

Selection of Frequency Estimation of 6-10 kV-Overhead Lines' Technical Condition Based on Reliability Statistical Studies

Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M.

Vyatka State University
Kirov, Russian Federation

Abstract. The aim of this work is to justify a criterion selection for the frequency estimation of the 6-10 kV-overhead lines' technical condition (OL), using the reliability indicators of the overhead lines (failure intensity, mean time between failures, reconditioning intensity and recovery mean time). To achieve the goal a retrospective method was used for obtaining information on reliability and a statistical method for analyzing the reliability of the multiple-action products to justify the frequency criterion. Certain methods of mathematical statistics were applied to process the information obtained. In particular, the Kolmogorov criterion was used to support the hypothesis on the exponential law of distribution of the OL failures and the time of their recovery. Based on the analysis of the 6-year overhead line failures database, the exponential law hypothesis of distribution of the overhead line failures and the time of their recovery was accepted and confirmed. The most essential result is the experimental and theoretical confirmation that the complex indicator of reliability, i.e., the technical preparedness coefficient with account of self-eliminating failures, can be used as the frequency criterion for verification of the OL technical condition. High precision of the criterion has been proved even at a small number of failures. Significance of the results obtained consists in that, while controlling the dynamics of the coefficient and comparing it with the normative values with respect to the OL reliability category, it is possible in due time to fix a date for the OL technical condition checking.

Keywords: overhead lines, technical availability factor, Kolmogorov criterion, criterion for the frequency of assessing overhead lines, mathematical model of reliability.

DOI: 10.5281/zenodo.4316637

UDC: 621.315.17

Alegerea frecvenței de evaluare a stării tehnice a liniilor aeriene de 6-10 kV pe baza rezultatelor studiilor statistice privind fiabilitatea acestora

Basmanov V.G., Holmanskikh V.M.

Universitatea de Stat Vyatka
Kirov, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării constă în fundamentarea selecției criteriului pentru periodicitatea evaluării stării tehnice a liniilor aeriene (LEA) 6-10 kV utilizând indicatorii de fiabilitate ai LEA (rata de eșec, timpul mediu dintre defecțiuni, rata de recuperare și timpul mediu de recuperare). Pentru a atinge acest obiectiv, a fost utilizată o metodă retrospectivă de obținere a informațiilor despre fiabilitate și pentru a fundamenta criteriul periodicității - o metodă statistică pentru analiza fiabilității produselor cu acțiune multiplă. Pentru procesarea informațiilor obținute, au fost utilizate metode separate de statistici matematice, în special, criteriul Kolmogorov a fost utilizat pentru a confirma ipoteza legii exponențiale a distribuției refuzurilor liniilor aeriene și a timpului de recuperare a acestora. Pe baza analizei bazei de date privind refuzurile liniilor aeriene în intervalul de timp egal cu 6 ani rețelelor electrice, s-a confirmat ipoteza acceptată despre legea exponențială a distribuției refuzurilor liniilor aeriene și timpul recuperării acestora. Lucrarea definește indicatorii de fiabilitate reali ai liniilor aeriene, iar compararea cu valorile de referință a indicat că acestea nu depășesc aceste valori, în ciuda duratei de viață destul de lungi a liniei aeriene. Cel mai semnificativ rezultat este confirmarea experimentală și teoretică că, ca criteriu pentru frecvența verificării stării tehnice a liniilor aeriene, este posibil să se utilizeze indicatorul de fiabilitate integrat, factorul de disponibilitate tehnică, luând în considerare defecțiunile de autocorectare. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că, controlând dinamica acestui coeficient și comparându-l cu valoarea standard, în funcție de categoria de fiabilitate a liniei aeriene, este posibilă stabilirea la timp a timpului pentru verificarea stării tehnice a liniei aeriene.

Cuvinte-cheie: linii aeriene, factor de pregătire tehnică, criteriul Kolmogorov, criteriu pentru frecvența diagnosticării liniilor aeriene, model matematic de fiabilitate, indicator complex de fiabilitate.

Выбор периодичности оценки технического состояния воздушных линий 6–10 кВ по результатам статистических исследований их надежности

Басманов В.Г., Холманских В.М.

Вятский государственный университет
г. Киров, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является обоснование выбора критерия периодичности оценки технического состояния воздушных линий (ВЛ) 6–10 кВ с использованием показателей надежности ВЛ (интенсивность отказов, средняя наработка на отказ, интенсивность восстановления и среднее время восстановления). Для достижения поставленной цели применен ретроспективный метод получения информации о надежности, а для обоснования критерия периодичности - статистический метод анализа надежности изделий многократного действия. Для обработки полученной информации применялись отдельные методы математической статистики, в частности, для подтверждения гипотезы об экспоненциальном законе распределения отказов ВЛ и времени их восстановления использовался критерий Колмогорова. На основе анализа базы данных об отказах ВЛ за 6 лет сетевого района была подтверждена принятая гипотеза об экспоненциальном законе распределения отказов ВЛ и времени их восстановления, кроме того, было установлено, что 65 % всех отказов приходятся на самоустраивающиеся, т.е. ВЛ после отказов включались в работу средствами автоматического или ручного повторного включения. В работе определены фактические показатели надежности ВЛ, при сравнении которых со справочными значениями, было установлено, что они не превышают эти значения, несмотря на довольно большие сроки эксплуатации ВЛ. Наиболее существенным результатом является экспериментальное и теоретическое подтверждение того, что в качестве критерия периодичности проверки технического состояния ВЛ можно использовать комплексный показатель надежности - коэффициент технической готовности с учетом самоустраивающихся отказов. Этот коэффициент наиболее полно характеризует текущее состояние ВЛ с точки зрения ее эксплуатационной надежности. Доказана высокая точность критерия даже при малом количестве отказов. Значимость полученных результатов состоит в том, что, контролируя динамику коэффициента и сравнивая его с нормативным значением в зависимости от категории надежности ВЛ можно своевременно назначать сроки проверки технического состояния ВЛ.

Ключевые слова: воздушные линии, коэффициент технической готовности, критерий Колмогорова, критерий периодичности диагностики воздушных линий, математическая модель надежности, комплексный показатель надежности.

