

## Промышленная безопасность объектов электроэнергетики

СКОПИНЦЕВ В.А.

*На современном этапе развития электроэнергетики в условиях рыночных отношений возникла потребность в разработке показателей и их нормативов для оценок уровня промышленной безопасности при проектировании и эксплуатации энергообъектов. Приведен анализ практики оценки и обеспечения промышленной безопасности в различных странах. Рассмотрены особенности понимания термина «безопасность» с учетом законодательства РФ, обоснование целесообразности оценки уровня промышленной безопасности размером риска. Обоснован подход к определению риска. Для практического использования рекомендуется формула вычисления риска негативных последствий от технологических нарушений, применение которой показано на примерах оценки экономического и социального рисков по статистическим данным о последствиях нарушений в электрических сетях. В энергосистемах необходимо обеспечить формирование достоверной и полной базы данных о технологических нарушениях с отражением не только их причин, но и объемов последствий.*

**Ключевые слова:** электроэнергетические объекты, промышленная безопасность, технологические нарушения, риски последствий, показатели, нормативы

С конца прошлого века в России осуществляется переход к рыночным отношениям, что требует совершенствования и разработки новых принципов и системы управления развитием и функционированием ЕЭС России в условиях действующих в электроэнергетике хозяйствующих субъектов, имеющих несовпадающие, часто противоречивые интересы. Многие системные задачи остались прежними, однако они должны быть адаптированы к новым условиям. В частности возникла необходимость в разработке нормативов и принципов обеспечения на объектах электроэнергетики промышленной безопасности, требуется координация и участие энергетиков в деятельности по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера, а также активных действий в чрезвычайных ситуациях с электроснабжением [1].

В [2] отмечается, что в нашей стране практика анализа безопасности промышленных производств весьма ограничена в части получения показателей безопасности объектов. Указывается не только на недостаток нормативной документации по этому вопросу, но и на отсутствие единого понимания терминов «промышленная безопасность», «риск», «анализ риска» и др.

В развитых промышленных странах законодательство по промышленной безопасности формировалось в 70–80-х гг. прошлого века. Одним из первых правовых документов, содержащих требование проведения анализа опасностей, стала Директива Европейского сообщества 82.501 ЕЕС (Директива Севезо). Она требует от производителя, работающего на опасном объекте, доказывать компетентным органам соответствующих государств —

членов сообщества, что ими идентифицированы соответствующие опасности, приняты необходимые меры безопасности и лицам, работающим на объекте, предоставлена информация об опасностях. Анализ опасности представляется как составная часть разрабатываемой предприятием декларации безопасности (Safety Report) [2].

Следуя требованиям времени в России в 1997 г. принят Федеральный закон [3]. В этом законе понятие «промышленная безопасность» определяется как *состояние защищенности* жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий. Данная формулировка относится к социальным последствиям, связанным с сохранением жизни и здоровья людей, а также с работой систем жизнеобеспечения.

В Федеральном законе [4] безопасность процессов производства и эксплуатации рассматривается как *состояние*, при котором отсутствует недопустимый *риск*, связанный с причинением вреда жизни и здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, государственному и муниципальному имуществу, окружающей природной среде, жизни и здоровью животных и растений. В приведённом определении кроме социальных последствий содержатся также экологические последствия (негативные воздействия на окружающую среду) и экономические последствия (утрата материальных ценностей и затраты на восстановительные работы). Кроме того, в формулировке вводится показатель безопасности «риск».

В отмеченных федеральных законах «безопасность» представляется как *состояние* защиты внешних (по отношению к рассматриваемому) объектов

(человека, природной среды и материальных ценностей) от опасностей, которые могут возникнуть вследствие аварии на рассматриваемом техническом объекте (соответствует английскому термину «security» [5]). На самом техническом объекте в случае аварии существует потенциальная опасность для находящихся на нем работников, оборудования и сооружений, а также занимаемой им территории. С этой точки зрения при проектировании и эксплуатации решения направлены на снижение уровня потенциальной опасности, т.е. придания объекту свойства безопасности при возможных технологических нарушениях (соответствует английскому термину «safety» [5]).

