

ЗЫКОВ Владимир ИвановичДоктор технических наук, профессор
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия
E-mail: zikov01@mail.ru**КРУПИН Михаил Владимирович**Кандидат технических наук
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия
E-mail: krupin3@yandex.ru**КОЗЛОВА Юлия Сергеевна**Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия
E-mail: yulia-3012@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 000 В

На территории Российской Федерации воздушные линии электропередачи до 1 000 В представлены преимущественно неизолированными проводами, при замыкании которых образуются частицы расплавленного металла, способные выступать в качестве источника зажигания, приводя к пожарам. Однако методики и зависимости, позволяющие оценить пожароопасность процесса короткого замыкания, отсутствуют. В статье сформулированы критерии определения уровня пожарной опасности при коротком замыкании проводов в сетях до 1 000 В, а также алгоритм оценки этого уровня.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, короткое замыкание, пожарная опасность, аварийный режим, электрическая сеть, алгоритм.

Воздушные линии (ВЛ) электропередачи напряжением до 1 000 В в России составляют почти треть от общей протяжённости электрических сетей различных классов напряжений (протяжённость кабельных и воздушных линий электропередачи напряжением 0,4–110 (220) кВ на 2019 г. составляла 2 072 020,6 км, из них 766 079,4 км – ВЛ до 1 000 В). Более 50 % указанных линий отслужили свыше 30 лет. В условиях продолжающегося износа большое значение приобретает потребность в решении задач предупреждения возможных аварийных ситуаций.

Эксплуатация ВЛ напряжением до 1 000 В сопровождается различными аварийными режимами (замыкание, обрыв проводов и др.), около 60 % которых составляют однофазные короткие замыкания (ОКЗ) [1]. При возникновении коротких замыканий проводов ВЛ могут образовываться капли расплавленного металла, которые способны выступать в качестве источника зажигания [2–7]. Короткое замыкание проводов приводит к локальному нагреву в точке их касания – в месте контакта возникает переходное сопротивление, на котором выделяется значительное количество теплоты, представляемое как тепловой удар, что ведёт к быстрому нагреву контактной зоны. Повышение температуры приводит к возрастанию сопротивления металла, что, в свою очередь, увеличивает выделение теплоты. Скорость тепловыделения настолько высока, что теплота из зоны короткого замыкания практически не передаётся в окружающую среду. В результате высокая температура в зоне

контакта, близкая к температуре кипения металла (основной материал проводов ВЛ до 1 000 В – алюминий с температурой плавления 660 °С, кипения – 2518,8 °С), приводит к разбрызгиванию расплавленного металла, а также отгоранию жил или полному пережогу проводов [4, 8]. При наличии горючей среды вблизи проводов ВЛ возможны возгорания с последующим переходом в пожар.

Образование пожароопасных признаков (частиц расплавленного металла) происходит при определённых значениях величины тока и длительности короткого замыкания [8, 9]. Сочетания этих параметров создают разную степень пожарной опасности в виде возможности инициирования возгораний.

Быстро оценить уровень пожарной опасности (P) коротких замыканий при эксплуатации электрических сетей возможно при наличии чёткого алгоритма оценки, а также простых в применении инструментов, к которым можно отнести минимаксные поверхности, являющиеся результатом построения математических моделей.

В общем виде возможность возникновения пожароопасных признаков при эксплуатации ВЛ электропередачи напряжением до 1 000 В определяется по алгоритму, изображённому на *рисунке 1*.

Определив вероятные значения токов короткого замыкания на различных участках ВЛ, а также учитывая эффективность срабатывания аппаратов защиты на этих участках, прогнозируется возможность возникновения пожароопасных признаков. В случаях,

