

УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ НЕИСПРАВНОГО ЭЛЕМЕНТА  
В СИСТЕМАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

## SIMPLIFIED TECHNIQUE OF FAULTY ELEMENT DETECTION IN RURAL POWER SUPPLY SYSTEMS

**Ключевые слова:** система электроснабжения, распределительная сеть, надёжность, теория графов, техническая диагностика, дерево проверок.

Надёжность как свойство системы электроснабжения сохранять работоспособность в течение требуемого времени должна быть обеспечена с наименьшей возможной затратой трудовых и материальных ресурсов. Рост количества отказов, неисправностей и сбоев в электрических сетях среднего и низкого напряжений в сельской местности, на удалённых и изолированных территориях приводит к необходимости эффективного поиска отказавшего (неисправного) элемента, поэтому проблема поддержания нормативов надёжности распределительных электрических сетей среднего и низкого напряжений чрезвычайно актуальна. Опыт эксплуатации рассматриваемых систем электроснабжения показывает, что длительность поиска дефектов существенно больше времени их устранения, поэтому упрощённые методики поиска неисправностей элементов анализируемых сетей представляют новые возможности повышения эффективности их работы. В условиях неопределённости, недостатка и часто недостоверности информации об отказах элементов СЭС, а также при практическом отсутствии современных средств контроля поставлена задача разработки упрощённой методики поиска неисправного элемента. Предлагается относительно простой метод поэтапных проверок, когда для каждого элемента имеются два исхода: «исправен», «неисправен». Метод даёт наибольший эффект при использовании его в ситуациях недостаточно высокой квалификации персонала, у которого отсутствуют навыки распознавания наблюдаемых при отказах (повреждениях, сбоях) симптомов. Основа метода – построение бинарного дерева проверок элементов системы электроснабжения, который может существенно повысить эффективность функционирования потребителя. Показаны возможности использования математического аппарата теории графов для решения задачи поиска отказавшего элемента системы электроснабжения. Приведённые примеры показывают возможности применения теории графов при использовании метода последовательных проверок в разных схемах и разными способами. Отмечено, что проведение поиска неисправности для любой системы

электроснабжения, представленной графом, содержащим гамильтонов путь, сводится к случаю последовательно соединённых элементов.

**Keywords:** electric power supply system, distribution network, reliability, graphs theory, technical diagnostics, check list.

Reliability, as a property of the power supply system to remain operational for the required time, should be ensured with the least possible expenditure of labor and material resources. The increase of the number of failures and malfunctions in medium and low voltage electrical networks in rural areas, in remote and isolated territories leads to the need for an effective search for a faulty element. Therefore, the problem of maintaining reliability standards for medium and low voltage distribution electric networks is extremely relevant. The experience of operation of the considered power supply system shows that the duration of the search for defects is significantly longer than the time to eliminate them. Therefore, simplified troubleshooting techniques for the elements of the analyzed networks present new opportunities to improve the efficiency of their operation. In conditions of uncertainty, lack and often unreliability of information about failures of rural power supply system elements as well as in the practical absence of modern controls, the task is to develop a simplified methodology for finding a faulty element. A relatively simple method of element-by-element checks is proposed where there are two outcomes for each element: "serviceable" and "defective". The method gives the greatest effect when used in situations of insufficiently qualified personnel who lack the skills to recognize the symptoms observed during failures or damages. The basis of the method is the construction of a binary tree of checks of elements of the power supply system which can significantly increase the efficiency of the consumer functioning. The possibilities of using the mathematical apparatus of graph theory to solve the problem of finding a failed element of an electrical supply system are shown. The examples given show the possibilities of applying graph theory when using the method of sequential checks in different schemes and in different ways. It is emphasized that troubleshooting for any power supply system represented by a graph containing a Hamiltonian path is reduced to the case of sequentially connected elements.

**Папков Борис Васильевич**, д.т.н., профессор ГБОУ ВО Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Нижегородская обл., Российская Федерация, e-mail: boris.papkov@gmail.com.

**Papkov Boris Vasilevich**, Dr. Tech. Sci., Prof. Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, e-mail: boris.papkov@gmail.com.

**Осокин Владимир Леонидович**, к.т.н., доцент, ГБОУ ВО Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, г. Княгинино, Нижегородская обл., Российская Федерация, e-mail: osokinvl@mail.ru.

