

## АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

С. В. Солёный<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

О. Я. Солёная<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** обширность методов оценки пожарной безопасности систем низковольтного электроснабжения, а также подходов к определению факторов опасности приводит к усложнению выбора метода и процесса такой оценки. **Цель:** унификация методов математического моделирования и оценки безопасной эксплуатации систем низковольтного электроснабжения путем классификации и анализа существующих подходов к определению уровня их пожарной безопасности. **Результаты:** анализ существующих методов оценки безопасности эксплуатации систем низковольтного электроснабжения позволил установить, что не весь имеющийся на сегодняшний день в этой области математический аппарат напрямую можно использовать для проведения оценки пожарной безопасности систем низковольтного электроснабжения. Вероятностные методы являются весьма объемными из-за необходимости проводить анализ с высокой детализацией рассматриваемых аварийных процессов. Эвристические методы не позволяют адекватно оценить результаты, так как вызывает сомнения достоверность используемой в них системы баллов. Логико-вероятностные методы не учитывают периодическое диагностирование защитно-коммутиционных аппаратов в процессе эксплуатации, что приводит к ошибкам в оценке на несколько порядков. С применением методов, построенных на использовании теории однородных марковских процессов, разработана адекватная с точки зрения достоверности математическая модель оценки безопасности электрифицированных помещений, не требующая большого инженерного ресурса при проведении оценки. **Практическая значимость:** на основе однородных случайных марковских процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем получена математическая модель оценки пожарной безопасности систем низковольтного электроснабжения, которая позволяет учитывать все возможные случаи нахождения элементов системы в опасном и безопасном состояниях и может применяться для анализа подобных систем любой конфигурации и сложности с точки зрения оценки их пожарной и эксплуатационной безопасности.

**Ключевые слова** — система низковольтного электроснабжения, электропроводка, математическое моделирование, контактное соединение, электрическое искрение, переходное сопротивление, изоляция, пожарная безопасность.

### Введение

В рамках Федеральной целевой программы «Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2017 г.» № 1481 от 30.12.2012 г. предусмотрено проведение исследований в области разработки математических моделей и методов по определению и прогнозированию вероятности возникновения пожаров, эффективных способов их предупреждения и ликвидации последствий. Также, согласно Федеральному закону Российской Федерации № 117-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 10.07.2012 г.» [1], предусмотрена разработка новых технических решений и организационных мероприятий, использование действующих и создание новых нормативных документов, применение которых позволит обеспечивать пожарную безопасность промышленных и бытовых электрифицированных объектов.

Анализ статистики пожаров в Российской Федерации по причине повреждений электрической проводки за период с 2005 по 2015 г. [2] свидетельствует о том, что если не разрабатывать новые и не совершенствовать известные методы и способы обеспечения безопасной эксплуатации

систем низковольтного электроснабжения (СНЭ), то в них с доверительной вероятностью 0,95 ежегодно будет происходить до 40 000 пожаров по электротехническим причинам [3].

Следовательно, работа, направленная на создание новых и совершенствование известных математических моделей и методов оценки и прогнозирования безопасной эксплуатации СНЭ, является актуальной научной задачей, решение которой позволит не допускать случаев появления возгораний горючего материала (изоляция и др.) в СНЭ и обеспечит их пожарную безопасность на уровне действующих нормативных документов [4].

### Методы оценки пожарной безопасности СНЭ

В связи с принятием законов [1, 5] особую актуальность приобретают разработка и внедрение в отечественную практику научно обоснованных рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности СНЭ и использование методов, с помощью которых предоставляется возможность проводить оценку существующего уровня пожарной опасности объектов и сравнивать его с законодательно установленным ГОСТ значением  $1 \cdot 10^{-6}$  [4].

В последнее время происходит переход от жесткого нормирования требований пожарной безопасности при проектировании СНЭ к гибкому или объектно-ориентированному. Этот подход заключается в том, что устанавливаются цели, которым должна соответствовать система безопасной эксплуатации низковольтного электрооборудования, но при этом не регламентируются проектные решения для их достижения. Таким образом, сводятся к минимуму ограничения в устройстве СНЭ, а приветствуется использование новых подходов к обеспечению ее безопасной эксплуатации, чем достигается более высокая экономическая эффективность проектных решений [6].