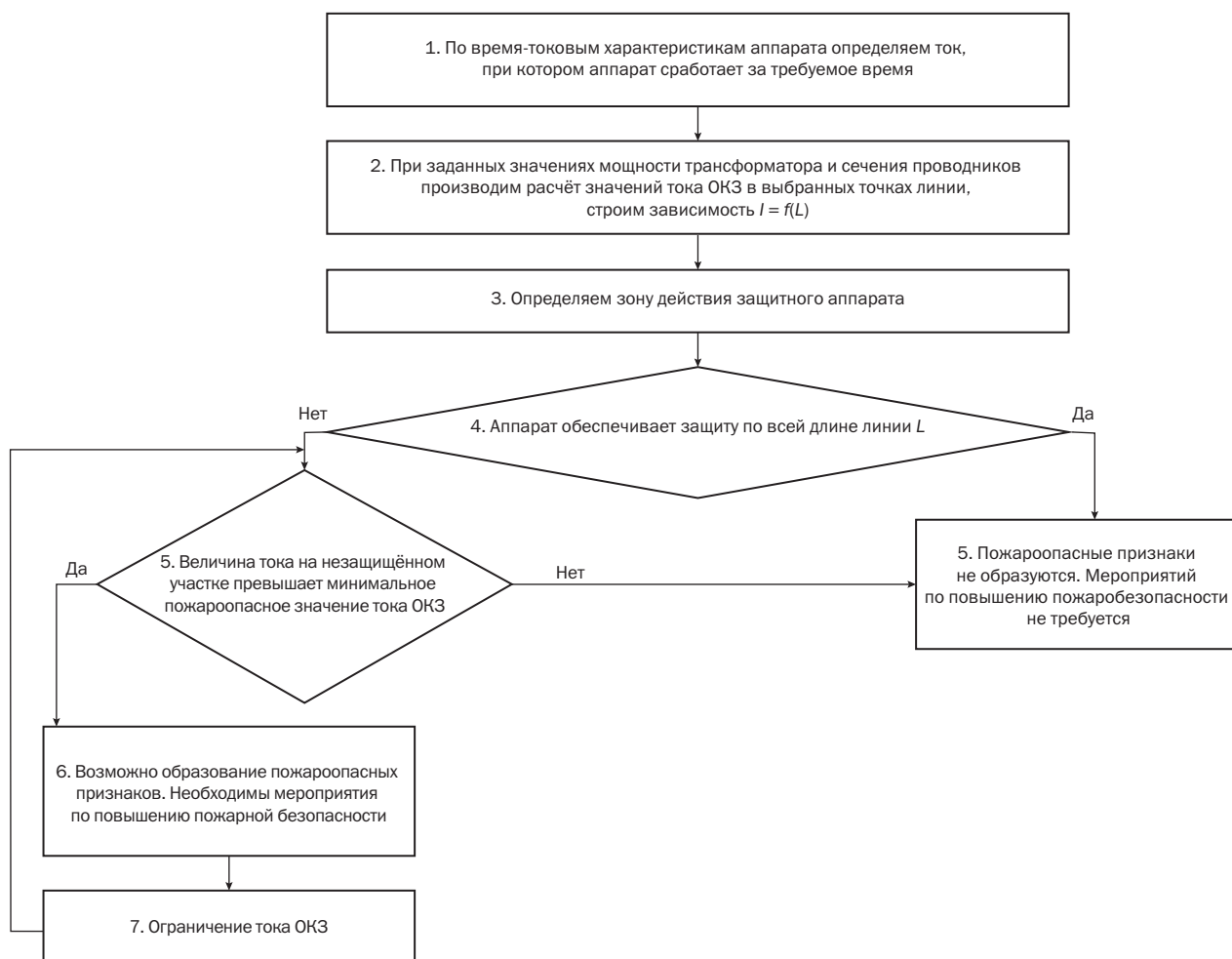


Рисунок 1. Алгоритм определения возможности возникновения пожароопасных признаков
 Figure 1. Algorithm for determining the possibility of fire hazard signs occurrence

когда образование пожароопасных признаков возможно, принимаются соответствующие меры по его предотвращению (ограничение величины тока короткого замыкания или повышение быстродействия аппаратов защиты).

Таким образом, уровень пожарной опасности ВЛ электропередачи, связанный с возможностью образования пожароопасных частиц, можно выразить следующим образом:

$$P = f(I_{кз}; t_{кз}; F_d), \quad (1)$$

где P – уровень пожарной опасности; $I_{кз}$ – величина тока короткого замыкания, А; $t_{кз}$ – длительность короткого замыкания, с; F_d – сечение провода, мм².

