

Научная статья

УДК 621.315.624

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31103>



К.В. Волхов¹ ✉, Д.Е. Титов¹,
А.А. Кудрявцев², Я.В. Ткачук³

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия;

² ООО «Экспертный центр», Екатеринбург, Россия;

³ ПАО «Россети Московский Регион», Москва, Россия

✉ K.Volkhov@skoltech.ru

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ПАО «РОССЕТИ МОСКОВСКИЙ РЕГИОН»

Аннотация. В статье представлены результаты испытаний технологии оценки состояния линейной изоляции, основанной на мониторинге параметров тока утечки в гирлянде изоляторов. Технология позволяет количественно оценить вероятность перекрытия гирлянд изоляторов и потери электроэнергии в них. Приведено описание реализующего технологию программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего съем осциллограмм тока утечки в трех фазах с дискретностью 1 мкс и метеопараметров в точке измерений тока утечки. Выявлены зависимости тока утечки от внешних факторов, а также степень увлажнения гирлянд изоляторов в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, изолирующая подвеска, загрязнения изолятора, перекрытие изолятора, ток утечки, устройство индикации состояния изоляции, потери электроэнергии.

Благодарности: Авторы выражают благодарность техническому директору АО «ЮАИЗ» Ефимову О.Н. и начальнику испытательного центра АО «ЮАИЗ» Мовсум-Заде Н.В. за помощь в проведении лабораторных испытаний демонтированных изоляторов.

Для цитирования:

Волхов К.В., Титов Д.Е., Кудрявцев А.А., Ткачук Я.В. Натурные испытания технологии оценки состояния линейной изоляции в ПАО «Россети Московский Регион» // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 41–58. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31103>



K.V. Volkhov¹ ✉, D.E. Titov¹,
A.A. Kudryavtsev², Ya.V. Tkachuk³

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia;

² LLC “Expert Center”, Yekaterinburg, Russia;

³ PJSC “Rosseti Moscow Region”, Moscow, Russia

✉ K.Volkhov@skoltech.ru

FIELD STUDIES OF THE TECHNOLOGY FOR ASSESSING THE CONDITION OF LINEAR INSULATION IN PJSC “ROSSETI MOSCOW REGION”

Abstract. The article presents the results of testing the technology for assessing the state of linear insulation based on monitoring the leakage current parameters in a string of insulators. The technology allows for a quantitative assessment of the probability of insulator string overlap and power loss in them. A description of the hardware and software complex implementing the technology is given, which ensures the removal of leakage current oscillograms in three phases with a discreteness of 1 μs and meteorological parameters at the point of leakage current measurements. The dependences of the leakage current on external factors, as well as the degree of moistening of insulator strings under operating conditions, are revealed.

Keywords: overhead power line, insulating suspension, insulator pollution, insulator flashover, leakage current, insulation condition indicator device, power loss.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the technical director of JSC Yuzhnouralsk reinforcement and insulator plant, O.N. Efimov, and the head of the testing center of JSC Yuzhnouralsk reinforcement and insulator plant, N.V. Movsum-Zade, for assistance in conducting laboratory tests of dismantled insulators.

Citation:

Volkhov K.V., Titov D.E., Kudryavtsev A.A., Tkachuk Ya.V., Field studies of the technology for assessing the condition of linear insulation in PJSC “Rosseti Moscow Region”, *Global Energy*, 31 (01) (2025) 41–58, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31103>

Введение. Большинство технологических нарушений в высоковольтных сетях приходится на воздушные линии электропередачи (далее – ВЛ). Высокая аварийность ВЛ связана с существенным природным и техногенным воздействием, а также с высокой степенью износа. Одной из основных причин аварийных отключений ВЛ является перекрытие загрязненной изоляции¹ [1].

Для снижения количества отключений по причине перекрытия загрязненных подвесок применяют их массовую или выборочную замену, руководствуясь результатами визуальных наблюдений, статистики перекрытий по фидерам и локациям, сопоставлением фактов аварий с находящимися поблизости источниками загрязнений.

Техническая политика ПАО «Россети»² и большинства сетевых компаний в мире [2–4] предполагает последовательный переход от системы планово-предупредительного оказания воздействия на активы к риск-ориентированному управлению (далее – РОУ). В России РОУ базируется

¹ Здесь и далее под изоляцией в зависимости от контекста подразумевается единственный изолятор, гирлянда изоляторов, изолирующая подвеска или их совокупность на опоре ВЛ, на ВЛ в целом, на всех обслуживаемых ВЛ.

² Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Режим доступа: https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpolitika_29.04.2022.pdf?ysclid=m5zd1ejdxt323573767 (дата обращения 16.01.2025).

на расчете индекса технического состояния (далее – ИТС) и последующей оценки уровней технического риска³.

Применительно к изоляции ВЛ для расчета ИТС используются данные визуальных осмотров. Поэтому загрязнение как параметр функционального узла – изоляции оценивается только качественно в терминах «стойкое», «нестойкое удаляемое» или «отсутствует»⁴. Такая градация значений параметра не позволяет количественно ранжировать изолирующие подвески по риску перекрытия. Более того, «на глаз» невозможно достоверно оценить стойкость загрязнения и связанный с ним риск перекрытия.

Существуют методы диагностики изоляторов с помощью портативных устройств, в том числе ультрафиолетовых (далее – УФ) приборов со счетчиками частичных разрядов и инфракрасных (далее – ИК) камер. Значимый недостаток данных методов связан с недостаточной разрешающей способностью устройств при наблюдении линейной изоляции с земли и может быть решен за счет использования беспилотного летательного аппарата винтокрылого типа. При этом главный недостаток этого способа диагностики – фиксация мгновенного состояния изоляции – сохраняется. УФ приборы и ИК камеры фиксируют частичные разряды или нагрев в определенных влажностных условиях и в определенную стадию процесса развития перекрытия. Через несколько минут или часов условия меняются, что приводит к изменению тока утечки и, как следствие, к изменению косвенных наблюдаемых параметров (число импульсов в единицу времени или градиент температур).

Другие методы диагностики, основанные на выявлении эквивалентной плотности отложений солей (ESDD) или плотности нерастворимых отложений (NSDD) [5], требуют отключения линии и удаления испытуемого изолятора, поэтому редко доказывают свою экономическую эффективность.

В последние десять лет все чаще публикуются материалы с результатами прямых измерений тока утечки в изоляции в условиях эксплуатации [6–9]. Данный факт связан с развитием технологий сенсорики и Internet of Things (IoT), а также с ростом возможностей собирать и обрабатывать большие объемы данных. При этом способы измерения (частота получения пакетов, дискретность измерений, пределы измерений, фиксируемый параметр тока утечки и т.д.), а также методы интерпретации результатов измерений значительно отличаются у разных авторов, но чаще всего сводятся к сравнению измеренного мгновенного значения одного из параметров тока с пороговым значением. Отсутствие общепринятого подхода к оценке состояния гирлянды по измеренному току утечки говорит о незрелости данной области техники.

Таким образом, принципы РОУ при управлении изоляцией ВЛ не могут быть реализованы в полной мере ввиду недостатка диагностических данных и несовершенства методик ранжирования по риску перекрытия. Для перехода на РОУ состоянием изоляции требуется разработка и внедрение инструментов, позволяющих сопоставлять состояние изоляции количественно и ранжировать ее по риску перекрытия.

