

УДК 621.3

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ

Н.П. Бадалян¹, Г.В. Квашнина², Е.А. Чащин³

¹ *Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия*

² *Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*

³ *Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, Владимирская обл., г. Ковров, Россия*

Проведен сравнительный анализ методов оценки показателей надежности, основанный на использовании параметров безотказности систем с позиции частоты возникновения отказов и времени наработки на отказ оборудования. На примере условной восстанавливаемой системы выполнено моделирование показателей надежности. Дано математическое описание процесса функционирования эквивалентного элемента с учетом принципа соединения составляющих его элементов системы электроснабжения и их однотипности по параметрам и выполняемым функциям. Обоснована возможность регулирования надежности электроснабжения путем влияния на наработку элементов системы электроснабжения.

Ключевые слова: система электроснабжения, безотказность, наработка на отказ, вероятность работы, вероятность отказа.

Введение. На сегодняшний день системы электроснабжения представляют собой сложные иерархические структуры, позволяющие передавать энергию как крупным промышленным потребителям, так и гражданским объектам. Однако, независимо от структуры и типа приемников, электроснабжение должно отвечать предъявляемым к нему требованиям бесперебойности и надежности. При этом обоснование необходимого уровня бесперебойности электроснабжения и надежности как системы электроснабжения в целом, так и отдельных ее элементов имеет большое значение. Перерывы в подаче электроэнергии, с одной стороны, могут привести к значительному материальному ущербу потребителей и другим негативным явлениям, а с другой – связаны с существенным ростом материальных затрат [1]. Это делает актуальным применение математических методов оценки показателей надежности для оптимизации затрат при проектировании, структурном и параметрическом синтезе систем электроснабжения, их эксплуатации и разработке алгоритмов эффективного управления.

Методы исследования. Один из известных методов оценки показателей надежности основан на рассмотрении параметров безотказности систем с позиции частоты возникновения отказов [2]. Однако системы электроснабжения имеют специфические особенности построения и функционирования. Они вызваны как непрерывным обменом электроэнергией между системой и потребителями при невозможности ее накопления, так и непреднамеренными мешающими воздействиями на систему, приводящими к отказу элементов, а в некоторых случаях – системы в целом, независимо от способа решения задачи сетевого резервирования, будь то кольцевые переемы между линиями соседних подстанций, или использование различных технических средств обеспечения необходимого уровня надежности и т.п. В последнем случае взаимодействия между системой электроснабжения и внешней средой носят стохастический характер, и говорить о бесперебойной подаче электроэнергии можно только с некоторой вероятностью достижения поставленной цели [3]. Это ограничивает достоверность применения метода оценки показателей надежности, основанного на анализе частоты возникновения отказов, при решении задачи оптимизации затрат, проектировании и эксплуатации систем электроснабжения.

Другой метод оптимизации затрат при обеспечении бесперебойности и надежности электропитания основан на решении технико-экономической задачи, основанной на сопоставлении затрат на проведение дополнительных мер с уменьшением ущерба от перерывов электроснабжения. Одним из путей решения поставленной задачи является анализ длительности наработок на отказ отдельных элементов системы электроснабжения и участков в целом. Выполним на примере условной восстанавливаемой системы моделирование показателей надежности.

Для примера рассмотрим схему главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия с двумя трансформаторами, двумя питающими воздушными линиями (ВЛ) на железобетонных опорах. При расчете принимаем, что на распределительном пункте (РП) 110 кВ используется воздушный выключатель, а в схеме мостика для резервного питания на подстанции используются разъединители (рис. 1). Расстояние от ГПП до узлового распределительного пункта - 50 км [4].

