

УДК 621.315.1
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-7

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ

**В. А. Листюхин¹, Е. А. Печерская², Д. В. Артамонов³,
Т. О. Зинченко⁴, А. А. Анисимова⁵**

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹vladyan4iklist@yandex.ru, ²peal@list.ru, ³dmitrartamon@yandex.ru,
⁴scar0243@gmail.com, ⁵an.ryzhova18@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* На основе анализа статистических данных показано, что Пензенский регион относится к «опасной ветровой зоне», в которой аварии на воздушных линиях в осенне-зимний период становятся не редкими явлениями для электросетевых организаций. Это указывает на актуальность изучения подходов к повышению устойчивости систем электроснабжения. *Материалы и методы.* Представлены результаты сравнительного анализа следующих методов контроля параметров воздушных линий: оптический, емкостной, механический, частотный, термодинамический, инклинометрический, а также метод, основанный на 3D-моделировании. *Результаты.* Предложена структура информационно-измерительной системы контроля параметров воздушных линий электропередачи, которая исключает ключевые недостатки, присущие распространенным методам и системам аналогичного назначения: не требуется внесения изменений в конструкции воздушных линий; осуществляется контроль параметров, оказывающих непосредственное влияние на надежное и устойчивое функционирование воздушных линий. *Выводы.* Предложено внедрение информационно-измерительной системы для измерений следующих параметров: угол наклона провода воздушной линии или расстояние и место расположения наименьшего провеса провода до земли; скорость ветровых нагрузок; температура окружающего воздуха. Система позволит электросетевым организациям повысить надежность и качество электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: надежность, воздушные линии электропередачи, информационно-измерительная система, погодные условия, метеорологические характеристики

Для цитирования: Листюхин В. А., Печерская Е. А., Артамонов Д. В., Зинченко Т. О., Анисимова А. А. Повышение надежности воздушных линий электропередачи посредством внедрения информационно-измерительных систем контроля их параметров // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 62–68. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-7

IMPROVING THE RELIABILITY OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES THROUGH THE INTRODUCTION OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS FOR MONITORING THEIR PARAMETERS

**V.A. Listyukhin¹, E.A. Pecherskaya², D.V. Artamonov³,
T.O. Zinchenko⁴, A.A. Anisimova⁵**

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia
¹vladyan4iklist@yandex.ru, ²peal@list.ru, ³dmitrartamon@yandex.ru,
⁴scar0243@gmail.com, ⁵an.ryzhova18@gmail.com

Abstract. *Background.* Based on the analysis of statistical data, it is shown that the Penza region belongs to the "dangerous wind zone", in which accidents on overhead lines in the autumn-winter period become not uncommon phenomena for electric grid organizations. the relevance of studying approaches to improving the stability of power supply systems. This indicates the relevance of studying approaches to improving the stability of power supply systems. *Materials and methods.* The results of a comparative analysis of the following methods for monitoring the parameters of overhead lines are presented: optical, capacitive, mechanical, frequency, thermodynamic, inclinometric, as well as a method based on 3D modeling. *Results.* The structure of the information and measurement system for monitoring the parameters of overhead power transmission lines is proposed, which eliminates the key disadvantages inherent in common methods and systems of similar

purpose: no changes are required in the design of overhead lines; parameters that have a direct impact on the reliable and stable operation of overhead lines are monitored. *Conclusions.* The introduction of an information-measuring system for measuring the following parameters is proposed: the angle of inclination of the overhead line wire or the distance and location of the smallest wire sag to the ground; the speed of wind loads; ambient air temperature. The system will allow power grid organizations to improve the reliability and quality of power supply to consumers.

Keywords: reliability, overhead power lines, information and measurement system, weather conditions, metrological characteristics

For citation: Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A., Artamonov D.V., Zinchenko T.O., Anisimova A.A. Improving the reliability of overhead power transmission lines through the introduction of information and measurement systems for monitoring their parameters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):62–68. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-7

Введение

Процесс бесперебойной передачи электрической энергии от источника генерации до потребителя (транспорт электроэнергии) является важнейшей задачей функционирования электроэнергетических систем и сетей (ЭЭС). Транспорт электроэнергии в основном осуществляется по воздушным линиям электропередачи (ВЛ), поэтому важнейшей задачей электросетевого комплекса является обеспечение надежного и бесперебойного функционирования ВЛ. Так, например, сегодня в РФ издан ряд нормативно-правовых актов (НПА), направленных на достижение национальных задач развития экономики и социальной сферы¹. В ПАО «Россети» разработана и принята к исполнению Концепция «Цифровая трансформация 2030», одной из важнейших задач которой является обеспечение бесперебойного транспорта электроэнергии [1].