Введение

Воздушные линии (ВЛ) являются одним из главных элементов систем электроснабжения промышленности и населения. Протяженность ВЛ 6–10 кВ в России составляет более 1,5 млн. км – почти 45% от общей протяженности линий электропередачи 0,4–110 кВ. Около 70% всех нарушений электроснабжения происходит в сетях данного класса напряжения [1].

При существующем уровне надежности в электроэнергетике экономике России наносится ущерб примерно в 460–461 млрд. руб. в год [2]. Поэтому сегодня основными задачами при эксплуатации ВЛ 6–10 кВ являются улучшение технического состояния действующих электрических сетей и повышение надёжности входящих в нее элементов.

ВЛ – наиболее повреждаемые элементы электрических сетей из-за территориальной протяженности и подверженности влиянию климатическим воздействиям. Их параметр потока отказов на порядок выше параметров потока отказов трансформаторов и выключателей [3]. Поэтому контроль состояния ВЛ

необходим для поддержания бесперебойности питания.

Аварийность сетей 6–10 кВ в значительной степени определяется аварийностью ВЛ, и, соответственно, именно в этой составляющей сетей лежит основной потенциал повышения надежности их работы в целом. В работах [4–14] представлены типичные причины неисправностей, а также результаты анализа эксплуатационных данных о неисправности в воздушных линиях электропередач различных электросетей, например, в работе [7] приведены типичные причины неисправностей в воздушной линии электропередачи по данным взятым из опросов различных агентств по всему миру. В работах [8–10] представлены результаты анализа эксплуатационных данных о неисправности воздушных и кабельных линий среднего напряжения польской национальной энергосистемы. В [14] отмечено, что большая часть ВЛ была введена в эксплуатацию 40–50 лет назад, тогда это позволило избавиться от большого количества неэкономичных и дорогостоящих маломощных электростанций и осуществить электроснабжение всех потребителей городов и сельской местности от электрических сетей

объединённых энергосистем. При этом срок службы проводов марок А и АС составляет 45 лет [15], а срок службы опор составляет 30–35 лет [16]. К настоящему времени ресурс этих линий исчерпан, либо близок к нулю. Оценка технического состояния и остаточного ресурса ВЛ при таких длительных сроках их эксплуатации крайне важна, что подчеркивается в работах [7-13].

В [17] констатируется что 71 % технологических нарушений приходится на ВЛ. Данные выводы автор статьи делает исходя из анализа выборки технологических нарушений в элементах электрических сетей, взятых из базы данных Объединенной энергетической системы Средней Волги (ОЭС СВ) «Анализ расследования технологических нарушений в работе оборудования и энергообъектов» за период с 2001 по 2010 гг.». На сегодняшний день удельное число аварийных отключений на 100 км длины воздушной линии 6–10 кВ составляет 6–7 раз в год, а для районов со сложными геолого-климатическими условиями 20–30 раз в год [18].

В [19] рассчитаны основные показатели надежности ВЛ 6–10 кВ (параметр потока отказов и среднее время восстановления) на основе данных об аварийных отключениях в сетях 6–10 кВ РУП «Гомельэнерго». Автор анализирует распределение отказов по месяцам года и времени суток, также рассматриваются причины отключений. Аналогичные расчеты по определению основных показателей надежности ВЛ, а также результаты их анализа приведены и в других работах [8-11,13,20-33], например, в [8] для анализа проблемы был применен непараметрический метод анализа данных о надежности электросетей, а в [9,10] приведен порядок количественной оценки надежности инженерных систем вероятностными методами. Аналогичные расчеты по количественной оценке надежности в электроэнергетических системах приводятся в [13,20,22-24], для этого используется метод статистического моделирования (метод Монте-Карло). Результаты исследования показывают, что этот метод дает приемлемые показатели надежности.

Новый подход к исследованию критических элементов распределительных систем, основанный на анализе чувствительности показателей надежности с точки зрения изменения интенсивности отказов различных элементов системы

предложен в [25], а в [26] приведена новая математическая формулировка для описания модели надежности ремонтпригодных компонентов приведена, модель основана на концепции Марковской цепи. Данная концепция применяется и в других работах, например, в [27].

В [28] предлагается классификация критериев надежности энергосистем на основе четырех характеристик: а) множества рассматриваемых состояний системы, б) целевой функции, в) допустимых действий в реальном времени, г) необязательных нетехнических ограничений.

В [8-11,29] рассматривается проблема надежности польских линий электропередач среднего напряжения, а в [30] низкого напряжения.

В данных работах представлены модели и отдельные показатели надежности ВЛ среднего напряжения, а также выполнен анализ сезонности и причин отказов, определены модели и показатели надежности ВЛ низкого напряжения.

В [31] предлагается целостный подход к разработке надежности электрических систем. Рассматриваются в совокупности механизмы отказов, методы испытаний, анализ отказов, методы определения характеристик и модели прогнозирования, которые могут быть использованы для повышения надежности целого ряда устройств.

Анализ приведенных работ по надежности ВЛ подчеркивает, что вопрос поддержания надежности ВЛ весьма актуален. Несмотря на большое разнообразие в подходах и методах исследования надежности ВЛ в многочисленных вышеупомянутых работах, нами не было найдено применение в качестве критерия периодичности проверки технического состояния ВЛ коэффициента технической готовности с учетом самоустраниющихся отказов.

Поэтому можно утверждать, что наш подход по выбору критерия периодичности оценки технического состояния воздушных линий (ВЛ) 6–10 кВ, с использованием показателей надежности ВЛ, является оригинальным.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является обоснование выбора одного из показателей надежно-

сти в качестве критерия периодичности проверки технического состояния ВЛ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу исследования надежности ВЛ по репрезентативным статистическим выборкам об отказах и восстановлениях.

Для решения поставленной задачи применим ретроспективный метод получения информации о надежности, а для обоснования критерия периодичности – статистический метод анализа надежности изделий многократного действия. Для обработки полученной информации будут применяться отдельные методы математической статистики, в частности, для подтверждения гипотезы об экспоненциальном законе распределения отказов ВЛ и времени их восстановления – критерий Колмогорова.

