

9. LaForest J.J. Transmission line reference book, 345 kV and above. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1982, 625 p.

10. Rakov V.A., Borghetti A., Bouquegneau C., Chisholm W.A., Cooray V., Cummins K., Diendorfer G., Heidler F., Hussein A.M., Ishii M., Nucci C.A., Piantini A., Pinto O., Qie X., Rachidi F., Saba M., Shindo T., Schulz W., Thottappillil R., Visacro S. Lightning parameters for engineering applications. – CIGRE Technical Brochure 549, 2013, 117 p.

11. Pigni A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., Pesavento G. Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods. – IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, vol. 4, No. 2, pp. 1379–1392.

12. Caldwell R.O., Darveniza M. Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation. – IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1973, vol. PAS-92, No. 4, pp. 1420–1428.

13. Chisholm W.A. New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators. – IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, vol. 26, No. 2, pp. 14–25.

14. Heidler F., Cvetić J. A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. – European Transactions on Electrical Power, 2002, vol. 12, No. 2, pp. 141–150.

15. Eriksson A., Deller L., Baldo G., Bouquegneau C.H., Darveniza M., Elovaara J., Garbagnati E., Gary C., Grant I., Hileman A., Houlgate R., Huse J., Janischewskij W., Kawamura T., Popolansky F., Ruhling F., Weck K.-H. Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. – Paris: CIGRE, 1991, 61 p.

16. Novikov A.N., Shmarago O.V. *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konf. imeni N.N. Tikhodeyeva – in Russ* (Proc. of the VII International Scientific and Research Conf. named N.N. Tikhodeyev), 2014, pp. 305–320.

*Электричество, 2016, № 6, с. 21–25.*

## Экологические последствия аварийных ситуаций в электрических сетях

СКОПИНЦЕВ В.А.

*При эксплуатации воздушных линий электропередачи и подстанций возможны аварийные ситуации с экологическими последствиями для человека и окружающей природной среды. Предлагаются методический подход и расчётные формулы для оценки экологического риска при аварийных ситуациях в электрических сетях. Приводится анализ нарушений в МЭС Урала с экологическими последствиями за период с 2006 по 2015 гг.*

*Ключевые слова: электрическая сеть, аварийная ситуация, экологические последствия, риск негативных последствий, статистические данные*

Целью экологической политики ПАО «ФСК ЕЭС» является минимизация негативного воздействия на окружающую среду при передаче и распределении электрической энергии. При этом первоочередной задачей является обеспечение экологической безопасности и рационального природопользования при осуществлении производственной деятельности, предупреждение и ликвидация аварийных ситуаций, приводящих к негативным последствиям.

Советом директоров ПАО «ФСК ЕЭС» утверждена экологическая политика в новой редакции. В число основополагающих принципов экологической политики вошли:

научная обоснованность экологической политики;

приоритет принятия предупредительных мер над мерами по ликвидации негативных воздействий на окружающую среду;

открытость и доступность экологической информации, информирование заинтересованных сторон о прошедших авариях, их экологических последствиях и мерах по их ликвидации.

Вопросы защиты окружающей среды в нашей стране по времени имеют полувековую историю.

Важнейшими юридическими нормами по охране среды стали принятые Верховным Советом СССР Основы законодательства о земле (1968 г.), о воде (1970 г.), о недрах (1975 г.), о лесах (1977 г.), об охране и использовании животного мира (1980 г.), об охране атмосферного воздуха (1980 г.) [1].

В электроэнергетике наибольшее негативное воздействие на окружающую среду оказывают электростанции всех типов. Опыт эксплуатации электрических сетей показал, что электросетевые объекты также заслуживают внимания при решении вопросов защиты окружающей среды.

В документе [2] указывается, что при проектировании электросетевых объектов должно быть предусмотрено не превышение предельно допустимых значений воздействий на среду, установленных соответствующими стандартами и санитарными нормами. Для этого предписано выполнять оценки воздействий электросетевого объекта на атмосферный воздух, растительность, животный мир и другие компоненты окружающей среды, а также влияния объекта на человека на стадии строительства и в процессе эксплуатации.