Таким образом в одном случае понятие «безопасность» может фигурировать в качестве *состояния*, а в другом – в качестве *свойства*. В современном толковом словаре русского языка «состояние – положение в котором кто-, что-либо находится»; «свойство – качество, признак, являющийся отличительной способностью кого-, чего-либо».

Из приведенных толкований для промышленных объектов (систем) можно сделать заключение, что человек, материальные ценности и окружающая объект природная среда будут находиться в состоянии (положении) безопасности (защищенности), если при проектировании, строительстве и организации эксплуатации объекта приняты необходимые меры по снижению тяжести последствий от возможных технологических нарушений, т.е. придания объекту свойства безопасности. Уровнем безопасности можно управлять принятием соответствующих мер и мероприятий и тем самым устанавливать приемлемую величину риска.

Для иллюстрации рассмотрим установку силового трансформатора на электроподстанции. Нужный уровень промышленной безопасности установки достигается выполнением комплекса противопожарных мероприятий: использование маслоприемников, маслоотводоов и маслосборников, газовых и водяных систем пожаротушения и др.; снижению тяжести последствий от технологических нарушений на установке способствует комплекс быстродействующих релейных защит трансформатора; для защиты от несанкционированного доступа к установке предусмотрены ограждения, блокировки и ряд других мероприятий.

Следует заметить, что свойство надежности трансформаторной установки обеспечивается отличающимся комплексом мероприятий. Технический объект может обладать достаточным уровнем надежности, но при этом не обязательно является безопасным. Справедливо обратное утверждение.

Введённое в [4] понятие «риск» исторически прежде всего использовалось в страховании. В классическом британском пособии по основам

страхования бизнеса [6] приводится несколько определений риска: возможность неблагоприятного события (происшествия); комбинация опасностей; неопределённость потерь; возможность потерь.

Смысл страхования – в механизме передачи риска и обеспечение финансовой компенсации за убыток. При этом страхователь (частный или промышленный) может передать финансовые последствия риска страховщику в обмен на уплату страховых взносов (премий).

Следуя принципам страхового бизнеса в отмеченном законе [4] риск определяется как «вероятность причинения вреда жизни и здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений с учётом тяжести этого вреда».

ГОСТ [7] содержит более короткую формулировку: «риск – сочетание вероятности события и его последствия».

Из приведённых формулировок следует, что понятие «риск» представляет собой вероятностный показатель (количественную характеристику, меру) опасности негативных последствий от технологических нарушений (аварии и инцидентов) на энергообъекте.

Введем обозначения  $P_m(t)$  – вероятность того, что на интервале времени  $t$  произойдет  $m$  технологических нарушений ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ). Обозначим также  $x\phi$  – значение последствий (как отмечалось ранее, они могут быть социальными ( $j = c$ ), экологическими ( $j = эк$ ) или экономическими ( $j = э$ )), при равенстве или превышении которого технологическое нарушение расценивается как неприемлемое по последствиям событие. При известной функции распределения последствий технологических нарушений случайной величины  $X(F(X) = P(X < x\phi))$  условная вероятность того, что в случае технологического нарушения размер последствий будет равен или превысит  $x\phi$ , равна

$$P(X_j \geq x\phi) = 1 - F(x\phi). \quad (1)$$

Риск того, что за время  $t$  произойдут технологические нарушения с неприемлемыми последствиями, равен

$$R_j(t, X_j \geq x\phi) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(t) P_m(X_j \geq x\phi), \quad (2)$$

где  $P_m(X_j \geq x\phi)$  – условная вероятность превышения допустимых значений последствий при  $m$ -м технологическом нарушении.

