

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.31.:004.8:333.45

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-236-6-61-67

О.К. Никольский, Л.В. Куликова,  
В.В. Фараносов, Д.О. Суринский  
O.K. Nikolskiy, L.V. Kulikova,  
V.V. Faranosov, D.O. Surinskiy

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АНТРОПОГЕННОЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

### PROBABILISTIC MODEL OF ANTHROPOGENIC ELECTRICAL SAFETY SYSTEM

**Ключевые слова:** электроустановка, антропогенный риск, человеко-машинная система, имитационная модель, логический вывод, рискообразующие факторы.

Приведена вероятностная модель системы антропогенной безопасности выхода из строя или нарушения режима эксплуатации электроустановок. В эту систему необходимо включить основные составляющие, которые образуют обобщенную систему, состоящую из следующих подсистем: информационное обеспечение, организационные и инженерно-технические мероприятия, а также защитные средства. Кроме того, здесь необходимо учитывать эксплуатационный контроль параметров техногенной безопасности и диагностики технического состояния эксплуатируемых электроустановок. Указанные подсистемы характеризуются различными элементами, которые определяют функционирование отдельных подсистем и всей системы в целом. Эти элементы охватывают достаточное количество факторов, позволяющих не только оценить состояние электроустановки, но и выполнить прогноз выхода из строя или нарушения режима эксплуатации электроустановок. В данном случае человек характеризуется дуальными свойствами: во-первых, определяется как субъект защиты, во-вторых, сам является источником снижения уровня электробезопасности и представляет собой один из рискообразующих факторов. Рискообразующие факторы являются переменными величинами и характеризуются циклом не связанных между собой событий. Результирующее влияние этих факторов представлено вероятностной моделью с дискретными состояниями определенными для каждого из факторов. Разработанный алгоритм состоит из следующих блоков: блок сбора данных и анализа информационных потоков, характеризующих функционирование системы; блок оценки влияния каждого фактора и весовое зна-

чение этого влияния на итоговую оценку состояния электробезопасности. Этот алгоритм реализован в процессорной модели, которая представлена автоматизированной информационной системой (АИС). АИС обрабатывает и анализирует данные о текущем состоянии системы и дает заключение об эффективности функционирования человеко-машинной системы «Ч-Э-С».

**Keywords:** electrical installation, anthropogenic risk, human-machine system, simulation model, logical inference, risk-forming factors.

This paper discusses the process of creating and automating a model of the anthropogenic safety system functioning of electrical installations which is formed on the basis of four subsystems such as: information support, organizational measures, technical measures and protective means, as well as operational control of anthropogenic safety parameters and diagnostics of the technical condition of electrical installations in the industry. In turn, each of the above subsystems consists of a set of elements included in it. In addition, in the course of functioning, the system interacts with a person who performs the role of the protection subject, controlling individual subsystems and elements. The anthropogenic safety system under consideration is an integral part of a higher-level system – the human-machine system "Man-Electrical Installation-Environment" (H-E-S). During this research, a simulation model for assessing the risk of electrical installations was compiled consisting of parameters characterizing the main components of the human-machine system "H-E-S" such as a person, an electrical installation and the environment. Risk-forming factors are presented in the form of variables and unrelated events, and their final value is represented by a probabilistic model with discrete states. The essence of the developed algorithm is presented in the form of a

scheme of information flows and a processor model of work in an automated information system (AIS), the data on the current state of the system processed in this way

give an opinion on the effectiveness of the human-machine system "H-E-S" functioning.

**Никольский Олег Константинович**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: epb\_401@mail.ru.

**Куликова Лидия Васильевна**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: liliavaskul@gmail.com.

**Фараносов Вадим Викторович**, аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: fvv@688144.ru.

**Суринский Дмитрий Олегович**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья, г. Тюмень, Российская Федерация, e-mail: surd1985@mail.ru.