Обоснование проблемы обеспечения надежности воздушных линий электропередачи

Высокий уровень аварийности воздушных линий связан с тем, что они являются наиболее повреждаемыми элементами электроэнергетических систем и сетей ввиду своего открытого конструктивного исполнения [2, 3]. Так, например, в последние годы воздушные линии энергосистемы Пензенской области подвергаются воздействиям неблагоприятных погодных явлений. Данные события привели к серьезным повреждениям ВЛ и существенным экономическим затратам. В табл. 1 представлен анализ воздействия неблагоприятных погодных условий (ветровые нагрузки, ледяные дожди и т.д.) на территории Пензенской области в период с 2019 по 2021 г.

Таблица 1

Анализ воздействия неблагоприятных погодных условий на территории Пензенской области в период с 2019 по 2022 г.

Период воздействия неблагоприятного природного явления (ветровые нагрузки)	Напряжение сети, кВ	Максимальная скорость ветра, м/с
1	2	3
16–18 января 2019 г.	0,4–110	16
13–19 февраля 2019 г.	0,4–10	19
11–13 апреля 2020 г.	0,4–110	28
21–23 апреля 2020 г.	6–10	20
11–14 июня 2020 г.	0,4–110	22
08–15 июля 2020 г.	0,4–10	23
08–25 декабря 2020 г.	0,4–110	20
05–21 января 2021 г.	0,4–110	19
07–09 февраля 2021 г.	0,4–10	18
25 апреля 2021 г.	0,4	17

¹ О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы : указ Президента Российской Федерации № 203 от 09.05.2017. ; О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : указ Президента Российской Федерации № 204 от 07.05.2018.

Окончание табл. 1

1	2	3
20–22 апреля 2021 г.	0,4–10	22
30–31 мая 2021 г.	0,4–10	20
27–30 июня 2021 г.	0,4–10	22
12–31 июля 2021 г.	0,4–10	20
03–19 августа 2021 г.	0,4–10	18
29–30 ноября 2021 г.	0,4–10	21
25–26 декабря 2021 г.	0,4–10	23

Основываясь на данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что территория Пензенской области в последние годы становится «опасной ветровой зоной», в которой аварии на воздушных линиях в осенне-зимний период (ОЗП) становятся обычными явлениями для электросетевых организаций.

В связи с этим возрастает актуальность изучения подходов к повышению устойчивости систем электроснабжения [4]. Решение данной задачи осуществляется путем внедрения на объекты электросетевого комплекса информационно-измерительных систем контроля метеорологических и эксплуатационных параметров электроустановок.

Сравнительный анализ методов контроля параметров воздушных линий электропередачи

На сегодняшний день существует множество методов и устройств мониторинга параметров воздушных линий. Как правило, традиционными методами мониторинга воздушных линий являются следующие: визуальный (пешие осмотры трасс и участков трасс ВЛ), инструментальный и аналитический. Однако данные методы обладают рядом значительных недостатков. Так, недостатком метода визуального осмотра воздушных линий является ограниченность охвата проблемных участков воздушных линий, обусловленная ограниченностью возможностей производственного персонала электросетевых организаций [5].

В табл. 2 представлен сравнительный анализ методов и систем контроля параметров воздушных линий.

Таблица 2

Сравнительный анализ методов и систем контроля параметров воздушных линий

Наименование метода	Достоинства	Недостатки
1	2	3
3D-моделирование	Высокая точность определения геометрических параметров ВЛ и их взаимного расположения	1. Отсутствует возможность исследования параметров ВЛ в неблагоприятных условиях. 2. Отсутствует возможность осуществления контроля в режиме реального времени погодными условиями и отсутствием возможности проведения полного мониторинга в режиме реального времени
Оптический метод	Простота монтажа	1. Высокая стоимость. 2. Неустойчивость к неблагоприятным природным явлениям
Емкостной метод	Низкая погрешность, высокая временная стабильность, простота конструкции	1. Отсутствует возможность контроля положения провода. 2. Отсутствует возможность распределенного контроля гололедообразования по всей трассе ВЛ
Механический метод	–	1. Сложное конструктивное исполнение, обусловленное большим количеством механизмов и деталей. 2. Необходимость дополнительного определения ветровой нагрузки. 3. Большая погрешность. 4. Низкая чувствительность тензодатчиков к изменению механических нагрузок

