

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst679911>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© К.К. Ким¹, С.Н. Иванов², С.И. Щетинин²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

² Комсомольский-на-Амуре государственный университет

(Комсомольск-на-Амуре, Россия)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УДАЛЕННЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Обоснование. Повышение качества и надежности элементов канализации и транспорта электроэнергии в системах электроснабжения.

Цель. Разработка методики прогнозирования процессов, протекающих в системах изоляции кабельных конструкций на основе современных электроизоляционных материалов с учетом влияния определяющих параметров внешней среды в условиях ограниченного доступа.

Материалы и методы. Исследование процессов деструкции элементов изоляции основывается на законах кинетики химических реакций. Анализ и систематизация результатов, полученных с использованием теории надежности и математической статистики, реализованы методами математического, имитационного и физического моделирования.

Результаты. Получены аппроксимирующие зависимости, устанавливающие связь между критериями отказа систем изоляции и основными проектными параметрами. Проведена верификация и доказана применимость предложенного подхода для прогнозирования работоспособности удаленных изоляционных систем на основе информации, получаемой при поставке кабельных изделий.

Заключение. Предложенная методика позволяет определять эксплуатационную надежность изоляции на стадии проектирования и изготовления кабельной конструкции с учетом качества изоляции в состоянии поставки, устойчивости к технологическим воздействиям и конструктивным параметрам труднодоступных или удаленных объектов электроэнергетики.

Ключевые слова: кабельная конструкция; система изоляции; испытательное напряжение.

Как цитировать:

Ким К.К., Иванов С.Н., Щетинин С.И. Прогнозирование работоспособности удаленных изоляционных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 219–229. doi: 10.17816/transsyst679911

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© K.K. Kim¹, S.N. Ivanov², S.I. Shchetinin²¹ Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university
(St. Petersburg, Russia)² Komsomolsk-na-Amur State University
(Komsomolsk-on-Amur, Russia)**PREDICTING THE PERFORMANCE
OF REMOTE INSULATOR SYSTEMS**

BACKGROUND. Improving the quality and reliability of power channeling and transfer elements of power supply systems.

AIM. To develop a method to predict processes occurring in cable insulation systems based on advanced insulation materials and the key environmental parameters in limited access conditions.

MATERIALS AND METHODS. The processes of destruction of insulation elements are studied based on chemical kinetics laws. The results obtained using reliability theory and mathematical statistics methods are analyzed and classified by mathematical, simulation, and physical modeling.

RESULTS. We determined approximated dependencies that connect the failure criteria of insulation systems and the key design parameters. The authors verified and proved the applicability of the proposed approach to predict the performance of remote insulation systems based on information provided during the wiring delivery.

CONCLUSION. The proposed method allows determining the operational reliability of insulation at the design and manufacturing stage of a cable structure based on the insulation quality in the as-delivered condition, resistance to process influences and design parameters of hard-to-reach or remote power generation facilities.

Keywords: cable structure; insulation system; test voltage.

To cite this paper:

Kim KK, Ivanov SN, Shchetinin SI. Predicting the Performance of Remote Insulator Systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):219–229. doi: 10.17816/transsyst679911

ВВЕДЕНИЕ

Повышение защищенности элементов канализации и транспорта электроэнергии может быть обеспечено заменой части воздушных линий электропередачи кабельными трассами, предназначенными для питания энергетического оборудования, например, морских платформ, насосных или компрессорных механизмов, работающих под водой, транспорта электроэнергии в места, не имеющие собственных источников (удаленные районы, острова). В первую очередь, это связано с применением кабельных конструкций с изоляцией из сшитого полиэтилена при напряжении 110–330 кВ.

Одним из таких примеров является высоковольтная линия NorNed длиной 580 км с расчетной пропускной мощностью 700 МВт. Отечественный подводный кабель КВВ переменного напряжения 450...750 В и частотой до 400 Гц предназначен для использования и непрерывной эксплуатации в течение 6 лет насосов прокачки скважин при давлении 7 МПа и температуре $-40...+70^{\circ}\text{C}$. Кабель марки АПвП2г имеет броню из алюминия, изоляционный слой – сшитый полиэтилен, внутреннюю полиэтиленовую оболочку. Кабель предназначен для прокладки под водой, рабочие температуры $-60...+50^{\circ}\text{C}$, срок службы 30 лет.

