

# ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 537.39:621.315:621.317:614.8

А.Ф. Костюков, Н.И. Черкасова,  
О.К. Никольский  
A.F.Kostyukov, N.I. Cherkasova,  
O.K. Nikolskiy

## ОСНОВЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА РИСКА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК С УЧЕТОМ ФАКТОРА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

### FOUNDATIONS OF PROBABILISTIC RISK ANALYSIS OF ELECTRICAL DEVICES TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAINTY FACTOR

**Ключевые слова:** электропроводка, оценка, прогнозирование, техническое состояние, кинетическая модель, испытания, математическое моделирование, преждевременный износ.

Целью исследования является оценка эффективности эксплуатации электроустановок, которая должна определяться, в первую очередь, обеспечением надежности и безопасности при приемлемых затратах на техническое обслуживание и ремонт. Достижение цели возможно при решении задач методами повышения надежности технических систем, инструментальными средствами диагностики и путем прогнозирования остаточного ресурса. Изучение общей структуры техногенного ущерба от электроустановок показывает, что детерминистические подходы не позволяют определить формы и размеры ущерба от аварийных режимов и опасность различного вида угроз. Вероятностный метод анализа риска базируется на стохастической природе возникновения отказов аварий и других опасностей техногенного характера. Математические модели представляются более упрощенными в сравнении с детерминистическими схемами расчета. Основные ограничения применения вероятностного анализа риска связаны с недостатком статистической информации по отказам электрооборудования, методической сложностью оценки социального (гуманитарного) ущерба, вызванного гибелью человека, и отсутствием функций распределения диагностических параметров электроустановок. При использовании вероятностного метода в зависимости от степени неопределенности исходных данных могут быть построены следующие модели оценки риска: статистические, вероятностные оценки которых определяются по

исходным данным; логико-вероятностные, где оценка рисков осуществляется для редких событий, когда статистические данные практически отсутствуют; эвристические, в основе которых лежат субъективные качественные оценки экспертными системами с использованием аппарата нечеткой логики или байесовских алгоритмов, с помощью которых возможно рассчитать риски при отсутствии или неоднозначности исходной информации.

**Keywords:** electrical wiring, estimation, forecasting, operating conditions, kinetic model, testing, mathematical modeling, premature wear.

The research goal is the estimation of the efficiency of electrical device operation which should be determined by reliability and safety at acceptable costs of maintenance and repair. That may be achieved when the problem is solved with the methods of improvement of engineering systems reliability and by the tools of residual operation time forecasting. The study of the general structure of the technogenic damage caused by electrical devices shows that the deterministic methods do not enable determining the types and degree of the damage caused by emergency state, and the danger degree. The probabilistic method of risk analysis is based on the stochastic nature of failures and accidents and other technogenic hazards. Mathematical models are more simplified in comparison with the deterministic calculation schemes. The main limitations to the application of the probabilistic risk analysis is associated with the lack of statistical information on failures of electrical equipment, methodological difficulty of evaluating social (humanitarian) damage caused by human death, and the lack of distribution

functions of the diagnostic parameters of electrical devices. When using probabilistic method and depending on the degree of uncertainty of the initial data, the following risk assessment models may be built: statistical models which probabilistic assessments are determined by the initial data; logical-

probabilistic models where risk is assessed for rare events and statistical data is practically unavailable; and heuristic model based on subjective evaluation by expert systems with the use of fuzzy logic or Bayesian algorithms which enable calculating risks in the absence or ambiguity of the initial data.

**Костюков Анатолий Федорович**, к.т.н., ст. преп., каф. «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», Алтайский государственный аграрный университет. Тел. (3852) 62-84-49. E-mail: kostyukovaf@mail.ru.

**Черкасова Нина Ильинична**, к.т.н., зав. каф. «Электроэнергетика», Рубцовский индустриальный институт (филиал), Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: 4ercas@bk.ru.

**Никольский Олег Константинович**, д.т.н., проф., Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Тел. (3852) 36-71-29. E-mail: elnis@inbox.ru.