В процессе исследования надежности ВЛ и обработки статистического материала должны быть установлены математические модели, а также показатели надежности ВЛ (интенсивность отказов, средняя наработка на отказ, интенсивность восстановления и среднее время восстановления)

На основе полученных результатов, в качестве критерия периодичности проверки технического состояния ВЛ необходимо предложить такой показатель надежности, который позволит своевременно назначать сроки проверки технического состояния ВЛ, контролируя динамику изменения этого показателя по регулярным статистическим данным об отказах ВЛ.

Должна быть доказана высокая точность определения опытного значения показателя даже при малом количестве опытных данных.

II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Одним из главных путей повышения надежности ВЛ является своевременная оценка их технического состояния, без которой невозможно принять правильное решение по продолжению их эксплуатации, ремонту или замене.

На практике для оценки технического состояния ВЛ 35 кВ и выше используется стандарт ОАО «ФСК ЕЭС» [34]. Для ВЛ 6–10 кВ такого стандарта не предусмотрено. Применяется сборник директивных указаний по повышению надежности... Часть I «Эксплуатация электроустановок распределительных сетей 0,38–20 кВ» (СДУ-2016 Ч.1) [35]. Со-

гласно этого документа периодичность оценки — технического состояния ВЛ реализуется по календарному времени эксплуатации ВЛ или по комплексным коэффициентам технического состояния элементов ВЛ.

Чаще всего такая оценка осуществляется случайным образом, выборочно, по ограниченным параметрам ВЛ. Это приводит к неоправданным затратам на оценку, которая довольно часто не позволяет объективно и своевременно предсказать предаварийное состояние ВЛ.

Нами предлагается, в предыдущих работах, на основе метода контроля надежности изделий многократного действия и на примере теоретического исследования характеристик потока их восстановлений [36], в качестве критерия периодичности диагностики кабельных линий 10 кВ использовать коэффициент технической готовности K_{testf} с учетом самоустраняющихся отказов, т.к. он наиболее полно характеризует текущее состояние кабельной линии с точки зрения ее эксплуатационной надежности.

После анализа статистических исследований надежности ВЛ мы пришли к выводу, что периодичность оценки их технического состояния можно выполнить аналогично — по текущему значению коэффициент технической готовности K_{testf} с учетом самоустраняющихся отказов.

Обоснование критерия периодичности оценки технического состояния ВЛ

Покажем решение вопроса назначения периодичности оценки технического состояния ВЛ, на основе анализа статистических данных об отказах ВЛ и результатов теоретической работы [36].

В настоящее время практически во всех электрических сетях заполняются электронные журналы регистрации времени возникновения и устранения отказов, с указанием причин и характера повреждений, а также краткого описания ремонта ВЛ.

В данной работе были проанализированы электронные базы данных об отказах, предоставленные одним из филиалов сетевой компании. Достоверность предоставленных данных подтверждается регистрацией отказов в филиале. Объем исследования составил 78 воздушных линий 10 кВ на 17 подстанциях в 3 районах филиала. Анализировались статистические данные за 6 лет. Для соблюдения

однородности статистического материала изучались однотипные объекты (ВЛ–10 кВ) в трех разных климатических районах А, В, С филиала отдельно друг от друга.

Для объективного сравнения надежности различных по протяженности ВЛ их показатели надежности были приведены к нормированной длине 1 км.

Математические модели надежности ВЛ по районами в целом по филиалу

Расчеты надежности СЭС имеют свои специфические особенности в том плане, что поток отказов может быть принят простейшим, а время восстановления — подчиняющемуся экспоненциальному закону [37–39].

Поэтому априори была принята гипотеза о том, что распределение отказов ВЛ и времени их восстановления подчиняется экспоненциальному закону, так как период приработки все объекты исследования прошли, а период интенсивного износа явно невыражен из-за постоянного обновления ВЛ при ремонтах и профилактических обслуживаниях подобно кабельным линиям 6–10 кВ. Из общего массива данных были извлечены данные об отказах ВЛ 10 кВ в трех контрольных

районах севера, центра и юга филиала. Далее отказы были сгруппированы по районам, разбиты по подстанциям и объединены в выборки по отдельным ВЛ на каждой подстанции. Затем был произведен расчет критерия согласия Колмогорова для проверки принятой гипотезы об экспоненциальном законе распределения отказов ВЛ и времени их устранения.

Сравнение теоретической $F_t(t)$ и экспериментальной $F_e(t)$ функций распределения наработок на отказ ВЛ позволило определить максимальное отклонение $D_{nmax}=|F_t(t) - F_e(t)|$, которое было использовано в последующих расчетах критерия Колмогорова $D_{nmax} \sqrt{n}$, где n — количество отказов.

В целом по филиалу и по всем обследованным районам наблюдается хорошее схождение экспериментальной и теоретической функции распределения, что подтверждается рассчитанным критерием Колмогорова.

В качестве примера на рис. 1 представлена математическая модель надежности ВЛ филиала.