АО «ЮАИЗ» и Сколковским институтом науки технологий разработана технология диагностирования линейной изоляции по току утечки. Совместные исследования в этой области были начаты в 2016 году. За это время были проведены лабораторные исследования поведения состояния изоляции с естественными загрязнениями [8], разработаны первые версии устройств индикации состояния изоляции (далее – УИС) [9] и проведены их натурные испытания на ВЛ 110 кВ в ПАО «МРСК Юга» и на ВЛ 330 кВ в ПАО «МЭС Юга» [10], построена математическая модель для оценки состояния изоляции по данным о токах утечки и приложенном к ней напряжении [11].

³ Постановление Правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей».

⁴ Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

В настоящей статье приведены результаты натурных и лабораторных испытаний технологии количественной оценки состояния гирлянды стеклянных изоляторов 110 кВ посредством измерений тока утечки.

Методы и материалы

Методика оценки состояния изолирующей подвески

Классификация состояний изолирующих подвесок базируется на сравнении выдерживаемого напряжения U_B с фазным напряжением подвески U_Φ и последующим присвоением одного из трех состояний: хорошее, опасное, критическое. Кроме того, проводится расчет вероятности перекрытия подвески P для количественного сравнения состояний гирлянд между собой.

U_B рассчитывается согласно А.1.2⁵ с доверительной вероятностью 90%:

$$U_B = U'_{cp} \cdot (1 - 1,3 \cdot \sigma'), \quad (1)$$

где U'_{cp} – нижнее значение среднего разрядного напряжения, кВ; σ' – наибольшее значение в относительных единицах стандартного отклонения в доверительном интервале при заданной точности определения σ .

Стандартное отклонение σ – сумма абсолютного оценочного значения стандартного отклонения разрядного напряжения при испытаниях z и стандартного отклонения оценки разрядного напряжения по току утечки σ_m в математической модели (σ_m принимается равным 23,6% [11]):

$$\sigma = z + \sigma_m. \quad (2)$$

Параметры U'_{cp} и σ' определяются с доверительной вероятностью 90% с учетом числа приложения напряжения $N = 10$ при испытаниях методом 100%-го разряда на гирляндах из стеклянных изоляторов со следами естественных загрязнений. Подробнее испытания описаны в [11], они проводились с целью обучения модели оценки разрядного напряжения гирлянды по параметрам тока утечки.

$$U'_{cp} = \bar{U}_{cp} - 0,58\sigma, \quad (3)$$

где $\bar{U}_{cp}$ – оценочное значение среднего разрядного напряжения, кВ; 0,58 – численное значение $\frac{t_p}{\sqrt{N}}$ для доверительной вероятности 90% и $N = 10$.

$$\sigma' = \frac{1,645\sigma}{U_{cp}}, \quad (4)$$

где U_{cp} – среднее разрядное напряжение, кВ; 1,645 – численное значение $\sqrt{\frac{N-1}{\chi^2_{(1-\frac{p}{2})}}}$ для доверительной вероятности 90% и $N = 10$.

U_{cp} принимается равным U'_{cp} и определяется согласно [11]:

$$U_{cp} = U'_{cp} = \frac{U_\Phi}{\%U_{50\%}} \cdot 100, \quad (5)$$

⁵ ГОСТ 1516.2-97 «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции».

где U_{ϕ} – фазное напряжение ВЛ, кВ; $\%U_{50\%}$ – фазное напряжение, выраженное в % от оценочного значения 50%-го разрядного напряжения $\bar{U}_{50\%}$.

$\%U_{50\%}$ вычисляется по параметрам тока утечки согласно [11]:

$$\begin{aligned} \%U_{50\%} = & 19,629 + 7,536 \cdot \ln(I_{\max}^p) - 2,899 \cdot (I_{\max}^p)^{-1} + \\ & + 0,138 \times I_{2\text{mA} - 3\text{mA}}^p + 8,671 \cdot \lg(I^-), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\ln(I_{\max}^p)$ – натуральный логарифм от максимального пикового значения тока утечки I^p , полученного применением высокочастотного фильтра (алгебраическая разность исходного и сглаженного методом скользящего среднего сигналов) к осциллограмме тока утечки, полученной с дискретностью 1 мкс; $(I_{\max}^p)^{-1}$ – обратное значение от максимального значения выборки, полученной применением высокочастотного фильтра к осциллограмме тока утечки; $I_{2\text{mA} - 3\text{mA}}^p$ – количество импульсов в выборке, полученной применением высокочастотного фильтра к осциллограмме тока утечки, амплитуда которых находится в диапазоне от 2 мА до 3 мА; $\lg(I^-)$ – десятичный логарифм от амплитуды гармонической составляющей тока утечки I^- , полученной применением низкочастотного фильтра (сглаживанием исходного сигнала методом скользящего среднего) к осциллограмме тока утечки.

Аппроксимация (6) получена для гирлянд из пяти изоляторов наиболее распространенного типа ПС-70. При этом уравнение (6) не имеет параметров, связанных с количеством изоляторов в гирлянде и приложенным напряжением, что вытекает из методики лабораторных испытаний.

С повышением класса напряжения ВЛ количество изоляторов в гирлянде увеличивается практически линейно, а значит, приведенное к одному изолятору падение напряжения сохраняется. Поэтому частичные разряды, связанные с электрическими дужками, начинающимися и заканчивающимися на поверхности стеклотела (например, между двумя каплями), не должны значительно изменяться по характеристикам. Коронные разряды как разновидность частичных становятся значительно интенсивнее на нижних изоляторах гирлянды при росте приложенного напряжения.

При разработке методики авторами были проведены предварительные исследования по определению оптимального количества изоляторов. Оно было определено, исходя из схожести процесса развития перекрытия трех, пяти, семи и девяти изоляторов (и, конечно, возможностей испытательной установки). При этом в ходе испытаний напряжение, при котором были получены осциллограммы, достигало 275 кВ, что близко к фазному напряжению ВЛ 500 кВ. Это позволяет предположить, что модель может быть применима для ВЛ любого класса напряжения с любым количеством изоляторов в гирлянде.

При сравнении подвесок между собой используются наименьшие достигнутые в ходе эксплуатации значения $\bar{U}_{50\%}$, соответствующие, как правило, наибольшей степени увлажнения поверхности изоляторов. На рис. 1 изображены соотношения между U_B и U_{ϕ} трех разных по степени загрязнения гирлянд.

При $U_B = U_{B1}$ вероятность перекрытия из-за накопленных загрязнений практически равна нулю. Изоляция находится в хорошем состоянии и не требует замены, так как:

$$k \cdot U_{\phi} < \bar{U}_{50\%} - 3 \cdot \sigma, \quad (7)$$

где k принят равным 1,6 для ВЛ менее 100 км согласно EPRI AC Transmission Line Reference Book: 200 kV and Above (Red Book)⁶.

⁶ EPRI AC Transmission Line Reference Book: 200 kV and Above (Red Book). Режим доступа: <https://www.epri.com/research/products/000000003002026982> (дата обращения 17.01.2025).