**Kostyukov Anatoliy Fedorovich**, Cand. Tech. Sci., Asst. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49. E-mail: kostyukovaf@mail.ru.

**Cherkasova Nina Ilyinichna**, Cand. Tech. Sci., Head, Chair of Electrical Power Engineering, Rubtsovsk Industrial Institute (Branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: 4ercas@bk.ru.

**Nikolskiy Oleg Konstantinovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Ph.: (3852) 36-71-29. E-mail: elnis@inbox.ru.

В фундаментальных и прикладных исследованиях последнего десятилетия поставлена проблема обеспечения комплексной безопасности электроустановок (ЭУ) зданий и сооружений (в том числе объектов АПК) по критериям надежности, остаточного ресурса, экономичности с использованием приемлемых и управляемых рисков [1].

**Целью** исследования является оценка эффективности эксплуатации электроустановок, которая должна определяться, в первую очередь, обеспечением надежности и безопасности, при возможности увеличения остаточного ресурса при приемлемых затратах на техническое обслуживание и ремонт. Достижение цели возможно при решении **задач** методами повышения надежности технических систем, инструментальными средствами диагностики и путем прогнозирования остаточного ресурса.

В связи этим представляется важным терминологический анализ одного из основных понятий теории безопасности электроустановок – техногенного риска. Известны различные трактовки этого понятия, среди которых можно выделить следующие [2]:

- риск рассматривается как вероятность возникновения какого-либо опасного события;
- риск трактуется как случайная величина возможного ущерба или потерь;
- риск представляется двухпараметрическим вектором в виде комбинации произведения вероятности опасного события на его последствие (ущерб).

Любая из перечисленных трактовок предполагает считать риск как случайную величину с заданными распределениями вероятностей, а их параметры (математическое ожидание, дисперсия и др.) являются количественными оценками показателя риска.

Таблица

**Классификация риска**

Определение $R_{эл}$	Характеристика риска
Технический риск	Вероятность отказа электроустановки (или ее элемента) с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период эксплуатации. Этот вид риска определяется параметрами надежности ЭУ
Техногенный риск	Интегральный показатель, зависящий не только от надежности ЭУ, но и от ошибок персонала. Техногенный риск включает фактор безопасности
Индивидуальный риск	Частота поражения отдельно взятого $i$ -го человека, принадлежащего к множеству людей $N$ за время $T$
Коллективный риск	Ожидаемое количество пораженных людей электрическим током в штатном режиме или в результате аварий за определенный период времени
Ожидаемый ущерб	Математическое ожидание величины ущерба от возможных аварий или электротравматизма людей за определенный период времени
Интегрированный риск $R_{\Sigma}$	Комплексный показатель потенциальной опасности электроустановки, выраженный в едином стоимостном эквиваленте и позволяющий применить механизм исчисления полных потерь, обусловленных экономическим, социальным и экологическим ущербом
Нормативный риск	Количественное значение, величина которого устанавливается законодательно; согласно [3] $\hat{R}_{норм} = 1 \cdot 10^{-6}$

Введем понятие риска опасности электроустановки  $R_{эл}$ , под которым условимся понимать меру опасности, количественно характеризующую возможность отказа – аварии на объекте и тяжесть ее последствий, приводящих к перерывам электроснабжения, простоям технологического оборудования, возникновению электротравмы, пожару и т.д.

Отметим, что оценка риска аварий электроустановки должна основываться на анализе причин возникновения предпосылок – иницирующих событий (отказ элементов ЭУ, неисправность средств электрической защиты, ошибки персонала, негативное воздействие факторов внешней среды) и ожидаемых последствий, приводящих к нанесению материального ущерба, вреда здоровью человеку и среде его обитания. Поэтому понятие риска рассматривается комплексным, и в зависимости от постановки задачи анализа  $R_{эл}$  могут использоваться различные производные этого понятия (табл.).