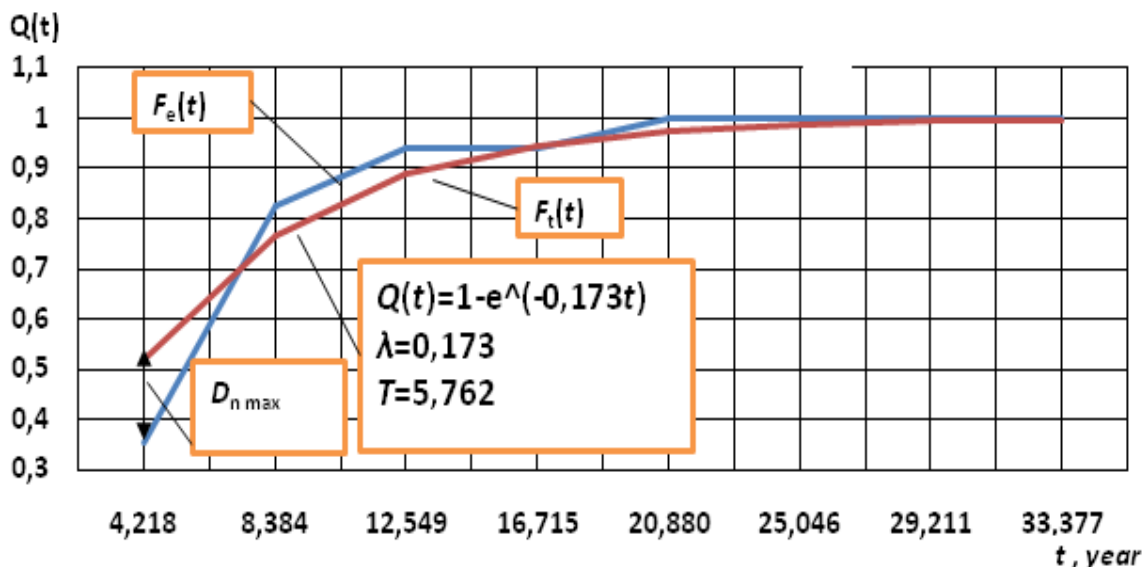


Рис.1. Математическая модель надежности ВЛ филиала.¹

В таблице 1 выполнено сравнение, рассчитанных нами, показателей надежности ВЛ по районам и в целом по филиалу с показателями надежности аналогичных объектов (ВЛ одноцепная на 1 км длины), приведенными в справочной литературе [40].

Как видно из табл. 1 средняя наработка на отказ несколько больше справочных значений.

Нами установлено, что около 60 % ВЛ практически выработали свой ресурс, однако интенсивность их отказов не превышает справочных значений.

Это можно объяснить большим процентом успешного срабатывания защиты, а также относительной простотой ремонта, высокой ремонтпригодностью и постоянным обнов-

¹ Appendix
1

лением ВЛ при замене поврежденных элементов на новые.

Таблица 1².

Фактические и справочные показатели надежности ВЛ³.

	$\lambda, \text{ year}^{-1}$		$T_{av}, \text{ year}$	
	λ_{fact}	λ_{ref}	$T_{av.\text{fact}}$	$T_{av.\text{ref}}$
Район А (Area A)	0,147	0,25	6,8	4
Район В (Area B)	0,227	0,25	4,4	4
Район С (Area C)	0,157	0,25	6,3	4
Филиал (Branch)	0,173	0,25	5,7	4

Математические модели распределения времени восстановления ВЛ по районам и в целом по филиалу

Не менее важным показателем надежности ВЛ является среднее время восстановления $T_{r.av}$.

Исследования показали, что для описания закона распределения времени восстановления t_r больше подходит нормальный закон, нежели экспоненциальный. Но поскольку $t_r \ll t_w$, то характер распределения случайной величины t_r мало сказывается при описании процессов восстановления на длительном отрезке времени. Поэтому в структурной надежности для возможности применения модели марковских процессов делается допущение об экспоненциальности распределения не только t_w , но и t_r [41].

Исходя из данного утверждения, априори принимаем гипотезу об экспоненциальном законе времени восстановления ВЛ.

На рис. 2 представлена математическая модель восстановления ВЛ филиала.

В качестве модели восстановления рассчитана вероятность восстановления ВЛ - $S(t)$.

В целом по филиалу и по всем обследованным районам наблюдается хорошее сходжение экспериментальной и теоретической функции распределения времени восстановления ВЛ, что подтверждается рассчитанным критерием Колмогорова.

В таблице 2 выполнено сравнение, рассчитанных нами, интенсивностей восстановления μ , и среднего времени восстановления $T_{r.av}$ по районам и в целом по филиалу со справочными значениями этих показателей аналогичных объектов, приведенными в справочной литературе.

В ходе исследования выяснилось, что большинство отказов (около 65 %) приходятся на неустойчивые отказы (самоустраняющиеся), т.е. их восстановление не требовало ремонта. ВЛ включались в работу через определенное время средствами автоматики (АПВ) и ручным повторным включением (РПВ).

Учитывая приоритет самоустраняющихся отказов при эксплуатации ВЛ в качестве критерия по выбору периодичности контроля технического состояния ВЛ примем комплексный показатель надежности - коэффициент технической готовности K_{testf} с учетом самоустраняющихся отказов.

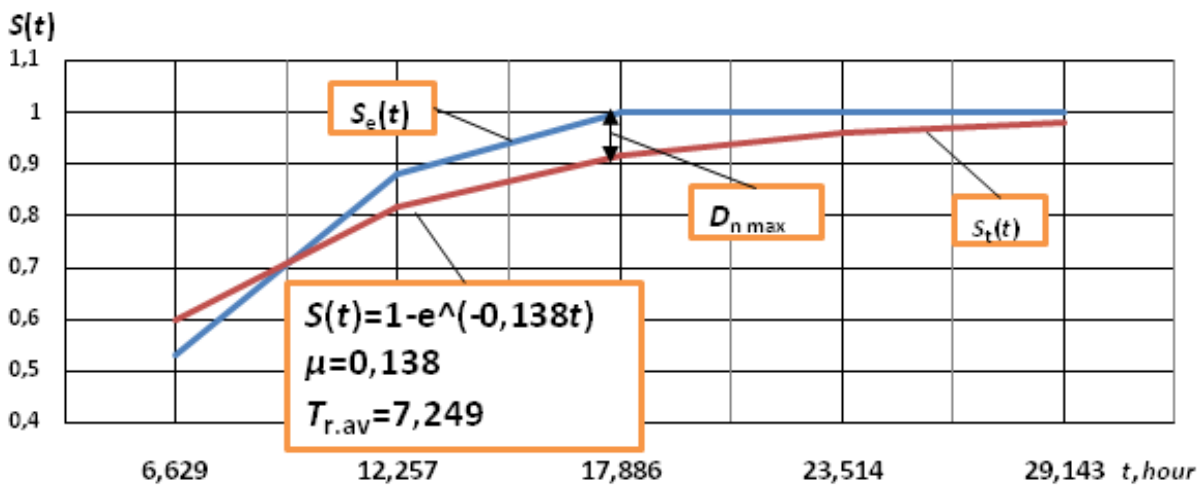


Рис. 2. Математическая модель восстановления ВЛ.⁴

^{2,3,4}Appendix 1

Таблица 2⁵.
Показатели по восстановлению ВЛ⁶.