**Nikolskiy Oleg Konstantinovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: epb\_401@mail.ru.

**Kulikova Lidiya Vasilevna**, Dr. Tech. Sci., Prof., Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: liliavaskul@gmail.com.

**Faranosov Vadim Viktorovich**, post-graduate student, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: fvv@688144.ru.

**Surinskiy Dmitriy Olegovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., State Agricultural University of Northern Trans-Urals, Tyumen, Russian Federation, e-mail: surd1985@mail.ru.

### Введение

Работа и функционирование электроустановок, которые эксплуатируются в различных сферах АПК, осуществляются в довольно сложных условиях, кроме того, обслуживающий персонал часто имеет низкую квалификацию. В такой обстановке значительно возрастает риск возникновения опасных ситуаций. Для снижения уровня этого риска необходимо не только контролировать состояние системы электробезопасности, но и разрабатывать эффективные комплексные методы и способы снижения рисков, что и позволяет повысить уровень электробезопасности на предприятиях АПК.

**Цель** работы – это исследование системы техногенной безопасности при эксплуатации электроустановок и разработка вероятностной модели функционирования системы, которая дает возможность выделить наиболее значимые факторы, негативно влияющие на уровень электробезопасности, и дать рекомендации по снижению этого влияния.

### Экспериментальная часть

Для предотвращения рисков возникновения опасных ситуаций, связанных с эксплуатацией электроустановок, необходимо учитывать различные факторы, влияющие на уровень электробезопасности. Кроме того, эти факторы характеризуются различными показателями вероятностей и взаимодействуют между собой, что не позволяет оценить стандартными методами уровень электробезопасности. Для оценки этого уровня разработана система техногенной без-

опасности (СТБ), которая учитывает вероятностные характеристики параметров и их взаимное влияние. Данная система основана на комплексе защитных средств и реализации организационных и инженерно-технических мероприятий с учетом условий их эксплуатации, что позволяет предотвратить риски, связанные с выходом из строя оборудования и технических средств, а также создания условий по обеспечению безопасного взаимодействия персонала с электроустановками [1].

Разработанная система формализована и представлена четырьмя подсистемами, которые включают следующие составляющие: информационное обеспечение (ПС I), организационные мероприятия (ПС II), инженерно-технические мероприятия и защитные средства (ПС III) и эксплуатационный контроль параметров техногенной безопасности и диагностирования технического состояния электроустановок (ПС IV). Каждая из указанных подсистем состоит из элементов, которые характеризуют основные свойства этих подсистем. Роль субъекта защиты выполняет человек, а СТБ показывает взаимодействие с этим субъектом. Данные взаимодействия помогают реализовать управление отдельными подсистемами и элементами СТБ.

Предложенная СТБ, в свою очередь, является составной частью человеко-машинной системы более высокого уровня – «Человек-Электроустановка-Среда» (Ч-Э-С) [1].

На рисунке 1 представлено функционально-морфологическое описание системы «Ч-Э-С», которое позволяет выявить компоненты этой

системы и установить входящие в нее элементы. Необходимо отметить, что все составляющие взаимодействуют между собой на разных уровнях иерархии. Человек при этом выполняет двойную функцию, т.к. является одновременно и объектом, и субъектом защиты. В ПС I необходимо осуществить классификацию и структурирование первичной информации, которая представлена базой знаний. Предупреждение или снижение техногенных рисков реализуется посредством использования ПС IV в формализованном виде, что позволяет принять благоприятное управленческое решение.

На рисунке 1 приведена обобщенная имитационная модель в обобщенном виде, которая является функционально-морфологическим описанием рассматриваемой ЧМС «Ч-Э-С». Такой подход позволяет моделировать реальную систему, где вводятся параметры, учитывающие процессы, происходящие в этой системе с достаточно высокой точностью. Эти процессы не-

возможно описать математической моделью, т.к. основные параметры зависят от целого ряда факторов вероятностного характера. Кроме того, необходимо учитывать взаимную связь между компонентами ЧМС.

