

УДК 004.3

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ПРОВОДОВ (ОБЗОР)

© 2021 г. М. Ф. Садыков¹, Д. А. Ярославский¹, М. П. Горячев¹ *, Ван Ву Нгуен¹, Н. К. Андреев¹, Д. А. Иванов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Казанский государственный энергетический университет”, Казань, Россия

*E-mail: goryachev91@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Проанализированы наиболее распространенные способы оценки состояния воздушных линий электропередачи. Рассмотрены три метода основанные на анализе механических параметров проводов. Указанные методы применяются в системе автоматизированного мониторинга гололедообразования и используют такие параметры, как углы наклона и вращения провода и период его колебаний.

DOI: 10.31857/S0367676521110326

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетические системы должны обеспечивать надежную и бесперебойную работу потребителей электроэнергии. Одним из самых протяженных элементов электроэнергетических систем являются воздушные линии электропередачи (ВЛ). Именно по ним осуществляется передача электрической энергии от электростанций до потребителей.

При повреждении ВЛ прекращается подача электрической энергии потребителям. Причинами возникновения аварийных ситуаций ВЛ могут являться: появление гололедно-изморозевых отложений (ГИО) [1]; обрыв проводов; повреждение проводов либо иных элементов ВЛ при перетяжках проводов между пролетами и междуфазных коротких замыканиях.

Контроль состояния ВЛ затруднен их большой протяженностью и ограниченностью доступа к определенным участкам ВЛ, ввиду труднодоступности территории либо погодных ограничений. В связи с этим, необходимо применение систем мониторинга состояния ВЛ, которые могли бы непрерывно информировать о текущем состоянии объекта контроля. Каждая система контроля включает в себя методы оценки состояния ВЛ.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ОБСЛЕДОВАНИЮ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В качестве основных параметров контроля состояния ВЛ могут быть выбраны стрела провеса

провода в пролете [2], собственные механические нагрузки в проводе ВЛ и дополнительная нагрузка от гололедно-изморозевых отложений.

Тремя основными подходами к контролю ВЛ являются визуальный осмотр, применение беспилотных летательных аппаратов и использование стационарных систем мониторинга состояния ВЛ. Сравнительные характеристики подходов и используемых ими методов контроля состояния ВЛ приведены в табл. 1.

Проведенный анализ показал, что наиболее оптимальным решением для мониторинга состояния ВЛ является установка диагностических устройств стационарных систем непосредственно на провод ВЛ. При этом, наиболее подходящим методом является инклинометрический. При его использовании устройства контроля устанавливаются непосредственно на провод и можно контролировать состояние ВЛ в каждом пролете.

В рамках исследования и развития данного направления разработано устройство контроля [3].

ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ ПРОВОДА

В инклинометрическом методе провод ВЛ рассматривается в рамках модели абсолютно гибкого провода [4]. На рис. 1 показан провод в пролете указанием основных параметров. В качестве ос-

Таблица 1. Сравнительные характеристики подходов и используемых ими методов контроля состояния ВЛ