**Osokin Vladimir Leonidovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, e-mail: osokinvl@mail.ru.

### Введение

Современные системы электроснабжения (СЭС) состоят из большого количества комплектующих элементов и имеют сложную структуру, что затрудняет решение задач диагностики их состояния, включая обнаружение отказов.

В современных распределительных сетях электрических систем (ЭЭС) и в системах электроснабжения (СЭС) напряжением 35/6-10/0,4 кВ, к которым относится большинство электрических сетей среднего и низкого напряжений сельской местности, удалённых и изолированных территорий, необходимо решение ряда актуальных задач, связанных с реализацией инвестиционных программ, устранения дефицита мощностей, поиска баланса между надёжностью и эффективностью оборудования, выбора приоритетов разработки эффективного механизма поддержки технологий и ряд других. Поэтому проблема поддержания нормативов надёжности распределительных электрических сетей среднего и низкого напряжений многогранна и требует комплексного решения.

Особое место занимают задачи поиска неисправностей и определения повреждённых элементов СЭС и мест их повреждения в распределительных электрических сетях среднего и низкого напряжений.

Надёжность как свойство СЭС сохранять работоспособность в течение требуемого времени должна быть обеспечена с наименьшей возможной затратой трудовых и материальных ресурсов. Но актуальна и обратная задача: обеспечение максимальной надёжности имеющимися ресурсами средствами. В период эксплуатации элементы оборудования СЭС изменяют свои свойства в зависимости от длительности работы (физический износ, старение изоляции, уменьшение способности выдерживать максимальные расчётные нагрузки), техногенных и природных явлений, несоблюдения правил технической эксплуатации при нехватке и низкой квалификации оперативного и ремонтного персонала и др., что приводит к отказам элементов СЭС.

### Состояние проблемы

Поиск неисправностей в СЭС, особенно в сельских распределительных сетях, связан с особенностями, неоднократно отмеченными в исследованиях [1-5]. Отмечается, что для своевременного выявления отказавших элементов оборудования, устранения сбоев и дефектов электротехнические и линейные службы должны работать в чрезвычайно напряжённом режиме.

Очевидно, что в современной электроэнергетике активно развиваются энергорайоны с системами распределённой генерации (РГ), возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), накопителями электроэнергии (НЭЭ), осуществляется переход к интеллектуальным средствам контроля, управления и защиты как для проектируемых, так и в действующих электрических сетях. Однако СЭС сельских и малонаселённых районов связаны пока ещё с рядом структурных, аппаратных и административных особенностей, осложнённых технико-экономическими ограничениями. Опыт эксплуатации СЭС показывает, что длительность поиска дефектов существенно больше времени их устранения, поэтому разработке методов, их обнаружения и поиска, на основе которых в более короткий срок определяется дефектный (отказавший) элемент, уделяется большое внимание.

Поскольку диагностические процессы характеризуются различной эффективностью, задача состоит в том, чтобы продолжительность поиска неисправности (отказавшего элемента), число проверок (испытаний), стоимость и трудоёмкость были бы минимальными [6, 7].

В этой связи упрощённые методики поиска неисправностей элементов анализируемых СЭС представляют новые возможности повышения эффективности их работы.

### Постановка задачи

В общем случае должно быть достоверно известно об отказе одного  $n_i$  из  $N$  элементов в анализируемой СЭС (объекте контроля). Вероятности отказа каждого элемента  $q_i$  и количество  $T$  возможных методик (тестов)  $t_i$  обнаружения неисправного элемента также известны. Применение любого теста  $t_i$  рассматривается как раз-

биение множества  $N$  на два подмножества:  $N_i$  и  $\bar{N}_i$ . При исходе «не успешен» отказавший элемент находится в подмножестве  $N_i$ , а при исходе «успешен» – в  $\bar{N}_i$ . Дальнейшая процедура обнаружения отказавшего элемента может осуществляться при помощи того же или другого  $t \in T$  теста, позволяющего дальнейшие разбиения подмножества  $N_i$ , содержащего отказавший элемент [7].

