

## Evaluation of the Idle time of Single-Chain and Double-Chain Overhead Power Lines of 6–10 kV by Methods of Queuing Theory

Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M.

Vyatka State University  
Kirov, Russian Federation

**Abstract.** The aim of this work is to substantiate the idle time evaluation of the overhead power line (OPL) according to the reliability indicators of its main elements using the probability value of the overhead power line availability factor. Statistical studies of the 17 OPL were performed to achieve this goal. The results of the statistical data processing made it possible to consider overhead lines as objects of a multiple action, and their failure and recovery flows as the primitive Poissonian flows. The calculation of the Wilcoxon and Pearson criteria confirmed the uniformity of the statistical material both in terms of failure times and recovery time for all 17 studied OPL, which allowed combining the uniform statistical data into two representative samples, according to failures and recoveries, for the generalized district OPL and calculate its reliability indicators. The most significant result is the justification of applying queuing theory methods to evaluate the idle time of 6–10 kV single-chain and double-chain of overhead lines. The significance of the results obtained consists in that a simple engineering method is proposed to evaluate the availability factor of the overhead power line according to the reliability indicators of its main elements, which allows predicting the idle time of the overhead line for the upcoming calendar year of its operation. The newly obtained availability factors of the main overhead line elements can be used in the overhead power lines' design.

**Keywords:** overhead power lines, technical availability factor, comprehensive reliability indicators, idle time, graph of states, queuing equations.

**DOI:** <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.4-56.01>

**UDC:** 621.315.17

### Estimarea timpului de repaus al liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune cu un singur circuit și cu dublu circuit de 6-10 kV prin metodele teoriei cozilor de așteptare

Basmanov V.G., Holmanskikh V.M.

Universitatea de Stat din Veatka  
Kirov, Federația Rusă

**Rezumat.** Scopul lucrării este de a fundamenta evaluarea timpului de nefuncționare a unei linii electrice aeriene de înaltă tensiune (LEA) 6–10 kV în ceea ce privește fiabilitatea elementelor sale principale folosind valoarea probabilistică a factorului de disponibilitate a LEA. Pentru a atinge acest scop, au fost efectuate studii statistice ale LEA. Pe parcursul de șase ani de observare, au fost înregistrate 251 de eșecuri. Volumul studiilor a constat din 17 linii aeriene, lungimea lor totală a fost de 337 km. Pentru a determina valorile statistice ale factorilor de disponibilitate ai liniilor aeriene au fost prelucrate date privind întreruperile alimentării cu energie electrică. Rezultatele prelucrării datelor statistice au făcut posibil să se considere liniile aeriene drept obiecte de acțiune multiplă, iar fluxurile lor de eșec și recu perare ca fiind cele mai simple procesele Poisson. Calculul criteriilor Wilcoxon și Pearson a confirmat omogenitatea materialului statistic atât în ceea ce privește timpul dintre defecțiuni, cât și timpul de recuperare pentru toate cele 17 linii aeriene studiate, ceea ce a făcut posibilă combinarea datelor statistice omogene în două eșantioane reprezentative, respectiv, pentru defecțiuni și refaceri pentru linia generalizată aeriană a regiunii și calcularea indicatorilor de fiabilitate a acesteia. Rezultatul cel mai semnificativ este fundamentarea aplicării metodelor teoriei cozilor pentru estimarea timpului de nefuncționare a LEA cu un singur circuit și dublu circuit 6–10 kV. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că metoda propusă face posibilă evaluarea factorului de disponibilitate al liniei aeriene în ceea ce privește fiabilitatea elementelor sale principale, ceea ce simplifică prognoza timpului de nefuncționare al liniei aeriene pentru viitorul anul calendaristic al funcționării acestuia. disponibilitate tehnică, indicatori complexi de fiabilitate, timp de nefuncționare, grafic de stare.

**Cuvinte-cheie:** liniile electrice aeriene, factor de disponibilitate, indicatori complexi de fiabilitate, timp de nefuncționare, grafic de stare, ecuații de așteptare.

## Оценка времени простоя одноцепной и двухцепной ВЛ 6—10 кВ методами теории массового обслуживания

Басманов В.Г., Холманских В.М.  
Вятский государственный университет  
Киров, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью работы является обоснование оценки времени простоя ВЛ 6—10 кВ по показателям надежности её основных элементов с использованием вероятностного значения коэффициента готовности ВЛ. Для достижения поставленной цели выполнялись статистические исследования ВЛ. За шесть лет наблюдений зафиксирован 251 отказ. Объем исследований составил 17 ВЛ, их общая протяженность - 337 км. Для определения статистических значений коэффициентов готовности ВЛ обрабатывались данные о перерывах в электроснабжении. Результаты обработки статистических данных позволили рассматривать ВЛ как объекты многократного действия, а их потоки отказов и восстановлений простейшими пуассоновскими процессами. Расчет критериев Вилькоксона и Пирсона подтвердил однородность статистического материала как по наработкам на отказ, так и по времени восстановления для всех 17 исследуемых ВЛ, что позволило объединить однородные статистические данные в две представительные выборки соответственно по отказам и восстановлением для обобщенной ВЛ района и рассчитать её показатели надежности. Процесс функционирования ВЛ изображался графами состояний и соответствующими дифференциальными уравнениями для установившегося режима эксплуатации, решение которых позволило рассчитать вероятностные значения коэффициентов готовности ВЛ. Наиболее существенным результатом является обоснование применения методов теории массового обслуживания для оценки времени простоя одноцепных и двухцепных ВЛ 6—10 кВ. Вероятностное значение коэффициента готовности ВЛ района, вычисленное по результатам решения уравнений массового обслуживания обобщенной ВЛ района, имеет хорошее согласие со статистическим значением коэффициента готовности ВЛ района. Значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный метод позволяет производить оценку коэффициента готовности ВЛ по показателям надёжности её основных элементов, что упрощает прогнозирование времени простоя ВЛ на предстоящий календарный год её эксплуатации. Вновь полученные показатели надежности основных элементов ВЛ могут быть использованы при проектировании ВЛ.

**Ключевые слова:** воздушные линии, коэффициент технической готовности, комплексные показатели надёжности, время простоя, граф состояний, уравнения массового обслуживания.

### ВВЕДЕНИЕ

Воздушные линии (ВЛ) электропередачи всех классов напряжений являются одними основных элементов систем электроснабжения (СЭС), которые соединяют между собой все элементы СЭС и имеют большие протяженности. При этом необходимо отметить, что только протяженность ВЛ 6—10 кВ в России составляет почти половину от общей протяженности линий электропередачи 0,4—110 кВ, что создает предпосылки для большого количества отказов. По данным, приведенным в [1], около 70% всех отказов в СЭС приходится на сети данного класса напряжения [1].

Экономике России наносится ущерб примерно в 460—461 млрд. руб. в год только по причине современного состояния надежности в электроэнергетике [2]. Поэтому основными задачами при эксплуатации ВЛ 6—10 кВ являются поддержание их высокого технического состояния и повышение надёжности, входящих в ВЛ элементов.