Для воздушных линий (ВЛ) должна быть обеспечена экологическая безопасность в отношении

допустимых уровней электрических полей, магнитных полей, электромагнитных помех, шумов (для ВЛ 110 кВ и выше только в населённой местности). На подстанциях (ПС) кроме перечисленных для ВЛ требований для устанавливаемого маслосодержащего оборудования требуется также обеспечить предотвращение попадания трансформаторного масла на рельеф местности и соблюдение требований пожарной безопасности.

Согласно [2] оценка воздействий электросетевых объектов на окружающую среду должна проводиться расчётным методом по методикам, утверждённым установленным порядком. В действующих нормативных документах разработаны комплексы мер и мероприятий по экологической безопасности объектов электрических сетей при их эксплуатации.

Мировая практика эксплуатации показала, что имеет место недостаточный уровень обеспечения экологической безопасности промышленных объектов в аварийных ситуациях. Поэтому возникла потребность в разработке вероятностных методов расчёта для оценки негативных экологических последствий при авариях. Применение таких оценок предусматривается в проекте вновь разрабатываемого стандарта для электрических сетей.

Для вероятностных оценок безопасности технических объектов в [3] есть понятие риска: «риск – вероятность причинения вреда жизни и здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, государственному и муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений с учётом тяжести этого вреда».

В указаниях [4] содержится определение: «риск аварии – мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть её последствий».

Таким образом, понятие «риск» представляет собой показатель (количественную характеристику, меру) опасности негативных последствий от технологических нарушений (аварий, инцидентов) на объекте.

Вероятностная оценка экологических последствий при аварийных ситуациях потребует разработки методики определения риска негативных последствий от технологических нарушений в электрических сетях, формирование многолетней базы статистических данных экологических последствий от аварийных ситуаций на действующих объектах с утверждением допустимого уровня риска экологических последствий, и в случае превышения уровня риска потребуются осуществление соответствующих защитных мероприятий.

Под экологическим риском понимается показатель функционирования объекта, который характе-

ризуется полной вероятностью того, что на заданном интервале времени экологические последствия от технологических нарушений на объекте будут равны или превысят установленные директивными документами допустимые экологические последствия.

Обозначим  $X_{\text{э}}$  – экологические последствия на интервале времени  $t$ . Математическая формула экологического риска в общем случае имеет вид [5]:

$$R_{\text{э}}(t, X_{\text{э}} \geq x_{\text{г}}) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(t)(X_{\text{э}} \geq x_{\text{г}}), \quad (1)$$

где  $m$  – число технологических нарушений на интервале времени  $t$ ;  $P_m(t)$  – вероятность технологических нарушений;  $x_{\text{г}}$  – экологическое последствие, при равенстве или превышении которого технологическое нарушение расценивается как неприемлемое по последствиям событие;  $P_m(X_{\text{э}} \geq x_{\text{г}})$  – условная вероятность того, что в случае технологического нарушения экологические последствия будут равны или превысят допустимое значение.

Для стационарного пуассоновского потока технологических нарушений вероятность того, что на интервале времени  $t$  произойдёт  $m$  технологических нарушений, согласно [6] определяется формулой

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

где  $l$  – интенсивность потока технологических нарушений на объекте, среднее число нарушений, приходящееся на единицу времени.