	μ, h^{-1}		$T_{r.av}, h$	
	μ_{fact}	μ_{ref}	$T_{r.av.fact}$	$T_{r.av.ref.}$
Район А (Area A)	0,146	0,1	6,852	6
Район В (Area B)	0,179	0,1	5,571	6
Район С (Area C)	0,112	0,1	8,914	6
Филиал (Branch)	0,137	0,1	7,249	6

Важным показателем надежности ВЛ многократного действия является среднее время самоустранения отказов T_{ifsr} .

Если в электрической сети имеется k ВЛ одного типа с n_1, n_2, \dots, n_k самоустраняющимися отказами со средними временами самоустранения этих отказов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$, то математическое ожидание T_{ifsr} найдется по выражению

$$T_{ifsr} = p_1\tau_1 + p_2\tau_2 + \dots + p_k\tau_k, \quad (1)$$

где p_i — вероятность того, что отказ будет у i -ой ВЛ.

С учетом вычисленных по статистическим данным интенсивностей самоустраняющихся отказов λ_i каждой ВЛ одного типа p_i определится формулой

$$p_i = \frac{n_i\lambda_i}{\Lambda} = \frac{n_iT}{T_i}, \quad (2)$$

где Λ — средняя интенсивность самоустраняющихся отказов k ВЛ;

T — средняя наработка на самоустраняющийся отказ k ВЛ.

Из уравнений (1) и (2) следует

$$T_{ifsr} = T \left(\frac{n_1\tau_1}{T_1} + \frac{n_2\tau_2}{T_2} + \dots + \frac{n_i\tau_i}{T_i} \right). \quad (3)$$

По показателям процесса восстановления ВЛ T и T_{ifsr} определяется, интересующий нас, коэффициент готовности

$$K_{tesrf} = \frac{T}{T + T_{ifsr}}. \quad (4)$$

Этот коэффициент представляет собой вероятность того, что в произвольный момент времени k ВЛ будет находиться в состоянии

готовности, т.е. не будут находиться в состоянии самоустраняющегося отказа

Последнее уравнение можно записать в форме

$$K_{tesrf} = \frac{t_{nvt}}{t_{nvt} + t_{ifsr}}. \quad (5)$$

где t_{nvt} — суммарное время работы k ВЛ одного типа за достаточно большой промежуток времени;

t_{ifsr} — суммарное время самоустранения отказов, возникших за этот же промежуток времени.

Необходимо отметить, что последние два уравнения справедливы только для установленного периода эксплуатации ВЛ, что хорошо согласуется с исследуемыми объектами, так как практически все эксплуатируемые ВЛ давно прошли период приработки. В процессе эксплуатации «старых» ВЛ происходит постоянная замена поврежденных элементов на новые. Это обстоятельство дает возможность утверждать, что период аварийного износа не так ярко выражен, что подтверждается статистикой отказов ВЛ с большими сроками эксплуатации.

Возобновление электроснабжения потребителей после самоустранения отказов чаще всего происходит с помощью оператора, который повторно включает ВЛ коммутационным аппаратом. При этом могут возникнуть отказы при включениях. Рассмотрим, как выполнить учет отказов при повторных включениях и рассчитать коэффициент готовности для такого режима.

Пусть для возобновления электроснабжения было сделано N_{re} попыток повторных включений ВЛ в результате которых она проработала t_{re} часов и находилась в состоянии самоустраняющихся отказов $t_{ifsr.re}$ часов. При этом было зафиксировано m_{ifsr} самоустраняющихся отказов, из числа которых было m_r отказов при включении.

В рассматриваемом случае среднее время самоустранения отказов можно рассчитать по уравнению:

$$T_{ifsr} = \frac{t_{ifsr.re}}{m_{ifsr}}. \quad (6)$$

Коэффициент готовности для такого режима повторных включений может быть найден по уравнению из [40]:

^{5,6} Appendix 1

$$K_{tesrf} = \frac{t_{re}}{t_{re} + t_{fstr.re}} = \frac{(m_{fstr} + m_r)T}{(m_{fstr} + m_r)T + m_r T_{fstr}}. \quad (7)$$

Докажем, что коэффициент готовности K_{tesrf} практически мгновенно достигает своего постоянного статистического значения.

Рассмотрим общий случай работы ВЛ.

Пусть ВЛ начинает работать в момент времени $t = 0$ (момент окончания диагностики).

Как показали исследования статистики самоустраняющихся отказов ВЛ, они образуют простейший поток событий с параметром $\Lambda = 1/T$, а процесс самовосстановления также образует простейший поток с параметром $\mu = 1/T_{fstr}$.

В произвольный момент времени t ВЛ может находиться в одном из двух возможных состояний: исправном, либо в состоянии самовосстановления.

Обозначим вероятность первого состояния через $p_0(t)$, а второго через $p_{ss}(t)$. Простой ВЛ не связанные с самовосстановлением исключим из рассмотрения. Тогда будет иметь место уравнение

$$p_0(t) + p_{ss}(t) = 1. \quad (8)$$

Определим начальные условия

$$p_0(0) = 1, p_{ss}(0) = 0. \quad (9)$$

Рассмотрим малый промежуток времени от момента t до момента $t + \Delta t$. Определим вероятность того, что в конце этого промежутка времени ВЛ будет исправна. Здесь возможны два варианта состояний:

1. В момент t ВЛ была исправна (вероятность этого события равна $p_0(t)$, а за время Δt отказов не было. Вероятность этого события равна $1 - \Lambda \Delta t$, так как у ординарных потоков уравнение для параметра потока упрощается и принимает вид $\Lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (p'(t, \Delta t) / \Delta t)$, тогда из этого уравнения следует приближенная формула (для малых Δt): $p'(t, \Delta t) \approx \Lambda(t) \Delta t$.

2. В момент t ВЛ находится в процессе самовосстановления (вероятность этого события равна $p_{ss}(t)$, а за время Δt она восстановилась (вероятность этого события равна $\mu \Delta t$ в соответствии с вышеизложенным, если это рассуждение применить к процессу восстановления).