В работах [3—12] приведены характерные причины повреждений и результаты анализа данных об отказах в воздушных линиях электропередач разных электросетей, например, в работе [6] приведены типичные причины неисправностей в воздушной линии по данным, взятым из опросов различных мировых агентств. В работах [7—9] даны результаты анализа данных о неисправности воздушных и кабельных линий среднего напряжения польской национальной энергосистемы. В [6—12] отмечается, что очень важна оценка технического состояния и остаточного ресурса ВЛ.

По данным, приведенным в [15], удельное число аварийных отключений на 100 км длины воздушной линии 6—10 кВ зависит от сложности геолого-климатических условий эксплуатации ВЛ, например, в обычных условиях этот показатель равен 6—7 отключений в год, а для районов со сложными условиями 20—30 отключений в год.

В работе [16], на основе статистических данных об аварийных отключениях в сетях 6—

10 кВ, приведены основные показатели надежности ВЛ 6–10 кВ, а именно, параметр потока отказов и среднее время восстановления. Кроме того, рассмотрены причины отключений. Подобные расчеты по определению основных показателей надежности ВЛ, а также результаты их анализа представлены и в других многочисленных работах [7-10,12,17-27]. Например, в работе [7] был использован непараметрический метод анализа данных о надежности электросетей, а в работах [8,9] изложен порядок количественной оценки надежности инженерных систем вероятностными методами. Подобные расчеты количественной оценки надежности в электроэнергетических системах приводятся в [12,17,19-21] на основе метода статистического моделирования.

Новый подход к изучению критических элементов распределительных систем изложен в [22], в основе которого применяется анализ чувствительности показателей надежности, например, изменение интенсивности отказов различных элементов системы.

Таким образом, вопрос поддержания надежности ВЛ весьма актуален. Несмотря на большое разнообразие в подходах и методах исследования надежности ВЛ в многочисленных вышеупомянутых работах, нами не найдено работ по оценке времени простоя ВЛ, используя методы теории массового обслуживания. Только в [23,24] приведена новая математическая формулировка для описания модели надежности ремонтпригодных компонентов, основанная на концепции Марковской цепи, а в [28] рассмотрены модели прогнозирования. Поэтому можно утверждать, что наш подход по оценке времени простоя ВЛ 6–10 кВ, на основе анализа графов состояния одноцепной и двухцепной ВЛ является оригинальным.

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является обоснование использования методов теории массового обслуживания, в частности представления функционирования одноцепной и двухцепной ВЛ соответствующими графами состояний с последующим составлением и решением системы дифференциальных уравнений для установившегося режима эксплуатации. Результатом решения будут являться

вероятности всех возможных состояний ВЛ, на основании которых определяются комплексные показатели - коэффициенты готовности и простоя, позволяющие оценить время простоя ВЛ.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть ВЛ как объект многократного действия с простейшими пуассоновскими потоками отказов и восстановлений. Использовать комплексные статистические показатели надёжности, которые бы оценивали одновременно свойства работоспособности и ремонтпригодности, об этом авторами говорилось в [29,30].

Для предсказания поведения коэффициентов готовности  $K_r$  и простоя  $K_s$  на последующие годы работы ВЛ следует использовать показатели надежности основных элементов ВЛ.

Очень важно правильно выбрать элементы ВЛ, по причине отказа которых происходят основные перерывы в электроснабжении, установить характер потоков их отказов и восстановлений.

Предлагаемый метод оценки времени простоя ВЛ должен отвечать на вопрос: как влияют показатели надежности основных элементов ВЛ на длительность перерыва в электроснабжении по одноцепным и двухцепным ВЛ.

## II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Достоверная оценка времени простоя ВЛ является важным инструментом повышения надёжности ВЛ. Он позволяет принять правильное решение о первоочерёдности профилактических работ или замене «слабых» элементов при одновременной эксплуатации большого числа ВЛ, предопределяя надёжное электроснабжение потребителей электрической энергией.

ВЛ можно представить в виде системы массового обслуживания (СМО) с неограниченным ожиданием с плотностью потока заявок  $\lambda$  и плотностью потока обслуживания  $\mu$ .

Используя математический аппарат для анализа надёжности восстанавливаемых СМО, разработанный на основе марковской модели с дискретным множеством состояний и непрерывным временем [31,32,33], можно на основе известных параметров интенсивностей отказов  $\lambda$  и восстановлений

$\mu$  основных элементов ВЛ заранее рассчитать  $K_r$  и  $K_s$  на предстоящий год эксплуатации ВЛ и оценить её надёжность, например, прогнозируемый перерыв в электроснабжении на предстоящий год эксплуатации.

Потоки, переводящие систему из состояния в состояние, должны быть пуассоновскими, а законы распределения наработки до отказа и времени восстановления экспоненциальными. Структуры системы изображается в виде графов состояний с прямыми (отказ) и обратными (ремонт) переходами, которые обозначаются стрелками с соответствующими надписями переходов  $\lambda$  и  $\mu$ .

Рассматриваются марковские процессы, у которых для любого момента времени вероятность каждого состояния системы в будущем зависит только от состояния в настоящий момент, и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние (потоки без последствия).

Использование марковских случайных процессов в системах электроснабжения подтверждается практикой их эксплуатации [34].

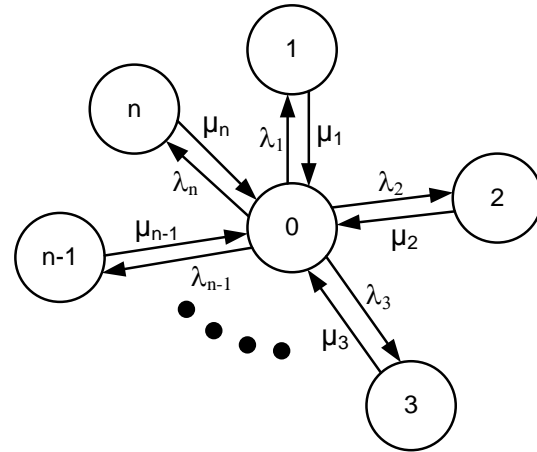
Для установления законов распределения наработок до отказа и времени восстановления ВЛ проводились многолетние статистические исследования, которые подтвердили экспоненциальный характер законов распределения и позволили установить показатели надёжности ВЛ как в целом, так и её основных элементов в отдельности.

**ОДНОЦЕПНАЯ ВЛ (БЕЗ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ)**

Представим такую ВЛ простым ветвящимся графом переходов (рис. 1).

Известно, что уравнения массового обслуживания составляются путем сравнения вероятностей ВЛ в моменты времени  $t$  и  $(t + \Delta t)$  по формуле полных вероятностей. Это строго математический подход и в практических расчетах не всегда удобен. В инженерных расчетах уравнения можно получить непосредственно по виду графа состояний ВЛ, если применить следующее формальное правило [35]. В левой части уравнения записывается производная вероятности  $i$ -го состояния  $dP_i'/dt$ , а в правой

части столько членов, сколько стрелок графа соприкасается с данным состоянием. Если стрелка направлена в данное состояние, то перед членом ставится плюс, а если из данного состояния – минус. Каждый член равен произведению интенсивности соответствующего потока событий ( $\lambda$  или  $\mu$ ), переводящего систему по данной стрелке в другое состояние, на вероятность того состояния, из которого выходит стрелка.