Название подхода к контролю	Применяемые методы	Ссылки на литературу	Достоинства и недостатки
Визуальный осмотр	Визуальный осмотр состояния ВЛ оперативно-выездной бригадой	[5]	Достоинства: простота. Недостатки: большие временные затраты; некоторые участки ВЛ недоступны для контроля
Обследование с помощью БПЛА	Фотограмметрия/лазерное сканирование	[5–7]	Достоинства: высокая точность определения геометрических параметров ВЛ Недостатки: данные о состоянии ВЛ не в режиме реального времени; зависимость от погодных условий и сигнала навигационной системы
Применение стационарных систем мониторинга состояния ВЛ	Оптический (видеосъемка элементов ВЛ и регистрация изменений параметров ВЛ по изменению положения визуальной метки)	[8]	Достоинства: простота реализации. Недостатки: необходимость защиты видеокамеры и визуальной метки от внешних воздействий; должна обеспечиваться достаточная видимость
	Емкостной (определяется емкость установленного на проводе датчика, которая изменяется при появлении посторонних отложений на проводе)	[9]	Достоинства: регистрирует толщину ГИО. Недостатки: толщина ГИО определяется только рядом с датчиком, что не позволяет оценить испытываемые проводом механические нагрузки
	Механический (использование динамометрических устройств для оценки силы тяжения провода)	[10, 11]	Достоинства: прямое определение силы тяжения провода ВЛ. Недостатки: недостаточная надежность; значительная погрешность при ветровых нагрузках; нет возможности фиксировать начало гололедообразования; необходима предварительная настройка тензодатчиков
	Локационный (подача импульсного сигнала в обследуемую ВЛ и последующий анализ его распространения по проводу)	[12, 13]	Достоинства: позволяет определять участки ВЛ с ГИО; не требуется установка диагностического оборудования на протяжении всего обследуемого участка ВЛ. Недостатки: небольшое по толщине ГИО на ВЛ большой длины неотличимо от значительных ГИО на ее отдельных участках; изменение радиолокационного сигнала в проводе зависит от погодных условий
	Термодинамический (определяются условия возникновения ГИО по данным о температуре провода, температуре и влажности воздуха)	[14, 15]	Достоинства: позволяет определять условия возникновения ГИО [6], а также интенсивность их образования и максимально возможную массу. Недостатки: требуются данные о точках росы и точках десублимации для конкретной территории
	Инклинометрический (восстановление по углу наклона датчика на проводе и параметрам пролета геометрии провода ВЛ)	[16]	Достоинства: высокая надежность и стабильность проводимых измерений; при известной температуре можно определять механические нагрузки провода. Недостатки: существенная погрешность определения геометрии провода в пролете при его перетяжке между соседними пролетами

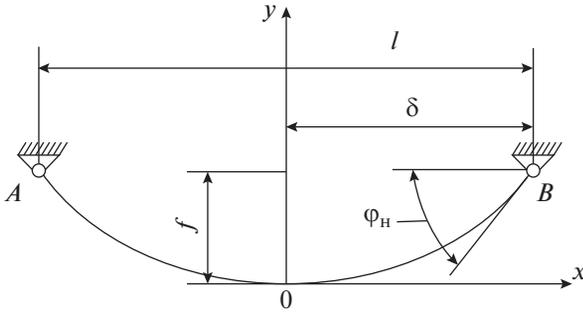


Рис. 1. Модель гибкого провода, подвешенного в точках A и B , с обозначениями основных геометрических параметров: l – длина пролета; f – стрела провеса; δ – расстояние от точки подвеса до нижней точки провода, φ_n – угол наклона устройства контроля, расположенного вблизи точки подвеса провода.

нового параметра оценки состояния провода ВЛ принимается сила тяжения провода.

Для упрощения расчетов вводится переменная u вместо переменной φ_n вычисляется по следующей формуле:

$$u = \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_n}{2} \right), \quad (1)$$

где φ_n – угол наклона устройства контроля, расположенного рядом с точкой подвеса провода, град.

Если точки подвеса A и B находятся на одном уровне, то длина нерастянутого провода при текущей температуре вычисляется следующим образом:

$$L_0 = \frac{-u \pm \sqrt{2\alpha^* l q_0 \operatorname{sh}(u) + u^2}}{\alpha^* q_0}, \quad (2)$$

где α^* – удельное относительное удлинение провода, H^{-1} ; l – длина пролета ВЛ, м; q_0 – удельная сила тяжести единицы длины еще нерастянутого провода, $\text{H}/\text{м}$.

При возникновении условий для возникновения ГИО длина L_0 :

$$L_0 = L_{0T} (1 + \beta(T - T_0)), \quad (3)$$

где β – температурный коэффициент линейного удлинения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; L_{0T} – длина провода при температуре изготовления, м; T – текущая температура

провода, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – температура изготовления провода, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент a определяется по следующей формуле:

$$a = \frac{L_0}{2 \operatorname{sh}(u)}. \quad (4)$$

Погонная масса провода с ГИО:

$$q = \frac{\left(\frac{l}{a} - 2u \right)}{\alpha^* L_0}. \quad (5)$$

Сила тяжения провода определяется, исходя из формулы:

$$F = a q c h(u). \quad (6)$$

Для каждой марки провода определена своя предельно допустимая сила тяжения, не приводящая к пластическим деформациям провода [18]. Путем сравнения текущей силы тяжения провода с предельно допустимой можно оценить уровень испытываемых им механических нагрузок в пролете.

