

## Вероятности редких случайных событий в электроэнергетике\*

ПАПКОВ Б.В., КУЛИКОВ А.Л., ОСОКИН В.Л.

*Рассматриваются и анализируются вопросы, связанные с оценкой вероятностей значимых, но редких событий, экстремальных и катастрофических ситуаций в электроэнергетике. Суть проблемы составляет количественная оценка степени опасности (риска) и его приемлемых уровней. Сложность оценки в малом количестве, неопределённости относительной достоверности ретроспективной информации, что не позволяет получить эффективные, несмещённые и состоятельные статистические оценки показателей надёжности, безопасности, живучести. Отмечена необходимость проверки условий и возможности возникновения катастроф при потере работоспособности объекта электроэнергетики под воздействием поражающих факторов. Основное внимание уделено методам количественной оценки технологического риска и его показателей. Приведены примеры. Положения статьи открывают перспективу дальнейших исследований чрезвычайно важной проблемы — оценки вероятности редких случайных событий и катастроф в электроэнергетике.*

**Ключевые слова:** электроэнергетика, случайные процессы, надёжность, риск, экстремальные события, вероятность

В связи с возможными катастрофическими последствиями отказов и происшествий в работе сложных технических систем (СТС) проблема оценки надёжности их функционирования как на стадии проектирования и выбора основных технических решений, так и в период эксплуатации является одной из приоритетных при исследовании проблем обеспечения безопасности населения и окружающей среды. Задача существенно усложняется для уникальных СТС ввиду отсутствия или ограниченности статистических данных по надёжности таких систем в реальных условиях эксплуатации и неизбежных неопределённостях в оценках их поведения при возникновении редких проектных и «запроектных» ситуаций, связанных с отказами оборудования, ошибками персонала, различными внешними воздействиями, обусловленными неполнотой знаний о реальных условиях эксплуатации.

Проблема обеспечения безопасности человека и потенциально опасных объектов была и остаётся весьма актуальной. Она перешла в научную категорию в связи с выявлением серьёзности последствий редких событий, которые возникают с вероятностью «почти ноль».

Безопасность в большинстве случаев определяется как состояние, в котором при наличии возникшей угрозы «уровень возможного вреда имуществу или персоналу оценивается через категорию риска, значения которого не превышают допустимой (стандартной) величины» [1]. Суть проблемы составляет количественная оценка степени опасности (риска) и его приемлемых уровней. При этом опасность рассматривается как объективно существующая

возможность негативного воздействия на общество, личность, окружающую среду, в результате которого им может быть причинён ущерб — социальный, технологический, экономический, экологический. Риск здесь — характеристика потенциальной опасности, возможность реализации негативных событий (худших альтернатив), причиняющих вред.

Оценка риска экстремальных, аварийных и катастрофических ситуаций, возникающих в системах энергетики, состоит в необходимости оценки их вероятностей. Основная сложность такой оценки заключается в малом количестве, неопределённости относительной достоверности ретроспективной информации, что практически не позволяет получить эффективные, несмещённые и состоятельные статистические оценки показателей надёжности, безопасности, живучести. Угроза стихийных бедствий, природных и техногенных катастроф, терроризма, кибератак, разного рода конфликтов и других достаточно редких событий превратилась в системную закономерность конца XX начала XXI века [2]. Это обусловлено современным технологическим укладом, при котором создаются новые технические, экономические, социальные, политические и другие искусственные системы, которые из-за своей сложности могут быть более уязвимыми по отношению к разного рода случайным и преднамеренным возмущениям и, соответственно, менее стойкими, менее надёжными, менее безопасными.

**Постановка задачи.** Экстремальные (катастрофические) события связаны с редкими выбросами случайного процесса, по которым не существует достоверной статистики. Время наступления им-

\* Статья подготовлена по материалам доклада, сделанного авторами на Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики» (июль 2018 г., Иркутск).

пульса и его амплитуда являются случайными и неопределёнными величинами.