На сегодняшний день отсутствует единый всемирно используемый метод оценки пожарной безопасности СНЭ, который был бы принят в качестве обязательного в нормативной документации, регламентирующей данные вопросы [7]. В странах с высоким уровнем развития промышленности применяются методы оценки пожарной безопасности СНЭ на основе логических деревьев. Для объектов, представляющих повышенную опасность, применяются специально разработанные методы оценки пожарной безопасности СНЭ, утвержденные на законодательном уровне [8].

Пожарная безопасность СНЭ должна оцениваться по общим законодательно прописанным принципам, а методы ее оценки могут выбираться самостоятельно. В качестве расчетных методов допускается использовать как качественный анализ, так и количественный, включая индексные методы и полный вероятностный анализ. Выбор метода должен производиться в соответствии с целями проведения оценки пожарной безопасности СНЭ и данными о ее расположении в помещении, а также с учетом графика выполнения анализа [9].

Исходя из документов [1, 4, 5], пожарная опасность объекта защиты — это такое состояние объекта, которое характеризуется возможностью возникновения и развития пожара, а также воздействием на людей и имущество его опасных факторов. Кроме того, существует пожарный риск — это мера возможной реализации пожарной опасности объекта защиты, ее последствий для людей и материальных ценностей. Далее рассмотрим подходы к анализу и определению величин этих двух понятий, которые отличаются друг от друга тем, что при нахождении пожарного риска учитывается вероятность воспламенения (загорания) изоляции и конструктивных материалов СНЭ. Риск может быть измерен числом возгораний, происшедших на объекте в единицу времени, или вероятностью его появления в течение времени [10].

## Вероятностный подход к оценке пожарной безопасности СНЭ

Количественная оценка безопасности СНЭ с использованием вероятностного подхода является фундаментом значительного числа современных методов анализа. В общем виде риск возникновения пожароопасной ситуации в СНЭ от проявления какого-либо аварийного режима (короткого замыкания, перегрузки, утечки тока на землю, электрического искрения через переходное сопротивление) можно определить следующим образом [11]:

$$R = P \cdot U, \quad (1)$$

где  $P$  — вероятность возникновения пожароопасной ситуации в СНЭ от проявления какого-либо аварийного режима в ней;  $U$  — ожидаемый ущерб от этой пожароопасной ситуации.

Таким образом, при возникновении ущерба от проявления  $N$ -го количества аварийных режимов работы СНЭ совокупный риск реализации пожароопасной ситуации определяется суммированием вероятностей всех возможных аварийных режимов работы СНЭ:

$$R = \sum_{i=1}^N P_i \cdot U_i. \quad (2)$$

В итоге количественная оценка риска возникновения пожароопасной ситуации в СНЭ сводится к выявлению возможных аварийных режимов ее работы и определению последствий каждого режима.

В мировой практике оценки безопасности объектов наиболее распространенными являются следующие программные продукты [12]: CRISP2 (Великобритания), FRAMEworks (США), Probabilistic Fire Simulator (Финляндия), Fire Risk Evaluator (Швеция), CESARE-RISK (Австралия). Широко известна программа FiRECAM (Канада), которая обладает подробной детализацией факторов, определяющих пожарную опасность объекта [13]. FiRECAM позволяет оценивать два основных вида риска пожароопасной ситуации: риск для жизни людей, находящихся в здании, и ожидаемый ущерб от пожара. Математический аппарат, заложенный в FiRECAM, строится на всестороннем использовании выражения (1).

Подводя итог, можно отметить, что задача количественной оценки пожарной безопасности СНЭ существующими вероятностными методами является трудоемкой в практическом исполнении. При всей привлекательности вероятностных методов оценки пожарной безопасности применительно к СНЭ, они являются весьма объемными из-за необходимости проводить анализ с высокой детализацией рассматриваемых аварийных процессов.