УЛУЧШЕННЫЙ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ, УЧИТЫВАЮЩИЙ УГОЛ ВРАЩЕНИЯ ПРОВОДА

Провода ВЛ имеют многопроволочную структуру и могут рассматриваться в качестве каната с большой гибкостью. После скрутки каждая проволока, кроме центральной, располагается по винтовой линии. В результате, при растяжении провода и креплении одного из его концов к анкерной опоре через гирлянду изоляторов наблюдается его вращение вокруг своей оси. В результате этого становится возможным практически напрямую переходить от угла вращения провода к силе его тяжения. Особенно явно данный эффект наблюдается у проводов с одним слоем свивки вокруг центральной проволоки.

При свободном растяжении свойственном пролетам ВЛ с одной анкерной опорой удлинение бесконечно малого отрезка в любой точке пропорционально угловой деформации того же отрезка. В таком случае сила тяжения провода вычисляется по следующей формуле [19]:

$$F = \frac{l + L_{0T} \operatorname{ch}(u) - \sqrt{(l + L_{0T} \operatorname{ch}(u))^2 - 8L_{0T} (\varphi_{к1} - \varphi_{к0}) \frac{B}{C}}}{2\alpha^* L_{0T}} \operatorname{ch}(u), \quad (7)$$

где B – жесткость провода на кручение, $\text{H} \cdot \text{м}^2$; C – коэффициент жесткости провода (коэффициент влияния), $\text{H} \cdot \text{м}$; $\varphi_{к1}$ – угол поворота провода во-

круг своей оси при текущих условиях, град; $\varphi_{к0}$ – угол поворота провода вокруг своей оси при начальных условиях, град.

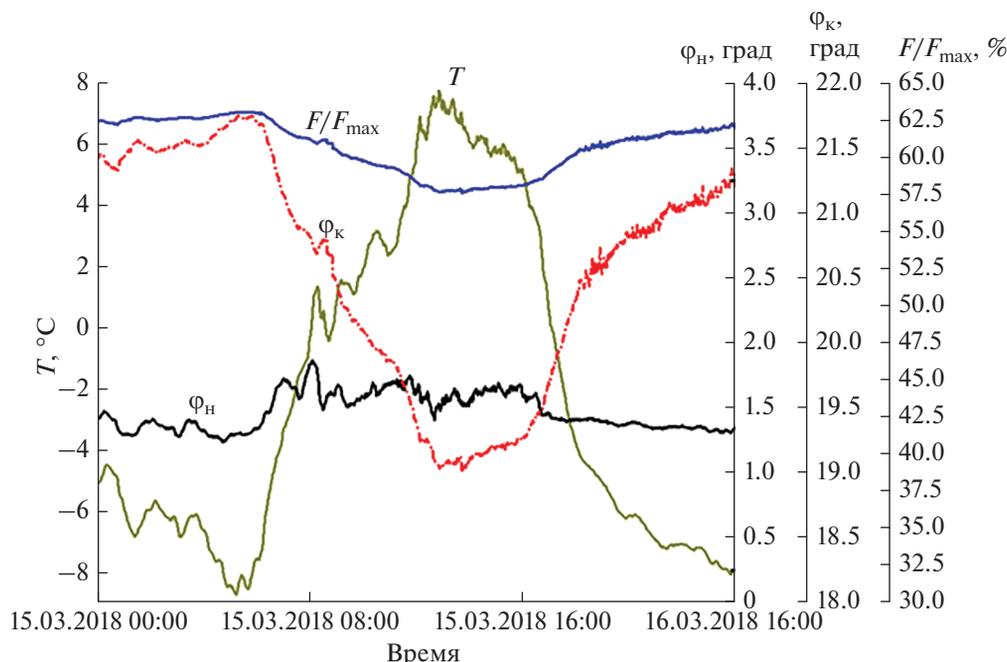


Рис. 2. Диаграмма с описанием процесса изменения параметров провода в пролете № 10 с одной анкерной опорой с течением времени при отсутствии ГИО: T – температура провода; φ_n – угол наклона провода; φ_k – угол кручения провода; F/F_{\max} – отношение силы тяжения провода с учетом угла его вращения к допустимой силе тяжения данного провода.

