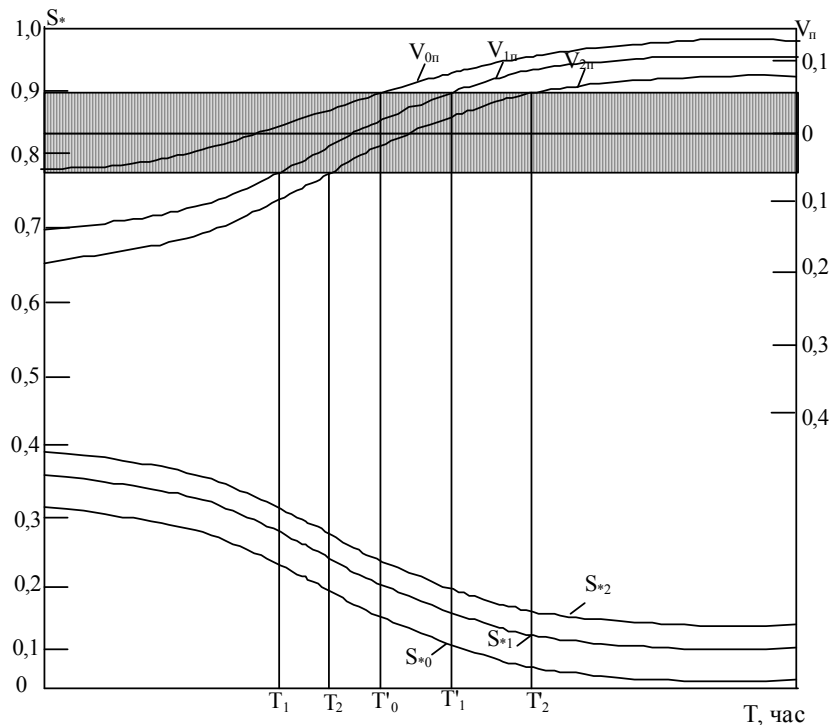


Рис. 1. Зависимость отклонения напряжения во времени от графика нагрузки

Оценка качества распределительной электрической сети

Проиллюстрируем количественную оценку качества функционирования сети на примере схемы, приведенной на рис. 2. Оценка качества этой системы будем выполнять с учетом отклонения напряжения в узле питания.

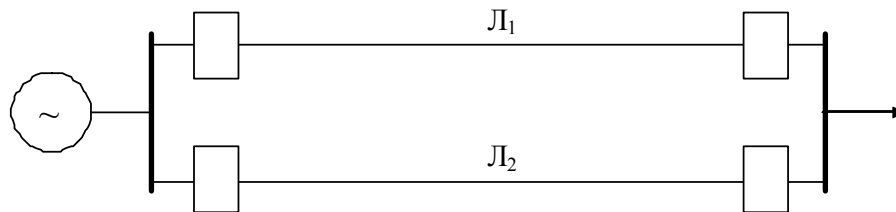


Рис. 2. Распределительная электрическая сети

Для этой схемы граф изменения состояний будет иметь вид, приведенный на рис. 3. Объяснения состояний такие:

- состояние 1 – обе линии работают;
- состояние 2 – линия Л₁ отказала, Л₂ работает;
- состояние 3 – линия Л₂ отказала, Л₁ работает;
- состояние 4 – обе линии отказали.

При построении графа принято, что автоматика и релейная защита в этой системе идеально надежная.

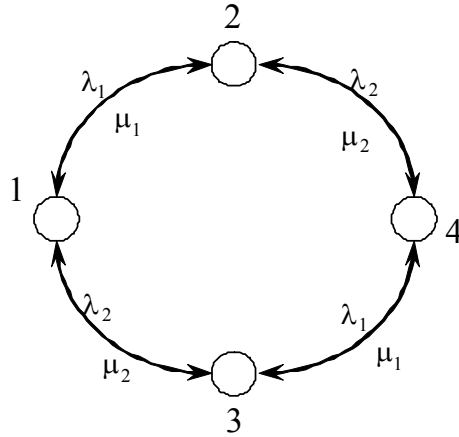


Рис. 3. Граф состояний системы

По графу (рис. 3) составляется система уравнений (4), которая в общем виде имеет такой вид:

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

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

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

Решив систему уравнений (4) относительно P_i , можно определить вероятности нахождения системы в соответствующих состояниях.

Для рассмотренной распределительной сети критериальная модель будет иметь вид:

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

С учетом (3), перепишем (5)

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

Необходимо отметить, что при решении практических задач необходимо наносить не одну, а две области допустимых значений отклонения напряжения: одну для состояния $i = 1$ и другую для состояния $i \neq 1$, при этом другая область будет больше первой, поскольку действующее нормативное положение допускает увеличение границ отклонения напряжения в послеаварийных режимах.

Исходная информация для расчета качества функционирования приведена в таблице 1. Данные приведены для трех ситуаций: распределительная сеть только введена в эксплуатацию; проведена реконструкция сети; сеть должна быть заменена.

Таблица 1

Исходные данные

	Параметры надежности	Кабельная линия Л1	Кабельная линия Л2
1. Обе линии в начале эксплуатации	λ (1/год)	0,0122	0,0122
	μ (1/год)	292	292
2. Первая линия после определенного срока эксплуатации	λ (1/год)	10	0,0122
	μ (1/год)	292	292
3. Линии должны быть заменены	λ (1/год)	100	100
	μ (1/год)	100	100

Результаты расчетов с учетом изменения вероятности отклонения напряжения в состоянии 1 приведены на рисунке 4. Выполнив его анализ, можно сделать вывод, что при надежной системе изменение качества электроэнергии практически не влияет на качество функционирования (случай 1). Аналогичный вывод можно сделать и для ненадежной системы (случай 3). Для промежуточного варианта по надежности (случай 2) качество функционирования системы электропитания определяется не только надежностью, но и качеством электроэнергии.

