



МОДЕЛЬ СОБСТВЕННЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДА ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Д.А. Ярославский, В.В. Нгуен, М.Ф. Садыков, М.П. Горячев, А.А. Наумов

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия
goryachev91@mail.ru

Резюме: В статье обосновывается актуальность обследования воздушных линий электропередач путем определения механических нагрузок проводов. Провод под действием сил, вызванных давлением ветра, раскачивается и ведет себя в пролете как маятник. Инклинометрическим методом можно определять колебания провода в пространстве с высокой точностью. Восстановив геометрию провода в пролете воздушной линии электропередачи, можно определить механические нагрузки. Для оценки механических нагрузок провода воздушной линии электропередачи выводится модель собственных гармонических колебаний провода в пролете. Математическая модель провода основана на математических моделях гибкой нити и физического маятника. Провод - физический маятник, где в качестве тела выступает провод, а в роли неподвижной оси вращения – прямая, проходящая через точки подвеса провода. Разработанная модель позволяет по периоду колебаний провода в пролете определять стрелу его провеса. В статье рассмотрены алгоритмы расчета стрелы провеса провода для двух случаев: точки подвеса провода находятся на одной высоте; точки подвеса провода находятся на различных высотах. Приводится теоретический расчет для модели пролета воздушной линии электропередачи с оценкой чувствительности разработанной модели и её погрешности при определении стрелы провеса провода. По стреле провеса провода можно восстановить его геометрию, а значит и механические нагрузки провода. Зная исходные геометрические параметры пролета воздушной линии и текущий период колебаний провода, можно проводить обследование ее текущего состояния.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, мониторинг воздушных линий, стрела провеса, колебания провода, механические нагрузки, провод.

Для цитирования: Ярославский Д.А., Нгуен В.В., Садыков М.Ф., Горячев М.П., Наумов А.А. Модель собственных гармонических колебаний провода для задач мониторинга состояния воздушных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3 С. 97-106. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106.

MODEL OF OWN HARMONIC CONDUCTOR OSCILLATIONS FOR TASKS OF MONITORING THE STATUS OF AIRLINE POWER TRANSMISSION LINES

DA. Yaroslavskiy, VV. Nguyen, MF. Sadykov, MP. Goryachev, AA. Naumov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
goryachev91@mail.ru

Abstract: The article substantiates the relevance of the inspection of overhead power lines by determining the mechanical loads of the conductors. The conductor sways under the action of external loads and variable internal mechanical loads. The conductor behaves in span like a pendulum. Using the inclinometric method, it is possible to determine the deviations of the conductor in space from its equilibrium position. Having restored the geometry of the conductor in the span of an overhead power line, mechanical loads can be determined. A model of the harmonic oscillations of the conductor in flight is derived to assess the mechanical loads of the conductor overhead power lines. This mathematical model is based on mathematical models of a flexible thread and a model of a physical pendulum. A conductor is a physical pendulum, where the conductor acts as the body, and in the role of the fixed axis of rotation, a straight line passing

through the suspension points of the conductor. The developed model allows you to determine the arrow of its sag from the period of oscillations of the conductor in the span. The article considers algorithms for calculating the conductor sag arrows for two cases: the conductor suspension points are at the same height; conductor suspension points are at different heights. A theoretical calculation is given for a model of a span overhead power line with an estimate of the sensitivity of the developed model and its error in determining the sag of the conductor. Using the arrow of the conductor sag, you can restore its geometry, and hence the mechanical load of the conductor. Therefore, knowing the initial geometric parameters of the span of the overhead power line and the current period of the conductor's oscillations, it is possible to examine its current state.

Keywords: *overhead power transmission lines, monitoring of power transmission lines, sag, conductor's oscillations, mechanical loads, conductor.*

For citation: Yaroslavskiy DA, Nguyen VV, Sadykov MF, Goryachev MP, Naumov AA. Model of own harmonic conductor oscillations for tasks of monitoring the status of airline power transmission lines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22 (3): 97-106. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106.