Диаграмма с описанием процесса изменения параметров провода в пролете № 10 с одной анкерной опорой с течением времени при отсутствии ГИО представлена на рис. 2 [20]. Провод в пролете № 10 с анкерной опорой длиной 31 м имеет значительную силу тяжения, о чем свидетельствует изолятор со стороны проходной опоры, перетянутый и смещенный внутрь пролета. Данные получены с реального устройства контроля, установленного на ВЛ. На представленной диаграмме наблюдается изменение геометрии провода при изменении его температуры. При этом угол кручения изменяется под действием изменения сил тяжения в проводе, а угол наклона провода практически не изменялся. Таким образом, применение улучшенного инклинометрического метода в данном случае более предпочтительно.

Таким образом, улучшенный инклинометрический метод, учитывающий угол вращения провода, позволяет определять силу тяжения провода даже в случаях наличия его перетяжки между соседними пролетами [20].

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРЕЛЫ ПРОВЕСА ПРОВОДА ПО ПЕРИОДУ ЕГО СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Рассмотренные выше два разработанных метода обладают рядом недостатков. Инклиномет-

рический метод на основе гиперболических уравнений позволяет определять силу тяжения провода при его перетяжке между пролетами только при наличии устройств контроля в смежных соседних пролетах ВЛ. Улучшенный инклинометрический метод, чувствительный к вращению провода вокруг своей оси, учитывает наличие перетяжки провода между соседними пролетами даже при отсутствии устройств контроля в соседних смежных пролетах. Однако второй разработанный метод может быть применен только в пролетах с одной анкерной опорой и с проводами с одним слоем навивки относительно центральной жилы (например, А-70, АС-70/11).

В связи с этим, было принято решение разработать метод контроля состояния ВЛ, в котором были бы устранены недостатки предыдущих методов.

Определение механических нагрузок провода можно осуществить по его геометрии и температуре. Для восстановления его геометрии необходимо знать габариты пролета ВЛ и стрелу провеса провода.

Под действием внешних возмущающих сил провод ВЛ совершает вынужденные колебания. В проводе могут возникать колебания разных видов. Одним из видов таких колебаний являются маятниковые колебания [21]. Маятниковые колебания являются низкочастотными и требуют незначительной энергии для своего поддержания. В