Традиционные показатели возможности редкого (непредсказуемого) события являются неопределёнными. Значения ряда динамических величин, определяющих их, лежат на «хвостах» распределений, попадая в маловероятную (критическую) область, которая в общем случае является «размытой». Поэтому приходится переходить к методам Fuzzy Sets, ограничиваясь осторожной оценкой этой области, заведомо расширяя её за счёт неопределённости, которая неизбежно связана с более или менее обоснованной экстраполяцией на основе «осторожных» экспертных оценок.

Увеличение риска возникновения опасных ситуаций на объектах электроэнергетики сопровождается резким возрастанием стоимости компенсации их технико-экономических и социальных последствий при одновременном снижении безопасности как эксплуатационного персонала, так и населения в целом.

После Чернобыльской аварии (1986 г.) приняты экстраординарные меры безопасности во всём мире. Риски существенно и резко снизились. Есть надежда, что аварии такого масштаба будут случаться нечасто. Вопрос в том, насколько нечасто? Проведённый математиками Великобритании и Швейцарии статистический анализ 216 аварий и происшествий, зарегистрированных за всю историю ядерной энергетики, показал, что аварии действительно стали значительно более редкими. Тем не менее, на основе имеющихся данных [3] предполагается, что аварии типа Фукусимы или крупнее будут происходить каждые 60–150 лет с вероятностью  $p=0,5$ .

Причина запроектных и гипотетических аварий – цепочка событий или сценарий с попаданием системы в опасное состояние, вероятность возникновения которого не имеет никакого значения, если ущерб значим и недопустим для пользователей систем [2, 4]. Более того, в случае редких событий некорректно вводить понятие «среднее время до катастрофы». Основная задача связана с поиском «окон уязвимости», а решение её осуществляется методами многокритериальной оценки обобщённых показателей типа «эффективность», «надёжность», «безопасность», «уязвимость», «стойкость», «приемлемость», «экономичность», «эргономичность», «конкурентоспособность» и т.п. [1].

Опасность характеризуется не только вероятностью (относительной частотой) наступления кризисной (чрезвычайной) ситуации, но и тяжестью её последствий. В ранее опубликованных работах [2] показано, что численное значение риска  $R$  при нарушении нормального режима работы оборудова-

ния систем электроэнергетики может быть оценено как

$$R = pY,$$

где  $p$  – вероятность реализации опасного события (авария, отказ, инцидент и т.п.);  $Y$  – математическое ожидание ущерба, причинённого в результате этого события.

Количественная мера риска согласуется с интуитивным представлением о нем и делит процедуру его оценки на два этапа:

- 1) определение вероятностей неблагоприятных исходов;
- 2) определение ущербов, сопровождающих эти исходы.

В решении проблемы техногенной безопасности существуют две концепции [5]: детерминистическая («абсолютной» безопасности) и вероятностная (приемлемого риска).

Первая основана на нормативном подходе и логическом анализе особенностей технологических процессов и источников возможных аварий, выработке системы обязательных мер (противоаварийная защита, инструкции, обучение персонала). Основным недостатком этой концепции является отсутствие количественной оценки безопасности и чувствительности к особенностям конкретного объекта, так как истинная эффективность набора обязательных мер по обеспечению безопасности остаётся неопределённой.

Вторая концепция основана на статистическом анализе степени опасности (риска), результатах имитационного моделирования для выявления возможных путей перехода аварийных ситуаций в аварии, установление приемлемых уровней риска. Для этого необходима информация о вероятностях возникновения исходных событий и готовности средств защиты, репрезентативность которой явно недостаточна. При анализе риска здесь возникают трудности, связанные с полнотой и достоверностью исходных данных, адекватностью моделей перехода объекта в аварийное состояние.

Вместе с тем, обе концепции содержат по крайней мере два вида неопределённостей [5]:

- 1) неопределённость в оценке достаточности принятых мер безопасности;
- 2) неопределённость, связанная с неперечислимостью исходных событий аварий на объектах электроэнергетики.