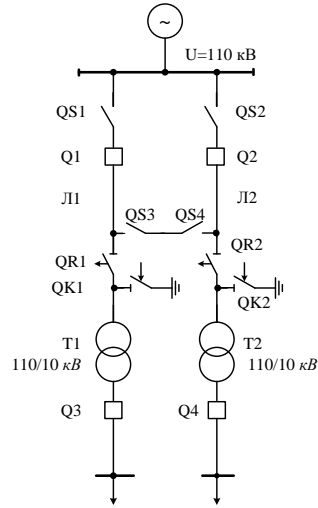


Рис. 1. Расчетная схема электроснабжения: $Q1, Q2$ – выключатели воздушные 110 кВ; $QS1 - QS4$ – разъединители; $Л1$ и $Л2$ – воздушные линии 110 кВ; $QR1, QR2$ – отделители; $QK1, QK2$ – короткозамыкатели; $T1, T2$ – трансформаторы; $Q3, Q4$ – выключатели масляные 10 кВ

Проведем математическое описание процесса функционирования эквивалентного элемента с учетом принципа соединения составляющих его элементов системы электроснабжения и их однотипности по параметрам и выполняемым функциям. Для последовательного соединения элементов требуемую наработку для одного элемента $\bar{\tau}_{i \min}$, обеспечивающую заданное (требуемое) значение средней суммарной наработки, определим согласно выражению [3]

$$\bar{\tau}_{i \min} = \frac{n \cdot \bar{\tau}_{\text{посл}} \cdot p_{i \min}}{p_{\text{посл}}} = \frac{n \cdot \bar{\tau}_{\text{посл}}}{p_i^{n-1}}, \quad (1)$$

где n – число последовательно соединенных элементов; $\bar{\tau}_{\text{посл}}$ – наработка на отказ последовательной цепочки; $p_{i \min}$ – минимально допустимая вероятность работы оборудования; $p_{\text{посл}}$ – вероятность работы последовательного соединения, $p_{\text{посл}} = \prod_{i=1}^n p_i$.

Тогда суммарная наработка последовательного соединения двух элементов определяется согласно выражению

$$\bar{\tau}_{22} = \frac{\bar{\tau}_1 \cdot \bar{\tau}_2}{\bar{\tau}_1 + \bar{\tau}_2}, \quad (2)$$

где $\bar{\tau}_1$ и $\bar{\tau}_2$ – наработка на отказ 1-го и 2-го элементов соответственно.

При параллельном включении длительность суммарной наработки на отказ $\bar{\tau}_{22}$ в случае необходимости включения обеих параллельных цепочек для обеспечения функционирования системы определяется аналогично случаю

последовательного соединения двух элементов, так как вне зависимости от типа соединения (последовательного или параллельного) она выражается через их длительности наработок на отказ. Однако часто достаточным условием питания приемника является работа хотя бы одной из параллельных ветвей. Остальные в это время могут находиться на плановом ремонте или обслуживании. Тогда наработка на отказ определяется с учетом того, какой из эквивалентных элементов работает, а какой находится в резерве или на обслуживании (отключен). Например, если из двух параллельно включенных элементов первый работает, а второй отказал, наработка на отказ определяется длительностью наработки первого элемента $\bar{\tau}_1$ и времени восстановления отказа второго $\bar{\theta}_2$ [5]:

$$\bar{\tau}'_{21} = \frac{\bar{\tau}_1 \cdot \bar{\theta}_2}{\bar{\tau}_1 + \bar{\theta}_2}. \quad (3)$$

Аналогичным образом наработка определяется и в обратной ситуации: когда функционирует второй элемент. Разница лишь в том, что для первого будет учитываться время его восстановления, а для второго – его наработка:

$$\bar{\tau}''_{21} = \frac{\bar{\tau}_2 \cdot \bar{\theta}_1}{\bar{\tau}_2 + \bar{\theta}_1}. \quad (4)$$

Для таких участков цепи, соединенных по схемам "звезда" и "треугольник", при условии, что наработка элементов гораздо больше длительностей их отказов для перехода от "звезды" к "треугольнику", при определении длительностей средних наработок на отказ справедливы формулы

