

УДК 621.315

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.45.2.024](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.024)

Математическая модель канала измерения механической нагрузки на изолятор

В.Ю. Непомнящий¹, В.М. Панарин², А.А. Маслова^{2✉}, П.Е. Рябов³, С.В. Прокопчина³, А.А. Кочкаров³

¹ Публичное акционерное общество «Россети Московский регион», филиал «Московские высоковольтные линии», Москва, Российская Федерация

² Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация

³ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

Резюме. Актуальность исследования обусловлена тем, что важным фактором надежной эксплуатации воздушных линий электропередач является исправная работа гирлянд изоляторов, а повреждение изоляции гирлянд изоляторов может привести к увеличению токов утечки, энергетическим потерям, в том числе к аварийным ситуациям при повреждении изоляторов. Также к дополнительным потерям электроэнергии могут привести неблагоприятные метеорологические условия, такие как гололед, снег, дождь, туман, сильный ветер. В связи с этим, данная статья направлена на описание новой математической модели канала измерения механической нагрузки на изолятор для оценки технического состояния изоляторов, которая реализуется в виде отдельного блока информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, и снабжает оператора диспетчерского пункта актуальной информацией о текущем состоянии изоляторов, а также позволяет уменьшить число внештатных (аварийных) ситуаций путем своевременного ремонта или замены изоляторов. Ведущим методом при построении математической модели канала измерения механической нагрузки на изолятор является рассмотрение статической нагрузки с перспективой оценки процессов гололедообразования на проводах воздушной линии электропередач, позволяющий обеспечить фиксирование динамики нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда), а также без лишних трудозатрат и временных ресурсов создать удобную в использовании цифровую модель энергетической системы, предоставляющую возможность реализовать структуру, состояние и действие реальной энергосистемы с достаточной оперативностью, полнотой и достоверностью. В статье представлена последовательность измеренных значений датчика механической нагрузки на изолятор при квантовании во времени, которые далее сопоставляются с величиной статической нагрузки на изолятор, определяемой величиной веса провода на пролете воздушных линий электропередач, и в результате проводится оценка нарастания механической нагрузки на изолятор и фиксация образования гололеда на проводе воздушных линий. Материалы статьи представляют практическую ценность для оперативных служб электросетевых компаний.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, воздушная линия электропередач, изолятор, диагностика, механическая нагрузка, канал.

Для цитирования: Непомнящий В.Ю., Панарин В.М., Маслова А.А., Рябов П.Е., Прокопчина С.В., Кочкаров А.А. Математическая модель канала измерения механической нагрузки на изолятор. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1550> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.024

Mathematical model of the channel for measuring mechanical load on an insulator

V.Y. Nepomnyashchiy¹, V.M. Panarin², A.A. Maslova²✉, P.E. Ryabov³, S.V. Prokopchina³, A.A. Kochkarov³

¹ Public Joint Stock Company «Rosseti Moscow Region», branch «Moscow High-Voltage Lines», Moscow, the Russian Federation

² Tula State University, Tula, the Russian Federation

³ Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, the Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is due to the fact that an important factor in the reliable operation of overhead power lines is the proper operation of insulator strings, and damage to the insulator strings' insulation can lead to an increase in leakage currents, energy losses, including emergency situations when insulators are damaged. Also, adverse weather conditions such as ice, snow, rain, fog, and strong wind can lead to additional losses of electricity. In this regard, this article is aimed at describing a new mathematical model of the channel for measuring the mechanical load on the insulator to assess the technical condition of the insulators, which is implemented as a separate block of the information-measuring system for remote monitoring of overhead line insulators, and provides the control center operator with up-to-date information about the current condition insulators, and also allows you to reduce the number of emergency situations through timely repair or replacement of insulators. The leading method in constructing a mathematical model of a channel for measuring the mechanical load on an insulator is to consider the static load with the prospect of assessing the processes of ice formation on the wires of an overhead power line, which makes it possible to record the dynamics of the increase in the mechanical load on the insulator (fixation of ice formation), as well as without unnecessary labor costs and time resources create an easy-to-use digital model of the energy system, which provides the opportunity to implement the structure, state and operation of a real energy system with sufficient efficiency, completeness and reliability. The article presents a sequence of measured values of the mechanical load sensor on the insulator when quantized in time, which are then compared with the value of the static load on the insulator, determined by the weight of the wire on the span of overhead power lines, and as a result, an assessment of the increase in the mechanical load on the insulator is made and the formation of ice is recorded on overhead lines. The materials of the article are of practical value for operational services of electric grid companies.