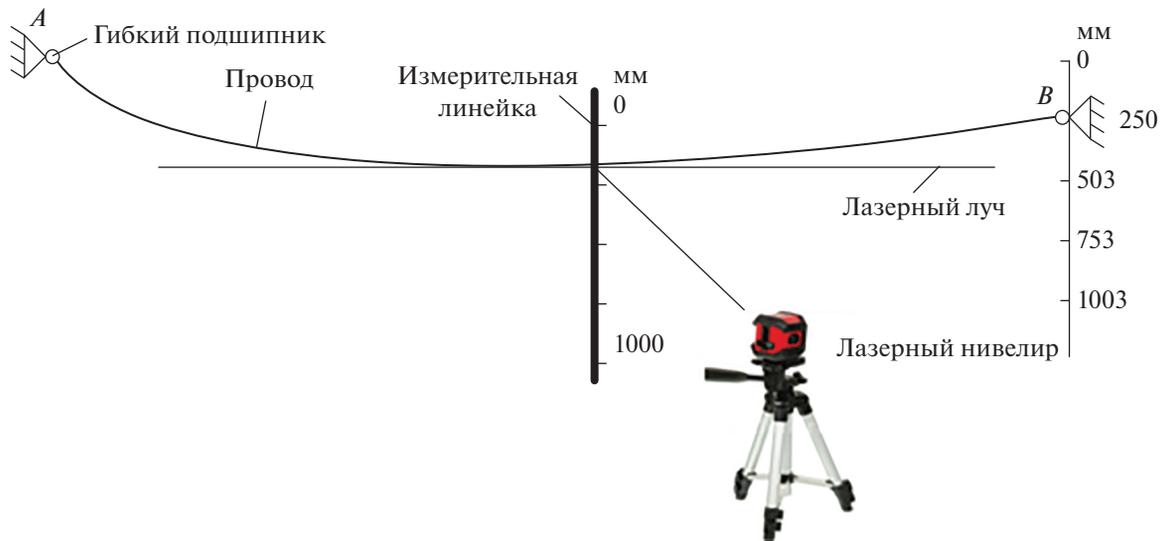


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний при разнице высот $h = 250$ мм.

качестве возмущающих сил может выступать движение воздушных масс, от самого незначительного движения конвекционных потоков до сильного ветра. Некоторые авторы отмечают, что колебания также вызывают температурные колебания провода [22] либо электромагнитные взаимодействия проводов между собой или с магнитным полем земли. Натянутый между опорами провод подобен струне музыкального инструмента: не имеет значения как возбуждать колебания в струне, струна после кратковременного вынужденного колебания продолжит колебаться на собственной резонансной частоте, иные колебания быстро затухнут. Аналогично и провод под действием квазислучайных слабосвязанных возмущающих воздействий будет иметь сложный гармонический состав и характер колебаний, но собственная частота маятниковых колебаний будет иметь максимальную амплитуду по вышеописанным причинам [23]. Поэтому эту частоту можно легко выделить путем спектрального анализа и провести вычисление стрелы провеса по разработанной модели.

При определении стрелы провеса провода по периоду его колебаний провод в пролете рассматривается как абсолютно жесткая изотропная конструкция. Данная конструкция обладает одной вращательной степенью свободы относительно оси, соединяющей точки подвеса провода. Провод в пролете в данном случае представляет собой физический маятник.

В ходе проведенных исследований была выведена следующая зависимость между периодом (τ , с)

собственных колебаний провода и стрелой его провеса [24, 25]:

$$f = \frac{5g\tau^2}{16\pi^2} \approx 0.31\tau^2, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Данная модель определения стрелы провеса провода была апробирована на лабораторной установке (рис. 3).

Для измерения расстояний, например, стрелы провеса, используется линейка длиной 1000 мм (минимальный шаг измерения длины – 0.5 мм). Для увеличения точности определения стрелы провеса применяется лазерный нивелир BOSCH PCL 20 SET, с помощью которого на стену проецируются горизонтальные и вертикальные лазерные лучи. Применение лазерного нивелира позволяет проецировать положение точки подвеса В и нижней точки провода на линейку. Это позволяет определять параметры h, f . В ходе эксперимента разность высот изменяется от 0 до 1.003 м. Стрела провеса провода в эксперименте вычисляется в соответствии с выражением (8).

Результаты проведения лабораторного эксперимента приведены на рис. 4. По оси абсцисс откладываются экспериментальные значения стрелы провеса провода ($f_{\text{эксп}}$, м), по оси ординат значения периодов собственных колебаний провода ($\tau_{\text{расч}}$ – периоды, рассчитываемые по формуле (8) для значений $f_{\text{эксп}}$; $\tau_{0.753\text{эксп}}$ – периоды, получаемые экспериментально, при $h = 0.753$ м; $\tau_{1.003\text{эксп}}$ – получаемые экспериментально периоды при $h = 1.003$ м).