0 – исправное состояние; 1, 2, 3, ... (n-1), n – неисправное состояние, где n – число основных элементов ВЛ.

**Рис. 1. Граф состояний одноцепной ВЛ.<sup>1</sup>**

В соответствии с этим правилом система уравнений массового обслуживания будет иметь вид.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} &= -P_0(t) \sum_1^n \lambda_i + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t) + \dots \\ &+ \mu_{n-1} P_{n-1}(t) + \mu_n P_n(t), \\ \frac{dP_1}{dt} &= \lambda_1 P_0(t) - \mu_1 P_1(t), \\ &\vdots \\ \frac{dP_{n-1}}{dt} &= \lambda_{n-1} P_0(t) - \mu_{n-1} P_{n-1}(t), \\ \frac{dP_n}{dt} &= \lambda_n P_0(t) - \mu_n P_n(t), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$  — интенсивность отказов элементов ВЛ;

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{n-1}, \mu_n$  — интенсивность восстановления элементов ВЛ;

$P_1(t), P_2(t), \dots, P_{n-1}(t), P_n(t)$  — вероятности состояний ВЛ;

<sup>1</sup> Appendix 1

$\frac{dP_0}{dt}, \frac{dP_1}{dt}, \dots, \frac{dP_{n-1}}{dt}, \frac{dP_n}{dt}$  — производные вероятностей состояний.

Полученную систему дифференциальных уравнений можно решить на основе преобразования Лапласа и получить функцию готовности ВЛ:  $K_r(t) = P_0(t)$ .

Ранее отмечалось, что процесс функционирования ВЛ длится в течение нескольких десятилетий. Таким образом, можно перейти к предельным вероятностям. При существовании предельного стационарного режима ВЛ случайным образом меняет свои состояния, но вероятность каждого из них уже не зависит от времени, то есть каждое из состояний осуществляется с некоторой постоянной вероятностью, представляющей не что иное, как среднее относительное время пребывания системы в данном состоянии. С учетом изложенного для нормального периода эксплуатации ВЛ система дифференциальных уравнений (1) переходит в систему алгебраических уравнений (2), для решения которой необходимо добавить нормировочное уравнение.

$$\begin{cases} 0 = -P_0 \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i + \mu_1 \cdot P_1 + \mu_2 \cdot P_2 + \dots + \\ + \mu_{n-1} \cdot P_{n-1}, \\ 0 = \lambda_1 \cdot P_0 - \mu_1 \cdot P_1, \\ 0 = \lambda_2 \cdot P_0 - \mu_2 \cdot P_2, \\ \vdots \\ 0 = \lambda_{n-1} \cdot P_0 - \mu_{n-1} \cdot P_{n-1}, \\ 0 = \lambda_n \cdot P_0 - \mu_n \cdot P_n, \\ P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_{n-1} + P_n = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы уравнений (2) имеет вид:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_{n-1}} + \frac{\lambda_n}{\mu_n}}, \\ P_1 = P_0 \frac{\lambda_1}{\mu_1}, P_2 = P_0 \frac{\lambda_2}{\mu_2}, \dots, \\ P_{n-1} = P_0 \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_{n-1}}, P_n = P_0 \frac{\lambda_n}{\mu_n}. \end{cases} \quad (3)$$

В инженерных расчетах результаты решения системы уравнений (2) можно получить непосредственно по виду

рассматриваемого графа состояний, если применить следующее правило [35]: вероятность нулевого состояния  $P_0$  определяется выражением:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_{n-1}} + \frac{\lambda_n}{\mu_n}}, \quad (4)$$

где числитель правой части – всегда единица; знаменатель – сумма, состоящая из единицы и дробей, числители которых – соответствуют интенсивностям прямых переходов  $\lambda$ , знаменатели – интенсивностям обратных переходов  $\mu$ . Дробь формируется последовательно, начиная с первого перехода ВЛ из состояния 0 в состояние 1 и заканчивая последним переходом из состояния 0 в состояние  $n$ . То есть количество дробей равно числу элементов ВЛ.

Вероятности последующих состояний всегда равны вероятности нулевого исправного состояния  $P_0$ , умноженного на коэффициент, равный соответствующему слагаемому в знаменателе для  $P_0$ , т.е.:

$$\begin{cases} P_1 = P_0 \frac{\lambda_1}{\mu_1}, P_2 = P_0 \frac{\lambda_2}{\mu_2}, \dots, \\ P_{n-1} = P_0 \frac{\lambda_{n-1}}{\mu_{n-1}}, P_n = P_0 \frac{\lambda_n}{\mu_n}. \end{cases} \quad (5)$$

### ДВУХЦЕПНАЯ ВЛ (С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ)

Двухцепная ВЛ представляет собой систему массового обслуживания (СМО) с однократным общим резервированием и числом каналов обслуживания равным числу основных элементов  $n$ , входящих в состав каждой одноцепной ВЛ.

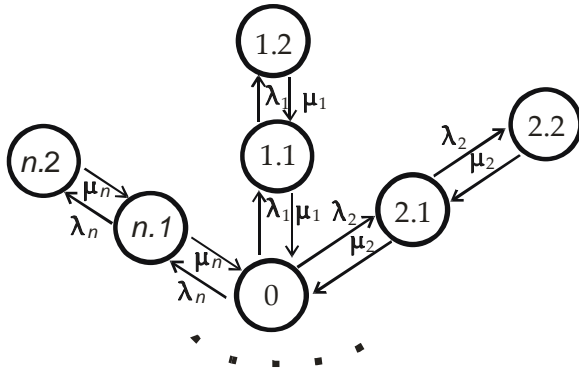
Граф переходов такой СМО (рис. 2) изобразится простым ветвящимся графом с числом ветвей, равным числу основных элементов  $n$ . Ветви этого графа будут соответствовать простым неветвящимся графам с однократным общим резервированием.

Опишем граф состояний двухцепной системой дифференциальных уравнений (6).

Для исследования двухцепной ВЛ в установившемся режиме при  $t \rightarrow \infty$   $dP_{i,j}/dt = 0$ , а  $P_{i,j}(t) = P_{i,j} = \text{const}$  система дифференциальных уравнений (6) переходит в систему алгебраических уравнений (7), для

решения которой добавим нормировочное уравнение.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} &= \sum_1^n (\mu_i P_{i,1}(t) - (\sum_1^n \lambda_i) \cdot P_0(t)); \\ \frac{dP_{1,1}}{dt} &= \lambda_1 P_0(t) + \mu_1 P_{1,1}(t) - (\lambda_1 + \mu_1) P_{1,1}(t); \\ \frac{dP_{1,2}}{dt} &= \lambda_1 P_{1,1}(t) - \mu_1 P_{1,2}(t); \\ &\vdots \\ \frac{dP_{n,1}}{dt} &= \lambda_n \cdot P_0(t) + \mu_n \cdot P_{n,1}(t) - \\ &\quad - (\lambda_n + \mu_n) P_{n,1}(t); \\ \frac{dP_{n,2}}{dt} &= \lambda_n \cdot P_{n,1}(t) - \mu_n \cdot P_{n,2}(t). \end{aligned} \right. \quad (6)$$



0 – исправное состояние ВЛ; 1.1, 2.1, ..., n.1 – неисправное состояние первой ВЛ; 1.2, 2.2, ..., n.2 – неисправное состояние второй ВЛ;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$  – интенсивности отказов соответственно 1-го, 2-го, ..., n-го элементов ВЛ;  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{n-1}, \mu_n$  – интенсивности восстановлений соответственно 1-го, 2-го, ..., n-го элементов ВЛ.