Уровень пожарной опасности выражается в единицах вероятности возникновения загорания при том или ином сочетании величин тока и длительности короткого замыкания и характеризуется как низкий – при вероятности до 0,1; средний – от 0,1 до 0,5; высокий – 0,5 и более.

Полагая, что в линии находятся провода одного и того же сечения по всей её протяжённости,

необходимо установить ожидаемые значения величин тока и длительности короткого замыкания.

Что касается длительности короткого замыкания, то она зависит от эффективности электрической защиты. На эффективность, в свою очередь, оказывают влияние правильный выбор и расстановка аппаратов защиты, а также их надёжность.

Время срабатывания аппаратов защиты определяется величиной токов ОКЗ и, в соответствии с требованиями Правил устройства электроустановок, не должно превышать 5 с. В реальной сети это время определяется местом короткого замыкания. При близких к трансформаторной подстанции повреждениях (до 50 м) кратности токов ОКЗ по отношению к номинальным токам защитных аппаратов велики (токи ОКЗ в 8–10 раз превышают номинальный ток аппаратов защиты), а время отключения ОКЗ не превышает 0,2–0,5 с. С учётом запаса по времени срабатывания защиты, время нагрева проводов на этом участке может быть принято 1,5 с. По мере удаления места повреждения от трансформаторной подстанции на расстояние более 50 м кратности токов ОКЗ уменьшаются, и время отключения может значительно

превышать 5 с. При таких условиях образование капель (а также возможное отгорание жил проводов ВЛ) зависит от величин тока короткого замыкания.

Определив ожидаемую длительность короткого замыкания, её соотносят с условием:

$$t_{\text{КЗ}} = \begin{cases} t_{\text{БС}}, \leq 1,5 \text{ с}; \\ t_{\text{СР}}, 1,5 < t < 5 \text{ с}; \\ t_{\text{ОТК}}, > 5 \text{ с}, \end{cases} \quad (2)$$

где $t_{\text{БС}}$ – быстрое срабатывание защиты; $t_{\text{СР}}$ – время срабатывания не превышает нормативного значения; $t_{\text{ОТК}}$ – защита не обеспечивает отключение за требуемое время.

Ток короткого замыкания является наиболее значимым среди факторов, подлежащих определению при оценке безопасности электрических сетей [8–10], и может быть выражен как:

$$I_{\text{КЗ}} = f(S_{\text{ТР}}; L; F_d), \quad (3)$$

где $S_{\text{ТР}}$ – мощность трансформатора, кВА; L – фактическая длина линии, м.

Для расчёта токов ОКЗ применяются классический метод, метод фазных координат и метод симметричных составляющих. Целесообразность и возможность использования того или иного метода определяется лицом, осуществляющим расчёт.

Результаты исследований время-токовых характеристик плавких предохранителей и автоматических выключателей показали, что лишь в 3–5 % случаев токи короткого замыкания в исследуемых сетях инициируют работу аппаратов защиты, обеспечивая отключение участка сети за нормируемый промежуток времени [11]. Предельная зона защиты, обеспечиваемая плавкими предохранителями (автоматическими выключателями) не превышает 250–350 м. Таким образом, в рамках данной работы сделано допущение о том, что на участках ВЛ, находящихся в зоне защиты плавких предохранителей (автоматических выключателей), образование пожароопасных признаков маловероятно, а длительность протекания токов короткого замыкания на незащищённом участке может превышать 5 с.

Расчётные значения тока короткого замыкания (длящегося более 5 с) могут быть отнесены к одному из токовых диапазонов, представляющих опасность с точки зрения образования пожароопасных признаков. Представленные ниже значения токовых диапазонов основаны на результатах, полученных при проведении физического эксперимента. Он проводился на установке, защищённой патентом РФ № 191656, 2019, создающей определённые электрические условия для имитации короткого замыкания с образованием капель расплава [12]. Экспериментальные исследования проведены в соответствии с основными положениями теории планирования эксперимента [13], а результаты обработаны с использованием