Прокладка таких трасс предполагает их размещение в удаленных и труднодоступных местах, том числе, и в водных акваториях. Например, в 2024 году по информации пресс-службы электросетевого холдинга энергообъектов Группы «Россети» с целью демонтажа старых и прокладки новых кабелей на реках Москвы и Санкт-Петербурга оперативно-ремонтный персонал компании провел около 2 тысяч часов под водой [1–4].

В отечественной и зарубежной литературе накоплен достаточно большой объем информации об отказах элементов изоляции электрических систем при эксплуатации [5–14]. Однако, проведение таких научных исследований, как на макетах, так и на реальных конструкциях систем изоляции требует существенных временных и материальных затрат.

Вопрос прогнозирования работоспособности удаленных изоляционных систем является актуальной проблемой. Поэтому наряду со статистическими данными, важным направлением в области системной надежности является прогнозирование эксплуатационной надежности изоляции на стадии проектирования, основанное на имеющемся объеме информации об отказах элементов изоляции, о кинетике и динамике их износа (старения) при эксплуатации.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Последовательность и взаимосвязь процессов, обуславливающих электрическое старение и пробой изоляции, можно представить следующим образом: инкубационная стадия старения (инжекция, экстракция и увеличение носителей зарядов, химическая деградация, образование и развитие микротрещин и микрополостей), дендритная стадия (развитие частичных разрядов с зарождением дендритов и их последующим ростом) и пробой в виде образования высокопроводящего канала.

Причины старения изоляции обусловлены совокупностью физических и химических процессов, происходящих в полимерном материале и приводящих к необратимым изменениям его свойств: развитие частичных разрядов при перенапряжении и рабочем напряжении; тепловая деструкция материала; увлажнение изоляции и водный триинг (рост древовидных насыщенных водой фигур); повреждения за счет электродинамических усилий, вибраций и т.п.

В силу того, что причиной большинства отказов является пробой основной изоляции, то в первую очередь необходимо рассмотреть математическую модель ее надежности. Такая модель может быть создана на основе так называемой модели наиболее «слабого звена», широко используемой в теории надежности [15].

Непосредственной причиной пробоя изоляции в большинстве случаев являются коммутационные перенапряжения, возникающие при переходных процессах, в частности вследствие среза тока при быстром охлаждении дуги в выключателе.

Максимальная величина перенапряжения может быть найдена из уравнения:

$$U_{max} = I_{cp} z_v$$

где: U_{max} – амплитуда перенапряжения, В; I_{cp} – ток среза, А, z_v – волновое сопротивление, Волновое сопротивление кабелей приводится в технических характеристиках и приближенно составляет 50...100 Ом.

Величина и форма коммутационных перенапряжений зависят от волновых параметров кабеля, свойств выключателя, скорости изменения тока и напряжения и других факторов. Следует отметить, что волновые параметры практически не зависят от величины воздействующего напряжения. При, обычно имеющей место, длительности переднего фронта волны импульсных напряжений, больше $7 \cdot 10^{-3}$ с, максимальные напряжения распределяются практически равномерно.

Распределение коммутационных перенапряжений кратностью K может быть представлено в виде суперпозиции усеченного нормального распределения со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,2$ и усеченного распределения Коши:

$$g(K) \approx 0.4e^{-12.5(K-1)^2} + 0.335(1 + (K-3))^{-2}$$

Распределение пробивного напряжения изоляции $U_{\text{пр}}$ Вейбулла имеет вид:

$$F(U_{\text{пр}}) = 1 - \exp\left(-\frac{U_{\text{пр}}^k}{U_0^k}\right).$$

Параметры распределения Вейбулла U_0, k можно определить только экспериментальным путем. Будучи однажды получены для изоляции определенного типа, эти параметры могут быть использованы для расчета надежности аналогичных кабельных изделий при условии сохранения марки кабеля, вида пропитывающего состава, технологии изготовления.

Другой подход возможен при расчете надежности изоляции для периода приработки. В этот период основной причиной отказов является наличие дефектов изоляции, которые могут быть обусловлены как нарушениями технологии производства применяемых материалов, так и повреждениями, причиняемыми изоляции в процессе изготовления изоляционной системы.

Полагая, что значения пробивного напряжения поврежденных участков имеют нормальное распределение, можно найти количество образцов с поврежденной изоляцией в общей совокупности:

$$n_{\text{пр}} = 2n_1,$$

где n_1 – число образцов, пробитых напряжением, меньшим U_1 .