Рис.2. Граф переходов двухцепной ВЛ.<sup>2</sup>

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \sum_1^n (\mu_i P_{i,1} - (\sum_1^n \lambda_i) \cdot P_0); \\ 0 &= \lambda_1 P_0 + \mu_1 P_{1,2} - (\lambda_1 + \mu_1) P_{1,1}; \\ 0 &= \lambda_1 P_{1,1} - \mu_1 P_{1,2}; \\ &\vdots \\ 0 &= \lambda_n \cdot P_0 + \mu_n \cdot P_{n,1} - (\lambda_n + \mu_n) P_{n,1}; \\ 0 &= \lambda_n \cdot P_{n,1} - \mu_n \cdot P_{n,2}; \\ P_0 &+ P_{1,1} + P_{1,2} + P_{2,1} + P_{2,2} + \dots + \\ &+ P_{n,1} + P_{n,2} = 1. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

<sup>2</sup> Appendix 1

Решение системы алгебраических уравнений (7) имеет вид

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_1^2}{\mu_1^2} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\lambda_n}{\mu_n} + \frac{\lambda_n^2}{\mu_n^2}}; \\ P_{1,1} &= P_0 \frac{\lambda_1}{\mu_1}; P_{1,2} = P_0 \frac{\lambda_1^2}{\mu_1^2}; \\ P_{2,1} &= P_0 \frac{\lambda_2}{\mu_2}; P_{2,2} = P_0 \frac{\lambda_2^2}{\mu_2^2}; \\ &\vdots \\ P_{n,1} &= P_0 \frac{\lambda_n}{\mu_n}; P_{n,2} = P_0 \frac{\lambda_n^2}{\mu_n^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Коэффициент технической готовности, исследуемых ВЛ – это вероятность нулевого состояния:

$$K_{t,r} = P_0. \quad (9)$$

Коэффициент простоя ВЛ – это сумма вероятностей всех неисправных состояний:

$$K_s = \sum_1^n P_i. \quad (10)$$

Как известно  $K_{t,r}$  и  $K_s$  применяют, когда требуется оценить одновременно свойства работоспособности и ремонтпригодности. При расчётах  $K_{t,r}$  и  $K_s$  используются два единичных показателя надёжности – суммарное время исправной работы  $t_{twt}$  и суммарное время вынужденных простоев (восстановлений)  $t_r$ , взятых за один и тот же календарный срок [29].

$$t_{twt} = \sum_1^n t_{twt i}, t_r = \sum_1^n t_{r i}, \quad (11)$$

где  $t_{twt i}$  и  $t_{r i}$  — i-е интервалы времени исправной работы и восстановления ВЛ после i-го отказа;

$n$  — число отказов.

По известным  $t_{twt}$  и  $t_r$  определяются  $K_{t,r}$  и  $K_s$ .

$$K_{t,r} = \frac{t_{twt}}{t_{twt} + t_r}, \quad (12)$$

$$K_s = \frac{t_r}{t_{twt} + t_r}. \quad (13)$$

От соотношения величин  $t_{\text{пр}}$  и  $t_r$  зависит величины  $K_{t.r.}$  и  $K_s$ .

Разделив числитель и знаменатель выражений (8) и (9) на число отказов  $n$ , происшедших за рассматриваемое время, получим следующие выражения для  $K_{t.r.}$  и  $K_s$  [30].

$$K_{t.r.} = \frac{T}{T + T_{r.av}}, \quad (14)$$

$$K_s = \frac{T_{r.av}}{T + T_{r.av}}. \quad (15)$$

где  $T$  и  $T_{r.av}$  — соответственно среднее время безотказной работы и восстановления ВЛ.

Будем считать, что  $T_{r.av}$  соответствует времени простоя ВЛ, т.е. включает в себя время отыскание повреждения, демонтаж отказавшего элемента и монтаж исправного.

В [30] нами подтверждена высокая точность замены вероятности нахождения ВЛ в исправном состоянии, рассчитанная по теоретической функции готовности, на статистическое значение коэффициента готовности.

На практике расчет  $K_{t.r.}$  и  $K_s$  выполняется по статистическим данными об отказах ВЛ за прошедший календарный год и служит для подведения итогов работы электрических сетей.

С практической точки зрения более интересно решение вопроса оценки времени простоя ВЛ на предстоящий период её эксплуатации.

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подтверждения полученных теоретических выводов нами были проведены статистические исследования ВЛ 6–10 кВ одного из районов страны.

Период наблюдений составил 6 лет. За это время отмечено 251 отказ. Достоверность предоставленных данных подтверждается регистрацией отказов в электронной базе филиала сетевой компании. Объем исследования составил 17 воздушных линий, их общая протяженность - 337 км. Для определения реальных значений коэффициентов готовности ВЛ были обработаны данные о перерывах в электроснабжении, предоставленные филиалом сетевой компании.

Все причины отказов были разделены по элементам воздушных линий. Рассматривались следующие основные элементы: провода, опоры, изоляторы, линейная арматура. У проводов ВЛ, одной из самых распространенных причин отказов является их схлестывание из-за следующих причин: падение деревьев и веток на провода, налипание снега с последующим обрывом проводов, грозовые воздействия. Отказы опор воздушных линий возникают вследствие расщепления, крена, переломов и падения опор. Изоляторы могут оказаться причиной перебоя электроснабжения в виду пробоев и срывов. Повреждения линейной арматуры так же вызывают аварии на воздушных линиях, в частности, повреждения траверс и оголовников, выпадение крюков из тела опор. Перечисленные выше повреждения, составляют основную массу причин отказа и недоотпуска электроэнергии.

#### а) Математические модели надёжности ВЛ и её элементов.

На рис. 3–6 представлены математические модели надежности 4-х основных элементов ВЛ и их сравнение с экспериментальными моделями. В качестве модели надежности было выбрано экспоненциальное распределение наработок на отказ. Рассчитывалась функция распределения наработок  $F(t)$ , которая является вероятностью отказа  $Q(t)$ .  $F(t) = Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ , где  $\lambda$  — интенсивность отказа элементов, 1/год.  $\lambda = 1/T$ , где  $T$  — наработка на отказ в годах. Следует отметить, что показатели надежности  $\lambda$  и  $T$  были приведены к 1 км длины ВЛ.