В общем случае интегрированный риск электроустановки можно представить как

$$R_{\Sigma Эл} = R(Y_э) + R(Y_с) + R(Y_{экол}), \quad (1)$$

где  $R(Y_э)$ ,  $R(Y_с)$ ,  $R(Y_{экол})$  – составляющие  $R_{\Sigma}$  экономического, социального и экологического ущерба.

При детальном рассмотрении экономических, социальных и экологических последствий крупных аварий или катастроф (например, пожара) используются понятия полного, прямого и косвенного ущербов [4]. Отметим, что показатель полного ущерба в результате, например, системной аварии в электроэнергетике, следует рассматривать неопределенным, т.к. он не позволяет на заданном временном интервале учесть и количественно в отдаленной перспективе оценить сумму всех потерь, убытков и затрат как пострадавших отдельных объектов и производств, так и всего хозяйства региона в целом.

Изучение общей структуры техногенного ущерба от электроустановок показывает, что детерминистические подходы не позволяют определить формы и размеры ущерба от аварийных режимов и опасность различного вида угроз. Эти подходы предусматривают анализ этапов развития аварий, начиная от исходного события, через последовательность стадий износов и накопления повреждений до наступления конечного состояния ЭУ, т.е. ее отказа. Аварийные состояния при этом изучаются с помощью математического моделирования и проведения сложных расчетов. Однако детерминистический метод не учитывает случайные рискообразующие факторы, определяющие вероятность возникновения отказа и его последствий.

Вероятностный метод анализа риска базируется на стохастической природе возникно-

вения отказов и аварий и других опасностей техногенного характера. При этом оценка вероятности аварий производится по известному алгоритму от идентификации иницирующих событий до построения деревьев происшествий и исходов [5]. Математические модели представляются более упрощенными в сравнении с детерминистическими схемами расчета. Основные ограничения применения вероятностного анализа риска (ВАР) связаны с недостатком статистической информации по отказам электрооборудования, методической сложностью оценки социального (гуманитарного) ущерба, вызванного гибелью человека, и отсутствием функций распределения диагностических параметров ЭУ.

При использовании вероятностного метода в зависимости от степени неопределенности исходных данных могут быть построены следующие модели оценки риска:

- статистические, вероятностные оценки которых определяются по исходным данным;
- логико-вероятностные, где оценка рисков осуществляется для редких событий, когда статистические данные практически отсутствуют;
- эвристические, в основе которых лежат субъективные качественные оценки экспертными системами с использованием аппарата нечеткой логики или байесовских алгоритмов, с помощью которых возможно рассчитать риски ЭУ при отсутствии или неоднозначности исходной информации.

Рассмотрим распределения опасного исхода аварии ЭУ во времени (например, пожара), принимая гипотезу о случайном возникновении этого события, поток которых рассматривается в виде редких событий, обладающих свойствами ординарности (т.е. за достаточно малый промежуток времени  $\Delta t$  происходит не более одной реализации), отсутствия последствий (после очередной реализации их частота не изменится) и стационарности (частота реализации  $\lambda = \text{const}$ ). Тогда поток реализаций опасного события (пожара) можно рассматривать как простейший пуассоновский, для которого случайное число  $n$  реализаций, происходящих в течение времени  $\Delta t$ , подчиняется дискретному распределению биномиального типа [6]:

$$F_n = \alpha^n \exp(-\alpha), n = 0, 1, 2 \dots, \quad (2)$$

где  $n$  – число пожаров в течение времени  $\Delta t$ ;  
 $\alpha$  – параметр распределения Пуассона – среднее число реализаций в течение времени  $\Delta t$ .

Для пуассоновского потока время  $T$  между событиями подчиняется экспоненциальному закону. С увеличением  $\Delta t$  возрастает и число событий  $n$ . При  $n(\Delta t) \rightarrow \infty$  распределение Пуассона приближается к нормальному, с параметрами  $M\{n\}$  и  $D\{n\}$ .

