
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF NOTES

УДК 004.942

DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-557-561

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ

А. В. Рысин

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
Galewon@yandex.ru*

Аннотация. Рассматривается метод диагностики технического состояния электрических изоляторов, установленных на воздушных линиях электропередачи. Целью исследования является разработка инструментов для оценки работоспособности электрооборудования, что позволит повысить надежность электроснабжения и безопасность эксплуатации воздушных линий электропередачи. Предложен подход к диагностике изоляторов, основанный на математическом моделировании их электрических и физических характеристик. Использование таких моделей позволяет прогнозировать изменение параметров изоляции под воздействием различных факторов, включая климатические условия, старение материалов и эксплуатационные нагрузки. Результаты демонстрируют перспективы применения математического моделирования в задачах диагностики и профилактического обслуживания оборудования высоковольтных линий. Математические модели учитывают механические и электрические воздействия на изоляторы, такие как механические нагрузки, температура, влажность и уровень загрязнения. В частности, используются уравнения состояния материала, критерии разрушения и модели накопления повреждений для оценки текущего состояния и прогнозирования будущих отказов. Применение методов машинного обучения позволяет автоматизировать процесс классификации состояния оборудования и прогнозировать вероятность его отказа. Практическое применение этих подходов может существенно снизить риски аварийных ситуаций и оптимизировать техническое обслуживание оборудования.

Ключевые слова: математическая модель электрооборудования, диагностика технического состояния, механическая модель разрушения

Ссылка для цитирования: Рысин А. В. Использование математических моделей элементов воздушных линий электропередачи для диагностики оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 6. С. 557–561. DOI: 10.17586/0021-3454-2 025-68-6-557-561.

THE USE OF MATHEMATICAL MODELS OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINE ELEMENTS FOR EQUIPMENT DIAGNOSTICS

A. V. Rysin

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia
Galewon@yandex.ru*

Abstract. A method for diagnosing the technical condition of electrical insulators installed on overhead power transmission lines is considered. The purpose of the study is to develop tools for assessing the operability of electrical equipment, which will improve the reliability of power supply and the safety of operation of overhead power transmission lines. An approach to the diagnosis of insulators based on mathematical modeling of their electrical and physical characteristics is proposed. The use of such models makes it possible to predict changes in insulation parameters under the influence of various factors, including climatic conditions, aging of materials and operational loads. The results demonstrate the prospects of using mathematical modeling in the tasks of diagnostics and preventive maintenance of high-voltage line

equipment. The mathematical models take into account the mechanical and electrical effects on insulators, such as mechanical loads, temperature, humidity, and pollution levels. In particular, material state equations, fracture criteria, and damage accumulation models are used to assess the current condition and predict future failures. The use of machine learning methods makes it possible to automate the process of classifying the condition of equipment and predict the probability of its failure. The practical application of these approaches can significantly reduce the risks of emergencies and optimize equipment maintenance.

Keywords: mathematical model of electrical equipment, diagnostics of technical condition, mechanical model of destruction

For citation: Rysin A. V. The use of mathematical models of overhead power transmission line elements for equipment diagnostics. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 6. P. 557–561 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-557-561.

Введение. Изоляторы обеспечивают электрическое обособление проводов от опорных конструкций, предотвращая короткие замыкания и потери энергии. Однако эксплуатационные нагрузки, воздействие климатических факторов, старение материалов и механические повреждения могут приводить к деградации изоляторов, что создает угрозу стабильности работы энергосистемы. Современные технологии позволяют собирать и анализировать данные о состоянии этих элементов, что открывает новые возможности для предиктивной аналитики и проактивного обслуживания [1].

Методы и материалы. Определяются источники измеряемых параметров и величин для последующей обработки данных, как правило, это сенсоры и датчики для мониторинга параметров температуры, влажности, механических нагрузок, уровня загрязнения. Также используются аэрофотосъемка и БПЛА [2] для периодического визуального контроля состояния оборудования [3].

После сбора данных методами фильтрации и нормализации выполняется предобработка. Используя фильтр Калмана или скользящего среднего, можно удалять шумы и случайные флуктуации в данных. Для улучшения качества обучения моделей необходимо нормализовать данные — привести их к единому масштабу [4].