### Эвристический подход к оценке пожарной безопасности СНЭ

Если обстоятельства (недостаточно статистических данных либо они не удовлетворяют точности математической модели) не позволяют применить строгую количественную оценку пожарной безопасности СНЭ на основе вероятностных методов, то существенное преимущество получают методы, реализующие эвристический подход. Данные методы строятся на экспертном оценивании и нахождении субъективных вероятностей тех или иных аварийных режимов работы СНЭ, а также определении набора факторов, формирующих ее пожарную опасность и степень защиты. После определения факторов происходит их оценка в баллах с постепенным подведением общей оценки — индекса пожарной опасности СНЭ [14].

Существует большое разнообразие индексных методов оценки пожарной безопасности. Это связано с тем, что они разрабатываются как методы оценки пожарной опасности для конкретных типов объектов (производств). Из-за этого характеристики, которые описывают пожарную опасность, и методы обработки выставленных баллов очень отличаются друг от друга [15]. Рассмотрим наиболее широко применяемые индексные методы — Дау Кемикал и Гретенера.

Метод Дау Кемикал используется для оценки пожарной опасности химических производств [16]. Он базируется на выделении производственных участков по роду производства и формировании для каждого из них фактора опасности материала, который характеризует выделяемую энергию при его возгорании в пределах 1–40 баллов. После чего оценивается фактор опасности для данного участка производства, зависящий от показателей первого (условия, которые способны усилить либо ослабить последствия пожара) и второго класса (условия, предопределяющие вероятность реализации пожара либо взрыва). Затем показатели по каждому классу суммируются, а их результаты перемножаются, и полученный фактор опасности находится в пределах 1–8 баллов. Далее путем произведения фактора материала на фактор опасности определяется индекс пожаровзрывоопасности объекта (F EI — fire and explosion index). При этом анализируются факторы, позволяющие снизить уровень опасности. В итоге дается заключение о возможном масштабе последствий пожара либо взрыва (размере зоны разрушений, степени материального ущерба, вероятности гибели либо травматизма персонала).

Метод Гретенера используется для определения пожарной безопасности объектов путем оценки вероятности возникновения возгорания

и оценки материального ущерба по выражению [17]

$$R = A \cdot B = \frac{A \cdot P}{N \cdot S \cdot F}, \quad (3)$$

где  $A$  — вероятность возникновения возгорания;  $B$  — материальные потери;  $P$  — потенциальная пожарная опасность;  $N$  — показатель, который учитывает мероприятия по обеспечению пожарной безопасности, предусмотренные нормативными документами;  $S$  — специализированные мероприятия, направленные на повышение пожарной безопасности;  $F$  — степень огнеупорности помещения.

Таким образом, данный метод является мерой некоего баланса между вероятностью возникновения возгорания, потенциальными материальными убытками и действиями, направленными на защиту объекта.

Итак, рассмотренные индексные методы отображают эвристический подход к оценке пожарной безопасности, а также позволяют проводить это с минимальными затратами на математический аппарат, при этом адекватность их применения напрямую зависит от достоверности представленных баллов по критериям интерпретации пожарной опасности.

### Логико-вероятностные методы оценки пожарной безопасности СНЭ

Согласно ГОСТ [18], пожарная опасность СНЭ — это возможность возникновения или развития в ней или от нее пожара. Таким образом, ее пожарную опасность в целом можно характеризовать так: вероятность возникновения пожара, связанная с возгоранием узлов СНЭ, а также веществ и материалов, соприкасающихся с ней или находящихся в зоне ее радиационного излучения или в зоне воздействия электрической дуги и выпадающих из нее раскаленных частиц и газов; вероятность появления и воздействия на человека, строительные конструкции и оборудование дыма, токсичных продуктов и других опасных факторов, образующихся при горении ее деталей и узлов, находящихся в объекте [19]. Следовательно, оценка пожарной опасности СНЭ должна выполняться методами определения вероятности возникновения пожара, которые должны включать в себя вероятность возникновения возгорания от электротехнического изделия или электропроводки, а также вероятность перехода этого возгорания в пожар.