Keywords: remote monitoring, overhead power line, insulator, diagnostics, mechanical load, channel.

For citation: Nepomnyashchiy V.Y., Panarin V.M., Maslova A.A., Ryabov P.E., Prokopchina S.V., Kochkarov A.A. Mathematical model of the channel for measuring mechanical load on an insulator. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1550> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.024 (In Russ.).

Введение

Передача электрической энергии от электростанции к потребителям является актуальной задачей энергетической отрасли, которая в основном осуществляется по воздушным линиям (ВЛ) электропередач. Качество передачи электроэнергии зависит от надежности работы электросетей. При транспортировке электроэнергии возникают существенные потери энергии. Также мощность снижается в процессе передачи по протяженным проводным линиям [1–3].

Важным фактором надежной эксплуатации воздушных линий электропередач является исправная работа гирлянд изоляторов, а повреждение изоляции гирлянд изоляторов может привести к увеличению токов утечки, энергетическим потерям, в том числе к аварийным ситуациям при повреждении изоляторов. Также к дополнительным

потерям электроэнергии могут привести неблагоприятные метеорологические условия, такие как гололед, снег, дождь, туман, сильный ветер [4–6]. В статье рассматриваются подвесные изоляторы, т. е. линейные изоляторы, предназначенные для подвижного крепления токоведущих элементов к несущим конструкциям или объектам (изолятор подвесной типа ПС 70Е или подобные).

Целью работы является разработка математической модели канала измерения механической нагрузки на изолятор, которая в дальнейшем реализуется в виде отдельного блока информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач, позволяющей оценить техническое состояние изоляторов и обеспечить оператора диспетчерского пункта актуальной информацией о текущем состоянии изоляторов, и тем самым уменьшить число внештатных (аварийных) ситуаций путем своевременного ремонта или замены изоляторов [7].

Материалы и методы

Механическая нагрузка на изолятор состоит из статической и динамической составляющих нагрузок. Статическая нагрузка определяется величиной веса провода на пролете ВЛ электропередач. Динамическая нагрузка определяется метеоусловиями, в которых находится ВЛ и состоит из ветровой нагрузки, приводящей к возникновению вибрации и «пляски» проводов.

В рамках построения математической модели канала измерения механической нагрузки на изолятор рассматривается статическая нагрузка с перспективой в дальнейшем оценки процессов гололедообразования на проводах ВЛ электропередач [8].

Измеренные значения датчика механической нагрузки на изолятор при квантовании во времени можно представить в виде последовательности:

$$p_{из}(k), p_{из}(k - 1), p_{из}(k - 2), \dots, p_{из}(2), p_{из}(1), \quad (1)$$

где $p_{из}(k)$ – текущий отсчет измеренных значений датчика механической нагрузки на изолятор, Н.

Вес провода на пролете ВЛ электропередач формирует статическую (постоянную) механическую нагрузку на изолятор $p_{прВЛ}$, определяемую величиной веса провода на пролете ВЛ электропередач.

Используя последовательность измеренных значений датчика механической нагрузки на изолятор при квантовании во времени и сопоставляя с величиной статической нагрузки на изолятор, определяемой величиной веса провода на пролете ВЛ электропередач, в дальнейшем проведем оценку нарастания механической нагрузки на изолятор и фиксацию образования гололеда на проводе ВЛ.

Фиксацию нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда) проводим для снижения погрешностей измерений посредством суммирования ряда замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени

$$p_{из}(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{из}(k), \quad (2)$$

где $p_{из}(N)$ – усредненная величина замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени, Н;

N – количество замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени.

Под интервалом времени замеров понимается период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.

Количество замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени определяется соотношением

$$N = \frac{T_{uzmn}}{T_{uz}}, \quad (3)$$

где T_{uzmn} – период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, с; T_{uz} – период квантования по времени данных с датчика механической нагрузки на изолятор, с.

Значения $p_{uz}(N)$ передаются от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.