Модели машинного обучения можно разделить на три типа: регрессионные, модели классификации и глубокое обучение. Использование линейной регрессии или метода опорных векторов (support vector machine, SVM) позволяет прогнозировать значения напряжений и деформаций. Пример линейной регрессии можно представить как:

$$\sigma(x, t) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 t.$$

Алгоритмы классификации (например, случайный лес, градиентный бустинг) позволяют определять вероятности разрушения. Пример использования алгоритма случайного леса для классификации технического состояния изоляторов воздушных линий электропередачи представлен на рисунке.

```
1 from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
2 from sklearn.model_selection import train_test_split
3 from sklearn.metrics import classification_report
4
5 # Данные
6 X = data[['leakage_current', 'partial_discharge', 'resistance', 'humidity', 'temperature']]
7 y = data['state'] # Метки: 0 - исправен, 1 - начальные дефекты, 2 - критическое состояние
8
9 # Разделение выборки
10 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
11
12 # Модель
13 model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
14 model.fit(X_train, y_train)
15
16 # Предсказания и оценка
17 y_pred = model.predict(X_test)
18 print(classification_report(y_test, y_pred))
```

Глубокое обучение подразумевает использование сверточных нейронных сетей обработки изображений с БПЛА для анализа визуальных данных [5]. После этого применяются уже

математические модели для оценки текущего состояния. Для расчета текущих напряжений и степени повреждений используются уравнения состояния материала и критериев разрушения. Прогнозируется будущее состояние для прогнозирования времени до возможного отказа методом накопления повреждений. Данные комбинируются из различных моделей (механических, электрических, коррозионных) для получения комплексной оценки состояния оборудования [6].

Математическая модель процессов разрушения. Для описания процессов разрушения керамических изоляторов можно использовать комбинацию механических и электрических моделей. Эти модели учитывают влияние различных факторов, таких как механические нагрузки, температура, влажность и уровень загрязнения.

Пусть $\sigma(x, t)$ — напряженное состояние изолятора в точке x в момент времени t . Процесс разрушения можно описать с помощью критерия максимальных напряжений или энергии разрушения.

Уравнение состояния материала определяется как:

$$\sigma(x, t) = E\tau(x, t),$$

где E — модуль упругости материала, $\tau(x, t)$ — деформация в точке x в момент времени t .

Пусть σ_{ult} — предельное напряжение материала, тогда разрушение происходит при:

$$\sigma(x, t) \geq \sigma_{ult}.$$

Используя модель Качанова–Работова, получим описание накопления повреждений:

$$D(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t k(\sigma(x, t'))dt\right),$$

где $D(t)$ — степень повреждения в момент времени t , $k(\sigma)$ — функция скорости повреждения, зависящая от текущего уровня напряжений.

С целью учета электрических воздействий можно использовать уравнение Пуассона для электростатического потенциала $\varphi(x, t)$:

$$\nabla(\varepsilon \nabla \varphi(x, t)) = -\rho(x, t),$$

где ε — диэлектрическая проницаемость материала, $\rho(x, t)$ — объемная плотность заряда.

Процесс разрушения изолятора под действием электрического поля можно описать через зависимость его прочности от приложенного напряжения:

$$\sigma_{ult}(V) = \sigma_{ult,0} \left(1 - \alpha \frac{V}{V_{kr}}\right),$$

где V — приложенное напряжение, V_{kr} — критическое напряжение, при котором происходит разрушение, α — коэффициент, характеризующий чувствительность материала к электрическому полю.

Для грозотросов можно использовать аналогичные подходы, но с учетом дополнительных факторов, таких как коррозия и удар молнии. Пусть $C(t)$ — степень коррозии грозотроса в момент времени t . Скорость коррозии зависит от влажности H и концентрации электролита c :

$$\frac{dC(t)}{dt} = k_c H c,$$

где k_c — коэффициент коррозии.

Удар молнии можно моделировать как импульсную нагрузку на грозотрос:

$$I(t) = I_0 \delta(t - t_0),$$

где I_0 — амплитуда тока, t_0 — время удара молнии, а $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака.

Общую модель разрушения грозотроса можно записать как:

$$\sigma_{ult}(t) = \sigma_{ult,0}(1 - C(t))\exp\left(-\beta \int_0^t I(t')dt'\right),$$

где β — коэффициент, характеризующий влияние ударов молнии на прочность грозотроса.