Введение

Рынки мировой энергетики в перспективе до 2035 года будут расти благодаря увеличению спроса на энергию в развивающихся странах (определяется процессами растущей индустриализации и урбанизации регионов Азии и Африки и ростом численности населения) [1].

Основным звеном при передаче электрической энергии от электростанций или подстанций к потребителю являются воздушные линии электропередачи (ВЛ). Протяжённость ВЛ в Российской Федерации составляет свыше 2,8 млн. км. Электросетевое хозяйство стремительно устаревает. Уровень износа оборудования достигает 70% [2]. Однако, в связи с ростом спроса на электроэнергию и вводом в строй новых участков ВЛ, повышается необходимость их полноценного обследования в целях повышения надежности их работы.

Конструктивные элементы ВЛ испытывают как горизонтальные (например, механические напряжения в натянутом проводе/тросе), так и вертикальные нагрузки (например, от собственного веса или от веса провода/троса). Провода и тросы являются элементами ВЛ, на которых в большей степени наблюдаются изменения механических нагрузок ввиду изменения силы натяжения провода/троса в зависимости от температуры и образования на нём гололёдно-изморозевых отложений [3], а также колебаний от порывов ветра.

Превышение механической нагрузкой предела прочности элемента ВЛ может привести к его повреждению: обрыв провода/троса, разрушение либо срыв изолятора, междуфазное короткое замыкание вследствие «пляски проводов» и др.

Механические нагрузки проводов ВЛ преимущественно оцениваются двумя методами: прямым определением (благодаря использованию тензометрических датчиков [4,5,6] либо косвенно (инклинометрические методы, основанные на определении угла наклона провода с помощью датчиков ускорения – акселерометров) [7,8,9,10]. Наряду с большим количеством достоинств, метод взвешивания обладает и рядом недостатков, а именно: необходимостью вносить изменения в линейную арматуру и высокой стоимостью [11]; отсутствием систем обнаружения для ВЛ напряжением 35 кВ и ниже. В свою очередь, инклинометрический метод надёжен, прост и не требует внесения изменений в конструкцию ВЛ, но обладает погрешностями измерения угла наклона датчика (акселерометра) и погрешностями, связанными с пересчётом угла наклона в силу натяжения провода [7,12].

Таким образом, необходима достаточно точная локализация проблемного участка ВЛ или дефекта, так как часто проезд вдоль воздушных линий электропередачи затруднён, а скорость устранения аварийной ситуации напрямую связана с понесёнными убытками. При этом, повышение качества обследования ВЛ должно сопровождаться минимальными финансовыми вложениями, то есть желательно использование аппаратной базы существующих систем мониторинга состояния ВЛ. Наиболее оптимальным вариантом является построение системы мониторинга на основе инклинометрического метода, сочетающего в себе надёжность, высокую точность определения углов отклонения датчика, а также простоту установки устройства контроля с набором датчиков на провод ВЛ.

Провод под действием сил, вызванных давлением ветра, раскачивается. Инклинометрическим методом можно определять отклонения провода в пространстве от его положения равновесия в плоскости качания с высокой точностью. Таким образом, провод в пролете ВЛ можно представить в качестве физического маятника и в дальнейшем использовать в разрабатываемой модели собственных гармонических колебаний провода.

Модель собственных гармонических колебаний провода в пролете (без учета различной высоты у точек подвеса провода)

Физический маятник – тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, не проходящей через центр тяжести тела. Провод ВЛ можно представить в качестве физического маятника, где в качестве тела выступает провод, а в роли неподвижной оси – прямая, проходящая через точки подвеса провода.

Представим провод в пролете как абсолютно жесткую монолитную изотропную конструкцию, имеющую только одну вращательную степень свободы, относительно оси, проходящей через точки подвеса (рис.1).