При выполнении практических расчетов часто полагают, что технологические нарушения на объекте на интервале времени  $t$  могут быть представлены пуассоновским потоком:

$$P_m(t) = \frac{(lt)^m}{m!} e^{-lt}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где  $l$  – интенсивность потока технологических нарушений – среднее число событий за единицу времени.

Интервал времени  $t$  часто принимается равным одному году. Тогда при заданном  $x\phi$  и  $l \in 1$  (что характерно для электроустановок) риск негативных последствий от технологических нарушений на объекте составит [8]:

$$R_j(l, X_j^3 x\phi) \approx 1 - e^{-l P(X_j^3 x\phi)}. \quad (4)$$

Для задания  $P(X_j^3 x\phi)$  в (4) можно использовать теоретические законы случайных величин (последствий технологических нарушений) или гистограммы случайных величин, построенных по статистическим данным о последствиях нарушений.

Законодательный ввод в качестве показателя промышленной безопасности риска негативных последствий от технологических нарушений предполагает в дальнейшем разработку обоснованных нормативов для проектирования и эксплуатации энергообъектов. Потребность работ в этом направлении становится актуальной с развитием рыночных отношений и обусловлена рядом практических задач.

В качестве одной из таких задач рассмотрим обоснование размера аварийного запаса материалов (АЗМ) для эксплуатации воздушных линий

В [9] для проведения восстановительных работ на ВЛ в регионах с неблагоприятными природно-климатическими условиями предусматривается создание АЗМ по приведённым нормативам. Указанные нормативы обобщают большой накопленный опыт эксплуатации электрических сетей разного класса напряжения, однако не в полной мере соблюдается дифференцированный подход к каждому региону.

Аварийный запас предназначен для сокращения времени проведения восстановительных работ на ВЛ с тем, чтобы уменьшить ущерб от перерыва электроснабжения (у потребителей брак или недовыпуск объёма продукции, опасные для человека или оборудования нарушения технологических процессов и др.). При ограничении или прекращении электроснабжения электрическая сеть несёт потери в виде упущенной выгоды и кроме того, необходимо компенсировать нанесённый ущерб потребителям от прекращения электроснабжения в зависимости от договорных обязательств.

При определении объёма АЗМ в электрической сети необходимо решить дилемму: с одной стороны, чрезмерный объём АЗМ приводит к возрастанию затрат на приобретение и хранение материалов и кроме того, происходит своего рода «омертвление» материальных ценностей до момента их использования, с другой стороны, при недостаточном АЗМ возрастает риск возникновения дефицита ма-

териалов для ликвидации последствий аварий и связанное с этим увеличение сроков проведения восстановительных работ.

Следует признать, что из существующих статистических данных учёта технологических нарушений невозможно выделить составляющие ущерба, обусловленные увеличением времени проведения ремонтно-восстановительных работ на ВЛ после аварий из-за возникшего дефицита материалов. Поэтому в настоящее время наиболее приемлем нормативный подход, основанный на директивном задании уровня риска исходя из накопленного опыта эксплуатации. По сути он заменяет существующий нормативный подход в [9], при котором объём материалов в аварийном запасе зависит от суммарной протяжённости линий (задаётся норматив на 100 км линий). В случае задания уровня риска дифференциация осуществляется не только по суммарной протяжённости линий, но и по фактическим природно-климатическим условиям на территории и возможным реальным последствиям от аварий.

Для обоснования целесообразного объёма АЗМ в энергосистеме по какому-либо виду материалов необходимо располагать статистическими данными о повреждениях в электрических сетях за время  $T_{\text{нбл}}$ , при которых возникла потребность в рассматриваемом виде материалов для проведения ремонтных работ.