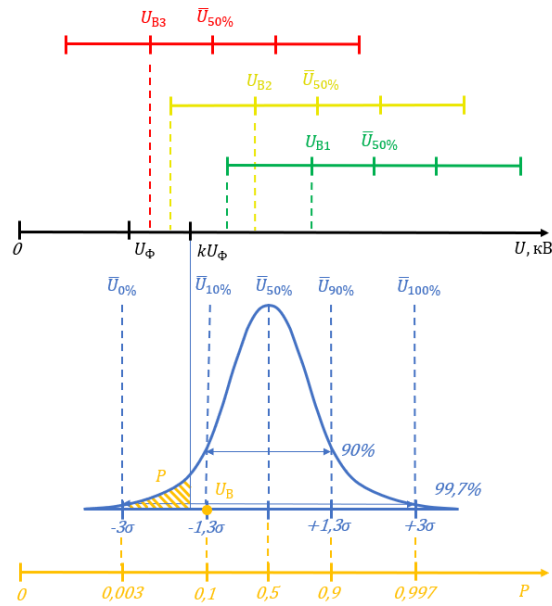


Рис. 1. Принцип классификации изолирующих подвесок
Fig. 1. Principle of classification of insulating suspensions

При $U_B = U_{B2}$ вероятность перекрытия становится значимой (но менее 0,1), изоляция находится в опасном состоянии и требует повышенного наблюдения, так как:

$$\bar{U}_{50\%} - 3 \cdot \sigma \leq k \cdot U_{\Phi} < \bar{U}_{50\%} - 1,3 \cdot \sigma. \quad (8)$$

При $U_B = U_{B3}$ вероятность перекрытия настолько высока (более 0,1), что изоляции присваивается статус критического состояния с необходимостью срочной замены, так как:

$$k \cdot U_{\Phi} \geq \bar{U}_{50\%} - 1,3 \cdot \sigma. \quad (9)$$

Вероятность перекрытия P является количественной мерой оценки состояния изоляции и определяется через вычисление вероятности заданного отклонения:

$$P = \Phi \left(\frac{\bar{U}_{50\%} - k \cdot U_{\Phi}}{\sigma} \right), \quad (10)$$

где Φ – функция Лапласа.

Алгоритм оценки состояния изоляции представлен на рис. 2.

Достигнутое и выявленное однажды опасное или критическое состояние изолирующей подвески «закрепляется» за ней на постоянной основе независимо от того, как часто регистрируется в дальнейшем, и может быть изменено в лучшую сторону только при замене, обмыве или чистке подвески, так как временное улучшение состояния вызвано, как правило, снижением степени увлажнения поверхности изоляторов, а не снижением проводимости загрязнений.

Потери электроэнергии за календарный месяц оцениваются следующим образом:

$$W = \sum_{i=0}^N \frac{I_i \cdot U_{\Phi} \cdot \Delta t_i}{\sqrt{2} \cdot 1000 \cdot 3600}, \quad (11)$$

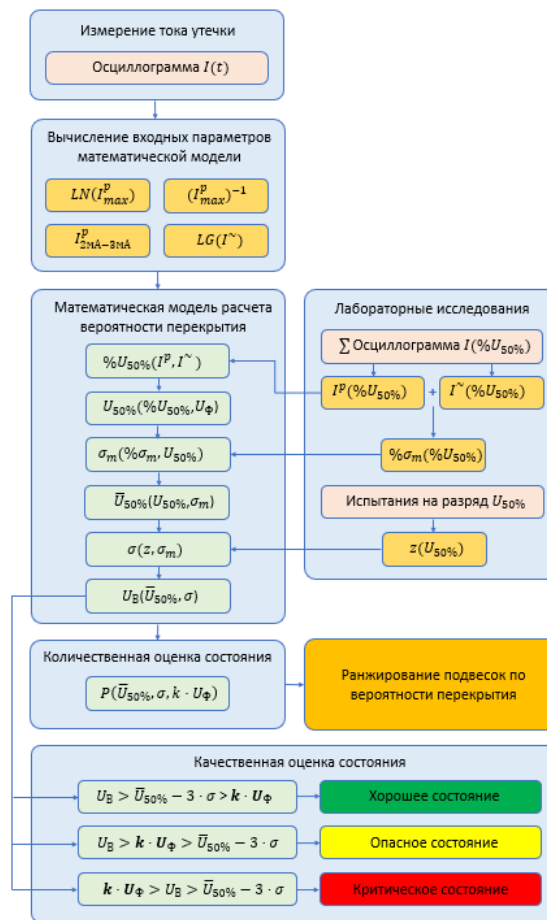


Рис. 2. Алгоритм оценки состояния изолирующей подвески
Fig. 2. Algorithm for assessing the condition of the insulating suspension

где W – потери электроэнергии за календарный месяц, кВт·ч/месяц; i – порядковый номер измерения I^- ; N – количество измерений I^- за расчетный месяц; I_i – мгновенное измеренное значение I^- , А, рассчитанное из осциллограммы, полученной с УИС; U_ϕ – фазное напряжение ВЛ, равное 72,75 кВ для ВЛ 110 кВ (рассчитано как наибольшее рабочее напряжение 126 кВ, согласно ГОСТ Р 57382-2017, деленное на $\sqrt{3}$); Δt_i – время, прошедшее с момента получения предыдущего пакета с УИС, сек.

Техническая реализация технологии оценки состояния изоляции

Как было упомянуто выше, параметры тока утечки в гирлянде $LN(I_{\max}^p)$, $(I_{\max}^p)^{-1}$, $I_{2\text{mA}-3\text{mA}}^p$ и $LG(I^-)$ значительно изменяются во времени в зависимости от множества факторов, а значит, требуют постоянного мониторинга. Авторами не найдены на рынке устройства, способные снимать осциллограммы тока утечки с частотой 1 МГц в условиях эксплуатации ВЛ. Авторами был разработан программно-аппаратный комплекс диагностирования состояния изоляции (далее – Комплекс), способный обеспечить съем показаний токов утечки в трех фазах и метеопараметров в точке измерений тока утечки.

Аппаратная часть Комплекса состоит из автономных беспроводных УИС (рис. 3а), станции сбора и передачи данных на удаленный сервер, оснащенной метеодатчиками (далее – Станция, рис. 3б).