Если максимальное электрическое напряжение составляет $U_1 + 3\sigma_1$, а электрическая прочность в поврежденном месте $E_{\text{п}}$, то элементарный участок изоляции, перекрытие которого по поверхности при данных условиях возможно, может быть представлен в виде круга радиусом r_{δ}

$$r_{\delta} = U_1 + 3\sigma_1$$

и площадью $S_{\text{эл}}$

$$S_{\text{эл}} = \pi r_{\delta}^2.$$

Число элементарных участков на образце кабеля

$$m = \pi d_{\text{из}} l_{\text{обр}} / S_{\text{эл}},$$

где $d_{\text{из}}$ – диаметр изоляции; $l_{\text{обр}}$ – длина образца.

Достоинством методики расчета надежности изоляции по дефектности провода является возможность получения исходных данных в процессе проведения пуско-наладочных работ. Вместе с тем испытания образцов провода дешевле и практичнее испытаний кабельных конструкций в сборе. Однако достоверность характеристик электрической прочности изоляции, полученных таким образом, будет низкой. Для повышения достоверности результатов испытания желательно проводить если не на реальных образцах, то по крайней мере на макетах с имитацией технологического процесса укладки кабеля.

Методика расчета надежности изоляции по дефектности кабеля не учитывает явления старения изоляции. Для расчета долговечности необходимо знать изменения характеристик изоляции по мере ее старения. С этой целью должны быть проведены опыты по определению дефектности изоляции как функции времени работы.

Оценка надежности изоляции основывается на знании распределения пробивных напряжений изоляции в состоянии поставки, а также параметров приемника электроэнергии.

Практикой экспериментального исследования установлено, что распределение пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ электрической изоляции, как правило, описывается нормальным законом распределения

$$F(U_{\text{пр}}) = \Phi(U_{\text{пр}i} - U_{\text{пр}} / \sigma),$$

где Φ – функция Гаусса, $U_{\text{пр}i}$ – среднее пробивное напряжение, определяемое по результатам i -го испытания образцов изоляции на пробой.

Исходными данными для расчета являются номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, напряжение пробоя U_1 , среднеквадратическое отклонение σ , класс нагревостойкости.

Согласно многочисленным исследованиям процессы термоокислительной деструкции полимеров подчиняются законам кинетики химических реакций, поэтому при постоянстве условий эксплуатации или испытаний параметры распределения пробивного напряжения изоляции уменьшаются во времени по экспоненциальному

закону. Функция распределения $F(U_{\text{пр}})$ для всего объема изоляции определяется в зависимости от кратности площади изоляции, времени и температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ параметров распределения $U_{\text{пр}}$ изоляционных конструкций различных классов нагревостойкости, полученных при увеличении температуры до предельного для данного класса нагревостойкости значения, показывает, что изменение параметров $U_{\text{пр}}$ достаточно точно можно аппроксимировать линейными зависимостями:

$$U_{\text{пр}} = U_1(1 - k_1(T_{\text{раб}} - T_0))k_2 \cdot k_3,$$

где $T_{\text{раб}}$, T_i – расчетная температура и температура изоляции при испытаниях; k_1 , k_2 , k_3 – коэффициенты, учитывающие соответственно температуру, время и площадь поверхности изоляции.

Дополнительно установлено, что при увлажнении изоляции наблюдается увеличение коэффициента импульсных перенапряжений для всех длительностей фронта, так как пробивное напряжение на промышленной частоте снижается намного быстрее, чем импульсное. Для новой изоляции среднее пробивное напряжение на промышленной частоте после увлажнения уменьшается приблизительно в 1,85 раза, для изоляции находящейся в эксплуатации – в 3,05 раза, а импульсное пробивное напряжение – соответственно в 1,16 и 1,5 раза. Влияние увлажнения сказывается сильнее на системах изоляции, бывших длительное время в эксплуатации.

Для оценки точности расчета надежности по вышеизложенной методике проведено сравнение результатов расчета с результатами их нормальных испытаний на ограниченной выборке при номинальном уровне воздействующих факторов (Рис.).

Исследования по определению среднего пробивного напряжения витковой изоляции проводились на установке Метерон ИСП/М-30, предназначенной для испытания кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Рассчитанные значения вероятности безотказной работы изоляции находятся внутри доверительного интервала, полученного по результатам испытаний, что свидетельствует о соответствии результатов расчета и испытаний.