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{12} &= \left(\frac{\frac{1}{\bar{\tau}_1} \cdot \frac{1}{\bar{\tau}_2}}{\frac{1}{\bar{\tau}_1} + \frac{1}{\bar{\tau}_2} + \frac{1}{\bar{\tau}_3}} \right)^{-1}; \\ \bar{\tau}_{13} &= \left(\frac{\frac{1}{\bar{\tau}_1} \cdot \frac{1}{\bar{\tau}_3}}{\frac{1}{\bar{\tau}_1} + \frac{1}{\bar{\tau}_2} + \frac{1}{\bar{\tau}_3}} \right)^{-1}; \\ \bar{\tau}_{23} &= \left(\frac{\frac{1}{\bar{\tau}_2} \cdot \frac{1}{\bar{\tau}_3}}{\frac{1}{\bar{\tau}_1} + \frac{1}{\bar{\tau}_2} + \frac{1}{\bar{\tau}_3}} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, \bar{\tau}_3$ - средние наработки на отказ соответствующих элементов, включенных по схеме "звезда".

Для обратного перехода от "треугольника" к "звезде" используются формулы

$$\begin{cases} \bar{\tau}_1 = \frac{\bar{\tau}_{12} \cdot \bar{\tau}_{13}}{\bar{\tau}_{12} + \bar{\tau}_{13} + \bar{\tau}_{23}}, \\ \bar{\tau}_2 = \frac{\bar{\tau}_{12} \cdot \bar{\tau}_{23}}{\bar{\tau}_{12} + \bar{\tau}_{13} + \bar{\tau}_{23}}, \\ \bar{\tau}_3 = \frac{\bar{\tau}_{23} \cdot \bar{\tau}_{13}}{\bar{\tau}_{12} + \bar{\tau}_{13} + \bar{\tau}_{23}}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\bar{\tau}_{12}$, $\bar{\tau}_{23}$, $\bar{\tau}_{13}$ - средние наработки на отказ соответствующих элементов "треугольника".

Преобразование "звезда"- "треугольник", так же как и обратное преобразование, позволяет свести схему к виду, когда элементы соединяются по смешанной схеме, а следовательно, далее можно осуществлять преобразования, рассмотренные ранее, и привести питающую цепь к эквивалентному элементу.

После определения наработки следует установить требуемое время перехода на обслуживание каждой цепочки по графикам, которые будут соответствовать виду функций вероятности работы системы при определенном законе распределения. Например, для экспоненциального закона вид данной зависимости отражен на рис. 2.

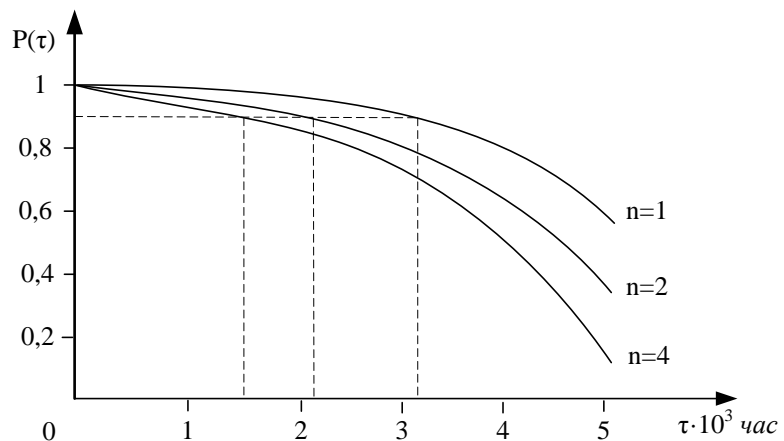


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказного функционирования элемента от длительности его работы

Видно, что при расчете по средним параметрам наступает время, когда вероятность работы становится равной нулю. В действительности это не так. По приведенной зависимости можно определить длительность безотказной работы элементов и участков системы. Таким образом, можно управлять надежностью системы. Если построить графики, аналогичные приведенному на рис. 2 для эквивалентных элементов, заменяющих различные цепочки оборудования сети электроснабжения, то можно регулировать время проведения обслуживания

этих участков. Для этого необходимо по графику определить, через какое время наступит минимально допустимая вероятность работы, и проводить обслуживание этих участков именно в рассчитанный период времени. Это позволит не только не допускать отказа оборудования вследствие его старения, но и проводить обслуживание системы с привлечением одного и того же обслуживающего персонала.