С заданным оператором интервалом, по команде со Станции, УИС выполняют синхронные измерения токов утечки на каждой из фаз ВЛ и передают результаты по радиоканалу в виде

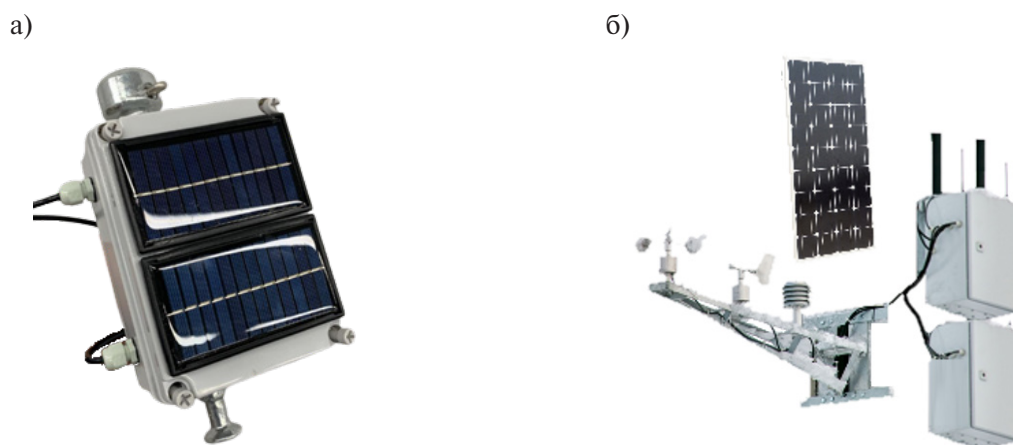


Рис. 3. а) УИС (слева); б) станция сбора и передачи данных (справа)
Fig. 3. a) Isolation status indication device (left); b) data collection and transmission station (right)

осциллограмм на Станцию. Станция дополняет измерения тока измерениями температуры и влажности воздуха, направления и скорости ветра и отправляет их на удаленный сервер посредством сотовой связи.

Основные параметры Комплекса представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики Комплекса

Table 1

Main technical characteristics of the Complex

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение параметра
Типы диагностируемых изоляторов	—	стеклянные, фарфоровые, полимерные
Номинальное напряжение ВЛ	кВ	110–500
Разрушающая нагрузка изолирующей подвески	кН	70–300
Погрешность измерения тока утечки: в диапазоне 0,025–5 мА в диапазоне 5–1000 мА	мкА мА	±10 ±2
Диапазоны измерения тока утечки	мА	0,025...1000
Разрешение осциллограммы (дискретность)	мкс	1–200
Объем осциллограммы	периоды промышленной частоты 50 Гц	1–100
Периодичность опроса	мин.	1–360
Время автономной работы (без подзаряда аккумуляторов от солнечной панели)	мес.	не менее 3
Срок эксплуатации	годы	10

Полученные с УИС осциллограммы, а также результаты их обработки отображаются в клиентском программном обеспечении (далее – ПО) (рис. 4). Клиентское ПО – desktop-приложение для Windows – сигнализирует оператору о необходимости принятия точечных мер реагирования.

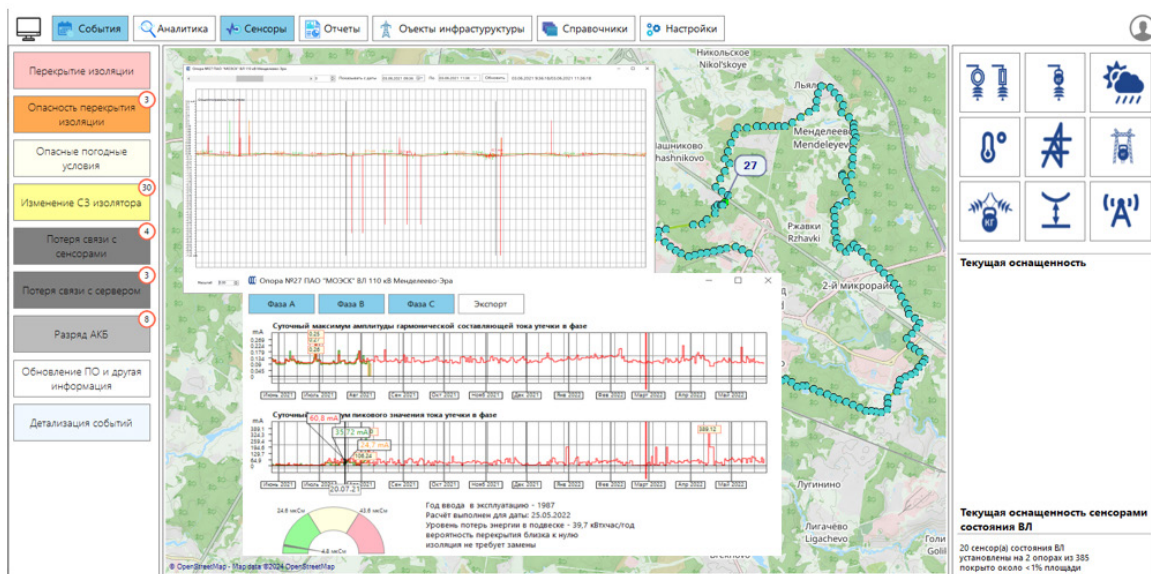


Рис. 4. Главное окно клиентского ПО с возможностью просмотра осциллограмм и графиков суточных максимумов амплитуды гармонической составляющей тока утечки и пикового значения тока утечки

Fig. 4. Main window of the client software with the ability to view oscillograms and graphs of daily maxima of the amplitude of the harmonic component of the leakage current and the peak value of the leakage current

Комплекс позволяет удаленно диагностировать изоляцию ВЛ под рабочим напряжением, что соответствует требованиям п. 2.5.1 Положения ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция)⁷.

Результаты

С целью выявления закономерностей в поведении изолирующих подвесок и проверки работоспособности УИС на ВЛ 110 кВ Комплекс был установлен на анкерную опору № 31 типа У100-2+5 ВЛ 110кВ «Менделеево – Эра» ПАО «Россети Московский Регион» (координаты: 56.02076999°N 37.188114523887°E) (рис. 5). Данная локация была выбрана в связи с непосредственной близостью к источнику загрязнения – Ленинградскому шоссе (96 метров на юго-запад от полотна дороги). УИС были установлены в натяжные изолирующие подвески трех фаз, состоящие из девяти изоляторов марки ПС-120 1987 года выпуска. При этом изолирующая подвеска фазы С была заменена на новую изоляторами той же марки. Изоляторы ПС-120 и ПС-70 имеют одинаковую стеклотель и, как следствие, одинаковую длину пути утечки и разрядные характеристики, отличаются лишь по механическим характеристикам, что позволяет применять формулу (6), полученную для изоляторов ПС-70, и для изоляторов ПС-120. Перечень параметров, по которым проводился анализ, представлен в табл. 2.

Годовой профиль токов утечки

Годовые графики $I_{\sim}$ и I^p представлены на рис. 6.

Зависимость токов утечки от внешних факторов

Анализ корреляции измерений токов утечки с погодными факторами показал, что наблюдался некоторый рост $I_{\sim}$ при увеличении относительной влажности воздуха (рис. 7).

Коэффициент детерминации экспоненциальной кривой, наилучшим образом отражающий тренд, составил 0,262 (при необходимом 0,5 и выше), что не позволяет использовать данные об относительной влажности воздуха для оценки состояния изоляции.

⁷ Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Режим доступа: https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpoltika_29.04.2022.pdf?ysclid=m5zd1ejdxt323573767 (дата обращения 16.01.2025).