Математическое ожидание и дисперсия для распределения Пуассона, соответственно, равны:

$$M\{n\} = \sum_{n=0}^{\infty} nF_n = \alpha; \quad (3)$$

$$D\{n\} = \sigma_n = M\{(n - \alpha)^2\} = \sum_{n=0}^{\infty} (n - \alpha)^2 F_n = \alpha. \quad (4)$$

На основании теоремы Бернулли [6] средняя частота рассматриваемых событий (пожаров), равная  $\frac{\alpha}{n}$ , при бесконечном росте  $n$  стремится к вероятности пожара:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha}{n} = P_{\Pi}. \quad (5)$$

Тогда  $F_n$  можно представить как

$$F_n = \frac{1}{n!} (nP_{\Pi})^n \exp(-nP_{\Pi}). \quad (6)$$

Получаемые численные оценки параметров риска по своей сути не являются точными, а представляют некий интервал, в котором в действительности находится истинное значение интересующей величины. В этом случае границы подобного интервала принято интерпретировать в виде неопределенности [7]. Основными источниками неопределенности, как уже отмечалось, являются неполнота и нечеткость информации, касающиеся надежности электрооборудования и коммутационной аппаратуры, человеческого фактора и т.д. Причем неопределенность обуславливается либо случайным характером условий эксплуатации электроустановок (субъективный фактор), либо неполнотой информации (объективный фактор). При этом недостающая информация может быть получена путем измерения соответствующих параметров или с помощью экспертной оценки. Для измеряемых величин разработаны алгоритмы статистической обработки экспериментальных данных. Неопределенность, характеризующая мерой рассеивания значений случайной величины, здесь может быть раскрыта путем расчета статистических характеристик (дисперсии, стандартного отклонения, доверительного интервала). Оцениваемые величины в принципе не поддаются измерению и могут быть определены субъективно, т.е. экспертным путем. Таким образом, техногенный риск можно рассматривать как некоторую сложную структуру, содержащую в своем составе компоненты вероятности опасного события, ущерба и их неопределенность.

Количественную оценку неопределенности результатов анализа риска можно провести в соответствии с отечественным нормативным документом РМГ 91-2009 [8], в основе кото-

рого лежит метод GUM [9]. Этим методом предусматривается:

- замена понятия «погрешность измерения» более строгим, содержащим метрологический смысл «неопределенность измерения», при этом понимая рассеивание экспериментальных данных вокруг измеряемой случайной величины;

- введение теоретической концепции, в основе которой лежит предположение, что все составляющие техногенного риска имеют вероятностную природу и поэтому могут быть описаны статистическими характеристиками, в частности, дисперсией.

Отсутствие статистических данных не позволяет использование традиционных частотных подходов при анализе риска и принятия решения. Имеющаяся в распоряжении исследователя информация дает возможность получить только субъективные оценки и суждения. Поэтапное раскрытие такого вида неопределенности производится с помощью байесовской процедуры [10]. В этом случае байесовская вероятность, являющаяся интерпретацией понятия «классической» вероятности, определяется как степень доверенности в истинности суждения.

Таким образом, вероятностный анализ риска предполагает, наряду со стандартной неопределенностью, рассчитываемой по значениям оцененных дисперсий компонентов  $R_{\Sigma}$ , учитывать и байесовскую (субъективную). Тогда суммарная неопределенность рассчитывается как сумма составляющих, с учетом весовых коэффициентов, каждый из которых равен коэффициенту первого (линейного) члена ряда Тейлора разложения функции по своим аргументам [10].

Реализацию метода вероятностного анализа риска можно свести к алгоритму последовательности следующих процедур:

1. Описание таксономии потенциальных техногенных рисков с установлением наиболее опасных источников.

2. Выявление возможных инцидентов (отказ, электротравма, пожар и т.д.) и составление прецедентных сочетаний по схеме: иницирующие события – промежуточные события – инцидент. Здесь возможно использовать метод «дерева событий».