На сервере диспетчерского пункта электросетевой компании при поступлении значений $p_{uz}(N)$ от модуля дистанционного мониторинга изоляторов формируется последовательность усредненных на интервале T_{uzmn} передачи данных по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе.

$$p_{uz}(N), p_{uz}(N - 1), p_{uz}(N - 2), p_{uz}(N - 3), \dots, p_{uz}(N - N_n), \quad (4)$$

где N_n – количество отсчетов на интервале наблюдения усредненных величин замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Динамику нарастания механической нагрузки на изолятор для фиксации образования гололеда определяем на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании в соответствии с соотношением

$$pD_{uz} = p_{uz}(N) - p_{uz}(N - 1), \quad (5)$$

где pD_{uz} – нарастание механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, Н.

Величина нарастания механической нагрузки на изолятор pD_{uz} соответствует весу образовавшегося на проводе ВЛ гололеда.

Относительное нарастание механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок по каналу измерения механической нагрузки определяем на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании в соответствии с соотношением

$$KpD_{uz} = \frac{p_{uz}(N)}{p_{uz}(N-1)}, \quad (6)$$

где KpD_{uz} – относительное нарастание механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.

Учитывая, что образование гололеда – процесс в значительной степени более медленный, чем период квантования по времени данных с датчика механической нагрузки на изолятор и период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, в математической модели фиксации динамики

нарастания механической нагрузки на изолятор применен фильтр первого порядка с постоянной времени, определяемой динамикой процесса гололедообразования на проводах ВЛ электропередач.

Для фильтрации полученных значений на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании формируется последовательность нарастания механической нагрузки на изолятор, определяемой образованием гололеда

$$pD_{uz}(l), pD_{uz}(l-1), pD_{uz}(l-2), \dots, pD_{uz}(l-l_n), \quad (7)$$

где $pD_{uz}(l)$ – нарастание веса гололеда, Н; l_n – интервал наблюдения образования гололеда на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Фильтрация проводится в соответствии с соотношением

$$pD_{mg}(l) = \frac{1}{T_{mg}} \cdot pD_{mg}(l-1) + \frac{K_{mg}}{T_{mg}} \cdot pD_{uz}(l), \quad (8)$$

где $pD_{mg}(l)$ – величина нарастания веса гололеда, отфильтрованная в соответствии с динамикой процесса гололедообразования на интервалах наблюдения l на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании, Н; T_{mg} – постоянная времени фильтра оценки нарастания веса гололеда, с; K_{mg} – коэффициент передачи фильтра оценки нарастания веса гололеда.

Постоянная времени T_{mg} и коэффициент передачи K_{mg} фильтра оценки нарастания веса гололеда выбираются в соответствии с динамикой гололедообразования на проводах в соответствии с климатическими условиями территории пролегания ВЛ электропередач.

В полученном соотношении значение коэффициентов можно представить в виде

$$\frac{K_{mgc}}{T_{mgc}} = \frac{T_{uz}}{3T_{uznn}}, \quad \frac{1}{T_{mgc}} = 1 - \frac{K_{mgc}}{T_{mgc}}. \quad (9)$$

В результате получаем величину веса гололеда на проводах ВЛ на текущем интервале наблюдения $pD_{mg}(l)$ в Ньютонах.

В килограммах вес гололеда на проводах ВЛ на пролете на текущем интервале наблюдения составит

$$pD_{mgкz}(l) = \frac{pD_{mg}(l)}{9,81}, \quad (10)$$

где $pD_{mgкz}(l)$ – величина веса гололеда на пролете ВЛ, кг.

Величина веса гололеда на 1 метр провода ВЛ составит

$$pD_{mgкzметр}(l) = \frac{pD_{mgкz}(l)}{L_{np}}, \quad (11)$$

где $pD_{mgкzметр}(l)$ – вес гололеда на 1 метр провода ВЛ, кг; L_{np} – длина пролета, м.

Аналогично для фильтрации значений относительного нарастания механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок сформируем на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании последовательность

$$KpD_{uz}(l), KpD_{uz}(l-1), KpD_{uz}(l-2), \dots, KpD_{uz}(l-l_n), \quad (12)$$

где $KpD_{uz}(l)$ – относительное нарастание веса гололеда на интервалах наблюдения, Н; l_n – интервал наблюдения образования гололеда на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Фильтрация проводится в соответствии с соотношением

$$KpD_{mgc}(l) = \frac{1}{T_{mgc}} \cdot pD_{mgc}(l-1) + \frac{K_{mgc}}{T_{mgc}} \cdot KpD_{uz}(l), \quad (13)$$

где $KpD_{mgc}(l)$ – величина относительного нарастания (скорости нарастания) веса гололеда, отфильтрованная в соответствии с динамикой процесса гололедообразования на интервалах наблюдения ln на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании, 1/с; T_{mgc} – постоянная времени фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда, с; K_{mgc} – коэффициент передачи фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда.