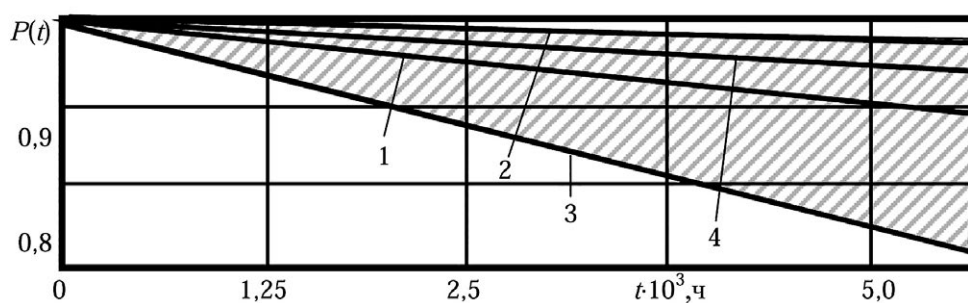


Рис. Линейные регрессии вероятности безотказной работы:
1 – экспериментальная зависимость; 2, 3 – ее доверительные границы;
4 – расчетная зависимость

Fig. Linear regressions of the probability of failure-free operation:
1 – experimental dependence; 2, 3 – its confidence limits; 4 – calculated dependence

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика экспертного прогнозирования вероятности безотказной работы изоляции кабельных конструкций, основанная на модели «слабого звена» с использованием распределения пробивных напряжений. Данные по надежности изоляции, полученные по рассмотренной методике, согласуются с данными, полученными на реальных кабельных конструкциях. Рассмотренный подход позволяет произвести прогноз эксплуатационной надежности изоляции на стадии проектирования и изготовления кабельной конструкции с учетом качества изоляции в состоянии поставки, устойчивости к технологическим воздействиям и конструктивным параметрам объекта электроэнергетики. Рассмотренный метод позволяет обосновать выбор конструктивного исполнения, технологии изготовления, способа электромонтажа и испытаний кабельных конструкций, направленный на повышение показателей надежности электротехнических комплексов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант Российского научного фонда № 24-29-00089).

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетика и промышленность России. Дата обращения: 28.04.2025. Режим доступа: https://www.eprussia.ru/news/base/2025/4914544.htm?sphrase_id=10486854
2. Петрова Е.В., Гиршин С.С., Криволапов В.А. и др. Анализ потерь в защищенных и неизолированных проводах в стационарных режимах с учетом погодных условий // Омский научный вестник. 2024. № 3(191). С. 99-109. doi: 10.25206/1813-8225-2024-191-99-109
3. Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И. и др. Оценка параметров тепловых режимов кабельных линий напряжением 10 кВ при различных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 6. С. 55-68. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6- 55-68
4. Мартыненко Т.С., Овсиенко В.Л., Сливов А.А., Шувалов М.Ю. ИЦ ВНИИКП. Испытания: необходимость, обусловленная требованиями безопасности и потребностями развития // Кабели и провода. 2022. № 4. С. 5-15. doi: 10.52350/2072215X_2022_4_5
5. Садирова С.Н. Изучение свойства сшитого полиэтилена // Международный журнал передовых технологий и естественных наук. 2022. № 1. С. 56-60. doi: 10.24412/2181-144X-2022-1-56-60
6. Ткаченко В.А., Кропотин О.В., Шепелев А.О., Кропотин В.О. Математическая модель кабельной линии электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена при подземной прокладке // Омский научный вестник. 2018. № 6(162). С. 137-141. doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-137-141
7. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., Шаряпов А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 146-155. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155
8. Ветлугаев С.С., Горобец А.Н., Макаров Л.Е. и др. Опыт испытаний кабелей и арматуры высокого и сверхвысокого напряжения // Кабели и провода. 2022. № 3. С. 9-15. doi: 10.52350/2072215X_2022_3_9
9. Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И. и др. Методика расчета температурных параметров и срока службы кабельных линий напряжением 10 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 4. С. 65-74. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74
10. Шувалов М.Ю. Применение микрофлуоресцентного анализа в исследовании качества и надёжности силовых кабелей среднего и высокого напряжения // Кабели и провода. 2023. № 1. С. 3-14. doi: 10.52350/2072215X_2023_1_3
11. Боев М.А., Чуньюй Суй, Чжунго Гао. Исследование устойчивости к трекингу изоляционных материалов // Кабели и провода. 2023. № 3. С. 24-28. doi: 10.52350/2072215X_2023_3_24
12. Шушпанов И.Н., Пермякова Д.Н., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Необходимость обеспечения потребных электрических мощностей объектов транспортной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей // Известия

- высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т.25. № 5. С. 59-73. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-59-73
13. Барашков О.К. Итоги эволюции рынка общепромышленных ПВХ пластикатов на конец 2022 года // Кабели и провода. 2023. № 3. С. 3-24. doi: 10.52350/2072215X_2023_3_24
14. Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т.26, № 4. С. 89-99. doi: 10.30724/1998-9903 2024-26-4-89-99
15. Иванов С.Н., Скрипилев А.А. Надежность электроснабжения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022.

REFERENCES

1. Energy and industry of Russia. [Internet]. Cited 2025 March 24. Available from: <https://www.eprussia.ru/news/base/2025/2580965> (In Russ.)
2. Petrova EV, Girshin SS, Krivolapov VA, et al. Analysis of losses in protected and uninsulated wires in stationary modes taking into account weather conditions. *Omsk Scientific Bulletin*. 2024;3(191):99-109. (In Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2024-191-99-109
3. Tsitson II, Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Petrova RM, Abdullin LI. Evaluation of parameters of thermal modes of 10 kV cable lines under various operating conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2024;26(6):55-68. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-55-68
4. Martynenko TS, Ovsienko VL, Slivov AA, Shuvalov MYu. JSC VNIKP. Testing center. Tests: necessity stipulated by safety requirements and development needs. *Cables and wires*. 2022;4:5-15. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2022_4_5
5. Sadirova SN. Studying the properties of crosslinked polyethylene. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. 2022;1:56-60. (In Russ.) doi: 10.24412/2181-144X-2022-1-56-60
6. Tkachenko VA, Kropotin OV, Shepelev AO, Kropotin VO. Mathematical model of a cable power transmission line with cross-linked polyethylene insulation for underground installation. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018;6(162):137-141. (In Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-137-141
7. Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullazyanov AF, Sharyapov AM. Digital power lines faults monitoring system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2021;23(1):146-155. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155
8. Vetlugaev SS, Gorobets AN, Makarov LE, et al. Hv and ehv cables and accessories test experience. *Cables and wires*. 2022;3:9-15. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2022_3_9
9. Tsitson II, Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, et al. Method of calculation of temperature parameters and service life of 10 kV cable lines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. ENERGY PROBLEMS*. 2024;26(4):65-74. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74

10. Shuvalov MYu. The use of fluorescence microscopy analysis in the investigation of quality and reliability of medium and high voltage power cables. *Cables and wires*. 2024;1:3-14. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2023_1_3
11. Boev MA, Chunyu Sui, Junguo Gao. Investigation of resistance to tracking of insulation materials. *Cables and wires*. 2023;3:24-28. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2023_3_24
12. Shushpanov IN, Permyakova DN, Konyukhov VYu, Oparina TA. The need to provide the required electrical capacities of the transport infrastructure facilities of the Baikal-Amur and Trans-siberian highways. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2023;25(5):59-73. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-59-73
13. Barashkov OK. The results of the evolution of the general purpose industrial PVC plastics market at the end of 2022. *Cables and wires*. 2023;3:3-24. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2023_3_24
14. Balobanov RN, Bulatova VM, Kryuchkov NS, Shafikov II. Optimization of monitoring systems power cable lines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2024;26(4):89-99. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903_2024-26-4-89-99
15. Ivanov SN, Skripilev AA. Reliability of power supply. Vologda: Infra-Engineering; 2022. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Иванов Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 6503-7849; ORCID: 0000-0002-9964-9111;
E-mail: snivanov57@mail.ru

Щетинин Станислав Игоревич, магистрант;
eLibrary SPIN: 9537-4042; ORCID: 0009-0001-6807-5880;
E-mail: stazzkom@gmail.com

Information about the authors:

Konstantin K. Kim, Dr. Sci. (Engineering), Professor;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Sergey N. Ivanov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor;
eLibrary SPIN: 6503-7849; ORCID: 0000-0002-9964-9111;
E-mail: snivanov57@mail.ru

Stanislav I. Shchetinin, master's student;
eLibrary SPIN: 9537-4042; ORCID: 0009-0001-6807-5880;
E-mail: stazzkom@gmail.com