Для решения поставленных задач в [6, 7] предлагается относительно простой метод поэлементных проверок, дающий наибольший эффект при использовании его в ситуациях недостаточно высокой квалификации персонала, у которого отсутствуют навыки распознавания наблюдаемых при отказах (повреждениях, сбоях) симптомов. Так, при поэлементной проверке для каждого элемента имеются два исхода: «исправен», «неисправен». Если исправен, приступают к проверке следующего элемента и так до обнаружения неисправного. Задача состоит в том, чтобы определить последовательность проверок для обеспечения максимальной скорости получения информации об отказе.

Для СЭС, состоящей из функционально связанных между собой элементов (блоков)  $v_1, v_2, \dots, v_n$ , вводятся следующие условия.

1. Каждый элемент (ТП, РУ, ЛЭП) имеет один вход и один или несколько выходов, которые представляют собой входы в другие элементы СЭС или подключены к выходам других элементов. Выход каждого элемента подключен к входам одного или нескольких элементов, или служит внешним выходом непосредственно к потребителю.

2. Рассматриваемая СЭС имеет единственный выход (требование в общем случае не обязательное, но принято для упрощения).

3. Каждый элемент может находиться в одном из двух несовместных состояний: «исправен», «неисправен».

4. Система содержит не более одного неисправного элемента, то есть неисправность любого элемента вызывает отказ СЭС.

5. На все входы системы подаётся заданный набор входных воздействий (напряжений, токов (сигналов)). Если все элементы исправны, то их выходные отклики «допустимы». Сигнал на выходе неисправного элемента «недопустим». Отклик исправного элемента, если хотя бы на один из его входов подано «недопустимое» воздействие, также «недопустим».

6. Измерение  $\pi_i$  сигнала на выходе любого элемента  $v_i$  всегда позволяет установить, «допустим» этот сигнал или нет. Измерение  $\pi_i$  даёт отрицательный результат тогда и только тогда, когда элемент  $v_i$  неисправен сам, либо он может быть достижим при любом другом неисправном элементе этой СЭС.

Таким образом, процесс поиска отказавшего элемента (неисправности) состоит из нескольких этапов, каждый из которых включает набор «испытаний» по заранее заданной программе. Каждый новый  $i$ -тый этап определяется на основе информации (сигнала), полученный в предыдущем испытании.

### Методы решения и результаты

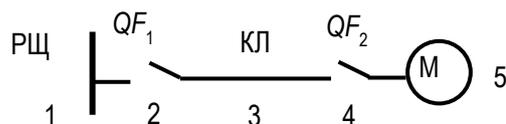
Метод поэлементных проверок возможен при наличии информации о вероятностях отказов элементов СЭС  $q_i$  и времени их восстановления  $t_i$ . В целях упрощения примем  $t_1 = t_2 = \dots = t_n$ . Допустим, что среди  $N$  элементов СЭС имеется элемент с вероятностью отказа  $q_{\max}$ , тогда вероятность отказа любого другого элемента этой СЭС  $q_{i-1} < q_{\max}$ . Поэтому на первом шаге для оценки работоспособности выбирается именно этот элемент, что даёт максимум информации о состоянии СЭС. На втором и последующих шагах выбираются элементы, у которых вероятность отказа имеет наибольшее значение по сравнению с другими, ещё не проверенными. Таким образом, если  $t_i = const$ , то проверка осуществляется в последовательности

$$q_1 \geq q_2 \geq \dots \geq q_n.$$

Однако практически в любых технических системах, в том числе и СЭС, времена восстановления разнородных элементов различны  $t_i \neq const$ . В этом случае оптимальная последовательность проверок определяется как

$$q_1/t_1 \geq q_2/t_2 \geq \dots \geq q_n/t_n. \quad (1)$$

Рассмотрим СЭС, состоящую из  $N = 5$  элементов (рис. 1), с условными показателями надёжности, приведёнными в таблице 1.



**Рис. 1. Схема участка сети:**  
**РЩ** – распределительный щит;  
**QF** – автоматические выключатели;  
**КЛ** – кабельная линия;  
**М** – электродвигатель (потребитель)

Таблица 1

$n_i$	1	2	3	4	5
$q_i$	0,05	0,1	0,2	0,1	0,3
$t_i$	4	2	8	2	8

На основании (1) результаты вычислений показаны в таблице 2.