Окончание табл. 2

1	2	3
Частотный (локационный) метод	1. Возможность размещения аппаратуры только на подстанции (нет необходимости устанавливать на ВЛ какие-либо устройства контроля). 2. Контроль ВЛ в пределах всего участка обследования, а не только одного пролета	1. Невозможность отличить наличие небольшого по толщине гололедного образования на большой длине ВЛ от опасной концентрации льда в отдельных ее пролетах. 2. Зависимость затухания радиолокационного сигнала в проводе ВЛ от погодных условий. 3. Сложность и трудоемкость в обработке сигналов
Термодинамический метод	Возможность определения условий и интенсивности образования ГИО	1. Большой объем математических вычислений. 2. Требуется значительных затрат для реализации осуществления обработки большого количества метеорологических данных
Инклинометрический метод	Простота конструкции и надежность системы	1. Большой объем математических вычислений. 2. Сложность в обработке экспериментальных данных

Анализируя существующие методы контроля параметров ВЛ, можно сделать вывод, что несмотря на имеющиеся достоинства ряда методов и систем, они обладают и недостатками [6–8]. В основном для реализации контроля ВЛ вышеуказанными методами требуется соблюдение следующих условий:

- 1) изменение конструкции линейной арматуры ВЛ;
- 2) проведение большого числа сложных расчетов и составления математических моделей.

Однако усовершенствование устройств, основанных на инклинометрическом и оптическом методе, может быть при учете конструктивных, эксплуатационных и климатических параметров.

Структура информационно-измерительной системы

Авторами предложен вариант информационно-измерительной системы (ИИС), реализация которой обладает рядом преимуществ, по сравнению с имеющимися методами и системами, а именно [9, 10]:

- ИИС не требует изменения конструкции ВЛ и линейной арматуры;
- ИИС осуществляет контроль параметров без излишних расчетов и не требует составления сложных математических моделей;
- ИИС осуществляет только контроль параметров, оказывающих непосредственное влияние на надежное и устойчивое функционирование ВЛ.

Структурная схема предлагаемой ИИС представлена на рис. 1.

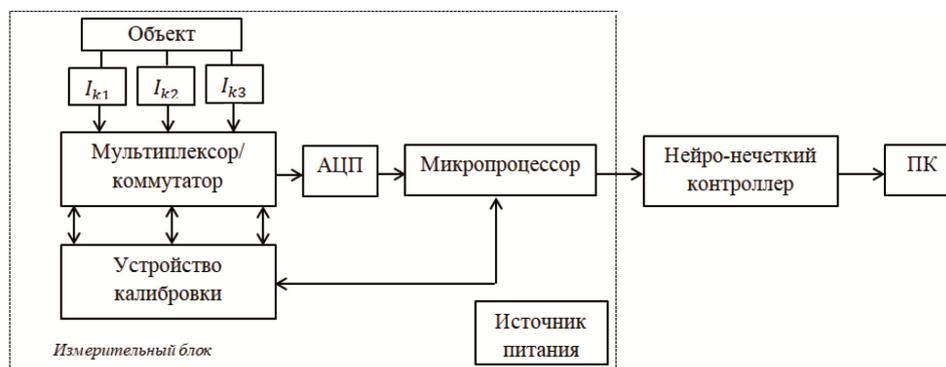


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой ИИС:

ИК1, ИК2, ИК3 – каналы измерения расстояний от провода до земли, скорости ветра, температуры соответственно; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Метрологические характеристики измерительных каналов ИИС представлены в табл. 3.

Таблица 3

Метрологические характеристики измерительных каналов ИИС

Наименование канала	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Пределы допускаемой абсолютной погрешности результатов измерений
Канал измерения расстояния	Длина l , м	0,5–35	$\pm 0,1$
Канал измерения температуры окружающего воздуха	Температура t , °C	–45–+45	$\pm 0,5$
Канал измерения скорости ветровых нагрузок	Скорость v , м/с	0–30	± 1

Заключение

Обеспечение надежности систем электроснабжения посредством контроля эксплуатационных параметров воздушных линий в режиме реального времени является актуальной задачей ЭЭС. Устойчивое функционирование воздушных линий ряда энергосистем РФ, в том числе и энергосистемы Пензенской области, зависит от воздействия неблагоприятных природно-климатических явлений (ветровые нагрузки). Анализируя существующие методы контроля параметров ВЛ авторами сделан вывод, что существующие системы контроля эксплуатационных параметров ВЛ наряду с достоинствами обладают и рядом недостатков. Авторами предлагается внедрение информационно-измерительной системы контроля параметров воздушных линий, оказывающих непосредственное влияние на их устойчивое функционирование, а именно:

- угол наклона провода ВЛ или расстояние и места наименьшего провеса провода до земли;
- скорость ветровых нагрузок;
- температура окружающего воздуха.