инструментов математической статистики [14]. Условия (4)–(6) соответствуют уровням, условно названным неопасным, пожароопасным и обладающим высокой пожарной опасностью:

$$I_{\text{НО}} = \begin{cases} < 120 \text{ А}, F_d = 25 \text{ мм}^2; \\ < 130 \text{ А}, F_d = 35 \text{ мм}^2; \\ < 160 \text{ А}, F_d = 50 \text{ мм}^2; \\ < 180 \text{ А}, F_d = 70 \text{ мм}^2. \end{cases} \quad (4)$$

$$I_{\text{ПО}} = \begin{cases} 120–180 \text{ А}, F_d = 25 \text{ мм}^2; \\ 130–190 \text{ А}, F_d = 35 \text{ мм}^2; \\ 160–220 \text{ А}, F_d = 50 \text{ мм}^2; \\ 180–250 \text{ А}, F_d = 70 \text{ мм}^2. \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{\text{ВПО}} = \begin{cases} > 180 \text{ А}, F_d = 25 \text{ мм}^2; \\ > 190 \text{ А}, F_d = 35 \text{ мм}^2; \\ > 220 \text{ А}, F_d = 50 \text{ мм}^2; \\ > 250 \text{ А}, F_d = 70 \text{ мм}^2, \end{cases} \quad (6)$$

где $I_{\text{НО}}$ – ток, при котором не образуются пожароопасные признаки; $I_{\text{ПО}}$ – ток, при котором вероятно образование пожароопасных признаков; $I_{\text{ВПО}}$ – ток, при котором существует высокая вероятность образования пожароопасных признаков.

Полученные величины токов короткого замыкания, в зависимости от его длительности, будут характеризовать уровни пожарной опасности ВЛ (низкий, средний, высокий), описанные ранее.

Следующим этапом оценки пожарной опасности ВЛ является определение протяжённости незащищённого участка, без учёта длины той части, на которой гарантировано срабатывание аппаратов электрической защиты за время, не превышающее 5 с.

Далее проводят сравнение величины токов короткого замыкания на незащищённом участке с величинами, указанными в условиях (4)–(6). В случаях, когда величины токов короткого замыкания на незащищённом участке линии достигают пожароопасных значений, проводят мероприятия по снижению величин этих токов. Повышение быстродействия релейной защиты неизбежно приведёт к нарушению электроснабжения. Отрицательные последствия этого очевидны [15].

Уровень пожарной опасности реальной ВЛ, как системы, характеризуется неопределённостью типа нечёткости границы системы, а также отдельных её состояний, входных и выходных воздействий. Следовательно, как отмечают авторы [16–19], для построения модели целесообразно использование специальных методов, ориентированных на построение моделей с учётом неполноты и неточности исходных данных. Технология нечёткого моделирования в таком случае является наиболее конструктивной [18, 20, 21].

Учитывая возможность различных сочетаний основных величин, характеризующих режим короткого замыкания сети, зависимость (1) можно представить как

$$P = \begin{cases} \text{низкий, } I_{НО} \text{ и } t_{КЗ} \leq t_{ср} \\ \text{низкий, } I_{ПО} \text{ и } t_{БС} \\ \text{средний, } I_{НО} \text{ и } t_{отк} \\ \text{средний, } I_{ПО} \text{ и } t_{ср} \\ \text{средний, } I_{ВПО} \text{ и } t_{БС} \\ \text{высокий, } I_{ПО} \text{ и } t_{отк} \\ \text{высокий, } I_{ВПО} \text{ и } t_{ср}, \end{cases} \quad (7)$$

Графически данное выражение схоже с поверхностью отклика в работах [6, 9] и представляет собой трёхмерную поверхность, полученную с использованием аппарата нечёткой логики в пакете расширения *Fuzzy Logic Toolbox* программной среды *MATLAB* и изображённую на рисунке 2 (для алюминиевых проводов сечением 25 мм²).