Пусть имеется выборка потребности в материалах:

$$x_1, x_2, \dots, x_n. \quad (5)$$

По выборке (5) может быть определена условная вероятность  $P(X^3 x\phi)$  в формуле риска (4) и вычислена интенсивность технологических нарушений (поток нарушений полагается стационарным):

$$l = n / T_{\text{нбл}}. \quad (6)$$

Если задан максимально допустимый риск возникновения дефицита материалов  $\epsilon$  на интервале времени  $t$  (часто принимают равным 1 году), то значение  $x\phi$  определяется решением неравенства

$$R(l, X^3 x\phi) < \epsilon \quad (7)$$

Рассмотренный алгоритм позволяет определить объёмы АЗМ разного вида при условии, что директивно нормирован или определён по каким-то другим соображениям максимально возможный риск возникновения дефицита материалов для ВЛ разного класса по напряжению.

В [8] на примере электрических сетей Ставропольэнерго показано применение изложенного подхода к обоснованию числа опор в АЗМ отдель-

но для ВЛ 110 и 35 кВ. Не повторяя содержащиеся в [8] решения задачи, в таблице приведены результаты расчётов.

| Напря-<br>жение<br>ВЛ, кВ | Протя-<br>жен-<br>ность<br>ВЛ, км | l,<br>1/год | ε,<br>отн.ед. | Необходимое число<br>опор в АЗМ<br>энергосистемы, шт. |               |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------|---------------|---|---------------|
|                           |                                   |             |               | по<br>нормативу                                       | по<br>расчёту |
| 110                       | 4500                              | 0,375       | 0,05          | 34  | 17            |
| 35                        | 5000                              | 0,5         | 0,075         | 50  | 55            |

На основании результатов расчёта сделаны выводы: при принятом уровне риска для ВЛ 110 кВ можно пойти на сокращение нормативного числа опор в АЗМ; для ВЛ 35 кВ нормативные и расчётные значения числа опор в АЗМ практически совпадают.

Полученные выводы относятся к конкретной электрической сети в соответствии с имеющейся статистикой об аварийности. Для других сетей выводы могут отличаться.

Другой пример на оценку риска негативных последствий от аварийных ситуаций на электросетевых объектах относится к социальным последствиям.

На электросетевых объектах промышленная безопасность определяется двумя наиболее характерными для них видами: пожарной и электрической безопасностью. Для оценки уровня опасности для человека при его профессиональной деятельности на указанных объектах может быть полезной формула для риска (4).

Пусть за период наблюдения  $T_{нбл}$  на объекте зафиксированы  $n$  случаев производственного травматизма, последствия которых характеризовались величиной  $s_i$  – числом человек, получивших травмы и заболевания:

$$s_1, s_2, \dots, s_n. \tag{8}$$

Практика статистического анализа данных по производственному травматизму показывает, что во многих случаях статистическая функция распределения может быть выравнена показательной (или экспоненциальной) функцией

$$F(S < s) = 1 - e^{-s/s_{cp}}, \tag{9}$$

где  $s_{cp} = \sum_{i=1}^n s_i / n$  – среднее арифметическое на-

блюдённых значений случайной величины  $S$ .

Подставляя (9) в (4), получим:

$$R(l, S^3 s) = 1 - e^{-l e^{-s/s_{cp}}}, \tag{10}$$

где  $l$  вычисляется по (6).

Формула для оценки риска социальных последствий (10) может быть использована для получения ряда показателей опасности объекта. Для практического применения предлагается вычислять коэффициент опасности для персонала предприятия на периоде наблюдения ( $T_{нбл}$ ) вида

$$k_{оп} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} R(l, S^3 s) ds = \frac{s_{cp}}{N} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{l^k}{k \cdot k!}, \tag{11}$$

где  $N$  – число человек из персонала объекта, которые могут подвергнуться опасным воздействиям в течение года при выполнении своих производственных обязанностей.