Тем не менее разработанная модель позволяет проводить исследования с целью изучения состояния электроустановок в различных реальных условиях. Такой метод необходимо использовать в тех случаях, когда возникают ситуации возможного значительного роста рисков травматизма или существенного материального ущерба. Построение модели ЧМС «Ч-Э-С» затруднено, если исходные данные характеризуются неоднозначно и сохраняют неопределенность параметров, но с известной степенью вероятности. Для оперативной корректировки показателей необходимо осуществлять наблюдения в динамике, что позволяет внести уточнения в разработанную модель.

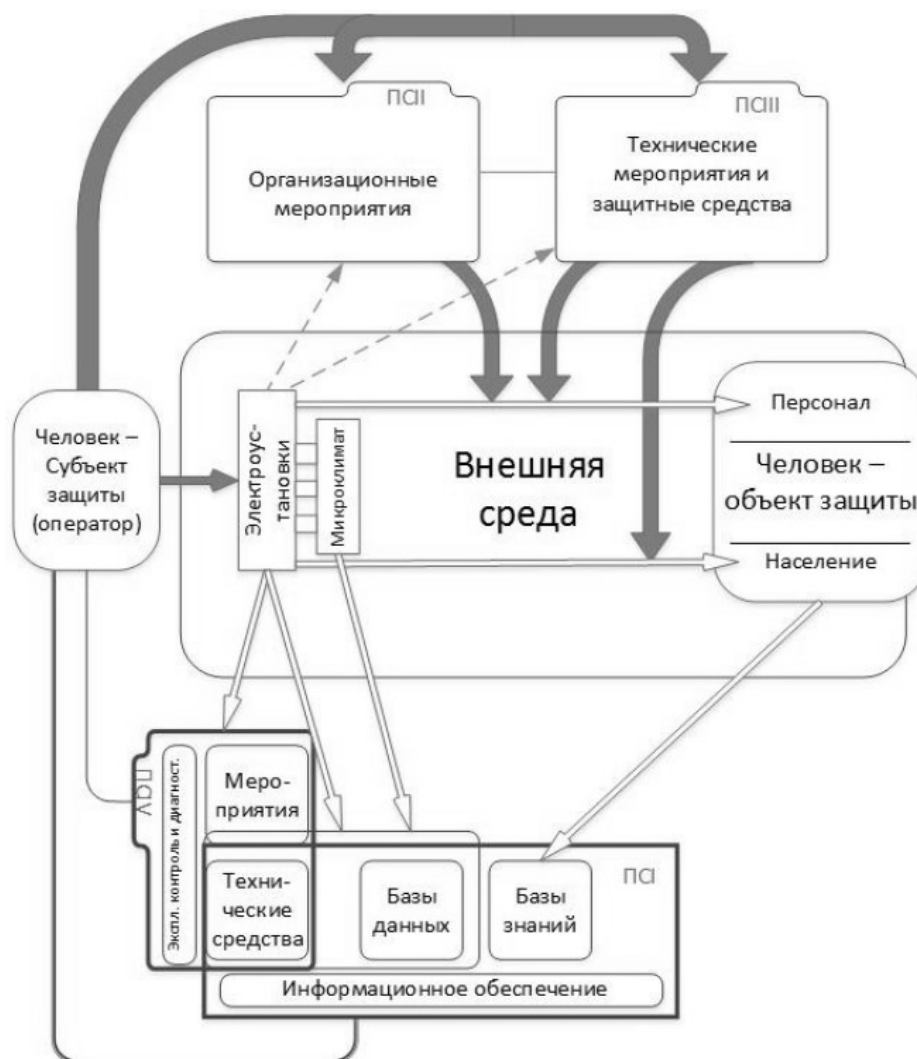


Рис. 1. Функционально-морфологическое описание системы «Человек-Электроустановка-Среда»