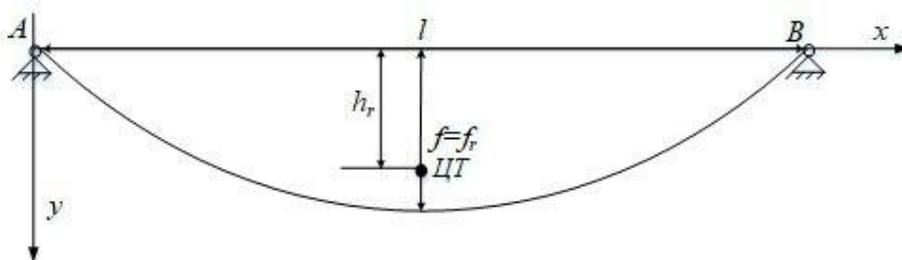


Рис. 1. Модель провода ВЛ, как физического маятника, с обозначением основных геометрических параметров при точках подвеса на одинаковой высоте: l – расстояние по горизонтали между двумя соседними точками подвеса (длина пролета), м; f – параметр разности высот между наивысшей точкой подвеса в пролете и низшей точкой провода в пролете (в данном случае равен стреле провеса провода f_r), м; h_r – расстояние от центра отрезка с вершинами в точках подвеса провода А и В до центра тяжести провода ВЛ, м.

В формулу для определения периода колебания физического маятника входят 4 параметра: g – ускорение свободного падения, h_r – расстояние между центром тяжести (ЦТ) и осью вращения, m – масса тела, I – момент инерции относительно оси, вокруг которой совершаются колебания:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgh_r}}$$

Момент инерции провода можно определить по следующей формуле:

$$I = \int_0^l y^2 dm,$$

где y – расстояние от оси вращения до бесконечно малого участка провода, м.

Расстояние от центра отрезка с вершинами в точках подвеса провода А и В до центра тяжести провода ВЛ по оси y :

$$h_r = \frac{1}{m} \int_0^l y dm,$$

где масса бесконечно малого элемента провода $dm = q ds$; q – погонная масса провода (кг);

ds – длина бесконечно малого элемента провода, м.

Длина бесконечно малого элемента провода при смещении вдоль горизонтальной оси на расстояние x [13]:

$$ds = \sqrt{1 + y'^2} dx, \tag{1}$$

где $|y'|$ – производная по оси x .

При малых углах провиса $|y'|$ будет мал по сравнению с единицей. Поэтому выражение 1 можно разложить в ряд и оставить только два первых члена:

$$ds = (1 + \frac{1}{2} y'^2) dx. \tag{2}$$

При отсутствии разницы высот опор ВЛ уравнение провода принимает следующий вид:

$$y = \frac{1}{a} \left(\frac{l}{2} x - \frac{x^2}{2} \right), \text{ где } a = \frac{l^2}{8f}, \quad (3)$$

где l – длина пролета, м; f – стрела провеса провода, м.

Определим расстояние от центра оси качания до центра качаний.

Тогда
$$L_k = \frac{I}{mh_r} = \frac{q \int_0^l y^2 \left(1 + \frac{y^2}{2} \right) dx}{q \int_0^l y \left(1 + \frac{y^2}{2} \right) dx},$$
 после подстановки выражения (3),

интегрирования и упрощения, при условии, что $l \gg f$, уравнение примет вид:

$$L_k = \frac{I}{mh_r} = \frac{4f(7l^2 + 8f^2)}{7(5l^2 + 8f^2)} \approx \frac{4f}{5}.$$

Тогда $T = 2\pi \sqrt{\frac{4f}{5g}}$, с Выражая стрелу провеса из периода, получим:

$$f = \frac{5gT^2}{16\pi^2} \approx 0,31T^2, \quad (4)$$

где T – период колебаний в секундах.