Эти неопределённости отражаются и в рекомендациях по оценке критических рисков. Так в [6] отмечается, что выход ключевых показателей безопасности за критический уровень считается катастрофическим, а в [3] – уровень риска возникновения опасных ситуаций, устраивающий на данный момент общество, с точки зрения допустимого

ущерб и затрат, является приемлемым или допустимым. Выявление и предупреждение его позволяют снизить ущерб до 10% ожидаемого.

**Примеры.** В искусственно созданных (элементы и объекты электроэнергетики) технических системах время от времени возникают экстремальные ситуации с быстрым, почти мгновенным, развитием событий. При решении задач обеспечения надёжности важное место отводится статистическим методам оценивания. Но статистические оценки показателей надёжности дают приемлемые результаты только в том случае, если оцениваемое событие характеризуется массовостью и однородностью, что в ряде задач не наблюдается.

1. На морских буровых платформах вероятность расчётной аварии оценивалась как одна авария в 20 миллионов лет ( $p=0,00000005$ ). Однако уже произошли аварии на 15 буровых платформах, в том числе крупнейшая в 2010 г. — в Мексиканском заливе [6].

2. Расчётная вероятность, связанная с возможностью переполнения водохранилища Зейской ГЭС, составляла  $p=0,001$ . Однако в 2007 г. в результате обильных дождей это событие произошло.

3. В Нидерландах [7] к началу XX в. был установлен никогда не наблюдаемый уровень защитных сооружений 390 см. Однако при их строительстве высота была принята 340 см — на 12 см выше максимума, зарегистрированного за 25 лет наблюдений (1 раз в 70 лет с вероятностью  $p=0,014$ ). Удешевление строительства обернулось трагедией 1953 г. Погибло около 2000 человек плюс огромные разрушения. Сейчас гидротехнические сооружения в Нидерландах строятся в расчёте на максимальный уровень 500 см (1 раз в 10 000 лет ( $p=0,0001$ )).

4. Москва, май 2005 г. Авария на подстанции «Чагино-500 кВ». Последствия: пострадали 4 млн жителей, ущерб превысил 3 млрд руб.

5. Саяно-Шушинская ГЭС, август 2009 г. Последствия: погибли 75 человек, ущерб превысил 40 млрд руб.

6. Предполагалось, что вероятность аварии на АЭС при нормальном законе распределения  $p=1 \cdot 10^{-7}$  год<sup>-1</sup>, т.е. одна авария за 10 млн лет. Однако, как показало время, оценки должны быть другие.

Приведённые примеры — случайные события, объективная оценка вероятностей которых затруднена из-за достаточно высокой надёжности функционирования уникальных энергетических объектов и ограниченной ретроспективной информации.

**Элементарная оценка вероятности редких событий.** После выявления принципиально возможных рисков оценивается их вероятность и возможные последствия.

1. Предположим, что расчётный максимум мощности узла нагрузки электрической системы составляет  $P_m=500$  МВт. Известно, что его превышение на  $\Delta P=1$  МВт (0,2%) возможно с вероятностью  $p=0,01$ . При этом все питающиеся от этого узла потребители отключаются от перегрузки вводов. Очевидно, в ряде случаев такой вероятностью (возможностью) подобного режима можно пренебречь. Однако при решении вопросов надёжности систем электроснабжения взрыво- или пожароопасного производств, систем жизнеобеспечения по максимальной пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП) вероятность  $p=0,01$  должна считаться достаточно большой и учитываться при проектировании структуры систем электроснабжения. Например, в США отключение ЛЭП с нагрузкой около 2,5% мощности связываемых ею частей энергосистемы в 1965 г. привело к крупнейшей аварии и длительному перерыву электроснабжения в районе с населением 30 млн человек.