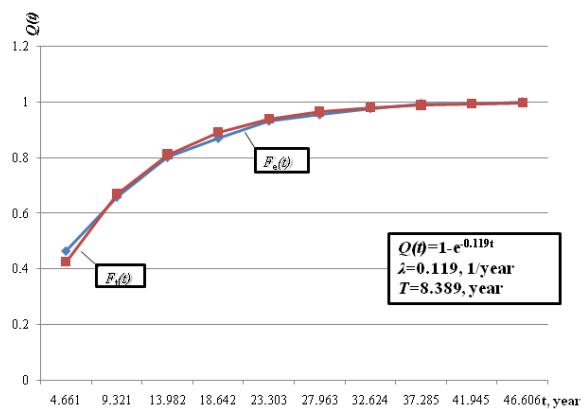


Рис. 3. Математическая модель надежности проводов ВЛ.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Appendix 1

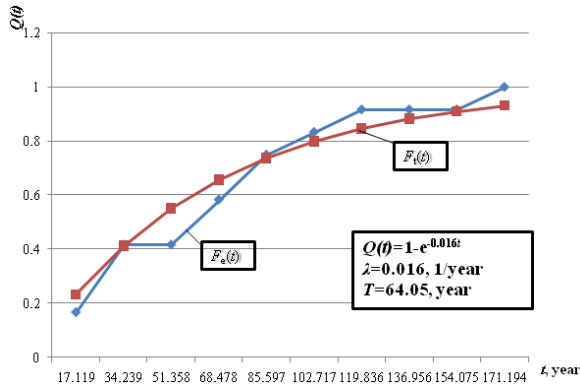


Рис. 4. Математическая модель надежности опор ВЛ.<sup>4</sup>

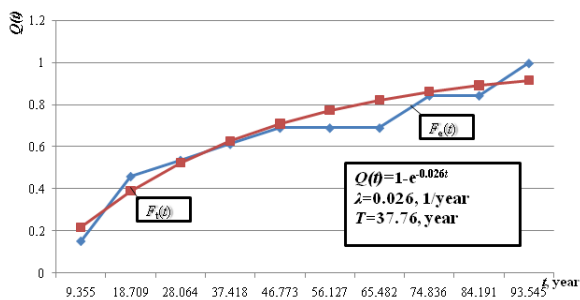


Рис. 5. Математическая модель надежности изоляторов ВЛ.<sup>5</sup>

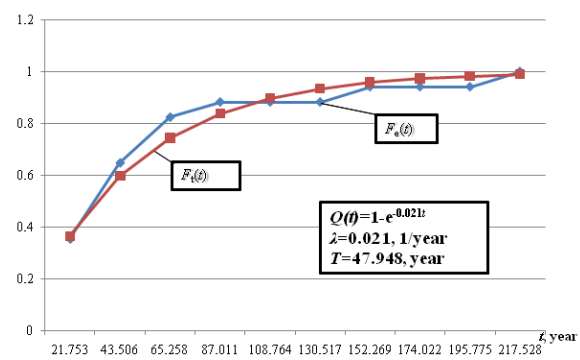


Рис. 6. Математическая модель надежности линейной арматуры ВЛ.<sup>6</sup>

Сравнение теоретической  $F_t(t)$  и экспериментальной  $F_c(t)$  функций распределения наработок на отказ ВЛ позволило определить максимальное отклонение  $D_{nmax} = |F_t(t) - F_c(t)|$ , которое было использовано в расчетах критерия согласия Колмогорова  $D_{nmax} \sqrt{n}$ , где  $n$  — количество отказов. Результаты расчетов критерия подтвердили хорошее согласие всех экспериментальных

функций распределения наработок на отказ с теоретическими функциями.

Учитывая экспоненциальный характер моделей надежности всех элементов ВЛ и нормальный период их эксплуатации нами были объединены статистические выборки по элементам в общую выборку и выполнены аналогичные расчеты для ВЛ района в целом. Математическая модель надежности ВЛ района обследования представлена на рис. 7.

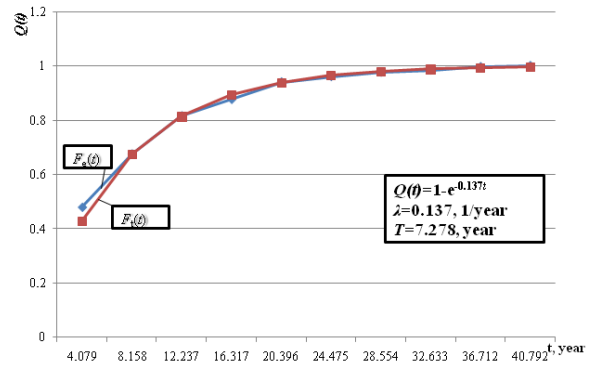


Рис. 7. Математическая модель надежности ВЛ района обследования.<sup>7</sup>

б) Математические модели восстановления ВЛ и её элементов.

При поведении статистических исследований времени восстановления ВЛ как отдельно по элементам для каждой из 17 ВЛ, так и в целом по ВЛ района учитывались следующие обстоятельства. В отличие от процесса отказов, который развивается во времени случайным образом, процесс восстановления является искусственным (ремонт элементов) и, тем самым полностью определяется организационно-технической деятельностью эксплуатационного персонала электрических сетей района. Тем более, что обоснованы и утверждены нормативы времени на выполнение ремонтных работ. Поэтому принимают интенсивность восстановления независимой от времени  $\mu(t) = \mu = const$ .

На практике время восстановления значительно отличается от нормативных значений и зависит от многочисленных факторов, в том числе и от случайных, например, от погодных условий, наличия нужного количества ремонтных бригад, исправности автотранспорта для ремонта ВЛ большой протяженности и др. Поэтому важно установить математические модели восстановления ВЛ и ее элементов для конкретного района. Параметры мо-



делей будут полезны для планирования и прогноза надёжности ВЛ и ее элементов.

Проверка статистических выборок времени восстановления для каждого из 4-х элементов отдельно по каждой из 17 ВЛ с помощью критериев согласия Вилькоксона и Пирсона подтвердила их однородность по 17 ВЛ, что позволило дифференцировать все данные о восстановлении в 4 однородные выборки по элементам.

На рис. 8–11 представлены математические модели восстановления  $F_t(t)$  4-х элементов ВЛ обследуемого района и их сравнение с экспериментальной функцией распределения времени восстановления  $F_e(t)$ . В качестве модели восстановления априори принято экспоненциальное распределение времени восстановления элементов. Рассчитывалась функция распределения времени восстановления  $F(t)$ , которая является вероятностью восстановления элемента  $S(t)$ .  $F(t) = S(t) = 1 - e^{-\mu t}$ , где  $\mu = 1/T_B$  — интенсивность восстановления элемента, 1/час, а  $T_{av}$  — время восстановления элемента в часах.

Сравнение теоретической  $F_t(t)$  и экспериментальной  $F_e(t)$  функций распределения времени восстановления элементов ВЛ позволило определить максимальное отклонение  $D_{nmax} = |F_t(t) - F_e(t)|$ , которое было использовано в расчетах критерия согласия Колмогорова  $D_{nmax} \sqrt{n}$ , где  $n$  — количество восстановлений. Результаты расчетов критерия подтвердили хорошее согласие всех экспериментальных функций распределения времени восстановления элементов с теоретическими функциями.