В том случае если возгорание горючего материала возможно при появлении  $n$  независимых случайных событий, то вероятность появления возгорания в течение времени  $t$  можно найти по формуле [20]

$$q(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t). \quad (4)$$

Если при формировании возгораний в СНЭ учитываются только три события ( $n = 3$ ), тогда из формулы (4) получим

$$q(t) = q_1(t) \cdot q_2(t) \cdot q_3(t), \quad (5)$$

где  $q(t)$  — вероятность возгорания горючего материала, расположенного вблизи прокладки электропроводки в течение времени  $t$ ;  $q_1(t)$  — вероятность повреждения электропроводки (короткое замыкание, электрическое искрение через переходное сопротивление контактного соединения, перегрузка, утечка тока на землю и др.);  $q_2(t)$  — вероятность нахождения горючего материала в течение времени  $t$  вблизи прокладки электропроводки;  $q_3(t)$  — вероятность отказа в срабатывании защитно-коммутационного аппарата.

В том случае если интервалы времени между повреждениями в СНЭ, отказами в срабатывании защиты и наличием горючего материала вблизи прокладки электропроводки не противоречат экспоненциальной функции распределения с параметрами  $\lambda_1$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  соответственно, тогда вероятности, входящие в формулу (5), можно найти следующим образом:

$$q_1(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t}; \quad q_2(t) = 1 - e^{-\omega_1 t};$$

$$q_3(t) = 1 - e^{-\omega_2 t}, \quad (6)$$

где  $\lambda_1$  — частота повреждения СНЭ;  $\omega_1$  — частота появления горючего материала вблизи СНЭ;  $\omega_2$  — частота отказа защитно-коммутационных аппаратов.

Подставив значения (6) в формулу (5), получим

$$q(t) = (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\omega_1 t})(1 - e^{-\omega_2 t}) =$$

$$= 1 - e^{-\lambda_1 t} - e^{-\omega_1 t} - e^{-\omega_2 t} + e^{-(\lambda_1 + \omega_1)t} +$$

$$+ e^{-(\omega_1 + \omega_2)t} + e^{-(\lambda_1 + \omega_2)t} - e^{-(\lambda_1 + \omega_1 + \omega_2)t}. \quad (7)$$

Вероятность того, что в течение времени  $t$  не произойдет возгорание горючего материала в СНЭ, находится по формуле

$$R(t) = 1 - q(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\omega_1 t} + e^{-\omega_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \omega_1)t} -$$

$$- e^{-(\omega_1 + \omega_2)t} - e^{-(\lambda_1 + \omega_2)t} + e^{-(\lambda_1 + \omega_1 + \omega_2)t}. \quad (8)$$

Среднее время до появления возгорания в СНЭ определим следующим образом:

$$T = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \left( \begin{aligned} & e^{-\lambda_1 t} + e^{-\omega_1 t} + e^{-\omega_2 t} - \\ & - e^{-(\lambda_1 + \omega_1)t} - e^{-(\omega_1 + \omega_2)t} - \\ & - e^{-(\lambda_1 + \omega_2)t} + e^{-(\lambda_1 + \omega_1 + \omega_2)t} \end{aligned} \right) dt =$$

$$= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \omega_1} -$$

$$- \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \omega_2} + \frac{1}{\lambda_1 + \omega_1 + \omega_2}. \quad (9)$$

Вероятность возгорания горючего материала в СНЭ можно определить по приближенной формуле

$$Q(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}. \quad (10)$$

Интенсивность возгорания горючего материала в течение времени  $t$  находим следующим образом [21]:

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt \cdot R(t)}. \quad (11)$$

Подставив формулу (8) в (11), получим

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \omega_1 e^{-\omega_1 t} + \omega_2 e^{-\omega_2 t} -$$

$$- (\lambda_1 + \omega_1) e^{-(\lambda_1 + \omega_1)t} - (\omega_1 + \omega_2) e^{-(\omega_1 + \omega_2)t} -$$