Выбор критериев и определения способов решения проблемы, которая обеспечивает безопасность электроустановок в агропромышленном комплексе, осуществляется в соответствии с теорией системного подхода, последняя является методологической основой этого процесса. Такой подход позволяет достигнуть поставленной цели и получить результаты, которые определяют уровень повышения безопасности человека и среды его обитания. В этом случае ЧМС, взаимодействующая между компонентами, может быть описана в виде совокупности следующих состояний (рис. 2):

1. Элемент – «Человек». Человек рассматривается как объект защиты. Кроме того, человек, выполняющий роль оператора, предпринимает различные действия и выполняет различные технологические операции. Здесь объектом защиты от опасного воздействия электрического тока является человек, тогда для него можно выделить следующие характеристические признаки: возраст, пол, физическое состояние, медицинские противопоказания и пр.

В этом случае человека необходимо рассматривать как одну из важнейших составляющих элемента системы ЧМС. Здесь следует выделить свойства и (или) состояния этого элемента и определить его характеристики, основными из которых являются:  $Ч_1$  – безошибочные действия;  $Ч_2$  – неопределенность действия;  $Ч_3$  – неправильные действия оператора.

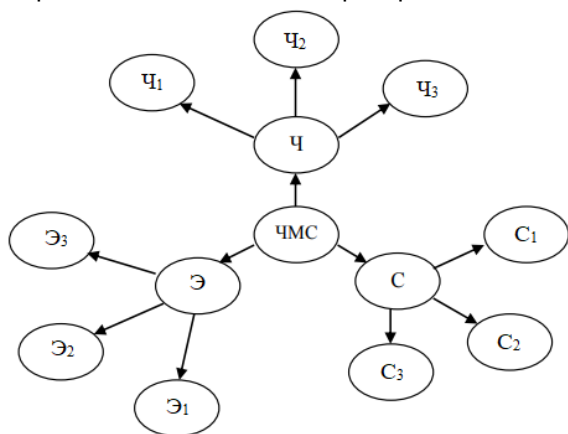


Рис. 2. Классификация состояний элементов «Ч-Э-С»

2. Элемент – «Электроустановка». В данном случае в качестве электроустановки рассматривается технологическое электрооборудование и (или) система электроснабжения в целом, которые потенциально опасны и характеризуются

следующими состояниями:  $Э_1$  – технологический процесс протекает согласно требованиям (ПУЭ);  $Э_2$  – технологический процесс протекает с нарушением требований техники безопасности;  $Э_3$  – неработоспособное состояние, интерпретируемое как структурный отказ.

3. Элемент «Среда» – рассматривается как рабочая (внутренняя) среда, т.е. электрооборудование может подвергаться различному опасному воздействию ( $С_1, С_2, С_3$ ).

Результат успешного функционирования ЧМС «Ч-Э-С» – это обеспечение работоспособности и безопасности обслуживания, что и является основной целью. В процессе формирования имитационной модели определим следующие этапы:

1) постановка задачи через формулировку проблем и определение целей исследования;

2) разработка семантического и лингвистического описания ЧМС «Ч-Э-С»;

3) подготовка базы данных, включающей идентификацию, спецификацию и интерпретацию рисков опасности электроустановок объекта;

4) формирование базы знаний, структурирование и написание кода программы для обработки данных;

5) верификация, заключающаяся в проверке полученной информации на достоверность;

6) валидация, оценивающая требуемую точность данных и результатов, а также соответствие имитационной модели реальной системе «Ч-Э-С» [1, 2].

Стохастическая ЧМС характеризуется качественными и количественными значениями параметров, которые описывают данный процесс. Для учета свойств компонентов и характера взаимосвязей между ними используют процесс формализации ЧМС. Различные варианты системы техногенной безопасности характеризуют параметры, которые представлены в виде векторов, что позволяет учитывать и свойства компонентов, и характер их взаимосвязей, при этом каждому параметру соответствует определенное состояние системы. Таким образом, в каждом конкретном случае необходимо учитывать взаимное влияние как параметров, так и процессов функционирования ЧМС «Ч-Э-С».