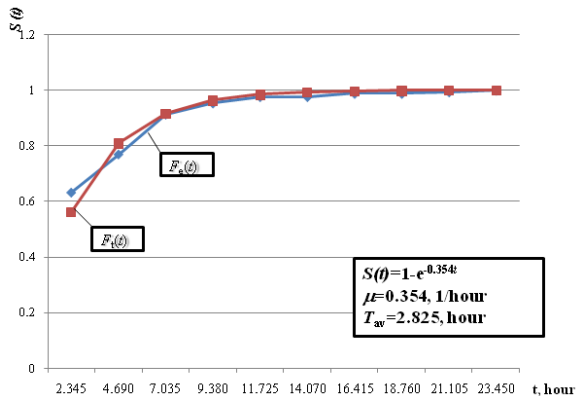


Рис. 8. Математическая модель восстановления проводов ВЛ.<sup>8</sup>

8,9,10,11 Appendix 1

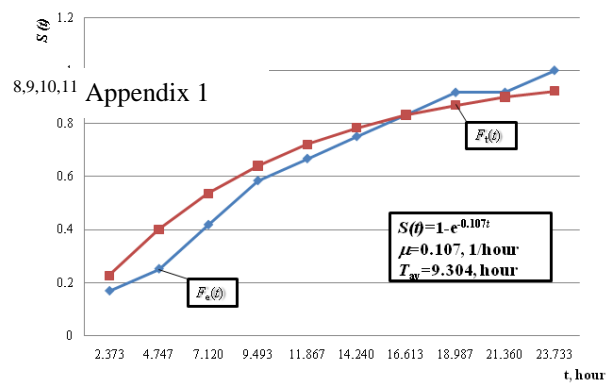


Рис. 9. Математическая модель восстановления опор ВЛ.<sup>9</sup>

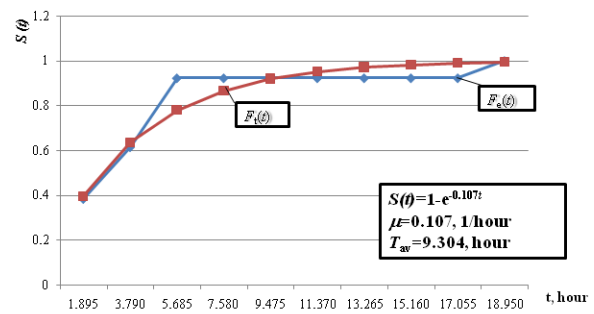


Рис. 10. Математическая модель восстановления изоляторов ВЛ.<sup>10</sup>

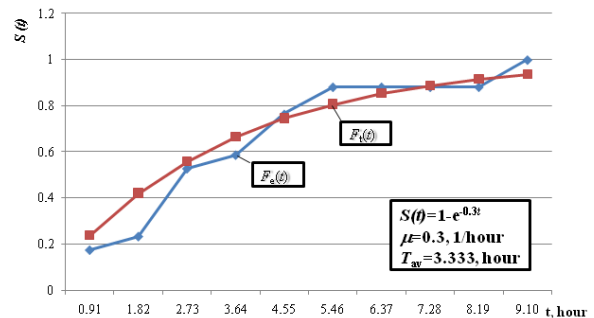


Рис. 11. Математическая модель восстановления линейной арматуры ВЛ.<sup>11</sup>

Учитывая экспоненциальный характер моделей восстановления всех элементов ВЛ нами были объединены статистические выборки по всем элементам в общую выборку и выполнены аналогичные расчеты для восстановления ВЛ района в целом. Математическая модель восстановления ВЛ обследуемого района представлена на рис. 12.

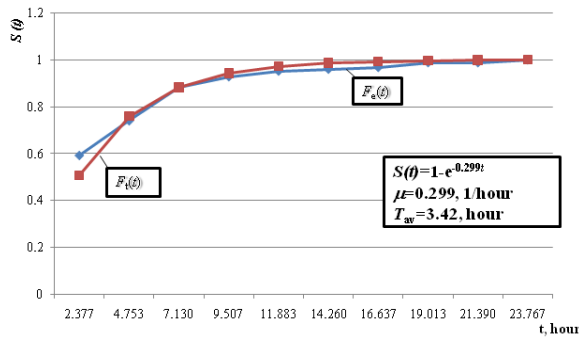


Рис. 12. Математическая модель восстановления ВЛ обследуемого района.<sup>12</sup>

в) Коэффициенты готовности и время простоя ВЛ.

Для определения реальных статистических значений коэффициентов готовности ВЛ были обработаны статистические данные о суммарном времени простоя 17 ВЛ за каждый

год наблюдений и дифференцированно по элементам ВЛ. В таблице 1 представлены значения этих коэффициентов, вычисленные за годовые интервалы времени по элементам и в целом по ВЛ района. С точки зрения надежности ВЛ представляет собой основное соединение элементов. Поэтому отдельно были вычислены  $K_{t,r.OEL.reg.}$  по формуле

$$K_{t,r.OEL.reg.} = K_{t,r.wir.} + K_{t,r.sup.} + K_{t,r.ins.} + K_{t,r.rein.} \quad (16)$$

Расхождение между статистическими значениями  $\overline{K_{t,r.OEL.reg.}}$  и вычисленными по формуле (16) объясняются отказами ВЛ, вызванными по неучтенным причинам и плановыми отключениями.

Значения коэффициентов готовности по элементам и в целом по ВЛ района.<sup>13, 14</sup>

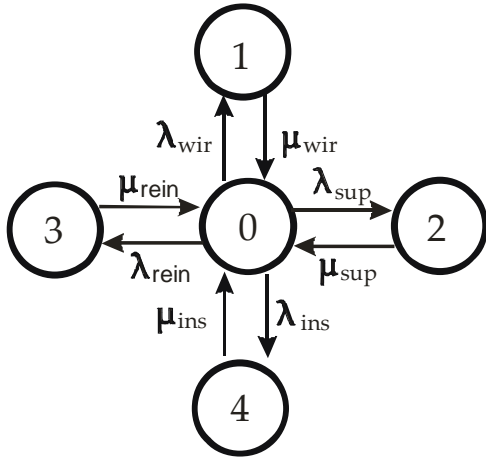
Год эксплуатации (Year of operation)	Статистические значения коэффициентов готовности элементов (Statistical values of the availability factors of elements)				Статистические значения коэффициентов готовности ВЛ района (Statistical values of the availability factors of the district overhead line) $\overline{K_{t,r.OEL.reg.}}$ и времени простоя $\overline{t_r}$ , час, вычисленное по формуле (and the idle time $\overline{t_r}$ , hour, calculated by the formula) $\overline{t_r} = 1 - \overline{K_{t,r.OEL.reg.}} \cdot 8760$		Значения $K_{t,r.OEL.reg.}$ и соответствующее время простоя, вычисленное по формуле (Value $K_{t,r.OEL.reg.}$ and the corresponding idle time calculated by the formula $t_r = K_{t,r.OEL.reg.} \cdot 8760$ )	
	$K_{t,r.wir.}$	$K_{t,r.sup.}$	$K_{t,r.ins.}$	$K_{t,r.rein.}$	$\overline{K_{t,r.OEL.reg.}}$	$\overline{t_r}$ , час (hour)	$K_{t,r.OEL.reg.}$	$t_r$ , час (hour)
2013	0.9961	0.9986	0.9994	0.9985	0.9942	50.8	0.9926	64.82
2014	0.9974	0.9955	1	0.9991	0.9951	42.9	0.9920	70.1
2015	0.9977	0.9973	0.9986	0.9995	0.9965	30.66	0.9930	61.3
2016	0.9981	0.9999	0.999996	0.9993	0.9976	21.02	0.9972	33.3
2017	0.9958	0.9984	0.9991	0.9988	0.9953	41.1	0.9921	69.2
2018	0.9947	0.9976	0.9994	0.9994	0.9950	43.8	0.9911	78

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполним проверку, полученных выше, теоретических результатов. Для этого изобразим граф состояний одноцепной ВЛ района с учетом 4-х основных её элементов (рис. 13) и напишем уравнения массового обслуживания (11) для нормального периода эксплуатации.