Все отдельно взятые участки системы, объединенные в эквивалентный элемент, обладают разными длительностями наработок, т.к. включают разный состав оборудования. Следовательно, интервалы обслуживания у них не должны перекрываться во времени. Такой подход эксплуатации системы позволит сократить технико-экономические затраты на замену оборудования в случае его старения, содержание дополнительного обслуживающего персонала и снизить риск возникновения отказов. Однако при этом возникает необходимость создания системы управления указанными переключениями. Она должна также отвечать требованиям надежности и быстродействия. Только в этом случае можно гарантировать положительный технико-экономический эффект от вводимых мер, а за счет использования резервных цепей питания и резервных источников питания приемника должно быть бесперебойным.

Результаты исследования и их обсуждение. С учетом вышеизложенного в приближении, что отказом схемы подстанции является одновременное отключение двух трансформаторов, выполним расчет безотказности подстанции (см. рис. 1). В расчетах принимаем, что одновременный выход из строя двух трансформаторов или двух линий практически невозможен. С учетом сделанных допущений на основании статистических данных (табл. 1) можно установить, что продолжительность нахождения одного из двух трансформаторов в плановом и аварийном ремонте составляет $t' = 0,004 \text{ года}$, а относительная продолжительность нахождения любой из линий в состоянии ремонта с учётом ремонтного состояния воздушного выключателя на узловом распределительном пункте и разъединителя на ГПП составляет $t'' = 0,01 \text{ года}$. Средние статистические времена t' и t'' могут быть приняты за расчётные при определении вероятности безотказной работы ГПП в течение времени $t = 1 \text{ год}$.

Первый вариант анализа основан на использовании средних статистических данных годовой продолжительности отключений элементов сети (времени восстановления) и частоты отказов электрооборудования, приведенных в [3, 6] (табл. 1, столбцы 1 и 2).

Таблица 1

Исходные данные для расчета надежности схемы [6]

| Элемент | Частота отказов, $\lambda, год^{-1}$ | Время восстановления $T_B, час$ | Вероятность отказа, \bar{p}_i |
|--|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| Разъединитель 110 кВ | 0,0001 | 10 | $1,14 \cdot 10^{-7}$ |
| Выключатель воздушный 110 кВ | 0,025 | 100 | $2,85 \cdot 10^{-4}$ |
| ВЛ 110 кВ | 0,500 | 14 | $7,99 \cdot 10^{-4}$ |
| Отделитель 110 кВ | 0,017 | 9 | $1,75 \cdot 10^{-5}$ |
| Короткозамыкатель 110 кВ | 0,013 | 10 | $1,48 \cdot 10^{-5}$ |
| Трансформатор с высшим напряжением 100 кВ | 0,013 | 200 | $2,97 \cdot 10^{-4}$ |
| Выключатель масляный 10 кВ | 0,008 | 10 | $9,13 \cdot 10^{-6}$ |

Определим суммарную частоту отказов оборудования [7]:

$$\lambda_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (7)$$

где λ_i - частота отказа i -го элемента цепи из табл. 1.

Подставив значения в формулу (7), получим, что для питания по основной цепи суммарная частота отказов оборудования составит $\lambda_{\Sigma 1} = 0,5761 год^{-1}$.