Таблица 2

$n_i$	1	2	3	4	5
$q_i / t_i$	0,0125	0,05	0,025	0,05	0,0375

Из расчёта следует, что минимизация среднего времени поиска повреждённого элемента возможна при соблюдении проверок элементов

СЭС в следующей последовательности:  $n_1, n_3, n_5, n_2$  или  $n_4$ .

Целый ряд задач, связанных с проблемой поиска отказавшего элемента, возникающих в сельских и подобных им СЭС, решается при практически полном отсутствии достоверной информации о вероятностях отказов и длительностях восстановлений в конкретных условиях их эксплуатации. В этой связи использование метода последовательных проверок может давать большую погрешность. При этом возможно использование методов построения дерева проверок, основанных на теории графов [8, 9].

Участок схемы СЭС и структура связей между её элементами представлены на рисунке 2.

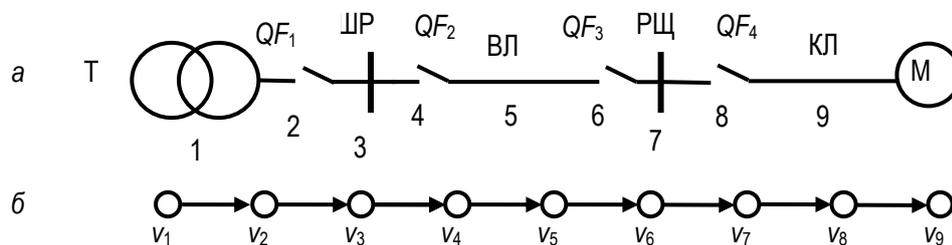


Рис. 2. Схема (а) и граф (структура) (б) СЭС:

**Т** – трансформатор; **QF** – автоматические выключатели; **ВЛ** – воздушная линия; **КЛ** – кабельная линия; **ШР** – шкаф распределительный; **РЩ** – распределительный щит; **М** – электродвигатель (потребитель)

Структура такой системы описывается орграфом с вершинами  $v_1, v_2, \dots, v_n$  и дугами  $e_1, e_2, \dots, e_m$ , соответствующими их функциональным связям. Условно считая отказы всех элементов равновероятными, требуется подсчитать среднее число проверок, разработав методику поиска неисправного элемента в виде бинарного дерева проверок  $\pi_i$ , указывающего, в каком порядке эти проверки проводить и какие выводы следует сделать.

Подобным образом можно представить не только последовательное соединение элементов электрической системы, но и последовательность каскадов фильтрации в измерительном органе релейной защиты, а также любую схему в виде графа, имеющего Гамильтонов путь. Напомним [8, 9], что Гамильтонов путь в графе – путь, проходящий через каждую вершину графа в точности по одному разу.

Очевидно, что оценка математического ожидания минимального количества проверок рабо-

тоспособности элементов СЭС ускорит проведение ремонтных работ (замен) и сократит длительность нарушения электроснабжения потребителя.

Допустим, что сигнал на выходе системы (на выходе элемента  $v_9$ ) «недопустим», то есть отказ недопустим, и произошло нарушение электроснабжения потребителя [10-12].

Дерево проверок для поиска неисправного элемента можно построить тремя способами. Для каждого дерева подсчитаем среднее число проверок. Если на выходе проверяемого элемента  $v_i$  сигнал «допустим», проверка  $\pi_i$  дает положительный ответ. На графе это обозначается знаком «+»; в противном случае ответ считается отрицательным и отмечается знаком «-» (рис. 3).

Способ «А» построения дерева проверок. Проверки проводятся так, что каждая из них разбивает множество вершин исходного графа (рис. 2) примерно пополам.