Уравнения массового обслуживания для графа состояний ВЛ:

$$\begin{cases} 0 = (\lambda_{wir} + \lambda_{sup} + \lambda_{ins} + \lambda_{rein})P_0 + \\ + \mu_{wir}P_1 + \mu_{sup}P_2 + \mu_{ins}P_3 + \mu_{rein}P_4, \\ 0 = \lambda_{wir}P_0 - \mu_{wir}P_1, \\ 0 = \lambda_{sup}P_0 - \mu_{sup}P_2, \\ 0 = \lambda_{ins}P_0 - \mu_{ins}P_3, \\ 0 = \lambda_{rein}P_0 - \mu_{rein}P_4, \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1. \end{cases} \quad (17)$$



0 – исправное состояние; 1, 2, 3, 4 – неисправное состояние;  $\lambda_{wir}, \lambda_{sup}, \lambda_{ins}, \lambda_{rein}$  – интенсивности отказов соответственно: проводов, опор, изоляторов, арматуры;  $\mu_{wir}, \mu_{sup}, \mu_{ins}, \mu_{rein}$  – интенсивность восстановлений соответственно: проводов, опор, изоляторов, арматуры.

Рис. 13 Граф состояний одноцепной ВЛ.<sup>15</sup>

Решение системы уравнений (17) имеет вид:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{wir}}{\mu_{wir}} + \frac{\lambda_{sup}}{\mu_{sup}} + \frac{\lambda_{ins}}{\mu_{ins}} + \frac{\lambda_{rein}}{\mu_{rein}}}, \\ P_1 = P_0 \cdot \frac{\lambda_{wir}}{\mu_{wir}}, \quad P_2 = P_0 \cdot \frac{\lambda_{sup}}{\mu_{sup}}, \\ P_3 = P_0 \cdot \frac{\lambda_{ins}}{\mu_{ins}}, \quad P_4 = P_0 \cdot \frac{\lambda_{rein}}{\mu_{rein}}. \end{cases} \quad (18)$$

Числовые значения вероятностей состояний ВЛ найдём, подставляя в (17) параметры моделей надёжности и восстановлений ВЛ из рис. 3–12.

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1}{1 + \frac{0.119}{3101.04} + \frac{0.016}{937.32} + \frac{0.026}{2321.4} + \frac{0.021}{2628}} = \\ = 0.99992537, \\ P_1 = 0.99992537 \cdot \frac{0.119}{3101.04} = 0.0000384, \\ P_2 = 0.99992537 \cdot \frac{0.016}{937.32} = 0.0000171, \\ P_3 = 0.99992537 \cdot \frac{0.026}{2321.4} = 0.0000112, \\ P_4 = 0.99992537 \cdot \frac{0.021}{2628} = 0.000008. \end{cases}$$

По уравнениям (9) и (10) вычислим коэффициенты готовности  $K_{t,r.}$  и простоя  $K_s$  ВЛ.

$$\begin{aligned} K_{t,r.} &= P_0 = 0.99992537, \\ K_s &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 0.0000384 + \\ &+ 0.0000171 + 0.0000112 + 0.000008 = \\ &= 0.0000746. \end{aligned}$$

Выполним проверку правильности вычислений по нормировочному уравнению.

$$\begin{aligned} P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 &= 0.99992537 + \\ &+ 0.0000384 + 0.0000171 + 0.0000112 + \\ &+ 0.000008 = 0.9999999999997 \approx 1. \end{aligned}$$

Небольшое расхождение объясняется округлениями при вычислениях.

### г) Сравнение надёжности одноцепной и двухцепной ВЛ

Таким образом, имея статистические данные об отказах в работе ВЛ, рассчитываются интенсивности отказов и восстановлений основных элементов ВЛ. Составляется граф состояний ВЛ, на основании которого записываются и рассчитываются уравнения массового обслуживания для нормального периода эксплуатации и находятся интересующие нас показатели надёжности ВЛ – коэффициент готовности  $K_{t,r.}$  и простоя  $K_s$ .

Анализируя величины  $K_{t,r.}$  и  $K_s$  можно прогнозировать время простоя ВЛ в предстоящий календарный год эксплуатации по формулам (12) и (13), принимая  $t_{wir} + t_r = 8760$  часов.

При сравнении вероятностного значения  $K_{t,r.} = 0.99992537$  со статистическими значениями, приведёнными в таблице 1

можно заметить незначительное расхождение в их значениях.

Так  $K_{l.r.}$  района за 6 лет наблюдений изменялся от 0.9942 до 0.9976. Ошибка в расхождении статистических  $K_{l.r.}$  с вероятностным находится в пределах от 0.23% до 0.57%. Это ещё раз подтверждает высокую точность предлагаемого метода.

#### IV. ВЫВОДЫ

1. Предложен простой инженерный метод оценки коэффициента готовности одноцепной ВЛ по показателям надёжности её основных элементов.

2. Подтверждён экспоненциальный характер распределения времени восстановления и наработок на отказ как для всех основных элементов ВЛ, так и для ВЛ в целом.

3. Выполненные статистические исследования надёжности ВЛ для условий обследуемого региона, позволили определить показатели надёжности не только ВЛ, но и её основных элементов, которые могут быть использованы при проектировании ВЛ.

4. Подтверждена высокая точности вероятностных значений коэффициента готовности ВЛ со статистическими значениями.

5. Предложенный инженерный метод оценки коэффициента готовности ВЛ позволяет прогнозировать время простоя ВЛ на предстоящий календарный год её эксплуатации.

#### APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

<sup>1</sup>**Fig. 1.** Graph of states of a single-chain overhead line. (0 - serviceable state; 1, 2, 3, ..., (n - 1), n - faulty state, where n is the number of main elements of the overhead line).

<sup>2</sup>**Fig. 2.** Graph of transitions of the two-chain overhead line. (0 - serviceable condition of the overhead line; 1.1, 2.1, ..., n.1 - faulty condition of the first overhead line; 1.2, 2.2, ..., n.2 - faulty condition of the second overhead line;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$  - failure rates of 1st, 2nd, ..., n-th elements, respectively, of the overhead line;  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{n-1}, \mu_n$  - the intensity of the recoveries of the 1st, 2nd, ..., n-th elements, respectively, of the overhead line).