2. Кроме обычно рассматриваемой числовой характеристики положения случайной величины (СВ)  $X$  — математического ожидания  $M(X)$  — часто возникает необходимость использования начальных моментов её распределения. Начальный момент  $s$ -го порядка СВ  $X$  определяется математическим ожиданием  $s$ -й степени этой СВ как

$$a_s(X) = \sum_{i=1}^n p_i x_i^s.$$

Проанализируем последствия внезапного нарушения электроснабжения разной длительности для условного производства, приводящего к его простоя  $t_{пр}$  со следующим распределением вероятностей:

$t_{пр}$	0,1	0,5	1,0	8,0
$p_i$	0,5	0,3	0,15	0,05

Математическое ожидание СВ  $t_{пр}$ :

$$M(t_{пр}) = \sum_{i=1}^4 t_{прi} p_i = 0,75;$$

то же квадрата СВ  $t_{пр}^2$ :

$$M(t_{пр}^2) = \sum_{i=1}^4 t_{прi}^2 p_i = 3,43.$$

Таким образом переход от  $M(t_{пр})$  к  $M(t_{пр}^2)$  позволяет с меньшей степенью риска учесть влияние возможного большого значения  $t_{пр}$ , которое имеет малую вероятность. Если бы СВ  $X$  имела несколько больших и маловероятных значений, то переход к вычислению начальных моментов более высоких

порядков  $a_3(X)$ ,  $a_4(X)$  и т.д. позволил бы ещё больше усилить их роль.

3. Рассмотрим случай, когда на анализируемом объекте электроэнергетики за предполагаемое время его эксплуатации  $t_{\text{ЭК}}=50$  лет не должно произойти ни одного экстремального события. Тогда в соответствии с [8] и законом распределения Пуассона можно определить нижнюю доверительную границу времени безотказной работы  $t_{\text{Н}}$  для доверительной вероятности  $\alpha$ . Если принять  $\alpha=0,95$ , что характерно для большинства технических решений, то нижняя граница времени безотказной работы составит  $t_{\text{Н}}=16,6$  лет. В более жёстких условиях при  $\alpha=0,99$  получим  $t_{\text{Н}}=10,8$  года.

4. Система (двухтрансформаторная подстанция) состоит из двух параллельно работающих элементов. Каждый из них отказывает в соответствии с экспоненциальным законом распределения и параметром  $\lambda$ . При независимых отказах вероятность отказа за время  $t$  составит

$$q(t) = (1 - e^{-\lambda t})^2. \quad (1)$$

В соответствии с [9] предположим, что с интенсивностью  $\lambda_0$  возникают независимые отказы элементов, а с интенсивностью  $\lambda_1$  – критические, под воздействием которых каждый элемент может отказать с вероятностью  $\alpha=1-\beta$ . При  $\lambda_0 + \lambda_1 \alpha = \lambda$  свойство экспоненциальности сохраняется, но при  $\alpha > 0$  надёжность системы существенно изменяется. Если  $p_i(t)$ ,  $i=0,1$  – вероятность наличия  $i$  отказавших элементов в момент  $t$ , то в [9] приводится система двух дифференциальных уравнений Колмогорова, решение которых при начальных условиях  $p_0(0)=1$ ;  $p_1(0)=0$  имеет вид:

$$\begin{aligned} p_0(t) &= e^{-[2\lambda_0 + (1-\beta^2)\lambda_1]t}; \\ p_1(t) &= 2e^{-(\lambda_0 + \alpha\lambda_1)t} [1 - e^{-(\lambda_0 + \alpha\beta\lambda_1)t}], \end{aligned} \quad (2)$$

откуда вероятность отказа системы

$$q(t) = 1 - p_0(t) - p_1(t). \quad (3)$$

В предельном случае  $\lambda_0=0$ ,  $\alpha=1$  имеем  $p_0(t)=e^{-\lambda t}$ ;  $p_1(t)=0$ , т.е.  $q(t)=1-e^{-\lambda t}$ .

Если отказы независимы и  $\lambda t=0,01$ , то по (1)  $q(t) \approx 10^{-4}$ . В действительности по (3) с учётом (2)  $q(t) \approx 10^{-2}$ .

Результаты говорят сами за себя. Поэтому необходима проверка условий и возможности возникновения катастроф при потере работоспособности объекта электроэнергетики под воздействием некоторого потока поражающих факторов.