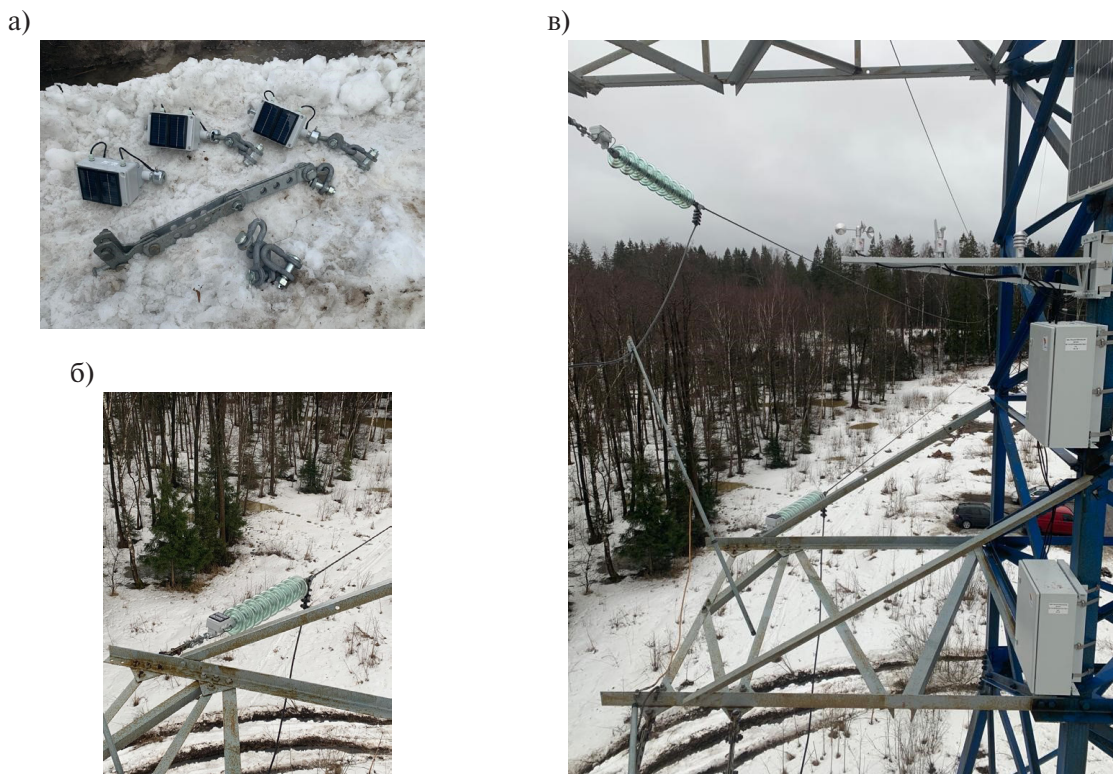


Рис. 5. а) Процесс подготовки УИС к монтажу (слева сверху); б) УИС, установленное на изолирующей подвеске фазы С, состоящей из новых изоляторов (слева внизу); в) общий вид Комплекса после монтажа (справа)

Fig. 5. a) Process of preparing the insulation condition indicator device for installation (top left); b) insulation condition indicator device installed on the insulating suspension of phase C, consisting of new insulators (bottom left); c) general view of the Complex after installation (right)

Fig. 5. a) Process of preparing the insulation condition indicator device for installation (top left); b) insulation condition indicator device installed on the insulating suspension of phase C, consisting of new insulators (bottom left); c) general view of the Complex after installation (right)

Таблица 2

Перечень исследуемых параметров

Table 2

List of investigated parameters

№ п/п	Параметр	Источник данных	Примечание
1	Амплитуда гармонической составляющей токов утечки $I^{\sim}$	УИС	Входит в состав Комплекса
2	Пиковое значение токов утечки I^p	УИС	
3	Относительная влажность воздуха	Датчик относительной влажности воздуха	
4	Температура воздуха	Датчик температуры воздуха	
5	Скорость ветра	Датчик скорости ветра	
6	Направление ветра	Датчик направления ветра	
7	Время суток	Станция	
8	Время года	—	По календарю
9	Тип и интенсивность осадков	Внешний интернет-ресурс	https://rp5.ru

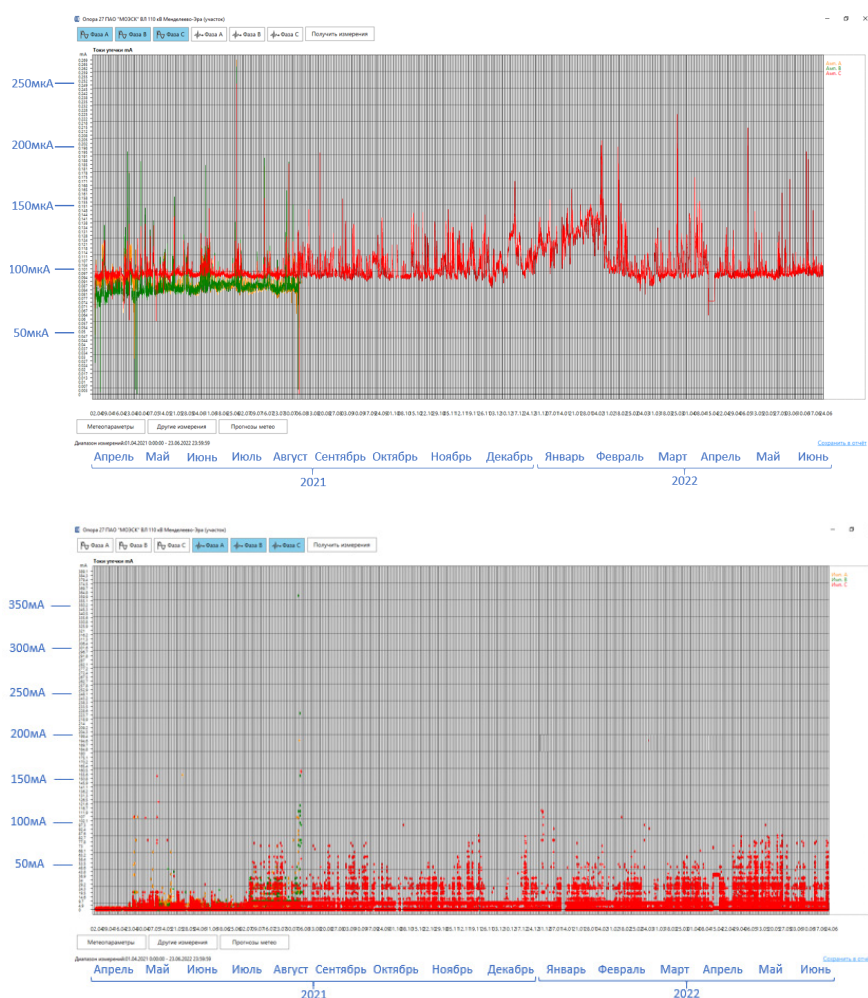


Рис. 6. Годовые графики $I_{\sim}$ и I^p
Fig. 6. Annual charts $I_{\sim}$ and I^p