Постоянная времени T_{mgc} и коэффициент передачи K_{mgc} фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда выбираются в соответствии с динамикой нарастания гололедообразования на проводах и климатическими условиями территории пролегания ВЛ электропередач.

В полученном соотношении значение коэффициентов можно представить в виде

$$\frac{K_{mgc}}{T_{mgc}} = \frac{T_{из}}{3T_{изнп}}, \quad \frac{1}{T_{mgc}} = 1 - \frac{K_{mgc}}{T_{mgc}}. \quad (14)$$

В результате получаем величину скорости нарастания веса гололеда на проводах ВЛ на текущем интервале наблюдения $KpD_{mgc}(l)$.

Расчитанные значения на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании сравниваются с допустимыми пределами

$$pD_{mgkz}(l) < pD_{mgkzdon} \quad KpD_{mgc}(l) < KpD_{mgcdon}, \quad (15)$$

где $pD_{mgkzdon}$ – предельно допустимое максимальное значение веса гололеда на проводе ВЛ электропередач на интервале наблюдений электросетевой компании, кг; KpD_{mgcdon} – предельно допустимая скорость нарастания веса гололеда на проводе ВЛ электропередач на интервале наблюдений электросетевой компании, 1/с.

Результаты

При соблюдении установленных неравенств предупреждающие сигналы об аварийных ситуациях не поступают на сервер электросетевого предприятия. Это означает, что максимальное значение веса гололеда на проводе ВЛ электропередач и скорость его нарастания находятся в установленных значениях.

При несоблюдении установленных неравенств, параметры образования гололеда превышают установленные пределы. В данном случае на сервере электросетевого предприятия появляются предупреждающие сигналы, по которым оперативная служба принимает соответствующие методы противодействия гололедообразованию [9–10].

Предлагаемая модель была реализована в виде отдельного блока информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, которая снабжает оператора диспетчерского пункта актуальной информацией о текущем состоянии изоляторов, а также позволяет уменьшить число внештатных (аварийных) ситуаций путем своевременного ремонта или замены изоляторов.

Обсуждение

Использование предлагаемой модели позволяет без лишних трудозатрат и временных ресурсов создать удобную в использовании цифровую модель энергетической системы, предоставляющую возможность реализовать структуру, состояние и действие реальной энергосистемы с достаточной оперативностью, полнотой и достоверностью. Проведение качественного анализа работы существующей системы и управления ею на основе виртуальной модели позволит осуществлять сбор всех необходимых данных о ней. Для этого необходимо разработать специальное программное обеспечение для обработки больших баз данных, которые смогут

поддерживать многомерную временную модель для организации интегрированного хранения информации.

Заключение

Представлена математическая модель канала измерения механической нагрузки на изолятор, практическая ценность которой состоит в использовании полученных уравнений для построения алгоритмического и программного обеспечения, реализуемого в модулях дистанционной диагностики проводов ВЛ, монтируемых непосредственно на проводах, и сервере электросетевой компании.