При углах колебания более 15° необходимо вносить поправку, чтобы погрешность определения f не превышала 0,5% [14].

$$f = \frac{5gT^2}{16\pi^2 \left(1 + \frac{1}{2^2} \sin^2 \frac{\theta_M}{2} + \frac{1}{2^2} \frac{3^2}{4^2} \sin^4 \frac{\theta_M}{2} + \dots \right)}, \quad (5)$$

где θ_M – максимальное угловое смещение провода (физического маятника).

Таким образом, разработанная модель собственных гармонических колебаний провода в пролете с точками подвеса на одной высоте позволяет определять стрелу провеса провода, исходя из данных по периоду колебаний провода. Для более точного определения стрелы провеса необходимы данные о максимальном угловом смещении провода в пролете.

Модель собственных гармонических колебаний провода в пролете, учитывающая разность высот

Представим провод в пролете как абсолютно жесткую монолитную изотропную конструкцию, имеющую только одну вращательную степень свободы, относительно оси проходящей через точки подвеса, находящиеся на различной высоте (рис.2).

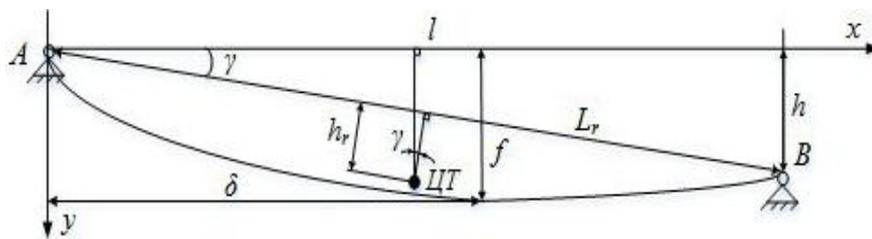


Рис. 2. Модель провода ВЛ, как физического маятника, с обозначением основных геометрических параметров при точках подвеса на различной высоте: L_r – расстояние между точками подвеса, м; l – длина пролета, м; f – параметр разности высот между наивысшей точкой подвеса и нижней точкой провода в пролете, м; h – разность высот точек подвеса, м; h_r – расстояние от центра отрезка с вершинами в точках подвеса провода А и В до центра тяжести провода ВЛ, м; δ – расстояние от точки подвеса до нижней точки провода, м; γ – острый угол между горизонтальной прямой и прямой, проходящей через точки подвеса провода, град.

Момент силы, действующий на провод относительно этой оси вращения, проходящей через точки подвеса А и В провода:

$$\tau = -mgh_r \cos \gamma \sin \theta.$$

где θ – угол отклонения провода от положения устойчивого равновесия в плоскости качания. На основании второго закона Ньютона;

$$\tau = I \frac{d^2\theta}{dt^2}.$$

При малых углах колебаний уравнение баланса системы имеет вид гармонического уравнения:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mgh_r \cos \gamma}{I} = 0.$$

Решением данного уравнения является:

$$\theta = \theta_M \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right),$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgh_r \cos \gamma}}.$$

Из рис.2 следует, что высота до центра тяжести равна:

$$h_r = (y_{cm} - x_{cm} \operatorname{tg} \gamma) \cos \gamma = y_{cm} \cos \gamma - x_{cm} \sin \gamma.$$

В интегральном виде

$$h_r = \frac{\cos \gamma}{m} \int_0^l y dm - \frac{\sin \gamma}{m} \int_0^l x dm,$$

$$dm = q ds, \tag{6}$$

где $ds = \sqrt{1 + y'^2} dx$.

Выражение приемлемо для ds определить в соответствии с выражением (2).

Момент инерции найдем как:

$$I = \int_0^l (y \cos \gamma - x \sin \gamma)^2 dm. \tag{7}$$

Расстояние от оси вращения до центра качаний приведенная к математическому маятнику (длина подвеса):

$$L_k = \frac{I}{mh \cos \gamma} = \frac{\int_0^l (y \cos \gamma - x \sin \gamma)^2 \left(1 + \frac{1}{2} y'^2\right) dx}{\cos \gamma \int_0^l (y \cos \gamma - x \sin \gamma) \left(1 + \frac{1}{2} y'^2\right) dx}. \tag{8}$$

В этом выражении учтены формулы 2,6,7 и то, что m и q сокращаются.