Показатель опасности  $k_{оп}$  имеет определённый физический смысл. Для этого рассмотрим первое слагаемое в (11), как правило, наиболее значимое при  $l \ll 1$ :

$$k_{оп(1)} = \frac{s_{cp} l}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{T_{нбл} N} = \frac{s_{ож}}{T}, \tag{12}$$

где  $s_{ож} = \sum_{i=1}^n s_i / T_{нбл}$  – ожидаемое среднее число

пострадавших на объекте за единицу времени.

Из (12) следует, что  $k_{оп}$  показывает среднюю долю пострадавших от общего числа персонала объекта за единицу времени.

В качестве примера вычислим  $k_{оп}$  на объекте численностью персонала  $N = 100$  человек. На этом объекте за 12 лет имеются два случая производственного травматизма: при первом событии тяжело пострадали два человека, а при втором – один человек. По условию задачи можно вычислить:

$$s_{cp} = (1 + 2) / 2 = 1,5 \text{ чел.};$$

$$l = 2 / 12 = 1/6 \text{ год}^{-1}.$$

Коэффициент опасности определяется по (11), ограничиваясь первыми тремя слагаемыми под знаком суммы:

$$k_{оп} = 1,5 / 100 (1/6 - 1/(6^2 \cdot 2 \cdot 2) + 1/(6^3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3)) = 2,4 \cdot 10^{-3}.$$

Следует заметить, что действующие в настоящее время правила [10] в большей мере приспособлены к выполнению функций оперативно-диспетчерского управления. Они не рассчитаны на выполнение анализа последствий от аварий и других нарушений на энергообъектах при проектировании и эксплуатации объектов.

Для того чтобы вопросы промышленной безопасности получили практическую направленность, необходимо, в первую очередь, обеспечить формирование достоверной и полной базы данных о технологических нарушениях на объектах с отражением не только их причин, но и последствий. Затем должны быть приняты показатели рисков послед-

ствий с последующим утверждением нормативов уровней промышленной безопасности энергообъектов. Без этого вопросы безопасности объектов останутся на уровне деклараций.

Оценки рисков последствий от технологических нарушений на энергообъектах необходимо выполнять на стадии их проектирования и периодически повторять (сроки требуют обоснования) при последующей эксплуатации.

Для обоснованного принятия решений по вопросам промышленной безопасности объектов потребуется выполнение целенаправленных научных исследований с последующим внесением изменений в нормативную и распорядительную документацию, а также разработкой методик расчёта показателей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Безопасность** России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Энергетическая безопасность. – В кн. Проблемы функционирования и развития электроэнергетики. – М.: МГФ «Знание», 2001, 480 с.
2. **Мартынюк В.Ф., Лисанов М.В., Кловач Е.В., Сидоров В.Н.** Анализ риска и его нормативное обеспечение. – Безопасность труда в промышленности, 1995, № 11, с. 55–62.

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 7, pp. 32–37.*

## Industrial Safety of Electric Power Facilities

V.A. SKOPINTSEV

*At the present development stage of electric power industry under the conditions of market relations, an endeavour is made to develop indicators and their criteria for estimating the level of industrial safety in designing and operation of power facilities. The approaches applied in different countries to estimating and securing industrial safety are analyzed. The specific features pertinent to understanding the "safety" term taking into account the legislation of the Russian Federation, and the advisability of estimating the industrial safety level in terms of risk amount is discussed. The approach to determining the risk is substantiated. For practical use, it is recommended to use a formula for calculating the risk of negative consequences from technological abnormalities. The application of this formula is illustrated on examples of estimating the economic and social risks from statistical data about the consequences of abnormalities in electric networks. A power system is concerned, arrangements must be taken for setting up a valid and full database on technological abnormalities with reflecting not only their causes, but also the scope of their consequences.*

**Key words:** *electric power facilities, industrial safety, technological abnormalities, risks of consequences, indicators, standards*