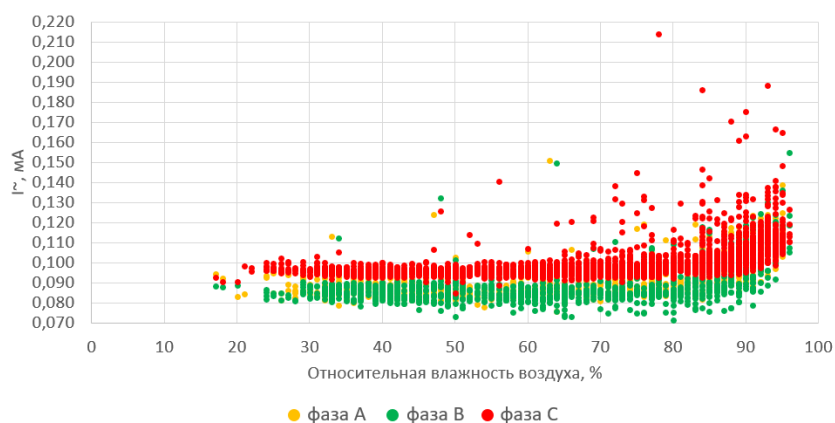


Рис. 7. График зависимости $I_{\sim}$ фаз А, В, С от относительной влажности воздуха при положительной температуре воздуха
Fig. 7. Graph of the dependence of $I_{\sim}$ phases A, B, C on relative humidity at a positive air temperature

Зависимость тока утечки от других измеряемых параметров погоды: температуры воздуха (в том числе от перехода через нулевую температуру), направления ветра, скорости ветра, а также от времени года, времени суток — не была подтверждена.

Единственный фактор, корреляция которого с током утечки была выявлена, — это интенсивность осадков. В качестве источника данных об осадках был выбран ресурс «Расписание погоды gr5» (метеостанция аэропорта Шереметьево, 15 км северо-восточнее от места установки Комплекса)⁸, так как на этом ресурсе архивные данные об осадках были представлены наиболее полно (10 типов). Данные об осадках были синхронизированы по времени с данными о токах утечки. Для каждого типа осадков были рассчитаны средние значения $I_{\sim}$, наблюдаемые в период данного типа осадков. Типам осадков были присвоены ранги, отражающие способность осадков увлажнять поверхность изоляторов от наименьшей к наибольшей: нет осадков — 0, слабый снег — 1, умеренный снег — 2, сильный снег — 3, морось — 4, слабый дождь — 5, снег с дождем — 6, умеренный дождь — 7, роса — 8, сильный дождь — 9, ливень — 10. В результате были получены графики, представленные на рис. 8.

На рис. 8 для фаз А и В отсутствуют значения $I_{\sim}$ для осадков типа 1–3, так как в период работоспособности УИС фазы А и УИС фазы В данные типы осадков (снег) не наблюдались. $I_{\sim}$ фазы С при отсутствии осадков (интенсивность 0) выше $I_{\sim}$ фаз А и В, но по мере увеличения интенсивности осадков темпы роста $I_{\sim}$ фаз А и В превышают темп роста $I_{\sim}$ фазы С. Выявленная закономерность объясняется тем, что подвеска фазы С находится в эксплуатации значительно меньшее время и, как следствие, имеет значительно меньше загрязнений на поверхности.

Потери электроэнергии

Потери электроэнергии с разбивкой по месяцам, а также средние значения потерь по каждой из фаз за 4 месяца и за весь период исследований представлены на рис. 9.

Потери на гирлянде фазы С, состоящей из новых изоляторов, за период работоспособности всех УИС выше потерь на изоляции фазы А на 12,2% и на 14,8% выше потерь на изоляции фазы В.

С апреля по июль осадки наблюдались 1/4 дней, в то время как за период с ноября 2021 года по февраль 2022 года осадки наблюдались значительно чаще — 2/3 дней. Это позволяет предположить, что годовые потери на подвесках фаз А и В могли быть выше годовых потерь на подвеске фазы С за счет неучтенных периодов с высокой интенсивностью осадков.

Лабораторные испытания демонтированных изоляторов

После проведения измерений токов утечки на опоре № 31 ВЛ 110 кВ «Менделеево — Эра» были демонтированы изоляторы трех фаз для проведения исследований в высоковольтной лаборатории АО «ЮАИЗ». Цель исследований — оценка степени увлажнения гирлянд изоляторов в условиях эксплуатации.

Измерения токов утечки выполнялись при помощи УИС и последовательно установленного осциллографа Micsig Tbook 1004 на увлажненном единичном изоляторе при напряжении 7 кВ (рис. 10). Испытательное напряжение получено делением фазного напряжения ВЛ 110 кВ, равного 63,5 кВ, на количество изоляторов в гирлянде — девять штук. Для подачи испытательного напряжения использовалась высоковольтная установка УИВ-500. Увлажнение гирлянды проводилось методом росообразования на предварительно охлажденном изоляторе.

Результаты измерений $I_{\sim}$ осциллографом и УИС совпали и составили 0,598 мА. После измерения токов была проведена серия испытаний методом 100%-го разряда для расчета U_B согласно методике ГОСТ 1516.2-97, приложение А. Сравнение результатов натурных и лабораторных измерений по изоляторам фаз А, В и С ВЛ 110 кВ «Менделеево — Эра» представлено в табл. 3.

⁸ Архив погоды в Шереметьево / им. А. С. Пушкина (аэропорт). Режим доступа: [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Шереметьево_им._А._С._Пушкина_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Шереметьево_им._А._С._Пушкина_(аэропорт)) (дата обращения: 16.09.2023).

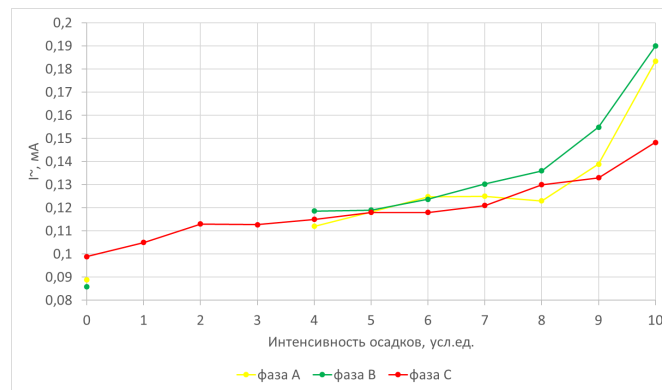
Рис. 8. График зависимости $I^{\sim}$ фаз А, В, С от интенсивности осадковFig. 8. Graph of the dependence of $I^{\sim}$ phases А, В, С on the intensity of precipitation

Таблица 3

Результаты натурных исследований и лабораторных измерений

Table 3

Results of field studies and laboratory measurements

№ п\п	Параметр	Ед. изм.	Данные натурных исследований			Данные лабораторных испытаний		
			фаза А	фаза В	фаза С	фаза А	фаза В	фаза С
1	$I_{\max}^{\sim}$	мА	0,269	0,263	0,250	0,598	0,533	0,475
2	U_B	кВ	388	390	396	274	312	336

Обсуждение

График $I^{\sim}$ на рис. 6 имеет резкопеременный характер. Большую часть времени значения $I^{\sim}$ находились на уровне 90 ± 5 мкА и за 14 месяцев исследований повысились до 95 ± 5 мкА. Периодически $I^{\sim}$ повышалась на непродолжительное время до 270 мкА с последующим снижением.

Интерес представляет период с декабря по февраль, в котором зафиксировано несколько событий повышения $I^{\sim}$ до 200 мкА с задержкой на достигнутом уровне на несколько часов. Данный факт можно объяснить применением химических реагентов для очистки рядом расположенной трассы от снега и наледи. Влага с солью поднимается вверх от проезжающих машин и оседает на гирляндах, значительно изменяя ток утечки.