Приведем классификацию параметров, которые определяют функционирование ЧМС

«Ч-Э-С», при этом учитываем основные критерии и характерные особенности факторов.

*Оператор, эксплуатирующий электроустановку, – человек.* Вероятность возникновения электротравмы и степень поражения обусловлены величиной суммарного сопротивления тела человека. Необходимо отметить, что общее сопротивление человека определяется суммой указанных составляющих. Кроме того, это сопротивление не является константой, т.к. зависит от множества параметров, что и определяет степень опасности для человека.

*Параметры электроустановки.* К параметрам действующей электроустановки относятся следующие характеристики: по напряжению – это линейное ( $U_n$ ) и фазное ( $U_\phi$ ) напряжения, напряжение, возникающее между электроустановкой и оператором ( $U_{эл-оп}$ ) и шаговое напряжение ( $U_{ш}$ ); по току – это ток однофазного замыкания на землю ( $I_3$ ); по сопротивлению – это сопротивление изоляции фазного провода ( $R_{из}$ ), сопротивление нейтрали ( $R_n$ ) и сопротивления фазного ( $R_\phi$ ) и нулевого ( $R_0$ ) проводов.

*Параметры среды.* Важной составляющей всей системы электробезопасности являются параметры среды. Для этих параметров необходимо разграничить влияние и выделить определяющие это влияние свойства. В таком контексте выделим рабочую среду – это «внутренняя область», которая характеризуется пространством, где персонал обслуживает электроустановки, и внешнюю среду – это среда, определяющая уровень воздействия внешних факторов. Только совместный учет этих параметров достоверно определяет воздействие на функционирование электроустановок [3].

При эксплуатации электроустановок необходимо учитывать негативное влияние низких температур, вредных примесей в воздухе, загрязненность и запыленность окружающей среды, повышенную влажность и прочие факторы, снижающие уровень электробезопасности. Такие негативные воздействия можно наблюдать при эксплуатации машин и оборудования, работающих в сфере животноводства, птицеводства. Здесь необходимо выделить такие параметры: резкие колебания температур, наличие в воздухе значительной концентрации аммиака, неблагоприятные климатические условия и др.

Рискообразующие факторы можно представить в виде целого набора переменных, которые

характеризуют несвязанные между собой события ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ).

Введем допущение следующего порядка: пусть ЧМС «Ч-Э-С» является вероятностной моделью, которая описывается принятыми  $n, m, k, l, t, p$  дискретными состояниями, что соответствует изменениям по различным компонентам человеко-машинной системы [4].

В этом случае объединенную группу независимых событий следует представлять как совокупность событий по каждому из учитываемых компонент. С учетом известных положений [5-7] можно определить итоговые суммы вероятностей по различным компонентам, входящим в исследуемую систему:

- составляющая системы «Оператор, эксплуатирующий электроустановку - человек»:

$$\sum_m^n P(X_i) = P_{ч.}, \quad (1)$$

где  $P_{ч.}$  – вероятность возникновения опасных ситуаций оператора;

- составляющая системы «Электроустановка»:

$$\sum_k^l P(Y_i) = P_{э.у.}, \quad (2)$$

где  $P_{э.у.}$  – вероятность возникновения аварийной ситуации при эксплуатации электроустановки;

- составляющая системы «Среда»:

$$\sum_t^p P(Z_i) = P_{с.}, \quad (3)$$

где  $P_{с.}$  – вероятность негативного воздействия окружающей среды с учетом конкретного воздействующего параметра.

На рисунке 3 представлена схема, реализующая взаимодействие информационных потоков, которые оказывают влияние на возникновение риска, при этом необходимо учитывать степень влияния каждой составляющей и выполнять анализ, в результате чего можно построить автоматизированную информационную систему (АИС). При этом пользователь осуществляет ввод необходимых данных, проводит настройку дерева решений, выполняет необходимые расчеты на основе настроенной для данного конкретного случая математической модели.