#### REFERENCES

1. **Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskiye i nauchno-tehnicheskiye aspekty. Energeticheskaya, bezopasnost'. V knige Problemy funkcionirovaniya i razvitiya elektroenergetiki** (Security of Russia. Legal, social-economic and scientific-technical aspects. Energy security. – in "Electric Power Industry Operation and Development Problems"). Moscow. Publ. "Znaniye", 2001, 480 p.
2. **Martynuk V.F., Lisanov M.V., Klovach Ye.V., Sidorov V.N.** *Bezopasnost' truda v promyshlennosti - in Russ. (Safety in Industry)*, 1995, No. 11, pp. 55-62.
3. **Federal'nyi zakon RF No. 116-FZ, 21.07.97. O Promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov** (RF Federal Law

3. **Federal'nyi zakon RF ot 21.07.97. № 116-FZ. O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov.**

4. **Federal'nyi zakon RF ot 27.12.02. № 184-FZ. O tekhnicheskom regulirovanii.**

5. **Энергетическая безопасность. Термины и определения/Отв. редактор Н.И. Воропай.** – М.: «ИАЦ Энергия», 2005, 60 с.

6. **Бланд Д.** *Страхование: принципы и практика/Пер. с англ.* – М.: Финансы и статистика, 1998, 416 с.

7. **ГОСТ Р 51901–2002.** *Управление надежностью. Анализ риска технологических систем.*

8. **Скопинцев В.А.** *Качество электроэнергетических систем: надёжность, безопасность, экономичность, живучесть.* – М.: Энергоатомиздат, 2009, 332 с.

9. **Справочник по ремонту и техническому обслуживанию электрических сетей/Под ред. К.М. Антипова, И.Е. Бандуилова.** – М.: Энергоатомиздат, 1987.

10. **Постановление** Правительства РФ от 28.10.09. № 846. Об утверждении правил расследования причин аварий в электроэнергетике.

[23.03.15]

*Автор: Скопинцев Владимир Алексеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1965 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию по анализу аварийности электроэнергетических систем. Начальник департамента ОАО «Институт «Энергосетьпроект».*

No. 116-FZ dated July 21, 1997 "About Industrial Safety of Hazardous Production Facilities").

4. **Federal'nyi zakon** (Federal Law) RF No. 184-F3, 27.12.02. *O tekhnicheskoy regulirovani* (On Technical Regulation).

5. **Energeticheskaya bezopasnost' Terminy i opredeleniya** (Energy security. Terms and definition / Editor-in-chief N.I. Voropai). Moscow, Publ. "Information-analytical centre Energiya", 2005, 60 p.

6. **Bland D.** *Strakhovaniye: printsipy i praktika/Per. s angl.* (Insurance: principles and practice/Trans. from English). Moscow, Publ. "Finances and Statistics", 1998, 416 p.

7. **GOST R 51901–2002.** *Upravleniye nadezhnost'yu. Analiz riska tekhnologicheskikh sistem* (GOST (State Standard) R 51901 – 2002: Risk Management. Risk Analysis of Technological Systems.).

8. **Skopintsev V.A.** *Kachestvo elektroenergeticheskikh system: reliability, security, efficiency, survivability*. Moscow, Publ. "Energoatomizdat", 2009, 332 p.

9. **Spravochnik** *po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu elektricheskikh setei* (A Handbook for Repair and Maintenance of Electric Network. Ed. by K.M. Antipov and I.E. Banduilov

(Energoatomizdat, Moscow, 1987)/ Edit. By K.M. Antipov and I.E. Banduyilov. Moscow, Publ. "Energoatomizdat", 1987.

10. **Postanovleniye** Pravitel'stva RF ot 28.10.09. No. 846. Ob utverzhdenii pravilra ssledovaniya prichinavarii v elektroenergetike (RF Government Decree No. 846 dated October 28, 2009 "On Approval of Rules for Investigating Causes of Accidents in the Electric Power Industry").

*Author: Skopintsev Vladimir Alekseyevich (Moscow, Russia) - Dr. Sci (Eng.). He is Head of the Department the JSC "Institute "Energoset'proekt".*