Импульсная активность за период исследований увеличилась более чем в два раза — среднее значение I^p повысилось с 1,16 мА до 2,92 мА, а среднее количество импульсов за сутки увеличилось с 5,4 до 12,5.

Максимальное значение I^p — 361 мА — зафиксировано 4 августа 2021 года на фазе В. В этот же день было зафиксировано максимальное значение I^p а на фазе А — 194 мА, после чего произошел отказ УИС фаз А и В. Данный факт свидетельствует о необходимости реализации дополнительных мер по защите измерительной схемы УИС от импульсов тока, что было учтено при последующей модернизации сенсоров.

Наименьшее за период исследований значение выдерживаемого напряжения U_B , рассчитанное по формулам (1–6), было зафиксировано 28 июня 2021 года в 14 часов 8 минут на фазе А и составило 388 кВ, что значительно выше фазного напряжения. Поэтому даже в этот момент вероятность перекрытия гирлянд с УИС стремилась к нулю.

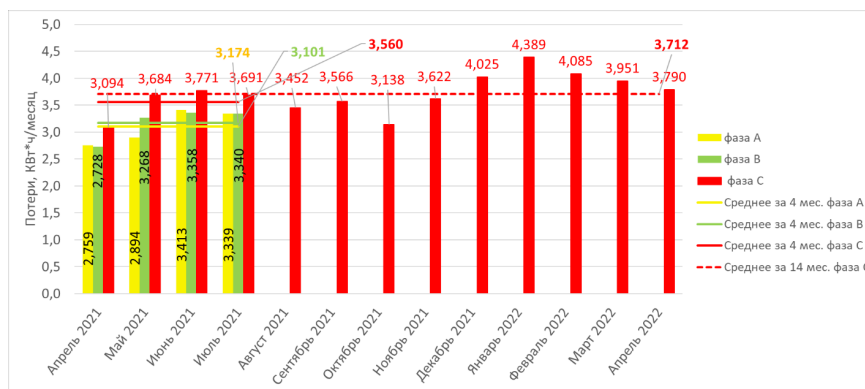


Рис. 9. Расчетные потери электроэнергии за период исследований

Fig. 9. Estimated power losses during the research period

В сухом состоянии усредненное $I^{\sim}$ фазы С выше $I^{\sim}$ фаз А и В более чем на 10%. Факт повышенного $I^{\sim}$ для новых изоляторов выявлен еще в 1973 году и описан в [12], где указано, что на стабилизацию характеристик новых изоляторов уходит 1,5–2 года. В увлажненном состоянии $I^{\sim}$ фазы С ниже $I^{\sim}$ фаз А и В более чем на 25%. Вероятность перекрытия определяется прежде всего значениями токов утечки в увлажненном состоянии, поэтому риск перекрытия изоляции фаз А и В будет выше риска перекрытия изоляции фазы С.

Усредненное значение I^p фазы С выше I^p фазы В на 20%, но ниже I^p фазы А на 45%. Из этого следует, что данный параметр сам по себе не является показательным для оценки состояния изоляции. Максимальное значение I^p фазы С ниже I^p фазы А на 60% и ниже I^p фазы В на 125%, т.е. I^p фазы С за весь период наблюдения не поднималось выше I^p фаз А и В. Импульсная активность фазы С в диапазоне до 30 мА сопоставима с остальными фазами, но за пределами этого диапазона заметно ниже.

Годовые потери на изолирующей подвеске фазы С составили 44,47 кВт·ч/год, что эквивалентно расходам сетевой компании в 89 руб./год при котловом тарифе на передачу электроэнергии в 2 руб./кВт·ч. При текущем уровне загрязнений и динамике их накопления только расходы на приобретение изоляторов для новой гирлянды 110 кВ окупятся примерно через $10000^9/89=112$ лет, поэтому замена гирлянды фазы С по критерию потерь электроэнергии не требуется.

Как видно из табл. 3, выдерживаемое напряжение U_B , рассчитанное по математической модели на основании данных УИС, установленных на ВЛ, в среднем на 20% выше полученного в лабораторных условиях. Это объясняется тем, что изоляция в реальных условиях эксплуатации за период исследований не достигала такой степени увлажнения, при которой проводились лабораторные испытания.

В ходе проведения натурных и лабораторных измерений была доказана работоспособность технологии оценки состояния изоляции на примере натяжной изолирующей подвески. В предстоящем этапе исследований будет уделено внимание поддерживающим подвескам из стеклянных и полимерных изоляторов, подверженным опасным для эксплуатации видам загрязнений.

Выводы

1. Разработана методика оценки состояния изолирующей подвески, основанная на сравнении расчетного выдерживаемого напряжения U_B с фазным напряжением подвески U_ϕ и последующем присвоении одного из трех состояний: хорошее, опасное, критическое. Кроме того, проводится расчет вероятности перекрытия подвески для количественного сравнения состояния

⁹ Стоимость одного изолятора ПС-70Е составляет около 1000 руб.



Рис. 10. Измерения токов утечки в лаборатории ЮАИЗ на демонтированных с ВЛ 110 кВ «Менделеево – Эра» изоляторах фазы А

Fig. 10. Measurements of leakage currents in the JSC Yuzhnouralsk reinforcement and insulator plant laboratory on phase A insulators dismantled from 110 kV Mendeleevo – Era overhead line

гирлянд между собой. Выдерживаемое напряжение оценивается на базе результатов мониторинга параметров тока утечки в гирлянде изоляторов.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс диагностирования состояния изоляции, способный обеспечить круглогодичный съем осциллограмм тока утечки в трех фазах с дискретностью 1 мкс и метеопараметров в точке измерений тока утечки. Комплекс состоит из автономных беспроводных устройств индикации состояния изоляции, станции сбора и передачи данных, оснащенной метеодатчиками, а также серверного и клиентского программного обеспечения.

3. Проведены испытания комплекса в натурных условиях на ВЛ «Менделеево – Эра» ПАО «Россети Московский Регион» в течение более 400 дней. В результате испытаний удалось снять около 200000 осциллограмм в разных погодных условиях на гирляндах с разной степенью загрязнения. Опыт организации автономных измерений токов утечки в гирляндах использовался для повышения качества измерителей.

4. Гармоническая и импульсная составляющие тока утечки имеют резко переменный характер и колеблются в диапазоне 85–270 мкА и 0–361 мА соответственно. Выявлены незначительная зависимость тока утечки от относительной влажности воздуха и отсутствие зависимости от температуры воздуха, направления ветра и скорости ветра, времени года и суток. Единственный фактор, корреляция которого с током утечки была выявлена, это интенсивность осадков. Зависимость тока утечки от интенсивности осадков растет с ростом загрязненности гирлянд.

5. Измерения тока утечки позволили выявить среднегодовые потери электроэнергии в гирлянде и получить рекомендации по замене гирлянд по критерию потерь электроэнергии.