**Обсуждение и сравнительные результаты.** В идеале суммарное действие множества не поддаю-

щихся учёту факторов (внезапные отказы, приводящие к каскадному развитию аварий; выбросы вредных веществ; взрывы; пожары; количество дождей, их интенсивность; тепло- и влагообмен атмосферы с поверхностью и т.п.) согласно центральной предельной теореме теории вероятностей соответствует нормальному распределению.

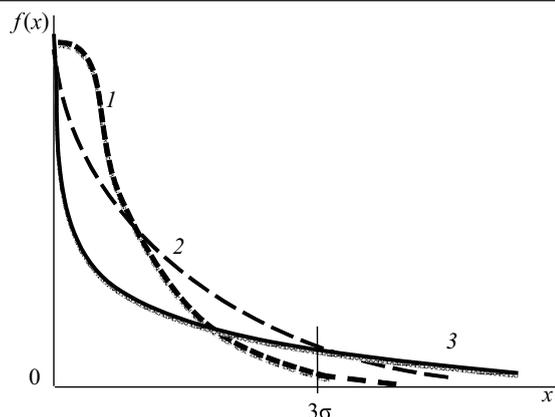
Для большинства технических систем характерны нормальное (Гаусса) и экспоненциальное распределения случайных параметров «с короткими хвостами». Например, распределение максимумов мощности электрической нагрузки стабильно работающих потребителей близко к нормальному и их численные значения, как правило, не укладываются в диапазон  $\pm 3\sigma$  с вероятностью  $p=0,0028$ . При этом их значения превышают значение  $5\sigma$  с вероятностью  $p \approx 0,000001$ .

В [6] рекомендуется использовать экспоненциальный или степенной закон распределения, которые относят к классу распределений с «тяжёлыми (или длинными) хвостами», так как статистика большинства крупных природных и техногенных аварий, катастроф, бедствий, таких как землетрясение, наводнение, лавина, ураган, торнадо, засуха, имеют степенной закон распределения вероятностей. Это вызвано тем, что все природные и техногенные системы, склонные к крупным авариям, катастрофам, кризисам, являются достаточно сложными, содержат множество взаимосвязанных и взаимозависимых элементов, подверженных воздействию многих случайных факторов с широким спектром значений параметров. Их описание не может быть сведено к простой сумме большого числа независимых слагаемых и нормальному закону распределения, так как последствия таких событий невозможно разложить на набор независимых подпроцессов. Известно, что даже малые нелинейности динамической системы существенно изменяют именно «хвосты» распределений и, следовательно, оценки вероятностей катастроф. Здесь требуется их целостное (системное) исследование и описание.

Так как маловероятные аварии и катастрофы в ограниченном периоде времени весьма возможны, пренебрежение значениями случайных величин, попадающих в «хвост» таких распределений, уже недопустимо. В качестве иллюстрации на рисунке показан типичный вид распределения плотности вероятностей случайной величины при разных законах распределения, откуда видно, что «хвост» степенного распределения существенно «тяжелее», изменяясь очень медленно.

Степенной закон распределения плотности вероятностей:

$$P(x) \sim x^{-(1+\alpha)}, \quad \alpha \sim 1.$$



Сравнительная плотность законов распределения случайной величины: 1 — нормального; 2 — экспоненциального; 3 — степенного

Чем меньше  $\alpha$ , тем опаснее процесс. Для всех рассматриваемых задач  $\alpha < 1$ .

Разница между нормальным и степенным распределениями имеет принципиальный характер. В терминах оценки безопасности и риска «хвост» распределения соответствует так называемым гипотетическим авариям и катастрофам, возможность которых практически равна нулю. Но так как при отсутствии статистики зона «хвоста» не определена, а достоверность аналитических расчётов вызывает «недоверие», приходится принять, что фактическое значение функций плотности распределения в этой области неизвестно.

Наличие степенного закона распределения вероятностей в корне изменяет представления о надёжности системы, возможных последствиях экстремальных событий, риске.

Статистика, описываемая степенными распределениями, отличается тем, что редкие события, приходящиеся на «хвост» распределения, происходят не настолько редко, чтобы их можно было не учитывать. Для степенного распределения вероятность катастрофических последствий может на порядок и больше превышать вероятности, вычисленные на основании экспоненциального или нормального распределения.