3. Анализ постинцидентных сочетаний исходов, которые могут иметь место после инцидента, например, электротравмы. На этом этапе используется метод «дерева исходов», при условии, что в данном случае рассматривается в виде инцидента один из

возможных его исходов (летальный, инвалидность, временная нетрудоспособность).

4. Составление сценариев техногенного риска и оценка предполагаемых ущербов в натуральном выражении.

5. Оценка всех видов ущерба и потерь в денежном эквиваленте.

6. Получение точечной оценки величины риска и сравнение его с нормативной величиной.

### Выводы

1. Руководствуясь рекомендациями GUM, рассмотрен вероятностный подход к анализу техногенного риска электроустановки, в соответствии с которым  $R_{\Sigma}$  можно представить как векторную величину, характеризующую компонентами вероятности опасного события, его ущерба и их неопределенностям.

2. Рассмотрены два вида неопределенностей, связанных либо с вероятностным характером рассматриваемого процесса, либо с недостатком информации. Неопределенность первого вида оценивается с применением классических и статистических методов. Неопределенность второго вида оценивается с помощью экспертных систем, используя при этом нечеткие алгоритмы или байесовские процедуры. Причем неопределенность этого вида можно рассматривать как аппроксимации соответствующих дисперсий, существование которых предполагается.

3. Процедура количественной оценки неопределенности сводится к установлению интервала, в котором с заданным уровнем доверия находится точечная оценка.

### Библиографический список

1. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные последствия. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.

2. Ларичев О.И. Проблемы принятия решений с учетом фактора риска и безопасности // Вестник АН СССР. – 1987. – № 11.

3. Федеральный закон Российской Федерации о пожарной безопасности. – № 230 – ФЗ от 18.10.2007.

4. ГОСТ Р 51905.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.

5. Еремина Т.В. Вероятностный анализ безопасности сельских электроустановок: монография. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2010 – 200 с.

6. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 551 с.

7. Руководство по выражению неопределенности измерений / пер. с англ.; науч. ред. проф. В.А. Слаев. – СПб.: ОНТИ ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1999. – 135 с.

8. РМГ 91-2009. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.

9. ISO / IEC Guide 98:1995 guide to the expression of uncertainty in measurement.

10. Хабаров С.П. Экспертные системы. – М., 2003. – 218 с.

### References

1. Makhutov N.A. Prochnost' i bezopasnost'. Fundamental'nyeiprikladnyeposledstviya. - Novosibirsk: Nauka, 2008. - 528 s.

2. Larichev O.I. Problemyprinyatiyareshenii s uchetomfaktorariskaibeopasnosti // Vestnik AN SSSR. – 1987. – № 11.

3. Federal'nyizakonRossiiskoiFederatsii o pozharnoibeopasnosti, № 230 – FZ ot 18.10.2007.

4. GOST R 51905.5-2005. Menedzhmentriska. Rukovodstvopoprimeneniyumetodovanalizanadezhnosti.

5. Eremina T.V. Veroyatnostnyianalizbezopasnostisel'skikhelektroustanovok: Monografiya. – Ulan-Ude: Izd-vo VSGTU, 2010 – 200 s.

6. Venttsel' E.S. Issledovanieoperatsii. – М.: Sovetskoe radio, 1972. - 551 s.

7. Rukovodstvopovyrazheniyuneopredelenostiizmerenii / per. s angl.Nauchn. red. prof. Slaev V.A. – SPb: ONTI GP «VNIIM im. D. I. Mendeleeva», 1999. – 135 s.

8. RMG 91-2009. Rekomendatsiipomezhgosudarstvennoistandartizatsii. GSI. Sovmestnoeispolzovanieponyatii «pogreshnost' izmereniya» i «neopredelennost' izmereniya». Obshchieprintsipy.

9. ISO / IEC Guide 98:1995 Guide to the expression of uncertainty in measurement.

10. Khabarov S.P. Ekspertnyesistemy. - М.: 2003 – 218 s.