На рисунке уровень пожарной опасности выражен в единицах вероятности возникновения загорания при том или ином сочетании величин тока и длительности короткого замыкания и характеризуется как низкий – при вероятности до 0,1, средний – от 0,1 до 0,5, высокий – 0,5 и выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970. 520 с.
2. Черкасов В. Н., Зыков В. И. Пожарная безопасность электроустановок. Учебник / Под общ. ред. В. Н. Черкасова. 5-е изд. М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. 391 с.
3. Смелков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. М.: Кабель, 2009. 328 с.
4. Ревякин А. И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках. М.: Энергия, 1980. 160 с.
5. Сидоров А. И., Семенцова Ю. С. Пожарная опасность схлестываний проводов воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ // Безопасность жизнедеятельности. 2017. № 2. С. 32–35.
6. Козлова Ю. С. Полунин Г.А. Нечёткие множества для анализа пожарной опасности воздушных линий электропередачи // Национальная безопасность России: актуальные аспекты: сборник избранных статей Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. С. 35–37.
7. Бершадский И. А., Згарбул А. В., Халыгинская Н. М. Математическая модель загорания горючих веществ частицами металла, образующимися при коротком замыкании в электропроводке // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2018. № 3. С. 54–64.
8. Козлова Ю. С. Определение количества капель расплавленного металла при однофазном коротком замыкании // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 3 (14). С. 28–31.
9. Kozlova Yu. S. Assessment of Fire Hazard Level for Overhead Power Lines of Voltage up to 1000 V // Test Engineering and Management. 2020. Vol. 83, pp. 25705–25712.
10. Eroshenko S. A., Egorov A. O., Zagidullin M. R., Senyuk M. D. The indicators system for the short circuit currents levels assessment in the power systems. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017. Proceedings Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 144–148. DOI:10.1109/ELMA.2017.7955419
11. Валеев Р. Г. Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением до 1000 В при однофазных

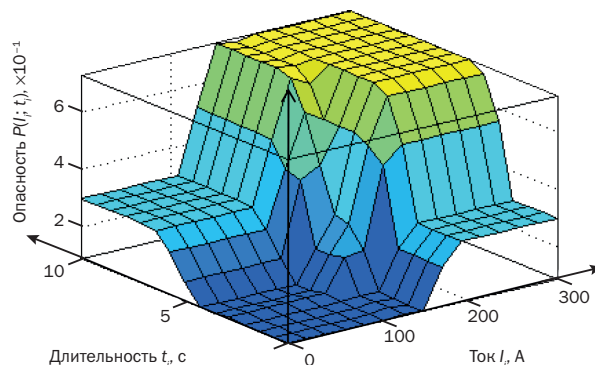


Рисунок 2. Уровень пожарной опасности для неизолированных проводов сечением 25 мм²

Figure 2. Fire hazard level for 25 mm² cross section uninsulated wires

Таким образом, представленные алгоритм и соответствующая ему модель позволяют определить уровень пожарной опасности воздушной линии в режиме короткого замыкания, выявив незащищённые с точки зрения пожарной безопасности участки сети.

Полученные результаты являются простыми в применении и позволяют управлять основными величинами, характеризующими процесс короткого замыкания проводов воздушной линии электропередачи напряжением до 1000 В, обеспечивая пожарную безопасность этих воздушных линий.

- коротких замыканиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Валеев Руслан Галимьянович. Челябинск, 2014. 180 с.
12. Козлова Ю. С. Экспериментальная установка для исследования пожарной опасности процесса схлестывания проводов воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ // Безопасность жизнедеятельности глазами молодёжи: материалы IV Всероссийской студенческой конференции (с международным участием). Секция «Безопасность в чрезвычайных ситуациях». Челябинск: ЮУрГУ, 2017. С. 221–223.
13. Spokoiny V. Basics of Modern Mathematical Statistics. Thorsten Dickhaus. Springer, 2016. 316 p. DOI:10.1007/978-3-642-39909-1
14. Jeff Wu C. F., Hamada M. S. Experiment: Planning, Analysis and Optimization. 2nd Ed. Wiley, 2009. 760 p.
15. Козлова Ю. С., Сидоров А. И. Обеспечение пожарной безопасности территорий, прилегающих к охранной зоне воздушных линий электропередачи // Техносферная безопасность Байкальского региона. Материалы международной научно-практической конференции. Чита: Забайкальский государственный университет, 2019. С. 42–45.
16. Belohlavek R., Dauben J. W., Klir G. J. Fuzzy Logic and Mathematics: A Historical Perspective. Oxford University Press, 2017. 531 p. DOI:10.1093/oso/9780190200015.001.0001
17. Lin Q.-L., Wang D.-J. Facility Layout Planning with SHELL and Fuzzy AHP Method Based on Human Reliability for Operating Theatre, Journal of Healthcare Engineering. Vol. 2019. DOI:10.1155/2019/8563528
18. Леоненков А. В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
19. Шмова С. Д. Введение в теорию нечётких множеств и нечёткую логику. Монография. Винница: Универсум-Винница, 2001. 756 с.
20. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications, 4th Ed. Wiley, 2016. 580 p.
21. Khalyasmaa A. I., Valiev R. T., Bolgov V. A. The methodology of risk evaluation for power equipment technical state assessment. 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017. Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 493–496. DOI:10.1109/ELMA.2017.7955494