Для иллюстрации катастрофических нелинейных эффектов в литературе приводятся данные по результатам природных стихийных явлений. В ряде публикаций [1,7,10,11] приведены результаты расчётов вероятностей возникновения катастрофических событий, связанных с экстремальными наводнениями в соответствии со степенным и гамма-распределением вероятностей. Сравнение их представлено в таблице.

В [7,11] отмечается, что плотности экспоненциального и гамма-распределения в анализируемой области малых вероятностей практически совпадают, но гамма-распределение обладает большей «гибкостью» и поэтому предпочтительнее. Плотности

степенного и гамма-распределения хорошо совпадают в средней части и сильно различаются в области аномальных событий. Именно этим объясняется разница в их ожидаемой повторяемости. Другими словами, произошедшие катастрофические наводнения не являются почти невероятными событиями, а имеют достаточно большую вероятность повториться даже при жизни нынешнего поколения. Поэтому подобные распределения необходимо учитывать при оценке надёжности и безопасности объектов и систем, имеющих жизненно важное значение.

Объект	Гамма-распределение	Степенное распределение
1	0,00005	0,015
2	0,00036	0,0039
3	0,001	0,059
4	0,025	0,009
5	0,000036	0,012
6	0,00011	0,098
7	0,0015	0,006
8	0,0055	0,026
9	0,0019	0,0114
10	0,01	0,029

**Заключение.** Приведенные предложения открывают перспективу дальнейшего исследования чрезвычайно важной проблемы оценки вероятностей редких событий и катастроф в электроэнергетике. Временные ряды, характеризующиеся медленным уменьшением числа редких событий, следует представлять степенным распределением. Статистика, описываемая степенным распределением, констатирует:

события, приходящиеся на «хвост» распределения, происходят не настолько редко, чтобы их можно было не учитывать;

катастрофические события не являются исключительными, а имеют достаточно большую вероятность, с которой необходимо считаться;

для степенного распределения вероятность катастрофических последствий может на порядок и больше превышать вероятности, вычисленные на основании нормального, экспоненциального или гамма-распределения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куклев Е.А. Определение рисков возникновения опасных сближений морских судов в аварийных ситуациях путём прогнозирования нечётких «окон уязвимости». — Транспорт Российской Федерации, 2016, № 4 (65), с. 28–31.
2. Папков Б.В., Куликов А.Л. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков. М.: Изд-во Юрайт, 2016, 470 с.
3. Чура Н.Н. Техногенный риск. М.: КНОРУС, 2015, 280 с.
4. Снижение рисков каскадных аварий в электроэнергетических системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011, 303 с.
5. Волик Б.Г. О концепциях техногенной безопасности. — Автоматика и телемеханика, 1998, № 2, с. 165–170.

6. **Прангишвили И.В.** Системный подход и повышение эффективности управления. — М.: Наука, 2005, 422 с.
7. **Шоломицкий А.Г.** Теория риска. Выбор при неопределённости и моделирование риска. М.: Изд. Дом ГУ ВШЭ, 2005, 400 с.
8. **Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И.** Таблицы для анализа и контроля надёжности. М.: Советское радио, 1968, 288 с.
9. **Коваленко И.Н., Кузнецов Н.Ю.** Методы расчёта высоконадёжных систем. М.: Радио и связь, 1988, 175 с.
10. **Найдёнов И.И., Кожевникова И.А.** Почему так часто происходят наводнения? — Природа, 2003, №9, с. 12 — 20.
11. **Гумбель Э.** Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965, 451 с.