В [5] показано, что для такого потока технологических нарушений формула экологического риска (1) может быть приведена к виду:

$$R_{\text{э}}(t, X_{\text{э}} \geq x_{\text{г}}) = 1 - e^{-lt} P(X_{\text{э}} < x_{\text{г}}). \quad (3)$$

Анализ статистических данных о последствиях технологических нарушений показывает, что число нарушений с экологическими последствиями ( $n_{\text{э}}$ ) составляет не более 5% общего числа нарушений ( $n$ ) в электрических сетях за время наблюдения  $T_{\text{наб}}$ . Остальные последствия технологических нарушений относятся к социальным и в большей мере экономическим последствиям. Поэтому при выполнении практических расчётов без большой погрешности принимают:

$$P(X_{\text{э}} \geq x_{\text{г}}) \approx n_{\text{э}} / n. \quad (4)$$

Так как интенсивность потока технологических нарушений в электрической сети определяется выражением

$$l = n / T_{\text{наб}}, \quad (5)$$

то на интервале времени  $t=1$  с учётом (4) формула экологического риска преобразуется к виду:

$$R_{\text{э}}(t, X_{\text{э}}) = R_{\text{э}} = 1 - e^{-\frac{n \cdot n_{\text{э}}}{T_{\text{наб}}}} = 1 - e^{-I_{\text{э}}}, \quad (6)$$

где  $I_{\text{э}} = n_{\text{э}} / T_{\text{наб}}$  – интенсивность технологических нарушений в сетях с экологическими последствиями.

Определение экологического риска для электросетевых объектов имеет некоторые особенности. Для ВЛ риск удобно вычислять для 100 км линий, а интервал времени принять равным одному году:

$$R_{\text{э}}^{\text{(ВЛ)}} = 1 - e^{-\frac{n_{\text{э}} \cdot 100}{LT_{\text{наб}}}}, \quad \text{отн. ед.}, \quad (7)$$

где  $L$  – суммарная длина линий, для которых получено значение  $n_{\text{э}}$  за период наблюдения  $T_{\text{наб}}$ .

Для ПС формулу (6) можно представить в виде:

$$R_{\text{э}}^{\text{(ПС)}} = 1 - e^{-\frac{n_{\text{э}}}{NT_{\text{наб}}}}, \quad \text{отн. ед.}, \quad (8)$$

где  $N$  – число ПС, для которых получено значение за период наблюдения  $T_{\text{наб}}$ .

Анализ технологических нарушений в электрических сетях с экологическими последствиями показал, что большинство из них сводится к следующим случаям:

поражение электрическим током птиц на ВЛ и на открытых токоведущих частях элементов ПС напряжением 35 кВ и ниже;

поражение электрическим током животных при проникновении их на территории ПС;

массовая гибель птиц в полости железобетонных опор ВЛ и ПС напряжением 35 кВ и выше;

обрыв провода на трассе ВЛ с возникновением пожарной ситуации в засушливый период года;

аварийный разрыв маслonaполненного бака оборудования ПС с разливом масла и возможным его воспламенением;

утечка в атмосферу элегаза при разгерметизации оборудования.

В [1] приводятся следующие примеры экологических последствий в аварийных ситуациях при эксплуатации электрических сетей. в степных и по-

Номер п/п	Предприятие МЭС	Диспетчерское наименование	Дата аварии	Время аварии	Напряжение оборудования, кВ
1.	Пермское	ПС 220 кВ Позимь	01.07.2006 г.	9:20	10
2.	Оренбургское	ПС 220 кВ Каргалинская	01.06.2008 г.	14:54	220
3.	Пермское	ПС 220 кВ Омутнинск	17.03.2009 г.	15:20	220
4.	Пермское	ПС 220 кВ Сюга	07.05.2009 г.	10:30	220
5.	Пермское	ПС 220 кВ Фаленки	16.06.2009 г.	13:10	10
6.	Пермское	ПС 220 кВ Сюга	22.06.2009 г.	12:12	220
7.	Пермское	ПС 220 кВ Сюга	14.07.2009 г.	9:30	220
8.	Оренбургское	ПС 220 кВ Мраморная	20.08.2009 г.	18:36	220
9.	Свердловское	ПС 500 кВ Южная	03.01.2010 г.	12:50	10
10.	Южно-Уральское	ПС 110 кВ Карталы район.	07.04.2011 г.	7:43	35
11.	Пермское	ПС 220 кВ Сюга	25.06.2011 г.	11:19	220
12.	Пермское	ПС 220 кВ Звездная	18.06.2012 г.	15:02	110
13.	Пермское	ПС 220 кВ Звездная	27.06.2012 г.	14:14	110
14.	Южно-Уральское	ПС 220 кВ Мраморная	22.07.2012 г.	9:57	110
15.	Свердловское	ПС 220 кВ Качканар	13.08.2012 г.	16:26	10
16.	Южно-Уральское	ВЛ 220 кВ Шагол–Кунашак	25.05.2013 г.	5:07	220
17.	Пермское	ПС 220 кВ Звездная	21.06.2013 г.	9:22	110
18.	Пермское	ПС 220 кВ Звездная	23.06.2013 г.	7:26	110
19.	Южно-Уральское	ПС 500 кВ Шагол	06.08.2013 г.	17:45	110
20.	Пермское	ПС 220 кВ Комсомольская	06.06.2015 г.	6:34	10