Тогда следует, что

$$p_0(t + \Delta t) = p_0(t)[1 - \Lambda \Delta t] + p_{ss}(t) \mu \Delta t. \quad (10)$$

После переноса $p_0(t)$ в левую часть и деления левой и правой частей уравнения на Δt перейдем к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$ и в результате получим дифференциальное уравнение

$$p_0'(t) = -\Lambda p_0(t) + \mu p_{ss}(t). \quad (11)$$

Запишем это уравнение с учетом (8) в виде

$$p_0'(t) = \mu - (\Lambda + \mu) p_0(t). \quad (12)$$

Решение этого уравнения при принятых начальных условиях (9) дает вероятность исправного состояния ВЛ в функции времени

$$p_0(t) = \frac{T}{T + T_{fstr}} + \frac{T_{fstr}}{T + T_{fstr}} e^{-\left[1 + \frac{T_{fstr}}{T}\right] \frac{t}{T_{fstr}}}, \quad (13)$$

Здесь Λ и μ заменены на их выражения через T и T_{fstr} .

Введем обозначение $K_{fstr} = T_{fstr} / T$ и назовем его относительным коэффициентом самоустранения отказов ВЛ. Тогда с учетом (4) решение дифференциального уравнения (12) можно преобразовать к виду:

$$p_0(t) = K_{tesrf} + (1 - K_{tesrf}) e^{-\left[1 + K_{fstr}\right] \frac{t}{T_{fstr}}}. \quad (14)$$

Из этого выражения видно, что при $t = 0$ $p_0(t) = 1$, а при росте t вероятность исправного состояния $p_0(t) \rightarrow K_{tesrf}$. Процесс приближения $p_0(t)$ к постоянному статистическому значению K_{tesrf} происходит довольно быстро и определяется величиной относительного коэффициента самоустранения отказов K_{fstr} . Если по уравнению (14) произвести расчет времени приближения $p_0(t)$ от 1 (при $t = 0$) до $p_0(t) = K_{tesrf}$, то это время окажется ничтожно мало.

Оценка точности опытного значения K_{tesrf}

Для оценки точности опытного значения K_{tesrf} рассмотрим его как функцию двух случайных переменных T и T_{fstr} . Для этого воспользуемся полученным авторами в предыдущих работах выражением

$$\frac{\sigma(K_{tesrf})}{K_{tesrf}} = \frac{K_{tesrf} T_{tfsr}}{T} \sqrt{\frac{\sigma^2(T)}{T} + \frac{\sigma^2(T_{tfsr})}{T_{tfsr}^2}}, \quad (15)$$

где $\sigma(K_{tesrf})$, $\sigma(T)$ и $\sigma(T_{tfsr})$ — средние квадратические отклонения коэффициента готовности, средней наработки на самоустраняющийся отказ и среднего времени самоустранения отказа соответственно.

Если T определено по m отказам, а T_{tfsr} по m_1 отказам, то для экспоненциального закона распределения времени между самоустраняющимися отказами с учетом его характерных свойств будем иметь:

$$\sigma(T) = \frac{T}{\sqrt{m}}. \quad (16)$$

Аналогично в первом приближении для T_{tfsr} можно записать

$$\sigma(T_{tfsr}) = \frac{T_{tfsr}}{\sqrt{m_1}}. \quad (17)$$

Из уравнения (15) с учетом (16) и (17) получено выражение:

$$\frac{\sigma(K_{tesrf})}{K_{tesrf}} = \frac{K_{tesrf} T_{tfsr}}{T} \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{m_1}}. \quad (18)$$

Таким образом, по уравнению (18) можно определить $\sigma(K_{tesrf})$ и воспользовавшись таблицей квантилей нормального распределения [36] рассчитать доверительные границы K_{tesrf} для заданной доверительной вероятности по формулам:

$$K_{tesrf_{LL}} = K_{tesrf} - z_{\alpha} \cdot \sigma(K_{tesrf}) \quad (19)$$

$$K_{tesrf_{HL}} = K_{tesrf} + z_{\alpha} \cdot \sigma(K_{tesrf}) \quad (20)$$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера в данной работе приводится расчет верхней и нижней границ K_{tesrf} при заданной доверительной вероятности $\alpha = 0,9$. Воспользуемся реальными статистическими данными: ВЛ протяженностью 40 км имеет наработку $T = 1000$ час., $T_{tfsr} = 6$ час., $m_1 = m_2 = 5$.

По уравнению (4) находим $K_{tesrf} = 0,994$.

Из уравнения (18) определяем $\sigma(K_{tesrf}) = 0,0037$.

Из таблицы П1 [40] для $\alpha = 0,9$ находим $z_{\alpha} = 1,645$.

Доверительные границы для K_{tesrf} определяются по формулам (19) и (20):

$$K_{tesrf_{LL}} = 0,994 - 1,645 \cdot 0,0037 = 0,9903,$$

$$K_{tesrf_{HL}} = 0,994 + 1,645 \cdot 0,0037 = 0,9977.$$

Этот расчет показывает, что даже при малом числе самоустраняющихся отказов $m_1 = m_2 = 5$ обеспечивается высокая точность определения опытного значения K_{tesrf} .

Таким образом, постоянно контролируя динамику изменения K_{tesrf} по текущим статистическим данным можно назначить время очередной диагностики ВЛ. Для этого требуется определиться с нормативным значением K_{tesrf} кабельной линии в зависимости от категории потребителя электроэнергии.

IV. ВЫВОДЫ

1. Подтверждена гипотеза об экспоненциальном законе распределения отказов и времени восстановления ВЛ для всех контрольных районов и в целом по филиалу.

2. Определены фактические показатели надежности ВЛ: интенсивность отказов (λ), средняя наработка на отказ (T_{av}), интенсивность восстановления (μ) и среднее время восстановления ($T_{r,av}$). Фактические значения этих показателей не превышают справочных значений.

3. Устранение около 65% отказов от общего количества не требуют ремонта ВЛ, т.к. питание было восстановлено с помощью устройств автоматического или ручного повторного включения.

4. Потоки самоустраняющихся отказов ВЛ и потоки их случайного времени самоустранения простейшие.

5. Коэффициент готовности ВЛ K_{tesrf} с учетом времени их простоя на самоустранение отказов практически мгновенно достигает своего постоянного статистического значения и наиболее полно характеризует текущую эксплуатационную надежность ВЛ.