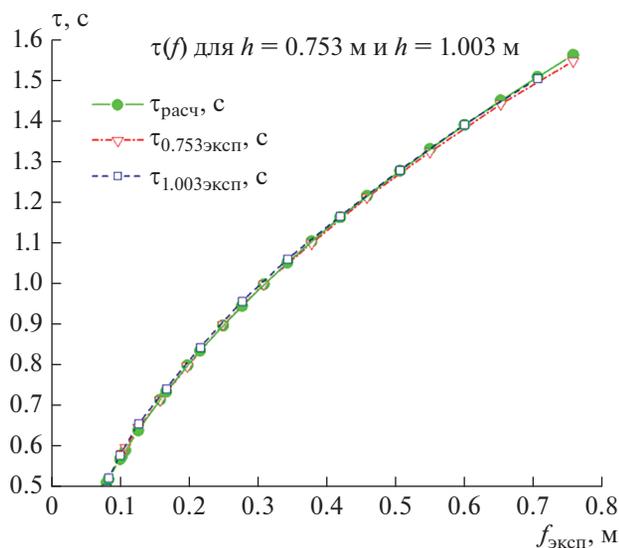


Рис. 4. Зависимости периода собственных гармонических колебаний провода от стрелы его провеса при разности высот точек подвеса провода $h = 0.753$ м и $h = 1.003$ м. По оси абсцисс откладываются экспериментальные значения стрелы провеса провода ($f_{\text{эксп}}$, м), по оси ординат значения периодов собственных колебаний провода ($\tau_{\text{расч}}$ — периоды, рассчитываемые по формуле (8) для значений $f_{\text{эксп}}$; $\tau_{0,753\text{эксп}}$ — периоды, получаемые экспериментально, при $h = 0.753$ м; $\tau_{1,003\text{эксп}}$ — получаемые экспериментально периоды при $h = 1.003$ м).

Таким образом, метод определения стрелы провеса провода по периоду его собственных колебаний может быть применен при перетяжке провода между соседними смежными пролетами независимо от марки провода и типа опор в пролете.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обследовании состояния ВЛ оптимальным решением является применение стационарных систем мониторинга. Для интерпретации данных был сделан выбор в пользу следующих трех методов: инклинометрического метода на основе гиперболических уравнений, инклинометрического метода с учетом угла вращения провода вокруг своей оси и метода определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний.

Инклинометрический метод на основе гиперболических уравнений используется наиболее широко, так как позволяет определять механические нагрузки на провод независимо от типа опор и провода в пролете. Однако, данный метод не позволяет учитывать перетяжку провода в пролете при отсутствии устройств контроля в соседних смежных пролетах.

Инклинометрический метод с учетом угла вращения провода вокруг своей оси, в отличие от инклинометрического метода на основе гиперболических уравнений, учитывает влияние смещения точек подвеса провода в пролете. Однако, учитывающий угол вращения провода улучшенный инклинометрический метод применяется только в пролетах с одной анкерной опорой и с проводами с одним слоем навивки относительно центральной жилы (например, А-70, АС-70/11).

Метод определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний позволяет упростить расчеты геометрии провода в пролете, так как для расчета стрелы провеса провода достаточно знать только период его собственных колебаний. Данный метод может быть использован в любом пролете при любой марке провода и учитывает перетяжку провода между соседними пролетами, так как стрела провеса провода ВЛ определяется через период колебаний провода и не зависит от расстояния между его точками подвеса.

Погрешность определения силы тяжения провода по разработанным методикам не превышает 5%.

Разработанные методы [17, 19, 23, 24] применяются в зависимости от условий мониторинга, повышают надежность и достоверность мониторинга состояния ВЛ, дополняя друг друга. Представленные три метода контроля состояния ВЛ используются в системе автоматизированного мониторинга гололедообразования в распределительных сетях ПАО «Татнефть» [26].

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (номер темы 075-00063-20-02).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Луговой В.А., Тимашова Л.В., Черешнюк С.В.* // Энергия един. сети. 2014. № 3. С. 30.
2. *Андреевский В.Н., Голованов А.Т., Зеличенко А.С.* Эксплуатация воздушных линий электропередачи. М.: Энергия, 1976. 616 с.
3. *Кабашов В.Ю.* // Символ науки. 2017. Т. 2. № 2. С. 60.
4. *Барбасов В.К., Разумовский А.А.* // Геопрофи. 2017. № 3. С. 39.
5. *Митин М. Д., Никольский Д.Б.* // Геоматика. 2013. № 4. С. 27.
6. *Грядунов Д.А., Барков Р.Р.* // Вести в электроэнергетике. 2017. Т. 91. № 5. С. 64.