<sup>3</sup>**Fig. 3.** Mathematical model of reliability of overhead line wires.

<sup>4</sup>**Fig. 4.** Mathematical model of reliability of overhead line supports.

<sup>5</sup>**Fig. 5.** Mathematical model of reliability of overhead line insulators.

<sup>6</sup>**Fig. 6.** Mathematical model of reliability of linear overhead line reinforcement.

<sup>7</sup>**Fig. 7.** Mathematical model of reliability of overhead lines of the surveyed area.

<sup>8</sup>**Fig. 8.** Mathematical model of restoration of overhead line wires.

<sup>9</sup>**Fig. 9.** Mathematical model of restoration of overhead line supports.

<sup>10</sup>**Fig. 10.** Mathematical model of restoration of overhead line insulators.

<sup>11</sup>**Fig. 11.** Mathematical model of restoration of linear overhead line reinforcement.

<sup>12</sup>**Fig. 12.** Mathematical model of restoration of overhead lines of the surveyed area.

<sup>13,14</sup>**Table 1.** The values of the availability factors for the elements and in general for the district overhead line.

<sup>15</sup>**Fig. 13.** Graph of states of a single-chain overhead line. (0 - serviceable condition; 1, 2, 3, 4 - faulty condition;  $\lambda_{wir}, \lambda_{sup}, \lambda_{ins}, \lambda_{rein}$  - failure rates, respectively: wires, supports, insulators, reinforcement;  $\mu_{wir}, \mu_{sup}, \mu_{ins}, \mu_{rein}$  - recovery rate, respectively: wires, supports, insulators, reinforcement).

#### 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 Electrotekhniki – 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 Electrotekhniki – 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] Barg I.G., Edelman V.I. *Vozdushnye Linii Elektroperedachi: Voprosy Eksploatatsii i Nadezhnosti* [Overhead lines: Issues of Operation and Reliability]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 248 p. (In Russian).
- [4] Barg I.G. Nadezhnost' VL 0,4–20 kV Sel'skokhozyaistvennogo Naznacheniya [Reliability of Overhead Lines 0.4–20kV for Agricultural Purposes]. *Energeticheskoe*

- Stroitel'stvo - Energy Construction*, 1992, no. 4. pp. 19–21. (In Russian).
- [5] Zhulev A.N., Barg I.G. O Vliyani Defektov, Dopushchennykh pri Sooruzhenii VL, na Ikh Nadezhnost' [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).
- [6] 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.
- [7] Kornatka M. Analysis of the Exploitation Failure Rate in Polish MV Networks. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2018, no 20 (3), pp. 413–419. doi: 10.17531/ein.2018.3.9.
- [8] 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.
- [9] Chojnacki A.Ł. Analiza Niezawodności Eksploatacyjnej Elektroenergetycznych Sieci Dystrybucyjnych, Rozprawa Habilitacyjna, Kielce 2013.
- [10] 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
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] *GOST 839–2019 Provoda Neizolirovannyye dlya Vozdushnykh Linii Elektropredachi. Tekhnicheskie Usloviya* [State Standart 839–2019 Non-Insulated Conductors for Overhead Power Lines. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 43 p.
- [14] *STO 56947007–29.240.01.053–2010 Metodicheskie Ukazaniya po Provedeniyu Periodicheskogo Tekhnicheskogo Osvidetel'stvovaniya Vozdushnykh Linii Elektropredachi 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).
- [15] Abdulveleev I.R. Vybor Tipa Opor Vozdushnykh Linii Elektropredachi 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).
- [16] 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).
- [17] Billinton R., Allan R.N. Reliability Evaluation of Power Systems. Springer Science & Business Media, 2013. p. 514.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Billinton R., Li W. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods. Springer Science & Business Media, 2013. p. 352.
- [22] 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.
- [23] Alvarez-Alvarado M.S., Jayaweera D. Bathtub 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.
- [24] García-Mora B., Santamaría 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.
- [25] 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.epsr.2018.11.011
- [26] 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.
- [27] Grakowski L., Chojnacki A.L., Gebczyk K., Banasik K. Statistical Analysis and Modeling of the Reliability of Overhead Low Voltage Lines. *Przegląd Elektrotechniczny*. vol. 95, no. 12, 2019. pp. 261-264. doi: 10.15199/48.2019.12.59
- [28] Swingler J. (Ed.) Reliability Characterisation of Electrical and Electronic Systems. Woodhead Publishing, 2015. 274 p.
- [29] Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M. Selection of Frequency Estimation of 6-10 kV-Overhead Lines' Technical Condition Based on Reliability Statistical Studies. *Problemele Energeticii Regionale*. vol. 4 (48). 2020. pp. 23-34,doi: 10.5281/zenodo.4316637.
- [30] Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M. Features of Forecasting Reliability of 6—10 kV Overhead Electric Lines According to Statistics of Their Failures and Reconditionings. *Problemele Energeticii Regionale*. vol. 4 (52). 2021. pp. 1-12. doi: 10.52254/1857-0070.2021.4-52.01.
- [31] Hooke J.B. *Teoriya Nadezhnosti v Elektroenergetike* [The Theory of Reliability in the Electricity Industry]. Leningrad, Energoatomizdat, 1990. 206 p. (In Russian).
- [32] Endreni D. *Modelirovanie pri Raschetakh Nadezhnosti v Elektroenergeticheskikh Sistemakh* [Modeling during Reliability Calculation in Electric Power Systems]. / D. Endreni; trans. from Eng. by B. N. Kazak; ed. Yu. N. Rudenko. – Moscow, Energoatomizdat, 1983. 336 p. (In Russian).
- [33] Ryabinin I.A., Kireev Yu.N. *Nadezhnost' Sudovykh Elektroenergeticheskikh Sistem i Sudovogo Elektrooborudovaniya* [Reliability of Ship Electric Power Systems and Ship Electric Equipment]. – Leningrad: Sudostroenie, 1974, p. 264. (In Russian).
- [34] Fokin Yu. A., Tufanov V.A. *Otsenka Nadezhnosti Sistem Elektrosnabzheniya* [Assessment of the Reliability of Power Supply Systems]. Moscow, Energoizdat, 1981, p. 224. (In Russian).
- [35] Golinkevich T. A. *Prikladnaya Teoriya Nadezhnosti: Uchebnik dlya Vuzov po Spets. «Avtomatizirovannye Sistemy Upravleniya»* [Applied Theory of Reliability: Textbook for Universities on spec. «Automated Control Systems».] – 2nd ed. reprint. and add. –Moscow, Vysshaya Shkola, 1985, p. 168. (In Russian).

**About authors.**



**Басманов Владислав Геннадьевич**, к.т.н., доцент. Область научных интересов: диагностика электрооборудования, надежность электроснабжения, энергосбережение.  
E-mail: [basmanov@vyatsu.ru](mailto:basmanov@vyatsu.ru)



**Холманских Валерий Михайлович**, к.т.н., доцент. Область научных интересов: надежность электрооборудования, энергосбережение.  
E-mail: [vm\\_holmanskih@vyatsu.ru](mailto:vm_holmanskih@vyatsu.ru)