лустепных районах ВЛ 6–10 кВ с опорами при горизонтальном расположении проводов стали причиной гибели большого числа хищных птиц, что поставило под угрозу экологическое равновесие в этом регионе. Только в 1981 г. от поражения электрическим током при междуфазных КЗ (от закорачивания фаз при взлёте) погибло до 20 тыс. птиц, многие из которых занесены в «Красную книгу».

Настоящей ловушкой для птиц являются полые железобетонные опоры ВЛ напряжением 35 кВ и выше. Мелкие насекомоядные птицы, пытающиеся устроить в полости гнездо или попадающие в полость опоры в погоне за насекомыми, как правило, гибнут. В полостях таких опор находили до 200 останков мелких птиц.

Много птиц гибнет на концевых опорах ВЛ 6–10 кВ и на спусках с этих опор к комплектным распределительным устройствам КТП 35–110 кВ или секционирующим аппаратам 6–10 кВ.

В таблице содержится статистика аварий в МЭС Урала с экологическими последствиями (гибелью птиц) в 2006–2015 гг. по представленной информации от Департамента производственной безопасности ПАО «ФСК ЕЭС».

За отмеченный период в МЭС Урала имело место 20 технологических нарушений с экологическими последствиями – гибелью птиц. Отмеченные нарушения по территории МЭС распределены неравномерно: более половины из них (12) произошли в Пермском ПМЭС (выделяются две ПС 220 кВ – Сюга и Звездная, на каждой из которых произошло по четыре нарушения), а другие нарушения – в остальных трёх ПМЭС. Причины такой неравномерности следует исследовать, чтобы принять соответствующие защитные меры. Отмечается гибель птиц в основном в летние месяцы с 8.00 до 16.00 часов.

Анализ представленной ПАО «ФСК ЕЭС» статистики нарушений с экологическими последствиями в других МЭС показал, что такие нарушения происходят преимущественно на оборудовании в распределительных устройствах среднего и низшего напряжения ПС.

На ВЛ подобные нарушения в составе статистических данных отмечаются редко. В действительности гибель птиц на ВЛ вероятнее всего происходит гораздо больше, чем на ПС. Однако они не отмечаются в актах, так как не сопровождаются аварийным отключением линий.

Для более глубокой проработки рассматриваемого вопроса должна быть выполнена самостоятельная работа электриков совместно с орнитологами для выявления опасных зон в местах наибольшего обитания птиц и на путях их миграции.

Со временем следует составить территориальные карты с указанием зон уровней опасности трасс линий для птиц. Указанные карты должны

учитываться при проектировании и эксплуатации ВЛ. При прохождении трасс линий по экологически опасным зонам следует предусматривать специальные мероприятия, например, закрытие отверстий полых железобетонных стоек опор сетками или наголовниками, а также устанавливать на порталах и опорах отходящих ВЛ до 330 кВ противоптичьих заградители [2].