Заключение. Использование предложенной модели позволяет более точно описывать процессы разрушения керамических изоляторов и других элементов системы воздушных линий электропередачи [7]. Это, в свою очередь, помогает разрабатывать более эффективные алгоритмы предиктивной аналитики для мониторинга состояния оборудования на воздушных линиях электропередачи. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение параметров моделей и их адаптацию к конкретным условиям эксплуатации [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рысин А. В., Солёный С. В. Создание киберфизических систем диагностики электрооборудования // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тез. докл. III Междунар. форума. Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 г. СПб: Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2023. С. 279–281. EDN GGTVIO.
2. Solyonyj S., Solenaya O., Rysin A. et al. Robot for inspection and maintenance of overhead power lines // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. Vol. 187. P. 487–497. DOI 10.1007/978-981-15-5580-0_40. EDN IPYWTD.
3. Солёная О. Я., Рысин А. В., Солёный С. В. и др. Характеристики и параметры технического состояния воздушных линий электропередачи // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 583–588. DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-7-583-588. EDN VFXXKT.
4. Рысин А. В., Кузьменко В. П., Солёная О. Я. Моделирование переходных процессов в энергосистемах // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Тез. докл. I Междунар. форума. Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2021 г. СПб: Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 259–260. EDN NNYPBP.
5. Рысин А. В. Проектирование киберфизических систем электроснабжения // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Матер. XIV Всерос. науч.-техн. конф. Оренбург, 17–19 октября 2023 г. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2023. С. 94–100. EDN HDZCQX.
6. Третьяков Н. К., Кузьменко В. П., Рысин А. В., Романова М. С. Имитационное моделирование источников переменного напряжения // Наука и бизнес: пути развития. 2024. № 4(154). С. 103–106. EDN TKLYWP.
7. Рысин А. В., Солёный С. В. Оценка технического состояния воздушных линий электропередачи // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 56–60. DOI 10.31799/2949-0693-2023-4-56-60. EDN CUSHNF.
8. Рысин А. В., Солёная О. Я., Создательева М. Э. Сбор и анализ данных параметров и характеристик воздушных линий электропередач с целью повышения надежности систем электроснабжения // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1, № 2. С. 20–25. DOI 10.31799/2949-0693-2022-2-20-25. EDN OSGBKN.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Александр Владимирович Рысин

— Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра электромеханики и робототехники Института киберфизических систем; старший преподаватель;
E-mail: Galewon@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.01.25; одобрена после рецензирования 20.01.25; принята к публикации 25.04.25.

REFERENCES

1. Rysin A.V., Solyony S.V. *Matematicheskiye metody i modeli v vysokotekhnologichnom proizvodstve* (Mathematical Methods and Models in High-Tech Production), Collection of abstracts of reports of the III International Forum. St. Petersburg, November 08, 2023, pp. 279–281. (in Russ.)
2. Solyonyj S., Solenaya O., Rysin A. et al. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2021, vol. 187, pp. 487–497, DOI 10.1007/978-981-15-5580-0_40.
3. Solenaya O.Ya., Rysin A.V., Solyony S.V., Kuzmenko V.P., Kvas E.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 7(64), pp. 583–588, DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-7-583-588. (in Russ.)

4. Rysin A.V., Kuzmenko V.P., Solenaya O.Ya. *Matematicheskiye metody i modeli v vysokotekhnologichnom proizvodstve* (Mathematical Methods and Models in High-Tech Production), Collection of abstracts of reports of the I International Forum, St. Petersburg, November 10–11, pp. 259–260. (in Russ.)
5. Rysin A.V. *Energetika: sostoyaniye, problemy, perspektivy* (Power Engineering: Status, Problems, Prospects), Materials of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference, Orenburg, October 17–19, 2023, pp. 94–100. (in Russ.)
6. Tretyakov N.K., Kuzmenko V.P., Rysin A.V., Romanova M.S. *Science and Business: Ways of Development*, 2024, no. 4(154), pp. 103–106. (in Russ.)
7. Rysin A.V., Solyony S.V. *Innovative Instrumentation*, 2023, no. 4(2), pp. 56–60, DOI 10.31799/2949-0693-2023-4-56-60. (in Russ.)
8. Rysin A.V., Solenaya O.Ya., Sozdateleva M.E. *Innovative Instrumentation*, 2022, no. 2(1), pp. 20–25, DOI 10.31799/2949-0693-2022-2-20-25. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

Aleksander V. Rysin

— St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Cyberphysical Systems, Department of Electromechanics and Robotics; Senior Lecturer; E-mail: Galewon@yandex.ru

Received 14.01.25; approved after reviewing 20.01.25; accepted for publication 25.04.25.