Определим вероятность отказа каждого из элементов схемы (см. рис. 1):

$$\bar{p}_i = T_{Bi} \cdot \lambda_i. \quad (8)$$

Результаты расчета (8) сведем в табл. 1 (столбец 4). Тогда суммарная вероятность отказа составит

$$\bar{p}_{\Sigma 1} = \sum \bar{p}_i = 0,00142. \quad (9)$$

Выразим из формулы (9) вероятность работы одной цепи:

$$p_{\Sigma 1} = 1 - \bar{p}_{\Sigma 1} = 1 - 0,00142 = 0,9986. \quad (10)$$

Найдем длительность наработки при заданных параметрах вероятности работы и суммарной интенсивности отказов:

$$\tau_1 = \frac{p_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma}} = 1,733 года. \quad (11)$$

Проведем аналогичный расчет времени наработки на отказ с учетом закона распределения функции вероятности работы, используя те же средние значения частоты отказов (табл. 1). Для электрооборудования с высоким уровнем обслуживания и организации производства принимают, что функция вероятности работы системы изменяется по экспоненциальному закону [7]. Тогда

$$p_2(\tau) = e^{-\lambda_{\Sigma} \tau}. \quad (12)$$

Используя найденное ранее значение суммарной интенсивности отказов оборудования (7), для рассматриваемой цепочки электрооборудования получаем

$$p_2(\tau) = e^{-0,5761\tau}. \quad (13)$$

Длительность наработки на отказ является интегральной функцией от вероятности работы [4], т.е.

$$\tau_2 = \int_0^{\infty} p_2(\tau)d\tau = \int_0^{\infty} e^{-0,5761\tau} d\tau = 1,736 \text{ года}. \quad (14)$$

Таким образом, независимо от способа расчета (11), (14), получили схожие значения суммарного времени наработки электрооборудования.

Вторым способом расчета, предлагаемым для проведения анализа, является расчет по длительностям наработок на отказ. Принимая, как и ранее, что закон изменения функций безотказности соответствует показательному закону, рассчитаем наработку каждого элемента по формулам (1)-(6). Однако для подобного расчета можно использовать и статистические данные, либо указать требуемую величину наработки исходя из параметров конкретного оборудования. Результаты расчета наработок сведены в табл. 2.

Таблица 2

Длительность полученной наработки, рассчитанной по среднему статистическому значению частоты отказов

| Элемент | Длительность наработки, год |
|---|--------------------------------|
| Разъединитель 110 кВ | 10 ⁴ |
| Выключатель воздушный 110 кВ | 40 |
| ВЛ 110 кВ | 2 |
| Отделитель 110 кВ | 58,8 |
| Короткозамыкатель 110 кВ | 76,9 |
| Трансформатор с высшим напряжением 110 кВ | 76,9 |
| Выключатель масляный 10 кВ | 124,9 |

Длительность наработки на отказ $\tau_{совм2}$ для одновременно работающих двух элементов удобно определить в зависимости от способа их соединения по формулам (1)-(6). Аналогичную зависимость можно распространить и на любое число последовательно соединенных элементов. Тогда суммарная наработка оборудования рассматриваемой цепи (см. рис. 1) составляет $\tau_{\Sigma} = 1,736 \text{ года}$.

Видно, что анализ цепи через вероятность отказов оборудования и длительность наработок на отказ дает аналогичные результаты. Однако второй способ позволяет рассчитать суммарную наработку исходя из требований конкретной схемы и потребителя. Это позволяет подобрать оборудование, обеспечивая максимально возможную длительность наработки и, как следствие,

максимальную вероятность работы системы. Если же осуществлять своевременный переход на резервное питание по истечении рассчитанной длительности времени наработки, не допуская отказа, то можно обеспечить безотказность работы системы с наибольшей вероятностью, нежели в случае, если обслуживание цепи проводить только в случае его отказа или сбоя в работе.