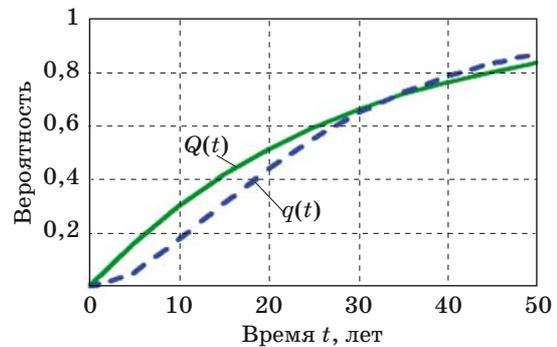
$$- e^{-(\lambda_1 + \omega_1)t} - e^{-(\omega_1 + \omega_2)t} -$$

$$- (\lambda_1 + \omega_2) e^{-(\lambda_1 + \omega_2)t} + (\lambda_1 + \omega_1 + \omega_2) e^{-(\lambda_1 + \omega_1 + \omega_2)t}}{e^{-\lambda_1 t} + e^{-\omega_1 t} + e^{-\omega_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \omega_1)t} - e^{-(\omega_1 + \omega_2)t} - e^{-(\lambda_1 + \omega_2)t} + e^{-(\lambda_1 + \omega_1 + \omega_2)t}}. \quad (12)$$

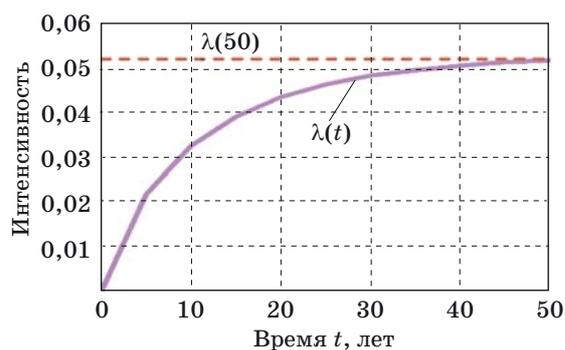
Рассмотрим случай, когда параметры процесса равны:  $\lambda_1 = 0,049 \text{ год}^{-1}$ ;  $\omega_1 = 0,061 \text{ год}^{-1}$ ;  $\omega_2 = 0,62 \text{ год}^{-1}$ . Используя формулы (7)–(9), при  $t = 1 \text{ год}$  получим:

- вероятность появления возгорания в течение года  $q(1) = 1,31 \cdot 10^{-3}$ ;
- среднее время до появления возгорания в СНЭ  $T = 27 \text{ лет}$ ;
- вероятность безаварийной работы  $R(1) = 3,54 \cdot 10^{-2}$ .

По точной (7) и приближенной (10) формулам получены функции вероятностей возгорания горючего материала в СНЭ в течение времени  $t$  (рис. 1). Из графика видно, в какой степени вероятность возгорания горючего материала, полученная по точной формуле, отличается от значения вероятности возгорания, полученного по приближенной формуле. Для времени  $t = 34 \text{ года}$  вероятности появления возгорания совпадают, а затем с течением времени результаты расходятся.



■ Рис. 1. Функции вероятностей появления возгорания по причине короткого замыкания в СНЭ



■ **Рис. 2.** Функция интенсивности возгорания горючего материала в СНЭ по причине короткого замыкания

Интенсивность возгорания горючего материала в СНЭ  $\lambda(t)$  определяется по формуле (12). При  $t = 1$  год находим  $\lambda(1) = 3,49 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ .

Используя формулу (12), можно построить функцию интенсивности возгорания горючего материала от короткого замыкания в СНЭ в течение времени  $t$  (рис. 2). Из графика видно, что при  $t = 50$  лет интенсивность отказов системы «источник зажигания — защита — среда» уже не зависит от времени:  $\lambda(50) = 0,052 \text{ год}^{-1}$ .

Используя полученные формулы (7)–(9) и (12), можно определить основные характеристики пожарной опасности СНЭ. Однако применение логико-вероятностных методов оценки пожарной опасности дает лишь качественный анализ пожарной безопасности, поскольку данные методы не имеют возможности учета влияния на пожарную безопасность длительности действия опасного источника зажигания, времени нахождения защитно-коммутационных аппаратов в необнаруженном отказавшем состоянии и длительности нахождения горючего материала вблизи возможного источника зажигания. Также логико-вероятностные методы не позволяют оценить влияние диагностических проверок работоспособности защитно-коммутационных аппаратов и не учитывают влияние профилактических проверок по обнаружению и устранению горючего материала вблизи возможного источника зажигания, что завышает истинный уровень пожарной безопасности на несколько порядков.

Следовательно, возникает необходимость в применении методов оценки пожарной безопасности, которые позволяют учитывать вышеперечисленные факторы.