Уравнения параболического провиса [13].

$$y = \frac{1}{a} \left(\delta x - \frac{x^2}{2} \right), \quad y' = \frac{\delta - x}{a}, \quad \delta = \frac{l}{2} + \frac{h}{l} a. \tag{9}$$

При вычислении коэффициента a необходимо учитывать поправку, в соответствии с выражением 5, при углах колебания θ_M более 15° .

Подставим в 8 выражения 9 и учтем, что $\cos \gamma = \frac{l}{L_r}$, $\sin \gamma = \frac{h}{L_r}$, после интегрирования и серии упрощений найдем:

$$L_k = \frac{l^2 (l^4 + 56a^2 l^2) + 28a^2 h^2}{14a (l^4 + 40a^2 l^2 + 20a^2 h^2)}. \tag{10}$$

Расстояние от оси вращения до центра качаний можно найти, зная период колебаний:

$$L_k = \frac{gT^2}{4\pi^2}. \quad (11)$$

Решая (10) относительно a , заключаем, что оно имеет вид кубического уравнения с единственным действительным корнем.

Найдя коэффициент параболы a , из уравнений (9) можно вычислить параметр f , подставив вместо x величину δ :

$$f = \frac{\delta^2}{2a}.$$

Выражение (10) можно упростить, пренебрегая малыми членами $28a^2h^2$ и $20a^2h^2$:

$$L_k = \frac{l^2(l^2 + 56a^2)}{14a(l^2 + 40a^2)}, \quad (12)$$

что даст погрешность менее 0,1%, при условии, что $h < l/10$.

В соответствии с формулой (11) может быть определено расстояние от оси вращения до центра качаний. В соответствии с выражением (12) определяется параметр a . Используя параметр a , можно найти значение стрелы провеса провода. Из чего можно сделать вывод, что при $h \ll L$ центр качаний, а следовательно и период собственных колебаний не зависит от разности высот h , при прочих неизменных параметрах полета. Однако, следует учитывать и то, что параметр a зависит от параметра h .

Вертикальное расстояние от самой нижней точки кривой до оси вращения (стрела провеса провода для случая с точками подвеса, находящимися на различной высоте согласно ПУЭ [17]):

$$f_p = f - \delta \operatorname{tg} \alpha = f - \delta \frac{h}{l}.$$

Найдя координаты центра тяжести и проведя перпендикуляр на ось вращения через него, найдем расстояние, проходящее через центр тяжести от кривой (провода) до оси вращения. Оно же будет максимальным расстоянием между проводом и осью вращения провода. По ходу преобразований, пренебрегая малыми величинами, получим стрелу, эквивалентную стреле провеса без разницы высот:

$$f_3 = \frac{l^3}{8a\sqrt{l^2 + h^2}} \approx \frac{l^2}{8a}.$$

Следовательно, разрабатываемая модель собственных гармонических колебаний провода в полете позволяет учитывать разность высот между точками подвеса провода. При этом, есть возможность определения как параметра «стрела провеса провода», так и такого параметра, как «максимальное расстояние между проводом и его осью вращения». Параметр «максимальное расстояние между проводом и его осью вращения» позволяет оценить возможность возникновения схлестывания проводов на обследуемой ВЛ.

Численный пример расчета полета воздушной линии электропередачи в соответствии с моделью собственных гармонических колебаний провода

Произведем теоретический расчет для модели полета ВЛ с проводом марки А-70 в полете длиной 50 метров при изменении периода колебаний провода от 1,4 с до 2 с.

Стрелу провеса провода найдем по формуле 4 через период его колебаний. Результаты расчета приведены на рис.3.