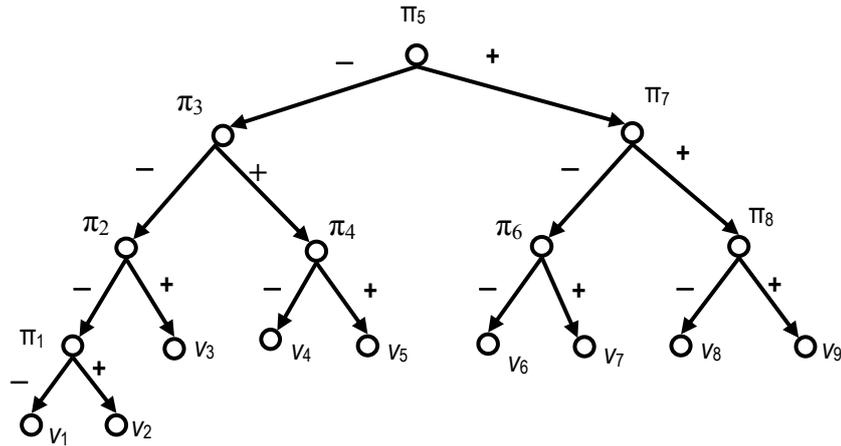


Рис. 3. Способ «А» поиска неисправного элемента

Первая проверка  $\pi_5$  проводится на выходе элемента  $v_5$ . Она разбивает множество всех элементов на два подмножества  $A$  и  $B$ :

$$A = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}; B = \{v_6, v_7, v_8, v_9\}.$$

Если проверка  $\pi_5$  дает положительный ответ «+», все элементы первого подмножества исправны, а неисправный находится во втором подмножестве.

Следующая проверка  $\pi_7$  производится на выходе элемента  $v_7$ .

Если проверка  $\pi_5$  дает отрицательный ответ «-», то есть на выходе элемента  $v_5$  получен «недопустимый» сигнал, то неисправный элемент находится среди элементов  $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ , и следующая проверка  $\pi_3$  производится на выходе элемента  $v_3$ .

Проверка  $\pi_7$  разбивает множество  $B = \{v_6, v_7, v_8, v_9\}$  на два подмножества:  $C = \{v_6, v_7\}$  и  $D = \{v_8, v_9\}$ . Если проверка  $\pi_7$  дает положительный ответ, делается проверка  $\pi_8$ . В результате выясняется, какой из двух элементов  $v_8$  или  $v_9$  неисправен.

Проанализировав подобным образом все другие возможности, получено дерево (рис. 3). Каждая его ветвь ведет от первой проверки (корень) к одному из элементов системы (висячие вершины). При конкретном поиске неисправного элемента получаем лишь одну ветвь дерева, которая ведет в этот элемент.

Если, например, неисправен элемент  $v_1$  (рис. 3), то потребуется 4 проверки для его обнаружения:  $\pi_5, \pi_3, \pi_2, \pi_1$ . Эти же проверки необходимы и в случае неисправности элемента  $v_2$ . При неисправности любого другого элемента необходимо сделать 3 проверки. Так, для обнаружения

неисправности элемента  $v_9$  потребуются проверки  $\pi_5, \pi_7, \pi_8$ .

Таким образом, количество проверок, необходимых для поиска неисправного элемента, является случайной величиной  $X$ . Так как вероятности неисправностей всех элементов приняты одинаковыми  $p = 1/n = 1/9 \approx 0,1$ , то случайная величина  $X$  (количество проверок) имеет дискретный закон распределения [8, 11], заданный таблицей 1, где  $m_i$  – количество элементов СЭС, для которых случайная величина  $X$  принимает значения  $x_3 = 7$  и  $x_4 = 2$ .

Таблица 3

$X_i$	3	4
$p_i = m_i/n$	$x_3 = 7/9 = 0,78$	$x_4 = 2/9 = 0,22$

Математическое ожидание количества проверок анализируемой системы определяется как  $M(X_1) = \sum_{i=1}^2 x_i p_i = 3 \cdot 0,78 + 4 \cdot 0,22 = 3,22$ .

Способ «В» построения дерева проверок. Проверки проводятся последовательно на выходе каждого элемента схемы (рис. 4). Если пути дерева, построенного первым способом, имели примерно одинаковую длину, то здесь получаются как короткие, так и длинные пути.

Если неисправен элемент  $v_1$ , то для его обнаружения потребуется всего одна проверка  $\pi_1$ . Если неисправным окажется элемент  $v_9$ , то для поиска неисправности потребуется 8 проверок.

Математическое ожидание количества проверок вычисляется так же, как и в первом случае:

$$M(X_2) = \sum_{i=1}^8 x_i p_i = 3,6.$$

Очевидно, что первый способ эффективнее, так как  $M(X_1) < M(X_2)$ .