### Методы, учитывающие частоту появления опасного источника и длительность его существования

В работе [22] на основе теории регулярных однородных марковских случайных процессов с дискретным числом состояний и непрерывным

временем была разработана и предложена обобщенная математическая модель «источник зажигания — среда», которая позволяет описать формирование аварий и катастроф на участке угольных шахт при эксплуатации электрооборудования. В этой работе показано, что такие разные по своему характеру аварии, как взрыв, пожар, случаи поражения человека электрическим током, происходят по одной логической схеме и имеют общую математическую модель.

Число аварий, происшедших в единицу времени, определяется следующим образом:

$$H = \frac{d_1 + d_2}{\bar{d}_1 \cdot \bar{d}_2}, \quad (13)$$

где  $\bar{d}_1$  — среднее время между появлением опасного состояния среды;  $d_1$  — средняя длительность нахождения среды в опасном состоянии;  $\bar{d}_2$  — средний интервал времени между появлением источника зажигания;  $d_2$  — средняя длительность существования опасного источника.

Формула (13) справедлива для случая, когда выполняются условия

$$\bar{d}_1 \gg d_1; \quad \bar{d}_2 \gg d_2. \quad (14)$$

Итак, использование теории марковских случайных процессов для оценки пожарной безопасности СНЭ позволит учитывать все возможные случаи нахождения элементов системы в опасном и безопасном состояниях, а также задавать нормы надежности на средства защиты, частоту появления и длительность существования горючего материала вблизи возможного повреждения СНЭ, что даст возможность не допускать случаев появления возгораний горючего материала и тем самым обеспечит безопасность эксплуатации электрооборудования, и, как следствие, снизит угрозу для жизни людей [23].

### Заключение

Установлено, что применение логико-вероятностных методов для оценки пожарной опасности дает лишь качественный анализ пожарной безопасности, поскольку данные методы не учитывают влияния на пожарную безопасность длительности действия опасного источника зажигания, времени нахождения защитно-коммутационных аппаратов в необнаруженном отказавшем состоянии и наличия горючего материала вблизи возможного источника зажигания. Таким образом, логико-вероятностные методы не позволяют оценить влияние проведения диагностических проверок защитно-коммутационных аппаратов и профилактических проверок наличия горючего материала вблизи возможного источника зажигания на пожарную безопасность

электрифицированного объекта. Для создания унифицированной методики оценки пожарной безопасности СНЭ целесообразно применять марковские процессы с дискретным числом состояний и непрерывным временем, поскольку ма-

тематические модели, построенные с их использованием, позволяют учитывать кроме частоты появления событий, связанных с возникновением возгораний, еще и длительность их существования.