При проектировании и эксплуатации электросетевых объектов заслуживают также внимания и другие перечисленные случаи экологических последствий. При этом оценка опасности экологических последствий на объектах возможна только при наличии статистических данных о последствиях аварий в электрических сетях за ряд лет эксплуатации. Далее на основе полученных оценок следует принимать решение о необходимости осуществления специальных защитных мероприятий.

Следует отметить, что действующие в настоящее время в электроэнергетике распорядительные и нормативные документы пока не ориентированы на проведение анализа рисков экологических последствий при аварийных ситуациях в электрических сетях.

**Выводы.** 1. Действующие в настоящее время нормативные документы недостаточно учитывают возможные экологические последствия от аварийных ситуаций.

2. Необходимо разработать методические и нормативные документы для проектирования и эксплуатации электросетевых объектов с учетом экологических последствий от аварий в электрических сетях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андривский В.Н.** Управление предприятием электрических сетей. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988, 344 с.
2. **СТО-56947007.** Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Экологическая безопасность электросетевых объектов. Требования при проектировании. Дата введения 15.03.2010.
3. **Федеральный закон РФ** от 27.12.02 г. № 184-ФЗ. О техническом регулировании.
4. **РД 03-418-01.** Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – М.: Гостехнадзор России, 2001.
5. **Скопинец В.А.** Качество электроэнергетических систем: надёжность, безопасность, экономичность, живучесть. – М.: Машиностроение, 2015, 352 с.
6. **Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Наука, 1991, 384 с.

[28.01.16]

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



*Elektrichestvo (Electricity)*, 2016, No. 6, pp. 21–25.

## Environmental Consequences of Emergency Situations in Electrical Networks

**SKOPINTSEV Vladimir Alekseyevich** (*Public Company «Institut Energoset'proekt», Moscow, Russia*) –  
*Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)*

*Emergency situations entailing ecological consequences for a human and natural environment may occur during operation of overhead power lines and substations. A methodical approach and calculation formulas are proposed for evaluating the ecological risk associated with emergency situations in electric networks. An analysis of deviations from normal operation in the Ural power system entailing ecological consequences that occurred for the period from 2006 to 2015 is given.*

*Key words: electric network, emergency situation, ecological consequences, risk of negative consequences, statistical data*

### REFERENCES

1. **Andriyevskii V.N.** *Upravleniye predpriyatiyem elektricheskikh setei. 2ye izd.* (Enterprise management of electrical networks. 2nd Publ.). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1988, 344 p.
2. **STO-56947007.** *Standart organizatsii OAO «FSK EES». Ekologicheskaya bezopasnost' elektrosetevykh ob'yektov. Trebovaniya pri proektirovani. Data vvedeniya 15.03.2010* (Standard Organization JSC «Federal Grid Company of Unified Energy System» (FGC UES). Environmental Safety of Electricity Facilities. Requirements for the Design. Late of introduction 15.03.2010.
3. **Federal'nyi zakon RF ot 27.12.02 No. 184-F3. O tekhnicheskoy regulirovani** (Federal Law of 27.12.02 No. 184-F3. On technical regulation).
4. **RD 03-418-01** *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu analiza riska opasnykh proizvodstvennykh ob'yektov* (Guidelines for risk analysis of hazardous production facilities). Moscow, Publ. Russia «Gostekhnadzor», 2001.
5. **Skopintsev V.A.** *Kachestvo elektroenergeticheskikh sistem: nadezhnost', bezopasnost', ekonomichnost', shivuchest'* (Quality of electric power systems: reliability, safety, efficiency, survivability). Moscow, Publ. «Mashinostroyeniye», 2015, 352 p.
6. **Venttsel' Ye.S., Ovcharov L.A.** *Teoriya sluchainykh protsessov I yeye inzhenernye prilozheniya* (The theory of random processes and its engineering application). Moscow, Publ. «Nauka», 1991, 384 p.