Для расчетов используем настроенное дерево решений (рис. 4) на основе разработанной имитационной модели, которая состоит из АИС и математической модели.

Алгоритм работы с системой АИС включает следующие этапы:

1-й этап – это ввод исходной информации о техническом состоянии электроустановки;

2-й этап – это ввод информации о характерных условиях эксплуатации электроустановки;

3-й этап – это вычислительный процесс, учитывающий введенные показатели по различным

параметрам, и прогнозируемые связи между составляющими системы;

4-й этап – это детальный анализ полученной информации о вероятности возникновения риска и оценка уровня опасности для оператора, эксплуатирующего электроустановку.



Рис. 3. Схематичное представление информационных потоков обобщенной системы

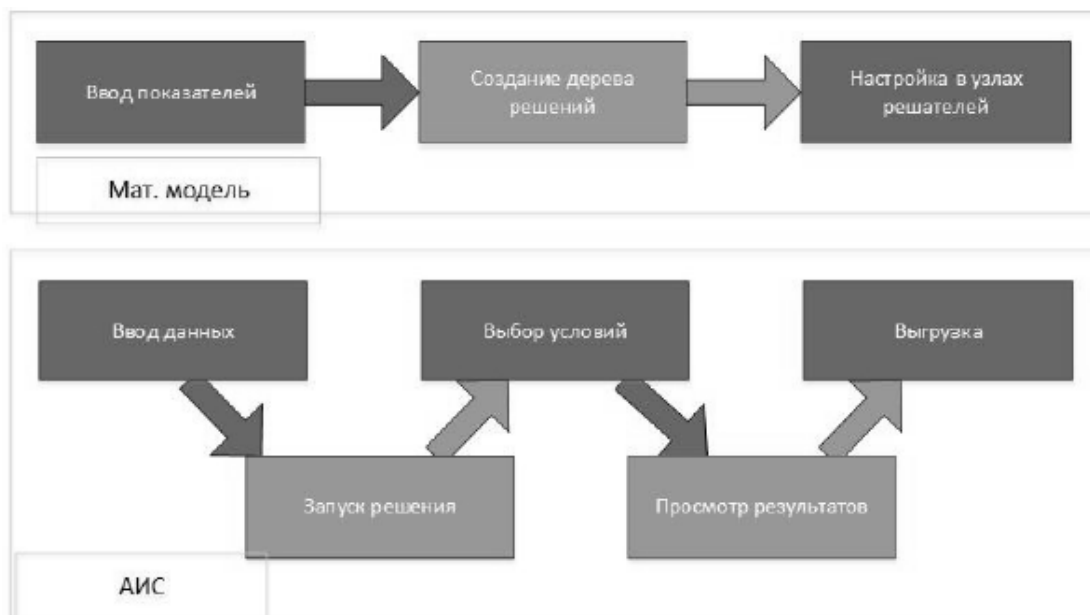


Рис. 4. Блок-схема процессорной модели работы в системе АИС

Таким образом, полученную информацию можно использовать как для предотвращения опасных ситуаций, так и для планирования мероприятий по электробезопасности для конкретных предприятий с учетом технического состояния электрооборудования, квалификации об-

служивающего персонала, состояния окружающей среды и пр.

В результате проведенных экспериментов по анализу состояния электробезопасности в различных хозяйствах АПК Алтайского края на основе программного комплекса человекo-машин-

ной системы «Ч-Э-С» получили данные, которые позволили составить план мероприятий по повышению уровня электробезопасности с учетом данных для конкретного предприятия, что приводит к снижению риска возникновения опасных ситуаций при эксплуатации электрооборудования.