## Литература

1. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» с изменениями согласно Федеральному закону Российской Федерации № 117-ФЗ от 10.07.2012 г.
2. Официальный сайт Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий <http://www.mchs.gov.ru/folder/3788548> (дата обращения: 22.10.2015).
3. Ковалёв А. П., Солёная О. Я. О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов // Электричество. 2014. № 11. С. 36–45.
4. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 77 с.
5. Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» с изменениями согласно Федеральному закону Российской Федерации № 234-ФЗ от 13.07.2015 г.
6. Молчанов В. П., Болодьян И. А., Дешевых Ю. И. и др. Концепция объектно-ориентированного нормирования промышленных предприятий по пожарной безопасности // Пожарная безопасность. 2001. № 4. С. 94–106.
7. Якуш С. Е., Эманский Р. К. Анализ пожарных рисков. Ч. I: Подходы и методы // Проблемы анализа риска. 2009. Т. 6. № 3. С. 8–27.
8. NFPA 551. Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. — Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2007. — 26 p.
9. PAS 79. Fire Risk Assessment — Guidance and a Recommended Methodology. — British Standards Institution, 2007. — 120 p.
10. ГОСТ Р 51901.1-2002 (МЭК 60300-3-9:1995). Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. — М.: Изд-во стандартов, 2002. — 28 с.
11. Kumamoto H. Satisfying Safety Goals by Probabilistic Risk Assessment. — London: Springer-Verlag, 2007. — 253 p.
12. Hall J., Watts J. Fire Risk Analysis // NFPA. Ch. 8. — Fire Protection Handbook, 2008. — P. 135–143.
13. Yung D., Hadjisophocleous G., Proulx G. A Description of the Probabilistic and Deterministic Modeling Used in FiRECAM™//Intern. Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. 1999. N 1. P. 18–26.
14. Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. — М.: Деловой экспресс, 2004. — 195 с.
15. Rasbash D., et al. Evaluation of Fire Safety/ D. Rasbash, G. Ramachandran, B. Kandola, J. Watts, M. Law. — N. Y.: J. Wiley & Sons, 2004. — 496 p.
16. Dow's Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide. 7th ed. — N. Y.: Dow Chemical Company; American Institute of Chemical Engineers, 2010. — 83 p.
17. Gretener M. Evaluation of Fire Hazard and Determining Protective Measures. — Zurich: Association of Cantonal Institutions for Fire Insurance and Fire Prevention Service for Industry and Trade, 1973. — 87 p.
18. ГОСТ 12.1.033-81. Пожарная безопасность. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 9 с.
19. Смелков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. — М.: Кабель, 2009. — 328 с.
20. Ковалёв П. Ф. Разработка и исследование средств и мер обеспечения безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах: доклад о содержании опубликованных работ и изобретений, представленных на соискание ученой степени доктора техн. наук в соответствии с решением президиума ВАК. — М.: МГИ, 1974. — 86 с.
21. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник для студ. вузов. 10-е изд., стер. — М.: Академия, 2005. — 576 с.
22. Ковалёв П. Ф., Коптиков В. П., Ковалёв А. П. О критериях оценки эффективности мер и средств обеспечения безопасности применения электрооборудования в шахтах // Безопасность труда в промышленности. 1972. № 8. С. 34–36.
23. Ковалёв А. П., Солёная О. Я. Оценка пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ в промышленных электрифицированных помещениях // Промышленная энергетика. 2013. № 11. С. 43–46.

UDC 614.841.332

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.58

**Analysis of Mathematical Methods of Electrified Area Safety Assessment**

Solyonyj S. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, ssv555ssv@yandex.ru

Solenaya O. Ya.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, osolenaya@list.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Low-voltage power supply systems can use so many fire safety assessment methods and so many approaches to identifying hazards, that it can be difficult to choose a method and carry out the assessment. Purpose: The goal is to unify the mathematical modeling methods and safe operation assessments for low-voltage power supply systems by classifying and analyzing the existing approaches to their fire safety assessment. **Results:** The analysis of the existing methodologies revealed that not all mathematical tools available today in this area can be directly used to assess the fire safety of low-voltage power supply systems. Probabilistic methods are very voluminous because of the need to analyze highly detailed emergency processes. Heuristic methods cannot adequately assess the results, as they use a point system whose reliability raises doubts. Logical-and-probabilistic methods do not take into account the regular checks of the protective switching devices during their operation, which leads to evaluation errors of several orders of magnitude. But the methods based on the theory of homogeneous Markov processes gave rise to a mathematical model of assessment which is adequate in terms of reliability and does not require too much engineering resources. **Practical relevance:** On the base of homogeneous random Markov processes with discrete number of states and continuous time, a mathematical model was obtained for low-voltage power supply system fire safety assessment, which allows you to consider all possible situations when the system elements stay in safe or unsafe states. This model can be used to analyze systems of any configuration and complexity in terms of their fire safety and operation security.

**Keywords** — Low-Voltage Power Supply System, Electric Wiring, Mathematical Modeling, Connectors, Electrical Arcing, Contact Resistance, Insulation, Fire Safety.