Из диаграммы на рис.2 видно, что с увеличением периода колебаний провода увеличивается и стрела его провеса.

Чувствительность модели собственных гармонических колебаний провода в полете по параметру T может быть посчитана по следующей формуле [15].

$$S_T = \frac{df}{dT}.$$

Тогда чувствительность разработанной модели можно найти по следующей формуле:

$$S_T = \frac{5gT}{8\pi^2} \approx 0,62T.$$

Чувствительность разработанной методики при изменении периода колебаний провода от 1,4 с до 2 с сварьируется от 0,870 м/с до 1,243 м/с.

Погрешность определения стрелы провеса провода определяется в соответствии со следующей формулой:

$$\Delta f = \frac{df}{dT} \Delta T.$$

При измерении периода колебаний провода с частотой дискретизации 1000 Гц измерения угла качения провода будут проводиться каждую миллисекунду. Следовательно, погрешность определения стрелы провеса провода, вносимая измерениями для рассматриваемого здесь случая не превышает 0,0012 м, что составляет 0,097% от максимальной стрелы провеса в данном случае.

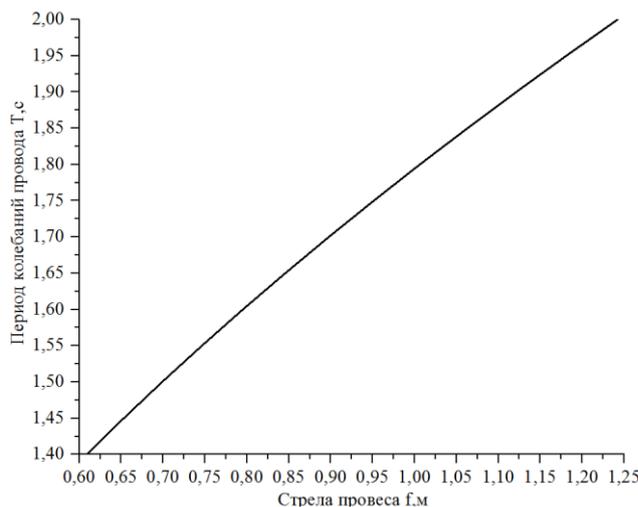


Рис.3. Связь стрелы провеса провода с периодом его колебаний

Результаты и обсуждение

Разработанная модель собственных гармонических колебаний провода позволяет определить стрелу провеса провода (наиболее важный параметр для определения текущих механических нагрузок на провод ВЛ [16]). При этом, благодаря измерению периода колебаний провода, стрела провеса определяется с высокой точностью (погрешность порядка 0,1% при одинаковой высоте точек подвеса). Кроме того, есть возможность определения максимального расстояния между проводом и его осью вращения, что позволяет оценить возможность схлестывания проводов на ВЛ.

Используя стрелу провеса, провода можно восстановить геометрию провода в пролете, т.е. его длину. Зная исходную силу натяжения провода и определяя его текущее удлинение можно оценить силу натяжения [8], под которой находится провод в текущих условиях. По силе натяжения можно оценить уровень опасности текущих механических нагрузок на обследуемой ВЛ. Следовательно, зная исходные геометрические параметры пролета ВЛ и текущий период колебаний провода, можно проводить обследование ее текущего состояния.

Заключение

Разработана модель собственных гармонических колебаний провода на основе математических моделей гибкой нити и модели физического маятника. Данная методика позволяет определять стрелу провеса провода по его колебаниям относительно своего равновесного положения. Причем, точность определения стрелы провеса зависит от частоты измерений положения провода в пространстве (увеличение частоты дискретизации измерений повышает точность определения стрелы провеса провода). От стрелы провеса провода можно перейти к определению механических нагрузок провода ВЛ, что позволяет оценивать их текущее состояние.

Однако, разработанная модель нуждается в экспериментальном подтверждении и на данный момент доказывается лишь теоретическая возможность определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний.