Математическая модель канала измерения механической нагрузки на изолятор может найти применение в оперативных службах предприятий электроэнергетики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Гиршин С.С., Бубенчиков А.А., Горюнов В.Н., Левченко А.А., Петрова Е.В. Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов. *Омский научный вестник*. 2009;(3):171–175.
Girshin S.S., Bubenchikov A.A., Goryunov V.N., Levchenko A.A., Petrova E.V. Temperature distribution analysis by sectioning of self-bearing insulated wires. *Omskij nauchnyj vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2009;(3):171–175. (In Russ.).
2. Войтов О.Н., Попова Е.В. Алгоритм учета температуры провода при расчете потокораспределения в электрической сети. *Электричество*. 2010;(9):24–30.
Voitov O.N., Popova E.V. Algoritm ucheta temperatury provoda pri raschete potokoraspredeleniya v elektricheskoi seti. *Elektrichestvo*. 2010;(9):24–30. (In Russ.).
3. Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*. 2019;7(1). <https://doi.org/10.3390/systems7010007>.
4. Mo Y., Zhou X., Wang Ya., Liang L. Study on Operating Status of Overhead Transmission Lines Based on Wind Speed Variation. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2017;60:111–120. <https://doi.org/10.2528/PIERM17072605>.
5. Макоклюев Б.И., Кудряшов Ю.М., Полижаров А.С., Литвинов П.В. Современные подходы к построению информационных моделей в электроэнергетике. Проблемы создания Единой системы классификации и кодирования информации. *ЭнергоРынок*. 2009;(2):59–64.
Makoklyuev B.I., Kudryashov Yu.M., Polizharov A.S., Litvinov P.V. Sovremennye podkhody k postroeniyu informatsionnykh modelei v elektroenergetike. Problemy sozdaniya Edinoi sistemy klassifikatsii i kodirovaniya informatsii. *EnergoRynok*. 2009;(2):59–64. (In Russ.).
6. Ковалев С.П. Применение онтологии при разработке распределенных автоматизированных информационно-измерительных систем. *Автометрия*. 2008;44(2):41–49.
Kovalev S.P. Primenenie ontologii pri razrabotke raspredelennykh avtomatizirovannykh informatsionno-izmeritel'nykh sistem. *Avtometriya*. 2008;44(2):41–49. (In Russ.).
7. Акуличев В.О., Непомнящий В.Ю., Висич С.Г., Степанов В.М., Панарин М.В., Панарин В.М., Маслова А.А. Математическая модель дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ по каналу измерения тока утечки. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021;(4):159–165.
Akulichev V.O., Nepomnyashchy V.Yu., Visich S.G., Stepanov V.M., Panarin M.V., Panarin V.M., Maslova A.A. Mathematical model remote monitoring of HV-line insulators by leakage current measurement channel. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo*

- universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2021;(4):159–165. (In Russ.).
8. Акуличев В.О., Захаров С.Ю., Родионов И.А., Висич С.Г., Степанов В.М., Панарин М.В., Маслова А.А. Математическая модель цифровой метеостанции ВЛ по каналу прогноза гололедообразования на элементах ВЛ. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2021;(10):588–596.
Akulichyev V.O., Zakharov S.Yu., Rodionov I.A., Visich S.G., Stepanov V.M., Panarin M.V., Maslova A.A. Mathematical model of a digital weather station VL on the channel for hundred forecast on the elements of VL. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences.* 2021;(10):588–596. (In Russ.).
9. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса. *Colloquium-journal.* 2019;(10):31–36. <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10264>.
Kokorev D., Yurin A. Digital twins: concept, types and benefits for business. *Colloquium-journal.* 2019;(10):31–36. <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10264>.
10. Минаев В.А., Мазин А.В., Здирук К.Б., Куликов Л.С. Цифровые двойники объектов в решении задач управления. *Радиопромышленность.* 2019;29(3):68–78.
Minaev V.A., Mazin A.V., Zdiruk K.B., Kulikov L.S. Digital twins of objects in the solution of control problems. *Radiopromyshlennost' = Radio Industry.* 2019;29(3):68–78. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Непомнящий Валерий Юрьевич, первый заместитель директора, главный инженер, Публичное акционерное общество «Россети Московский регион», филиал «Московские высоковольтные линии», Москва, Российская Федерация.

e-mail: 2565476@mail.ru

Панарин Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды, Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация.

e-mail: panarin-tsu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0431-3640>

Маслова Анна Александровна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация.

e-mail: anna_zuykova@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5974-3800>

Рябов Павел Евгеньевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Российская Федерация.

e-mail: peryabov@fa.ru

Valery Y. Nepomnyashchiy, Deputy Director, Chief Engineer, Public Joint Stock Company «Rosseti Moscow Region», branch «Moscow High-Voltage Lines», Moscow, the Russian Federation.

Vladimir M. Panarin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Labor and Environmental Protection, Tula State University, Tula, the Russian Federation.

Anna A. Maslova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Occupational Safety and Environment, Tula State University, Tula, the Russian Federation.

Pavel E. Ryabov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, the Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5401-3796>

Прокопчина Светлана Васильевна, доктор технических наук, профессор, профессор, Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Российская Федерация.

e-mail: svprokopchina@fa.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5500-2781>

Svetlana V. Prokopchina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, the Russian Federation.

Кочкаров Азрет Ахматович, доктор технических наук, доцент, профессор, Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Российская Федерация.

e-mail: akochkarov@fa.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3232-5331>

Azret A. Kochkarov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; одобрена после рецензирования 24.04.2024; принята к публикации 13.05.2024.

The article was submitted 13.04.2024; approved after reviewing 24.04.2024; accepted for publication 13.04.2024.