[14.11.2018]

*Авторы: Папков Борис Васильевич окончил Горьковский политехнический институт в 1967 г. Докторскую диссертацию защитил в 1994 г. Профес-*

*сор кафедры электрификации и автоматизации Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (НГГИЭУ).*

*Куликов Александр Леонидович окончил Военную инженерную радиотехническую академию ПВО в 1992 г. Докторскую диссертацию защитил в 2009 г. Профессор кафедры электроэнергетики, электрооборудования и силовой электроники Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.*

*Осокин Владимир Леонидович окончил Нижегородскую государственную сельскохозяйственную академию в 2008 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 2012 г. Доцент кафедры электрификации и автоматизации НГГИЭУ.*

Elektrichestvo, 2019, No. 2, pp. 4–9

DOI:10.24160/0013-5380-2019-2-4-9

## Probabilities of Rare Random Events in the Electric Power Industry

**ПАПКОВ Boris V.** (*Nizhniy Novgorod State Engineer — Economic University (NNSEEU), Nizhniy Novgorod, Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

**KULIKOV Alexander L.** (*Nizhniy Novgorod State Technical University named R.Yu. Alekseyev, Nizhniy Novgorod, Russia*) — *Professor, Dr. Sci. (Eng.)*

**OSOKIN Vladimir L.** (*NNSEEU, Nizhniy Novgorod, Russia*) — *Assistant Professor, Cand. Sci. (Eng.)*

*The article discusses and analyzes matters concerned with the estimating the probabilities of significant but rare events, extreme and catastrophic situations in the electric power industry. Essentially, the problem is concerned with quantitatively estimating the extent of hazard (risk) and its acceptable levels. The complexity of making a nestimate is stemming from scarcity and uncertainty of relative unreliability of retrospective information, due to which it becomes impossible to obtain reliable, unbiased and consistent statistical estimates of the reliability, safety, and survivability indicators. The need of checking catastrophe occurrence conditions and probability when an electric power industry facility loses its serviceability due to having been affected by hazardous factors is pointed out. The main attention is paid to methods for quantitatively estimating the technological risk and its indicators, and analysis examples are given. The statement outlined in the article opens the prospects for further investigations aimed at estimating the probability of rare random events and catastrophes in the electric power industry, which is an extremely important problem.*

**Key words:** *electric power industry, random processes, reliability, risk, extreme events, probability*

### REFERENCES

1. **Kuklev Ye.** *Transport Rossiiskoi Federatsii — in Russ. (Transport of Russian Federation)*, 2016, №. 4 (65), pp. 28–31.
2. **Папков В.В., Куликов А.Л.** *Teoriya sistem i sistemnyi analiz dlya elektroenergetikov* (System theory and system analysis for electric power engineers). Moscow, Publ. Yurait, 2016, 470 p.
3. **Chura N.N.** *Technogennyi risk* (Man-induced Risk). Moscow, KNORUS, 2015, 280 p.
4. **Snijeniye riskov kaskadnykh avarii v elektroenergeticheskikh sistemakh** (Reducing the risks of cascade accidents in electric power systems). Novosibirsk, Publ. Siberian Division of Russian Academy Sciences, 2011, 303 p.
5. **Volik B.G.** *Avtomatika i Telemekhanika — in Russ. (Automation and Teleautomatics)*, 1998, No. 2, pp. 165–170.
6. **Прангишвили И.В.** *Sistemnyi podkhod i povysheniye effektivnosti upravleniya* (System approach and improvement of control efficiency) Moscow, Nauka, 2005, 422 p.

7. **Sholomitskiy A.G.** *Teoriya riska. Vbor pri neopredelennosti i modelirovaniye riska* (Risk theory. Selection under uncertainty conditions and risk modeling). Moscow, Publ. House GU VShE, 2005, 400 p.

8. **Shor Ya.B., Kuz'min F.I.** *Tablitsy dlya analiza i kontrolya nadezhnosti* (Tables for an Analysis and Control of Reliability). Moscow, Sovetskoye radio, 1968, 288 p.

9. **Kovalenko I.N., Kuznetsov N.Yu.** *Metody rascheta vysokonadezhnykh sistem* (Methods of calculation of the hi-rel systems). Moscow, Radio i svyaz', 1988, 175 p.

10. **Naidenov I.I., Kozhevnikova I.A.** *Priroda — in Russ. (Nature)*, 2003, No. 9, pp. 12–20.

11. **Gumbel' E.** *Statistika ekstremal'nykh znachenii* (Statistics of extreme values). Moscow, Mir, 1965, 451p.

[14.11.2018]