Выводы. На примере анализа условных схем показана возможность определения наработок на отказ оборудования, позволяющих избегать выхода элементов систем электроснабжения из строя в связи с истечением времени возможной наработки. Участки, отработавшие максимально допустимое время, должны выводиться на плановое обслуживание путем переключения на резервные питающие цепи. Это позволит исключить интервалы отказов, а не просто минимизировать частоту их возникновения, как это предлагалось в методе, основанном на рассмотрении безотказности систем с позиции частоты возникновения отказов.

Литература

1. **Kvashnina G.V., Chashchin Ye.A.** Increasing the reliability of power supply of elevators // European journal of natural history.- 2016.- №5.- С. 37-40.
2. **Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Бош В.И.** Случайные потоки в решении вероятностных задач.- Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2003.- 224 с.
3. **Хорольский В.Я., Таранов М.А.** Надежность электроснабжения.- Ростов-на Дону: Терра Принт, 2007.- 128 с.
4. **Гук Ю.Б.** Анализ надёжности электроэнергетических установок.- Л.: Энергоатомиздат, 1988.
5. **Волков Н.Г.** Надежность электроснабжения: Учеб. пособие.- Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2003.- 140 с.
6. **Александров Д.С., Щербаков Е.Ф.** Надежность и качество электроснабжения предприятий: Учебное пособие.- Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2010.- 155 с.
7. **Матвеевский В.Р.** Надежность технических систем: Учебное пособие.- М.: Изд-во Моск. гос. ин-та электроники и математики, 2002.- 113 с.

*Поступила в редакцию 18.07.2016.
Принята к опубликованию 21.12.2016.*

ԷԼԵԿՏՐԱՄԱՏԱԿԱՐԱՐՄԱՆ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇՆԵՐԻ
ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ՝ ԱՇԽԱՏԱՏԵՎՈՒԹՅԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԻ ԽԱՓԱՆՄԱՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ

Ն.Պ. Բադալյան, Գ.Վ. Կվաշնինա, Ե.Ա. Չաշին

Համակարգերի անխափանության պարամետրերի օգտագործմամբ կատարվել է հուսալիության ցուցանիշների գնահատման մեթոդների համեմատական վերլուծություն՝ խափանումների առաջացման հաճախության և սարքավորումների աշխատատևության ժամանակի խափանման տեսանկյունից: Պայմանականորեն վերականգնվող համակարգի օրինակով մոդելավորվել են հուսալիության ցուցանիշները: Ներկայացված է համարժեք տարրի գործարկման ընթացքի մաթեմատիկական նկարագրությունը՝ նրա էլեկտրամատակարարման համակարգի բաղադրիչ տարրերի միացման սկզբունքի և դրանց՝ ըստ պարամետրերի և գործառնության միատիպության հաշվառումով: Հիմնավորվել է էլեկտրամատակարարման հուսալիության կարգավորման հնարավորությունը՝ էլեկտրամատակարարման համակարգի տարրերի աշխատատևության վրա ազդելու ճանապարհով:

Առանցքային բաներ. էլեկտրամատակարարման համակարգ, անխափանություն, աշխատատևության խափանում, աշխատանքի հավանականություն, խափանման հավանականություն:

ASSESSING THE RELIABILITY INDICES OF POWER SUPPLY CIRCUITS
CONSIDERING THE TIME FOR THE OPERATION FAILURE

N.P. Badalyan, G.V. Kvashnina, E.A. Chashin

A comparative analysis of the methods for assessing the reliability indices based on the use of the systems' reliability parameters from the standpoint of failure and operation time of the equipment failure is carried out. On the example of a conventional restorable system, the reliability indices are simulated. The mathematical description of the functioning process of the equivalent element, taking into account the principle of connection of its element constituents of the electric power supply and their uniformity according to parameters and performed functions is introduced. The ability to regulate the reliability of power supply by influencing the operating time of the power supply system elements is justified.

Keywords: power supply system, non-failure, probability of operation, probability of failure, operation of failure.