6. В ходе лабораторных испытаний демонтированных изоляторов выявлено, что в процессе эксплуатации гирлянда не увлажнялась настолько сильно, как в лаборатории (условия рособразования на поверхности с подтеками капель). Минимальные расчетные выдерживаемые напряжения на гирляндах в эксплуатации и в лаборатории составили 388 кВ и 274 кВ соответственно, что значительно выше опасного и критического уровней. Вероятность перекрытия гирлянд на опоре № 31 ВЛ 110 кВ «Менделеево – Эра» в результате увлажнения накопленных загрязнений близка к нулю.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Титов Д.Е., Грязина Е.А., Пономарев Е.Ю., Лукичева И.А., Цитрин П.В.** Сценарная диагностика состояния воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. Т. 76, № 1. С. 92–101.
- [2] **Alvarez-Alvarado M.S., Donaldson D.L., Recalde A.A., Noriega H.H., Khan Z.A., Velasquez W.** Power system reliability and maintenance evolution: A critical review and future perspectives // IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 51922–51950. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3172697
- [3] **Mirhosseini M., Keynia F.** Asset management and maintenance programming for power distribution systems: A review // IET Generation, Transmission & Distribution. 2021. Vol. 15, No. 16. Pp. 2287–2297. DOI: 10.1049/gtd2.12177
- [4] **O'Reilley C., King T. et al.** Electricity transmission system research and development: Hardware and components // Transmission Innovation Symposium: Modernizing the U.S. Electrical Grid. 2021. Pp. 54–55.
- [5] Insulator pollution monitoring. CIGRE, 1994.
- [6] **Liu Y., Du B.X., Farzaneh M.** Self-normalizing multivariate analysis of polymer insulator leakage current under severe fog conditions // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, No. 3. Pp. 1279–1286. DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2650214
- [7] **Dey U., Chandra M., Das S.** Insulator contamination diagnosis using unsupervised machine learning // 2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET). 2022. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/INCET54531.2022.9825221
- [8] **Титов Д.Е., Волхов К.В., Кудрявцев А.А., Котолитцев В.В., Петренко С.А.** К вопросу диагностики линейной изоляции // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. Т. 45, № 6. С. 10–16.
- [9] **Петренко С.А., Титов Д.Е.** Устройство (варианты) и способ определения состояния изолирующих подвесок. Пат. RU 2620021 С1 Российская Федерация. МПК G01R 31/12(2006.01); заявитель и патентообладатель ООО «МИГ». № 2015156834, 2015.12.29; заявл. 29.12.2015; опубл. 22.05.2017.
- [10] **Глухов Д.А., Титов Д.Е., Волхов К.В., Кудрявцев А.А.** Результаты испытаний системы диагностики линейной изоляции по току утечки // IX Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи». 2018. С. 2–4.
- [11] **Volkhov K.V., Titov D.E.** Diagnostics of overhead line insulator state based on leakage current regression analysis // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2023. Pp. 45–51. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139219
- [12] **Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А.** Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой. Ленинград: Энергия, 1973. 159 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОЛХОВ Клим Вячеславович — инженер, Сколковский институт науки и технологий, без степени.

E-mail: K.Volkhov@skoltech.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5525-4608>

ТИТОВ Дмитрий Евгеньевич — профессор, Сколковский институт науки и технологий, канд. техн. наук.

E-mail: D.Titov@skoltech.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1755-6895>

КУДРЯВЦЕВ Андрей Александрович — главный инженер, ООО «Экспертный центр», без степени.

E-mail: chief_engineer@exctr.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4790-5075>

ТКАЧУК Яков Васильевич — директор департамента эксплуатации сетей 35–500 кВ, ПАО «Россети Московский Регион», без степени.
E-mail: TkachukYV@rossetimr.ru

REFERENCES

- [1] **D.E. Titov, E.A. Gryazina, E.U. Ponomarev, I.A. Lukicheva, P.V. Tsitrin**, Scenario diagnosis of overhead transmission lines, *Electric Power. Transmission and Distribution*, 1 (76) (2023) 92–101.
- [2] **M.S. Alvarez-Alvarado, D.L. Donaldson, A.A. Recalde, H.H. Noriega, Z.A. Khan, W. Velasquez**, Power system reliability and maintenance evolution: A critical review and future perspectives, *IEEE Access*, 10 (2022) 51922–51950. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3172697
- [3] **M. Mirhosseini, F. Keynia**, Asset management and maintenance programming for power distribution systems: A review, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 15 (16) (2021) 2287–2297. DOI: 10.1049/gtd2.12177
- [4] **C. O'Reilley, T. King et al.**, Electricity transmission system research and development: Hardware and components, *Transmission Innovation Symposium: Modernizing the U.S. Electrical Grid* (2021) 54–55.
- [5] Insulator pollution monitoring. CIGRE, 1994.
- [6] **Y. Liu, B.X. Du, M. Farzaneh**, Self-normalizing multivariate analysis of polymer insulator leakage current under severe fog conditions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32 (3) (2017) 1279–1286. DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2650214
- [7] **U. Dey, M. Chandra, S. Das**, Insulator contamination diagnosis using unsupervised machine learning, 2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET), (2022) 1–6. DOI: 10.1109/INCET54531.2022.9825221
- [8] **D.E. Titov, K.V. Volkhov, A.A. Kudriavtsev, V.V. Kotolivtsev, S.A. Petrenko**, K voprosu diagnostiki linejnoj izoliatsii [On the issue of diagnostics of linear insulation], *Electric Power. Transmission and Distribution*, 6 (45) (2017) 10–16.
- [9] **S.A. Petrenko, D.E. Titov**, Device (versions) and procedure for determination of condition insulator sets, Russian Federation Patent, No. RU 2620021 C1 (2017).
- [10] **D.A. Glukhov, D.E. Titov, K.V. Volkhov, A.A. Kudriavtsev**, Rezul'taty ispytanij sistemy diagnostiki linejnoj izoliatsii po toku utechki [Results of testing the system for diagnostics of linear insulation by leakage current] // IX Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaja konferentsiia “Elektroenergetika glazami molodezhi” [IX International Scientific and Technical Conference “Electric Power Engineering through the Eyes of Youth”], (2018) 2–4.
- [11] **K.V. Volkhov, D.E. Titov**, Diagnostics of overhead line insulator state based on leakage current regression analysis, 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), (2023) 45–51. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139219
- [12] **S.D. Merkhalev, E.A. Solomonik**, Izoliatsiia linii i podstantsii v raionakh s zagriaznennoi atmosferoi [Insulation of lines and substations in areas with polluted atmosphere]. Leningrad: Energiia, 1973. 159 p.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Klim V. VOLKHOV — *Skolkovo Institute of Science and Technology*.
E-mail: K.Volkhov@skoltech.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5525-4608>

Dmitry E. TITOV — *Skolkovo Institute of Science and Technology*.
E-mail: D.Titov@skoltech.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1755-6895>

Andrey A. KUDRYAVTSEV – LLC “Expert Center”.

E-mail: chief_engineer@exctr.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4790-5075>

Yakov V. TKACHUK – PJSC “Rosseti Moscow Region”.

E-mail: TkachukYV@rossetimr.ru

Поступила: 12.10.2024; Одобрена: 12.01.2025; Принята: 13.01.2025.

Submitted: 12.10.2024; Approved: 12.01.2025; Accepted: 13.01.2025.