Кроме того, в дальнейшем потребуются оценка влияния на колебания провода ВЛ такого фактора внешней среды, как ветровое воздействие.

Модель собственных гармонических колебаний провода является результатом дальнейших исследований, изложенных в работах [17, 8]. Для разработки и практической реализации методики определения механических нагрузок проводов ВЛ на основе модели собственных гармонических колебаний провода предполагается использование разработанного ранее технического решения в виде измерительного устройства мониторинга механических параметров ВЛ [18].

Разработанная модель определения механических нагрузок проводов ВЛ планируется к апробации на системе СМГ-16, введённой в опытную эксплуатацию в ПАО «Татнефть».

Литература

1. План мероприятий («дорожная карта») «Энерджинет» Национальной технологической инициативы // Инновациив ТЭК проект Минэнерго России. Доступно по : URL: https://in.minenergo.gov.ru/energynet/docs/DK_energynet.pdf . Дата обращения: 28.02.2020.
2. Боков Г. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? // Новости Электротехники. 2002. №2(14).
3. Сацук Е.И. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях: дис. ... д-ра тех. наук // Новочеркасск, 2011. 314 с.
4. Макартичан С.В., Ким Д. С. Информационно -измерительная система контроля гололедных отложений на проводах ЛЭП // Энерго-и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2017. №. 2. С. 7-11.
5. Минуллин Р.Г. Современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №. 7-8. -С. 68-78.
6. Костиков И. Система мониторинга «САТ-1»-эффективная защита ВЛЭП от гололеда // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. №. 1-4. С. 32-35.
7. Макаров В.Г., ФедотовА. И, БасыровР. Ш., ВагаповГ. В.. Моделирование воздушной линии электропередачи в пакете Matlab/Simulink // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 13. С.93-96.
8. Ярославский Д.А., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., и др. Методика контроля ГИО на воздушных линиях электропередачи с учетом разрегулировки с использованием датчиков беспроводных каналов связи // Журнал технических и прикладных наук АИПС. 2017. Т. 12. -№ 22. С. 6479-6482.
9. Федотов А., Курт С., Войт С., Вагапов Г. Концепция системы обнаружения ледяных отложений на воздушных линиях электропередачи, теория и практические результаты // Материалы 9-го Международного научного симпозиума по электроэнергетике, Электроэнергетика 2017. С. 297-300.
10. Отто Т. Интегрированные микросистемы для интеллектуальных приложений // Датчики и материалы. 2018. Т. 30. №. 4. С. 767-778.
11. Засыпкин А.С., Щуров А.Н., Тетерин А.Д. Применение датчиков гололёдной нагрузки и датчиков продольного тяжения проводов Вл для оценки опасности гололёдной обстановки // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2018. №2 (198).
12. Петров В. С., Дубровская Т. И. Механический расчет проводов и тросов воздушных линий как основа расчета надежности конструкций // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. №. 6 (31). С.11-13.
13. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.
14. Джанколи Д. Физика: В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ.-М.: Мир, 1989.-656 с.
15. Андреев В.Я., Антонюк Е.М., Душин Е.М. Основы метрологии и электрические измерения / Е.М. Душина. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергомашиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 480 с.
16. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ // М., ОАО «ВНИИЭ». ПУЭ. изд. 7-е. Глава 2.5 . 2003.
17. Горячев М.П., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А. Способ контроля механических параметров воздушных линий электропередачи на основе улучшенной инклинометрии // Энергетика: исследования, оборудование, технологии. 2019. Т.21 (3). С. 160-171.
18. Садыков М.Ф., Горячев М.П, Ярославский Д.А. Иванов Д.А, Коряшкин И.М. Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи. Патент РФ №185311, 29.11.2018. // Патент России №2018120028.2018. Бюл. № 34.

Авторы публикации

Ярославский Данил Александрович – канд техн. наук, старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), Казанский государственный энергетический университет.