**References**

1. Federal Law of the Russian Federation from 22.07.2008 № 123-FZ “Technical Regulation on the Requirements of Fire Safety” with Change comply with the Russian Federation Federal Law № 117-FZ from 10.07.2012.
2. *Ofitsial’nyi sait Ministerstva Rossiiskoi Federatsii po delam grazhdanskoi oborony, chrezvychainym situatsiiam i likvidatsii posledstviu stikhiinykh bedstviu* [The Official Website of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters]. Available at: <http://www.mchs.gov.ru/folder/3788548> (accessed 22 October 2015).
3. Kovalev A. P., Solenaya O. Ya. About Problems of Safety Evaluation of Electrical Facilities. *Elektrichestvo*, 2014, no. 11, pp. 36–45 (In Russian).
4. State Standard 12.1.004-91. Fire Safety. General Requirements. Moscow, Standartov Publ., 1992. 77 p. (In Russian).
5. Federal Law of the Russian Federation from 21.12.1994. № 69-FZ “About Fire Safety” with Change Comply with the Russian Federation Federal Law № 234-FZ from 13.07.2015. (In Russian).
6. Molchanov V. P., Bolodyan I. A., Deshevih Yu. I., et al. The Concept of Object-Oriented a Valuation of Industrial Enterprises on Fire Safety. *Pozharnaia bezopasnost’*, 2001, no. 4, pp. 94–106.
7. Yakush S. E., Esmansky R. K. Analysis of Fire Risks. Part I. Approaches and Methods. *Problemy analiza riska*, 2009, vol. 6, no. 3, pp. 8–27 (In Russian).
8. NFPA 551. Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 2007. 26 p.
9. PAS 79. Fire Risk Assessment — Guidance and a Recommended Methodology. British Standards Institution, 2007. 120 p.
10. State Standard 51901.1-2002 (IEC 60300-3-9:1995). Risk Management. Risk Analysis of Technological Systems. Moscow, Standartov Publ., 2002. 28 p. (In Russian).
11. Kumamoto H. *Satisfying safety goals by probabilistic risk assessment*. London, Springer-Verlag, 2007. 253 p.
12. Hall J., Watts J. Fire Risk Analysis. In: *NFPA. Ch. 8. Fire Protection Handbook*, 2008, pp. 135–143.
13. Yung D., Hadjisophocleous G., Proulx G. A Description of the Probabilistic and Deterministic Modeling used in FiRECAM™. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 1999, no. 1, pp. 18–26.
14. Akimov V. A., Lesnih V. V., Radaev N. N. *Osnovy analiza i upravleniia riskom v prirodnoi i tekhnogennoi sferakh* [Basics of Analysis and Risk Management of Natural and Man-Made Areas]. Moscow, Delovoi ekspres Publ., 2004. 195 p. (In Russian).
15. Rashbash D., Ramachandran G., Kandola B., Watts J., Law M. *Evaluation of Fire Safety*. New York, J. Wiley & Sons, 2004. 496 p.
16. Dow’s Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide. 7th ed. New York, Dow Chemical Company, American Institute of Chemical Engineers, 2010. 83 p.
17. Gretener M. *Evaluation of Fire Hazard and Determining Protective Measures*. Zurich, Association of Cantonal Institutions for Fire Insurance and Fire Prevention Service for Industry and Trade, 1973. 87 p.
18. State Standard 12.1.033-81. Fire Safety. Terms and Definitions. Moscow, Standartov Publ., 1981. 9 p. (In Russian).
19. Smelkov G. I. *Pozharnaia bezopasnost’ elektroprovodok* [Fire Safety Wirings]. Moscow, Kabel’ Publ., 2009. 328 p. (In Russian).
20. Kovalev P. F. *Razrabotka i issledovanie sredstv i mer obespecheniia bezopasnosti primeneniia elektricheskoi energii v ugol’nykh shakhtakh* [Development and Research of Means and Measures to Ensure Safety of Electricity in Coal Mines]. Report on the contents of published works and inventions submitted for the degree of the doctor tehn. science in accordance with the decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission. Moscow, MGI Publ., 1974. 86 c. (In Russian).
21. Ventzel E. S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Akademiia Publ., 10 ed., 2005. 576 p. (In Russian).
22. Kovalev P. F., Koptikov V. P., Kovalev A. P. About Criteria of Evaluating the Effectiveness of Measures and Means to Ensure the Safety of Electrical Equipment in Mines. *Bezopasnost’ truda v promyshlennosti*, 1972, no. 8, pp. 34–36 (In Russian).
23. Kovalev A. P., Solenaya O. Ya. Estimation of Fire Hazard the Network 0,4 / 0,22 kV in Industrial Electrified Areas. *Promyshlennaia energetika*, 2013, no. 11, pp. 43–46 (In Russian).