Материал поступил в редакцию 26 января 2021 года.

Vladimir ZYKOV

Grand Doctor in Engineering
State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
E-mail: zykov01@mail.ru

Yulia KOZLOVA

South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russia
E-mail: yulia-3012@mail.ru

Mikhail KRUPIN

PhD in Engineering
State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
E-mail: krupin3@yandex.ru

FIRE HAZARD LEVEL DETERMINATION FOR OVERHEAD POWER LINES WITH A VOLTAGE OF UP TO 1000V

ABSTRACT

Purpose. On the territory of Russia overhead power lines with a voltage of up to 1 000 V are mainly represented by uninsulated wires which at short circuiting form molten metal particles can act as an ignition source. Currently, no methods and dependencies exist that allow assessing fire hazard for short circuit process. The authors faced the tasks of developing a general algorithm for assessing the fire hazard level of overhead power lines; setting current value ranges and short circuit duration representing different degrees of fire hazard; demonstrating the model displaying the impact result of the power grid operating parameters on the line fire hazard level.

Methods. For the research purposes methods of physical experiment and mathematical modeling including the application of the odd set theory apparatus have been used.

Findings. Current ranges and short circuit durations representing different fire hazard degrees have been determined experimentally for the first time. A rule database for model construction displaying a

current value impact and a short circuit duration impact on the fire hazard level for overhead power lines has been formed on these data. The results presented allow us to assess fire hazard of various overhead power lines sections with a voltage of up to 1 000 V in a short circuit mode and to identify their unprotected sections.

Research application field. The research results are intended for engineering staff engaged in maintaining the electrical network with a voltage of up to 1000V as well as for specialists assessing fire hazard of the territories. In addition, the research results have become the basis for developing the lines fire protection methods fundamentally different from the existing ones.

Conclusions. The results obtained allow providing fire safety for overhead power lines with a voltage of up to 1 000 V by selecting and controlling the most significant values typical for the wires short circuit process.

Key words: overhead power lines, short circuit, fire hazard, emergency mode, power grid, algorithm