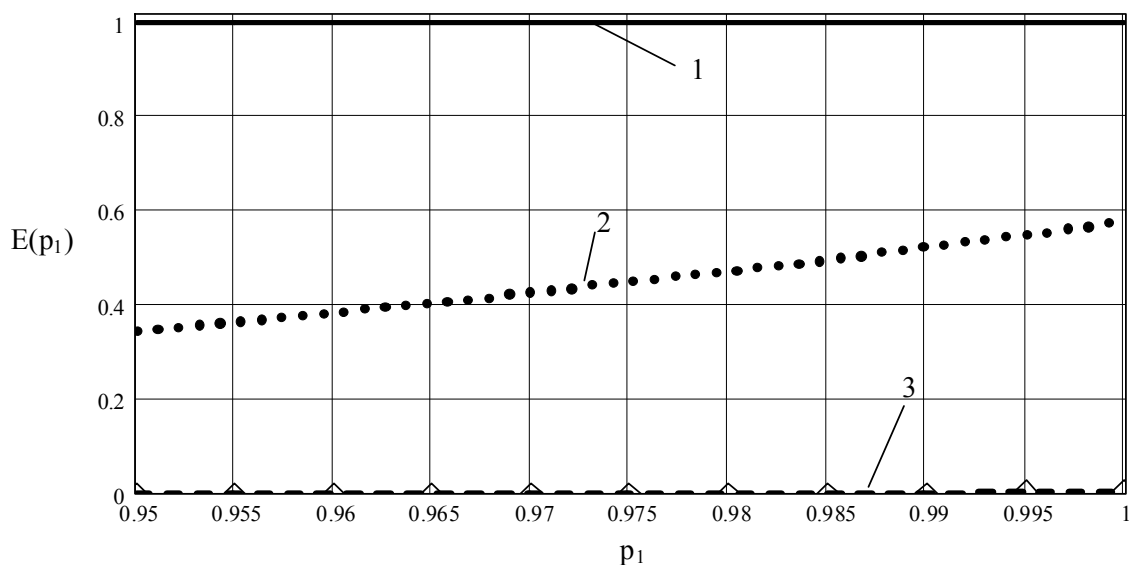


Рис. 4. Зависимость показателя качества функционирования от качества электроэнергии

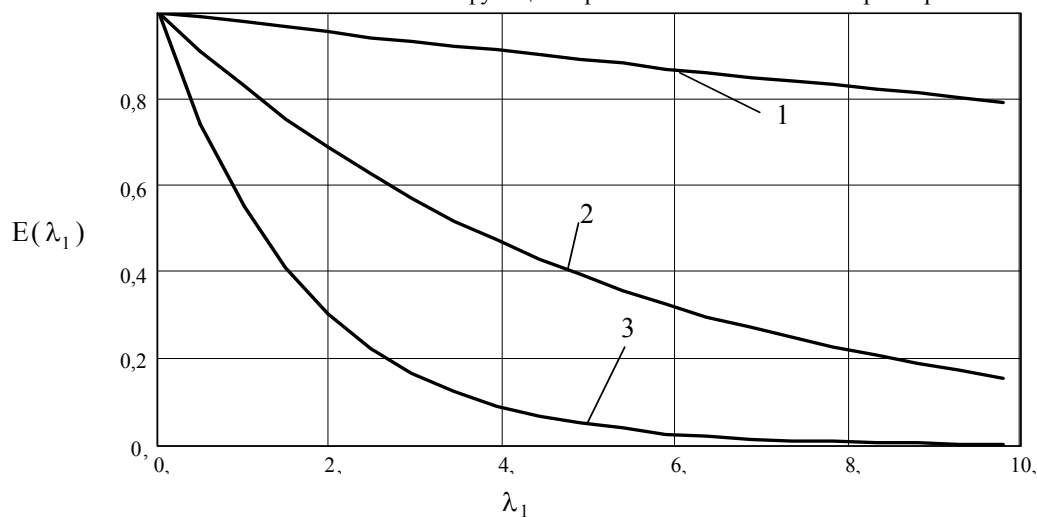


Рис. 5. Зависимость показателя качества функционирования от интенсивности отказов линии Л1

По результатам расчета, приведенного на рисунке 5, можно сделать вывод относительно изменения качества функционирования в зависимости от изменения интенсивности отказов λ_1 кабельной линии Л1. При этом рассмотрены три случая, которые отличаются качеством электроэнергии:

1 – вероятность соответствия отклонения напряжения ГОСТ в состоянии 1, 2 и 3 соответственно 1; 0,98; 0,98;

2 – вероятность соответствия отклонения напряжения ГОСТ в состоянии 1, 2 и 3 соответственно 0,98; 0,97; 0,97;

3 – вероятность соответствия отклонения напряжения ГОСТ в состоянии 1, 2 и 3 соответственно 0,98; 0,95; 0,95.

Выводы

Полученная критериальная модель позволяет количественно оценить качество функционирования распределительной электрической сети. Оценка проводится относительно "идеальной" системы, поэтому сравнение разных вариантов систем электропитания можно

выполнить без определения технико-экономических показателей. По полученным результатам можно выполнять разработку поэтапного плана реконструкции распределительных электрических сетей, необходимую при переходе на электроотопление.

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 Петр Демьянович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем;

Лагутин Валерий Михайлович – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем;

Комар Вячеслав Александрович – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем. Винницкий национальный технический университет.