7. Шилин А.Н., Дементьев С.С. // Изв. вузов. Приборостр. 2018. Т. 61. № 6. С. 490.
8. Кучеряевков А.А., Рукавицын А.А., Феоктистов А.В. Устройство и способ определения толщины ледяных отложений на проводе. Патент РФ № 2614988 С1, кл. H02G 7/16. 2017.
9. Самарин А.В., Рыгалин Д.Б., Шкляев А.А. // Естеств. и техн. науки. 2012. № 1. С. 2.
10. Засыпкин А.С., Шуров А.Н., Тетерин А.Д. // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. техн. науки. 2018. № 2. С. 48.
11. Писковацкий Ю.В., Губаев Д.Ф. // Изв. вузов. Пробл. энергетики. 2015. №. 3–4. С.138.
12. Дьяков А.Ф., Засыпкин А.С., Левченко И.В. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. Изд: РП “Южэнерго-технадзор”, 2000. С. 284.
13. Трубицин М.А., Лукашевич О.Г. // Инж. вестн. Дона. 2017. Т. 47. № 4. С. 47.
14. Титов Д.Е. Мониторинг интенсивности гололедообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2014. 150 с.
15. Otto T., Kurth S., Voigt S. et al. // Sens. Mater. 2018. V. 30. No. 4. P. 767.
16. Садыков М.Ф., Горячев М.П., Ярославский Д.А. и др. Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи. Патент РФ № 185311 U1, кл. H02J 13/00, G01R 31/02. 2018.
17. Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F., Ivanov D.A. et al. // ARPN J. Eng. Appl. Sci. 2017. V. 12. No. 22. P. 6479.
18. ПУЭ. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2015г. М.: КНОРУС. 2015. С. 195.
19. Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A. et al. // Proc. of the Smart Energy Systems 2019. V. 124. (Kazan, 2019). P. 1.
20. Горячев М.П. Система автоматизированного мониторинга силы тяжения провода воздушных линий электропередачи по параметрам кручения и провеса. Дис. ... канд. техн. наук. Казань: КГЭУ, 2019. 130 с.
21. Кабашов В.Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий электропередачи 10 (6) кВ в условиях воздействия ветровых и гололедных нагрузок. Дис. ... докт. техн. наук. Москва: МГАУ, 2011. 353 с.
22. Ланда П.С. // Изв. вузов. Прикл. нелинейн. динам. 2009. Т. 17. № 2. С. 3.
23. Прохоров А.М. (гл. ред.) Физическая энциклопедия. Т. 5. Стробоскопические приборы – Яркость. М.: Сов. энциклопедия, 1998. С. 10.
24. Ярославский Д.А., Нгуен В.В., Садыков М.Ф. и др. // Изв. вузов. Пробл. энергетики. 2020. Т. 22. № 3. С. 97.
25. Yaroslavsky D.A., Nguyen V.V., Sadykov M.F. et al. // IJETER. 2020. V. 8. No. 6. P. 2663.
26. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Иванов Д.А. и др. // Нефт. хоз. 2020. № 7. С. 53.

Analysis of modern methods for assessing air power lines by mechanical parameters of wires (a review)

**M. F. Sadykov^a, D. A. Yaroslavsky^a, M. P. Goryachev^{a,*}, Van Vu Nguyen^a,
N. K. Andreev^a, D. A. Ivanov^a**

^aKazan State Power Engineering University, Kazan, 420066 Russia

*e-mail: goryachev91@mail.ru

The analysis of the most common methods for the inspection of air power transmission lines has been carried out. The developed methods based on mechanical parameters of conductors are considered. These methods are used in the automated monitoring system for ice formation and use such parameters as the angles of inclination and rotation of the conductor and the period of its oscillations.