REFERENCES

1. Ulianov S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic transients in electrical systems]. Moscow. Energiya Publ. 1970. 520 p.
2. Cherkasov V.N., Zykov V.I. *Pozharnaia bezopasnost' elektroustanovok* [Electromagnetic transients in electrical systems]. Moscow. State Fire Academy of EMERCOM of Russia Publ. 2012. 391 p.
3. Smelkov G.I. *Pozharnaia bezopasnost' elektroprovodok* [Fire safety of electrical wiring] Moscow. Cable Publ., 2009. 328 p.
4. Revyakin A.I. *Elektrobezopasnost' i protivopozharnaia zashchita v elektroustanovkakh* [Electrical safety and fire protection in electrical installations]. Moscow. Energiya Publ., 1980. 160 p.
5. Sidorov A.I., Sementsova Yu.S. The fire risk of cross-wipping of the overhead transmission lines of 0,4 kV voltage. *Bezopasnost' zhiznedielnosti* (Life safety). 2017, no. 2, pp. 32–35.
6. Kozlova Yu.S., Polunin G.A. *Nechetkie mnozhestva dlia analiza pozharnoi opasnosti vozdukhnykh linii elektroperedachi. Natsionalnaia bezopasnost' Rossii: aktualnye aspekty: sbornik izbrannykh statei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Fuzzy sets for analysis of fire hazard of an overhead transmission lines. National Security of Russia: actual aspects: collection of selected articles of the All-Russian Scientific and practical Conference]. St. Petersburg, National Development Publ., 2020, pp. 35–37.
7. Bershadsky L.A., Zgarbul A.V., Khalyavinskaya N.M. Mathematical model of ignition of combustible substances by metal particles obtained at short circuit in electric wiring *Nauchno-analiticheskii zhurnal Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MCHS Rossii* (Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia). 2018, no. 3. pp. 54–64.
8. Kozlova Yu. S. Numerical determination of the quantity of melting drops at a single-phase short circuit. *Sibirskii pozharnospasatelnyi vestnik* (Siberian Fire and Rescue Bulletin). 2019, no. 3 (14), pp. 28–31.
9. Kozlova Yu. S. Assessment of Fire Hazard Level for Overhead Power Lines of Voltage up to 1000 V. *Test Engineering and Management*. 2020, vol. 83, pp. 25705–25712.
10. Eroshenko S.A., Egorov A.O., Zagidullin M.R., Senyuk M.D. The indicators system for the short circuit currents levels assessment in the power systems. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017. Proceedings Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 144–148. DOI:10.1109/ELMA.2017.7955419
11. Valeev R.G. *Povyshenie urovnia elektrobezopasnosti v elektricheskikh setiakh napriazheniem do 1000 V pri odnofaznykh korotkikh замыkaniyakh* Increasing the level of electrical safety in electrical networks with voltage up to 1000 V with single-phase short circuits. PhD in Engin. Sci. diss.]. Chelyabinsk, 2014. 180 p.
12. Kozlova Yu.S. *Eksperimentalnaia ustanovka dlia issledovaniia pozharnoi opasnosti protsessa skhlestyvaniia provodov vozdukhnykh linii elektroperedachi napriazheniem 0,4 kV. Bezopasnost'*

- zhiznedeiatel'nosti glazami molodezhi: materialy IV Vserossiiskoi studencheskoi konferentsii*. [Experimental installation for the study of fire hazard of the process of clumping wires of overhead power lines with a voltage of 0.4 kV. Safety of life through the eyes of youth: materials of the IV All-Russian Student Conference]. Chelyabinsk. South Ural State University, 2017, pp. 221–223.
13. Spokoiny V. Basics of Modern Mathematical Statistics. Thorsten Dickhaus. Springer, 2016. 316 p. DOI:10.1007/978-3-642-39909-1
14. Jeff Wu C.F., Hamada M.S. Experiment: Planning, Analysis and Optimization. 2nd Ed. Wiley, 2009. 760 p.
15. Kozlova Yu.S., Sidorov A.I. *Obespechenie pozharnoi bezopasnosti territorii, prilagaiushchikh k okhrannoi zone vozdushnykh linii elektropredachi. Tekhnosfernaia bezopasnost Baikalskogo regiona. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Ensuring fire safety of territories adjacent to the security zone of overhead power transmission lines. Technosphere safety of the Baikal region. Materials of the international scientific and practical conference.]. Chita. TransBaikal State University Publ., 2019, pp. 42–45.
16. Belohlavek R., Dauben J.W., Klir G.J. Fuzzy Logic and Mathematics: A Historical Perspective. Oxford University Press, 2017. 531 p. DOI:10.1093/oso/9780190200015.001.0001
17. Lin Q.-L., Wang D.-J. Facility Layout Planning with SHELL and Fuzzy AHP Method Based on Human Reliability for Operating Theatre, Journal of Healthcare Engineering. Vol. 2019. DOI:10.1155/2019/8563528
18. Leonenkov A.V. *Nechyotkoe modelirovanie v srede MATLAB fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in the MATLAB fuzzyTECH environment]. St. Petersburg, 2005. 736 p.
19. Shtovba S.D. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuiu logiku* [Introduction to the theory of fuzzy sets and fuzzy logic]. Vinnitsa. Universum-Vinnitsa Publ., 2001. 756 p.
20. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 4th Ed. Wiley, 2016. 580 p.
21. Khalyasmaa A.I., Valiev R.T., Bolgov V.A. The methodology of risk evaluation for power equipment technical state assessment. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017. Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 493–496. DOI:10.1109/ELMA.2017.7955494