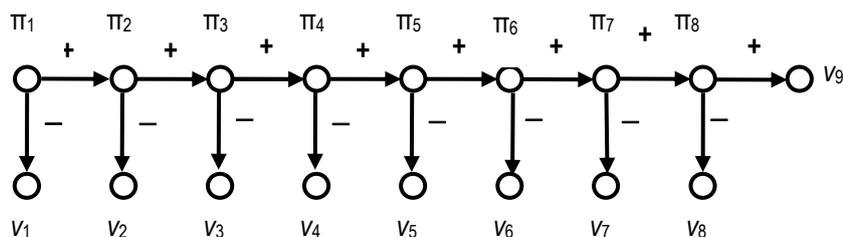


Рис. 4. Способ «В» поиска неисправного элемента

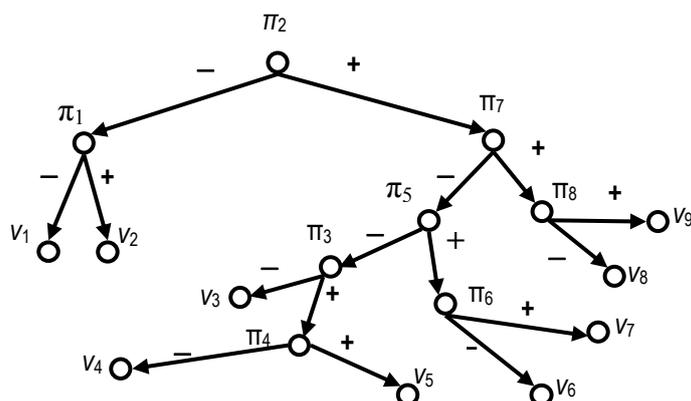


Рис. 5. Способ «С» поиска неисправного элемента

Способ «С» построения дерева проверок. Выбирается любой промежуточный элемент (например,  $v_2$ ) исходного графа (рис. 2) и производится его проверка  $\pi_2$ . Далее строится дерево проверок в соответствии с правилами, аналогичными для первого способа (рис. 5).

Математическое ожидание количества проверок анализируемой системы (рис. 2) способом «С» определяется как

$$M(X_3) = \sum_{i=1}^4 x_i p_i = 2 \cdot 0,22 + 3 \cdot 0,22 + 4 \cdot 0,33 + 5 \cdot 0,22 = 3,52.$$

Результат, полученный при проверках способом «С», является промежуточным между «А» и «В»:

$$M(X_1) < M(X_3) < M(X_2).$$

### Заключение

В условиях неопределённости, недостатка и часто недостоверности информации об отказах элементов СЭС, а также при практическом отсутствии современных средств контроля поставлена задача разработки упрощенной методики поиска неисправного элемента.

Предложен относительно простой метод элементарных проверок при наличии информации о вероятностях отказов элементов СЭС и времени их восстановления.

Показана необходимость разработки упрощенных методов, заключающихся в возможности использования математического аппарата теории графов.

Предложен метод построения дерева проверки элементов анализируемого класса СЭС, который обеспечивает максимальную скорость получения информации и существенно повышает эффективность функционирования потребителя.

Отмечено, что проведение поиска неисправности для любой СЭС, представленной графом, содержащим гамильтонов путь, сводится к рассмотренному случаю последовательно соединенных элементов.

В условиях стареющего оборудования СЭС при росте количества отказов и сбоев для поиска неисправного элемента следует использовать метод «А» и дерево проверок, изображённое на рисунке 3.

Методы «В» и «С», относительно мало отличающиеся математическими ожиданиями, при поиске повреждённых (отказавших) элементов СЭС в конкретных условиях могут дать результат, существенно отличающийся от оптимального.