Садыков Марат Фердинантович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), Казанский государственный энергетический университет. E-mail: s-marik@yandex.ru, sadykov@kgeu.ru.

Горячев Михаил Петрович – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), Казанский государственный энергетический университет. E-mail: goryachev91@mail.ru.

Нгуен Ван Ву – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Наумов Анатолий Алексеевич – д-р физико-математических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Action PLAN ("road map") "Energinet" of the National technological initiative INNOVATIONS in the fuel and energy sector project of the Ministry of energy of Russia. Available at :URL: https://in.minenergo.gov.ru/energynet/docs/DK_energynet.pdf. Accessed to: 28 feb 2020.

2. Bokov G. *Technical re-equipment of Russian electric networks*. How much can it cost? *Electrical Engineering News*. 2002. №2(14).

3. Satsuk EI. *Software and technical means of monitoring overhead power transmission lines and power system management in extreme weather conditions*: dis. ... doctor of technical Sciences. Novocheboksary, 2011. 314 p.

4. Mortician SV, Kim DS. Information-measuring system of control of ice deposits on the wires of power lines. *Energy and resource saving: industry and transport*. 2017;2:7-11.

5. Minullin RG. Modern methods of detecting ice on overhead power lines part 1. Methods of forecasting and weighing wires. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2013;7-8:68-78.

6. Kostikov I. monitoring System "SAT-1" - effective protection of overhead lines from ice. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2011;1-4:32-35

7. Makarov VG, Fedotov AI, Basyrov RSh, et al. Modeling of an overhead power transmission line in the Matlab/Simulink package. *Bulletin of the Kazan technological University*. 2017;20(13):93-96.

8. Yaroslavsky DA, Sadykov MF, Ivanov DA, et al. Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. –2017;12(22):6479-6482.

9. Fedotov A, Kurth S, Voigt S, et al. Concept for an ice detection system on overhead power lines, theory and practical results. Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, *Elektroenergetika* 2017. pp. 297–300.

10. Otto T. Integrated Microsystems for Smart Applications. *Sensors and Materials*. 2018;30(4):767-778.

11. Zasyplin AS, Shchurov AN, Teterin AD. Application of icy load sensors and sensors of longitudinal tension of Overhead line wires for assessing the danger of icy conditions. *University news. North Caucasus region. Series: Technical Sciences*. 2018;2 (198).

12. Petrov VS, Dubrovskaya TI. Mechanical calculation of wires and cables of overhead lines as a basis for calculating the reliability of structures. *Online journal Naukovedenie*. 2015;7:6 (31):11-13.

13. Merkin DR. *Introduction to the mechanics of flexible thread*. Moscow: Nauka. Main edition of physical and mathematical literature, 1980. 240 p.

14. Giancoli D. *Physics*: In 2 vols. T. 1: Trans. from English-M.: Mir, 1989. 656 p.

15. Andreev VYa, Antonyuk EM, Dushin EM. *Fundamentals of Metrology and electrical measurements*. - 6th ed., reprint. and extra. L.: Energiimidt. Leningr. otd-nie, 1987. 480 p.

16. Overhead power transmission lines with a voltage higher than 1 Kv. M, JSC "VNIIE". PUE.

ed. 7-e. Chapter 2.5-2003.

17. Goryachev MP, Sadykov MF, Yaroslavskiy DA. Method for control the mechanical parameters of overhead power lines based on improved inclinometry. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(3):160-171.

18. Sadykov MF, Goryachev MP, Yaroslavsky DA, et al. *A device for operational monitoring of the technical condition of high-voltage power lines*. RF patent №185311, 11.29.2018. Russian Patent N. 2018120028. 2018. Bull. Number 34.

Authors of the publication

Danil A. Yaroslavskiy – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marat F. Sadykov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: sadykov@kgeu.ru.

Mikhail P. Goryachev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: goryachev91@mail.ru.

Wu V. Nguyen – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anatoly A. Naumov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

29 апреля 2020 г.