Указанная информационно-измерительная система позволит электросетевым организациям повысить надежность и качество электроснабжения потребителей.

Список литературы

1. ПАО «Россети» Концепция «Цифровая трансформация 2030». М., 2018. 31 с.
2. Листюхин В. А., Печерская Е. А. Система контроля параметров воздушных линий электропередачи в режиме реального времени // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 4. С. 90–95. doi:10.21685/2227-8486-2021-4-8
3. Листюхин В. А., Печерская Е. А. Информационно-измерительная система контроля параметров воздушных линий электропередачи распределительных сетей 0,4–20 КВ // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике : XVI Всерос. открытая молодежная науч.-практ. конф. Казань, 2022. С. 328–330.
4. Li Z. et al. A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 135. P. 107497.
5. Дьяков Ф. А. Совершенствование методов и средств мониторинга гололедообразования на линиях электропередачи : дис. ... канд. тех. наук. Ставрополь, 2009. 195 с.
6. Дементьев С. С. Интеллектуальная система мониторинга гололедообразования на воздушных линиях электропередачи : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2019. С. 142.
7. Listyuhin V. A. et al. System for monitoring the parameters of overhead power lines // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Vol. 2086, № 1. P. 012059.
8. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Мартынов А. В. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового окисления // Радиотехника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. третьей Всерос. молодежной науч. конф. Тамбов, 2018. С. 111–113.
9. Листюхин В. А., Печерская Е. А. Система мониторинга параметров воздушных линий электропередачи для решения задач оперативно-технологического управления // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 6. С. 13–16.

10. Listyukhin V. A. et al. Systematization and monitoring of quality parameters of overhead power transmission lines functioning // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 990, № 1. P. 012058.

References

1. PAO «Rosseti» Kontseptsiya «Tsifrovaya transformatsiya 2030» = PJSC "Rosseti" Concept "Digital transformation 2030". Moscow, 2018:31. (In Russ.)
2. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. A system for monitoring parameters of overhead power transmission lines in real time. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(4):90–95. (In Russ.). doi:10.21685/ 2227-8486-2021-4-8
3. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. Information and measurement system for monitoring parameters of overhead power transmission lines of distribution networks of 0,4–20 KV. *Dispetcherizatsiya i upravlenie v elektroenergetike: XVI Vseros. otkrytaya molodezhnaya nauch.-prakt. konf. = Dispatching and management in the electric power industry : XVI All-Russian Open youth scientific and practical conference*. Kazan, 2022:328–330. (In Russ.)
4. Li Z. et al. A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022;135:107497.
5. D'yakov F.A. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv monitoringa golodedoobrazovaniya na liniyakh elektropredachi = Improvement of methods and means of monitoring ice formation on power transmission lines*. PhD dissertation. Stavropol', 2009:195. (In Russ.)
6. Dement'ev S.S. *Intellektual'naya sistema monitoringa golodedoobrazovaniya na vozdushnykh liniyakh elektropredachi = Intelligent system for monitoring ice formation on overhead power lines*. PhD dissertation. Volgograd, 2019:142. (In Russ.)
7. Listyukhin V.A. et al. System for monitoring the parameters of overhead power lines. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021;2086(1):012059.
8. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Martynov A.V. Application of quality control tools for the analysis of the microarc oxidation process. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. tret'ey Vseros. molodezhnoy nauch. konf. = Radioelectronics. Problems and prospects of development : theses of the third All-Russian youth scientific conference*. Tambov, 2018:111–113. (In Russ.)
9. Listyukhin V.A., Pecherskaya E.A. Monitoring system of parameters of overhead transmission lines for solving operational and technological management tasks. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont = Electrical equipment: operation and repair*. 2022;(6):13–16. (In Russ.)
10. Listyukhin V.A. et al. Systematization and monitoring of quality parameters of overhead power transmission lines functioning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;990(1):012058.

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Александрович Листюхин
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vladyan4iklist@yandex.ru

Vladislav A. Listyukhin
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya
Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Владимирович Артамонов
доктор технических наук, профессор,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

Dmitriy V. Artamonov
Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Тимур Олегович Зинченко
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анна Антоновна Анисимова
студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: an.ryzhova18@gmail.com

Anna A. Anisimova
Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 21.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 26.04.2022

Принята к публикации/Accepted 17.05.2022