**Библиографический список**

1. Федосенко, Р. Я. Эксплуатационная надёжность электросетей сельскохозяйственного назначения / Р. Я. Федосенко, А. Я. Мельников. – Москва: Энергия, 1977. – 320 с. – Текст: непосредственный.
2. Рыбаков, Л. М. Методы и средства обеспечения работоспособности электрически распределительных сетей 10 кВ / Л. М. Рыбаков. – Москва: Энергоатомиздат, 2004. – 421 с. – Текст: непосредственный.
3. Куликов, А. Л. Дистанционное определение мест повреждения ЛЭП методами активного зондирования / А. Л. Куликов. – Москва: Энергоатомиздат, 2006. – 148 с. – Текст: непосредственный.
4. Шуметов, В. Г. Разработка математической модели динамики отказов линии 0,38 кВ на основе оценки уровня их надёжности / В. Г. Шуметов, Ю. Д. Волчков, Н. В. Махиянова. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 1 (92). – С. 60-69. – EDN YWLXUD.
5. Илюшин, П. В. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределённой генерацией / П. В. Илюшин, А. Л. Куликов. – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 364 с. – Текст: непосредственный.
6. Дедков, В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем / В. К. Дедков, Н. А. Северцев. – Москва: Высшая школа, 1976. – 408 с. – Текст: непосредственный.
7. Надёжность технических систем: справочник / под редакцией И. А. Ушакова. – Москва: Радио и связь, 1985. – 608 с. – Текст: непосредственный.
8. Папков, Б. В. Теоретические основы надёжности и эффективности электроснабжения / Б. В. Папков, В. Л. Осокин. – Старый Оскол: ТНТ, 2019. – 592 с. – Текст: непосредственный.
9. Папков, Б. В. Элементы теории графов в задачах электроэнергетики / Б. В. Папков, А. Л. Куликов. – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 176 с. – Текст: непосредственный.
10. Папков, Б. В. Задачи надёжности современного электроснабжения / Б. В. Папков, П. В. Илюшин, А. Л. Куликов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 260 с. – Текст: непосредственный.
11. Папков, Б. В. Вероятностные и статистические методы оценки надёжности элементов и систем электроэнергетики: теория, примеры,

задачи / Б. В. Папков, В. Л. Осокин. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 424 с. – Текст: непосредственный.

12. Saha, M., Izykowski, J., Rosolowski, E. (2010). Fault Location on Power Networks. DOI: 10.1007/978-1-84882-886-5.

**References**

1. Fedosenko R.Ia., Melnikov A.Ia. Ekspluatatsionnaia nadezhnost elektrosetei selskokhoziaistvennogo naznacheniiia. – Moskva: Energiia, 1977. – 320 s.
2. Rybakov L.M. Metody i sredstva obespecheniia rabotosposobnosti elektricheski raspredelitelnykh setei 10 kV. – Moskva: Energoatomizdat, 2004. – 421 s.
3. Kulikov A.L. Distantcionnoe opredelenie mest povrezhdeniia LEP metodami aktivnogo zondirovaniia. – Moskva: Energoatomizdat, 2006. – 148 s.
4. Shumetov, V. G. Razrabotka matematicheskoi modeli dinamiki otkazov linii 0,38 kv na osnove otsenki urovnia ikh nadezhnosti / V. G. Shumetov, Iu. D. Volchkov, N. V. Makhiianova // Vestnik NGIEI. – 2019. – No. 1 (92). – S. 60-69. – EDN YWLXUD.
5. Iliushin P.V., Kulikov A.L. Avtomatika upravleniia normalnymi i avariinymi rezhimami energoraionov s raspredelennoi generatsiei. – N. Novgorod: NIU RANKhiGS, 2019. – 364 s.
6. Dedkov V.K., Severtsev N.A. Osnovnye voprosy ekspluatatsii slozhnykh sistem. – Moskva: Vysshaia shkola, 1976. – 408 s.
7. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem. Spravochnik / pod red. I.A. Ushakova. – Moskva: Radio i sviaz, 1985. – 608 s.
8. Papkov B.V., Osokin V.L. Teoreticheskie osnovy nadezhnosti i effektivnosti elektrosnabzheniia. – Staryi Oskol: TNT, 2019. – 592 s.
9. Papkov B.V., Kulikov A.L. Elementy teorii grafov v zadachakh elektroenergetiki. – N. Novgorod: NIU RANKhiGS., 2019. – 176 s.
10. Papkov B.V., Iliushin P.V., Kulikov A.L. Zadachi nadezhnosti sovremennogo elektrosnabzheniia. – Moskva; Vologda: Infra-Inzheneriia, 2022. – 260 s.
11. Papkov, B.V., Osokin V.L. Veroiatnostnye i statisticheskie metody otsenki nadezhnosti elementov i sistem elektroenergetiki: teoriia, primery, zadachi. – Staryi Oskol: TNT, 2017. – 424 s.
12. Saha, M., Izykowski, J., Rosolowski, E. (2010). Fault Location on Power Networks. DOI: 10.1007/978-1-84882-886-5.