### Выводы

Разработанная АИС позволяет оценить уровень электробезопасности конкретного предприятия и выявить риски возникновения опасных ситуаций в человеко-машинной системы «Ч-Э-С» с учетом целого комплекса параметров и факторов, которые взаимосвязаны и описываются вероятностными характеристиками. Реализация полученных рекомендаций позволяет значительно снизить риски возникновения опасных ситуаций при эксплуатации электрооборудования в системе АПК.

### Библиографический список

1. Никольский, О. К. Модель функционирования системы техногенной безопасности электроустановок / О. К. Никольский, М. А. Габова. – Текст: непосредственный // Вестник АПК Ставрополя. – 2021. – № 1. – С. 19-23.
2. Качесова, Л. Ю. Темпорально-нечеткий метод оценки техногенных рисков электроустановок / Л. Ю. Качесова. – Текст: непосредственный // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2018. – № 5. – С. 202-207.
3. Теория и практика управления техногенными рисками: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / О. К. Никольский, Н. П. Воробьев, Т. В. Еремина [и др.]. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – 219 с. – Текст: непосредственный.
4. Еремина, Т. В. Пожарная опасность электроустановок: модель и прогноз / Т. В. Еремина, И. А. Шаныгин. – Текст: непосредственный // Научные труды КубГТУ. – 2019. – № 3. – С. 572-582.
5. Тишков, О. И. Математическое моделирование инновационного потенциала организации на основе гибридных экспертных систем: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.18 / Тишков Олег Иванович. – Барнаул, 2010. – 170 с. – Текст: непосредственный.

6. Kachesova, L.Y. An Expert System for Assessing Technogenic Risks of Electrical Installations Using Temporal Logic / L.Y. Kachesova, O.K. Nikolskii // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89, No. 12. – P. 681-684. – DOI 10.3103/S1068371218120040.

7. Гулякина, Н.А. Языки и технологии программирования, ориентированные на обработку семантических сетей / Н.А. Гулякина, О.В. Пивоварчик, Д.А. Лазуркин // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2012. – № 2. – С. 221-228.

### References

1. Nikolskii, O.K. Model funktsionirovaniia sistemy tekhnogennoi bezopasnosti elektroustanovok / O.K. Nikolskii, M.A. Gabova // Vestnik APK Stavropolia. – 2021. – No. 1. – S. 19-23.
2. Kachesova, L.Iu. Temporalno-nechetkii metod otsenki tekhnogennykh riskov elektroustanovok / L.Iu. Kachesova // Vestnik KrasGAU. – 2018. – No. 5. – S. 202-207.
3. Teoriia i praktika upravleniia tekhnogennymi riskami: uchebn. posobie dlia stud. vyssh. ucheb. zavedenii / O.K. Nikolskii, N.P. Vorobev, T.V. Eremina, A.F. Kostiukov, A.F. Kalinin, A.N. Tushev. – Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2015. – 219 s.
4. Eremina, T.V. Pozharnaia opasnost elektroustanovok: model i prognoz / T.V. Eremina, I.A. Shanygin // Nauchnye trudy KubGTU. – 2019. – No. 3. – S. 572-582.
5. Tishkov O.I. Matematicheskoe modelirovanie innovatsionnogo potentsiala organizatsii na osnove gibridnykh ekspertnykh sistem: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.18. – Barnaul, 2010.
6. Kachesova, L.Y. An Expert System for Assessing Technogenic Risks of Electrical Installations Using Temporal Logic / L.Y. Kachesova, O.K. Nikolskii // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89, No. 12. – P. 681-684. – DOI 10.3103/S1068371218120040.
7. Guliakina, N.A. Iazyki i tekhnologii programirovaniia, orientirovannye na obrabotku semanticheskii setei / N.A. Guliakina, O.V. Pivovarchik, D.A. Lazurkin // Otkrytye semanticheskii tekhnologii proektirovaniia intellektualnykh sistem. – 2012. – No. 2. – S. 221-228.