6. Даже при малом числе самоустраняющихся отказов обеспечивается высокая точность определения опытного значения K_{tesrf} .

7. Установив нормативные значения K_{tesrf} ВЛ в зависимости от категории потребителей можно своевременно назначать сроки оценки технического состояния ВЛ, контролируя динамику изменения K_{tesrf} по регулярным статистическим данным об отказах, рассчитываемого только с учетом самоустраниющихся отказов ВЛ.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Mathematical model of OHL reliability.

^{2,3}Table 1. Actual and reference indicators of OHL reliability.

⁴Fig. 2. Mathematical model of OHL recovery.

^{5,6}Table 2. Indicators for OHL recovery.

Литература (References)

- [1] Vorotnitsky V.V., Buzin S.A. Reklouzer – novyi uroven' avtomatizatsii i upravleniya VL 6–10 kV [Recloser - a new level of automation and control of 6-10 kV overhead lines]. *Novosti elektrotehniki – Electrical Engineering News*, 2005, no.3. (In Russian). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/11.php> (accessed 10.09.2020).
- [2] Nepomnyashchy V.A., Ovseichuk V.A. Uchet nadezhnosti elektrosnabzheniya pri raschete tarifov [Taking into account the reliability of power supply when calculating tariffs]. *Novosti elektrotehniki – Electrical Engineering News*, 2010, no.4. (In Russian). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2010/64/04.php> (accessed 10.09.2020).
- [3] Faibisovich D.L. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setei* [Reference book on the design of electrical networks]. 4th ed., Rev. and add. Moscow: Publishing house NTs ENAS, 2012. 352 p. (In Russian).
- [4] Barg I.G., Edelman V.I. *Vozdushnye linii elektroperedachi: voprosy ekspluatatsii i nadezhnosti* [Overhead lines: Issues of operation and reliability]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 248 p. (In Russian).
- [5] Barg I.G. Nadezhnost' VL 0,4–20 kV sel'skokhozyajstvennogo naznacheniya [Reliability of overhead lines 0.4–20kV for agricultural purposes]. *Energeticheskoe stroitel'stvo - Energy construction*, 1992, no. 4. pp. 19–21. (In Russian).
- [6] Zhulev A.N., Barg I.G. O vliyaniy defektov, dopushchennykh pri sooruzhenii VL, na ikh nadezhnosti [On the influence of defects during the construction of overhead lines on their reliability]. *Energeticheskoe stroitel'stvo – Energy construction*, 1992, no. 7 pp. 33–38. (In Russian).
- [7] Li Wang. The Fault Causes of Overhead Lines in Distribution Network. MATEC Web of Conferences. vol.61, 2016. The International Seminar on Applied Physics, Optoelectronics and Photonics (APOP 2016). Shanghai, China, 2016 doi: 10.1051/mateconf/20166102017.
- [8] Kornatka M. Analysis of the exploitation failure rate in Polish MV networks. *Ekspluatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2018, no 20 (3), pp. 413–419. doi: 10.17531/ein.2018.3.9.
- [9] Chojnacki A.Ł. Chojnacka K.J. Niezawodność elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych [Reliability of power distribution networks]. Monografie, Studia, Rozprawy NR M100. Politechnika Świętokrzyska. Kielce 2018. p.467.
- [10] Chojnacki A.Ł. Analiza niezawodności eksploatacyjnej elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych, Rozprawa habilitacyjna, Kielce 2013.
- [11] Doletskaya L.I., Solopov R.V., Kavchenkov V.P., Andreenkov E.S. Analyzing the Reliability of Mechanical Parts in 10 kV Aerial Transmission Lines under Ice-Coating and Wind Effects in View of Their Design Features. *Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures (MRDMS-2017). AIP Conference Proceedings*. vol. 1915. 2017. doi: 10.1063/1.5017355
- [12] Hashemi-Dezaki H., Hosseinian S.H., Askarian-Abyaneh, H., Agah, SMM. Optimized operation and maintenance costs to improve system reliability by decreasing the failure rate of distribution lines. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. vol. 21. 2013. pp. 2191-2204. doi: 10.3906/elk-1203-34.
- [13] Clements D., Mancarella P. Systemic modelling and integrated assessment of asset management strategies and staff constraints on distribution network reliability. *Electric Power Systems Research*. vol. 155. 2018. pp. 164–171. doi: 10.1016/j.epsr.2017.09.029.
- [14] Andrievsky V.N., Golovanov A.T., Zelichenko A.S. *Ekspluatatsiya vozdushnykh linii elektroperedachi* [Operation of overhead power lines]. 3rd ed., revised. and add. Moscow, Energiya, 1976. 616 p. (In Russian).
- [15] *GOST 839–2019 Provoda neizolirovannye dlya vozdushnykh linii elektroperedachi. Tekhnicheskie usloviya* [State Standart 839–2019 Non-insulated conductors for overhead power lines. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 43 p.
- [16] *STO 56947007–29.240.01.053–2010 Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu periodicheskogo tekhnicheskogo osvidetel'stvovaniya vozdushnykh linii elektroperedachi ENES* [STO 56947007–29.240.01.053–2010 Guidelines for conducting periodic technical inspection of UNEG overhead lines. Organization standard. JSC "FGC UES"]. (In Russian). Available at:

- <https://normativ.su/catalog/standart/1001/319013/> (accessed 10.09.2020).
- [17] Khrennikov A.Yu., Skladchikov A.A. Tekhnologicheskie narusheniya na podstantsiyakh. Klassifikatsiya po vidam oborudovaniya [Technological violations at substations. Classification by type of equipment]. *Novosti elektrotehniki – Electrical Engineering News*, 2012, no. 2. (In Russian). Available at: <http://http://news.elteh.ru/arh/2012/74/13.php> (accessed 10.09.2020).
- [18] Abdulvelev I.R. Vybor tipa opor vozduzhnykh linii elektroperedachi s ispol'zovaniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya [The choice of the type of overhead line supports using computer design systems]. *Otraslevye aspekty tekhnicheskikh nauk – Branch aspects of technical sciences*, 2012, no. 5 (17) pp. 37–41. (In Russian).
- [19] Kutsenko G.F., Puhalskaya O. Yu. Osnovnye pokazateli nadezhnosti LEP 6–10 kV [Main indicators of reliability of 6–10 kV overhead lines]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG – Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS*, 2006, no. 6 pp.20–23. (In Russian).
- [20] Billinton R., Allan R.N. Reliability Evaluation of Power Systems. Springer Science & Business Media, 2013. p. 514.
- [21] Boussaadia F. Reliability analysis of transmission lines protection systems of the SONELGAZ power system. *2019 Algerian Large Electrical Network Conference (CAGRE)*, Algiers, Algeria. 2019. pp. 1-5. doi: 10.1109/CAGRE.2019.8713173.
- [22] Goel L. Monte Carlo simulation-based reliability studies of a distribution test system. *Electric Power Systems Research*, vol.54, no. 1, 2000, pp. 55–65. doi: 10.1016/S0378-7796(99)00066-8.
- [23] Heydt G.T., Graf T.J. Distribution system reliability evaluation using enhanced samples in a Monte Carlo approach. *Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, 2010, pp. 2006-2008, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2045929.
- [24] Billinton R., Li W. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods. Springer Science & Business Media, 2013. p. 352.
- [25] Golshanfard A., Hashemi-Dezaki H. Sensitivity Analysis of Distribution System Reliability for Identifying the Critical Elements. *27TH Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE 2019)*. 2019. pp. 522–526.
- [26] Alvarez-Alvarado M.S., Jayaweera D. Bath tub curve as a Markovian process to describe the reliability of repairable components. *Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no.21, 2018. pp. 5683-5689. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5505.
- [27] Garcia-Mora B., Santamaria C., Rubio G. Modeling dependence in the interfailure times. An analysis in Reliability models by Markovian Arrival Processes. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 343, 2018, pp. 762–770. doi: 10.1016/j.cam.2020.113085.
- [28] Heylen E., Ovaere M., Proost S., Deconinck G., Van Hertem D. A multi-dimensional analysis of reliability criteria: From deterministic $N - 1$ to a probabilistic approach. *Electric Power Systems Research*. vol. 167. 2019. pp. 290–300. doi: 10.1016/j.epr.2018.11.011
- [29] Kolcun Michal, Kornatka Miroslaw, Gawlak Anna, Conka Zsolt. Benchmarking the reliability of medium-voltage lines. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, vol. 68, no. 3, 2017. pp. 212–215.
- [30] Grakowski L., Chojnacki A.L., Gebczyk K., Banasik K. Statistical Analysis and Modeling of the Reliability of Overhead Low Voltage Lines. *Przeglad elektrotechniczny*. vol. 95, no. 12, 2019. pp. 261-264. doi: 10.15199/48.2019.12.59
- [31] Swingler J. (Ed.) Reliability characterisation of electrical and electronic systems. Woodhead Publishing, 2015. 274 p.
- [32] Iešmantas T., Alzbutas R. Bayesian spatial reliability model for power transmission network lines. *Electric Power Systems Research*. vol. 173. 2019. pp. 214–219. doi: 10.1016/j.epr.2019.04.014.
- [33] Iešmantas T., Alzbutas R. Bayesian Methods for Analysis of Electric Grid Outages. *Safety and Reliability*. vol. 33, no. 4. 2013. pp. 12-23. doi: 10.1080/09617353.2013.11690978.
- [34] STO 56947007-29.240.55.111–2011 *Metodicheskie ukazaniya po otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya VL i ostatechnogo resursa komponentov VL* [STO 56947007–29.240.55.111–2011 Guidelines for assessing the technical condition and residual life of overhead line components. Organization standard. JSC "FGC UES" 2011]. (In Russian). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200094416> (accessed 10.09.2020).
- [35] Sbornik direktivnykh ukazanii po povysheniyu nadezhnosti i bezopasnosti ekspluatatsii elektroustanovok v elektrosetevom komplekse PAO "Rosseti" Chast' I Ekspluatatsiya elektroustanovok raspredelitel'nykh setei 0,38–20 kV" (SDU–2016 CH.1). *PAO Rosseti 2016* [Collection of guidelines for improving the reliability and safety of electrical installations in the power grid complex of PJSC Rosseti. Part I "Operation of electrical installations of 0.38–20 kV distribution networks" (SDU–2016 Part 1). PJSC Rosseti 2016]. (In Russian). Available at: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293746/4293746884.htm> (accessed 10.09.2020).
- [36] Shor Ya.B. *Statisticheskie metody analiza i kontrolya kachestva i nadezhnosti: ucheb. dlya vuzov* [Statistical methods of analysis and quality control and reliability: textbook for universities].

- Moscow, Gosenergoizdat, 1962. 552 p. (In Russian).
- [37] Barlow R.E., Proschan F. *Mathematical Theory of Reliability*. Philadelphia: SIAM, 1996. 258 p.
- [38] Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'yev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in the theory of reliability]. Moscow, Nauka, 1965, p. 524. (In Russian).
- [39] Fokin Yu. A., Tufanov V.A. *Otsenka nadezhnosti sistem elektrocyabzheniya* [Assessment of the reliability of power supply systems]. Moscow, Energoizdat, 1981, p. 224. (In Russian).
- [40] Gul V.I., Nizhevsky V.I., Khomenko I.V., Shevchenko S.Yu., Chevychelov V.A. *Koordinatsiya izolyatsii i perenapryazheniya v elektricheskikh vysokovol'tnykh setyakh* [Coordination of insulation and overvoltage in electrical high-voltage networks]. Kharkov, EDNA, 2009, p. 270. (In Russian).
- [41] Oboskalov V.P. *Strukturnay nadezhnost' elektroenergeticheskikh sistem* [Structural reliability of electric power systems]. Yekaterinburg, UrFU, 2012, p. 194. (In Russian).

About authors.



Басманов Владислав Геннадьевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: диагностика электрооборудования, надежность электроснабжения, энергосбережение.
E-mail: basmanov@vyatsu.ru



Холманских Валерий Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Электроснабжение» ВятГУ. Область научных интересов: надежность электроснабжения, энергосбережение.
E-mail: vm_holmanskih@vyatsu.ru