

УДК 004.3

## МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА ГОЛОЛЁДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДАХ ВЛ С УЧЁТОМ РАЗРЕГУЛИРОВКИ ЛИНЕЙНОЙ АРМАТУРЫ

Д.А. Ярославский<sup>1</sup>, М.Ф. Садыков<sup>1</sup>, А.Б.Конов<sup>2</sup>, Д.А. Иванов<sup>1</sup>, М.П. Горячев<sup>1</sup>,  
Т.Г. Ямбаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия  
<sup>2</sup>Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского, Казань, Россия

**Резюме:** Одной из серьёзнейших причин аварий в электроэнергетических системах повышенной мощности является образование гололеда на проводах высоковольтных линий электропередачи (ВЛ). При этом следует учесть, что необходима достаточно точная локализация проблемного по гололёду участка или дефекта, так как часто проезд вдоль ВЛ затруднён. Кроме того, на изношенных воздушных линиях электропередачи наблюдается эффект перетягивания провода с одного пролёта на другой (разрегулировка). Для решения поставленных задач разработана методика мониторинга гололёдных отложений на проводах ВЛ на основе математической модели провиса провода, позволяющая определять текущие провис и удлинение провода в пролёте, силу его тяжения, учитывая разрегулировку линейной арматуры на линии. Реализация данной методики позволит выявлять появление гололёдных отложений на ВЛ, благодаря чему возможно своевременное осуществление мер по предотвращению аварийных ситуаций на линии (оптимизация графика плавки гололёда на проводах).

**Ключевые слова:** разрегулировка линейной арматуры, математическая модель провиса провода, провис провода, гололёдообразование.

## METHODOLOGY OF MONITORING ICE ON WIRES WITH CONSIDERING MISALIGNMENT OF POWER LINE ARMATURE

D.A.Yaroslavskiy<sup>1</sup>, M.F.Sadykov<sup>1</sup>, A.B.Konov<sup>2</sup>, D.A.Ivanov<sup>1</sup>, M.P.Goryachev<sup>1</sup>,  
T.G.Yambaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal state educational institution of higher education "Kazan State Power Engineering University", Russian Federation, Kazan  
<sup>2</sup>The Kazan E. K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Kazan

**Abstract:** One of the most serious causes of accidents in high-power electric power systems is the formation of ice on the wires of high-voltage transmission lines (HVL). In this case, it should be noted that it is necessary to accurately localize the problematic ice area of a site or defect, since it is often difficult to travel along a high-voltage line. In addition, the effect of dragging the wire from one span to the other (misalignment) is observed on worn-out overhead power transmission lines. To solve the set tasks, there was a method for monitoring ice deposits on the overhead lines based on the mathematical model of the chain line, which makes it possible to determine the current sag and elongation of the wire in the span, the force of its tension, taking into account the misalignment of the wires on the line. Implementation of this technique will allow to detect the appearance of ice deposits on the overhead line, which allows timely implementation of measures

*to prevent emergency situations on the line (optimization of the melting schedule for ice on the wires).*

**Keywords:** *misalignment of wires, mathematical model of a chain line, sag wires, ice formation.*

### **Введение**

Одной из серьёзнейших причин аварий в электроэнергетических системах повышенной мощности является образование плотного ледяного осадка – гололеда при намерзании переохлажденных капель дождя, мороси или тумана на проводах высоковольтных линий электропередачи.

В соответствии с картой гололедных нагрузок Республика Татарстан относится, в основном, ко второй группе риска (нормативная толщина стенки гололеда на проводе не менее 15 мм). Однако при этом Бугульминский район, например, относится к четвертой (нормативная толщина стенки гололеда на проводе не менее 25 мм), самой опасной группе. Проблемы с гололедообразованием также отмечены в Лениногорском, Нурлатском и Альметьевском районах. Увеличилось количество температурных переходов через 0°C, что привело к возрастанию вероятности гололедообразования, так как гололедно-изморозевые отложения на проводах ЛЭП образуются при намерзании переохлажденных капель дождя, мороси или тумана при температуре от 0°C и ниже. В условиях относительно мягкой зимы при резком перепаде значений температуры окружающего воздуха от положительной к отрицательной на проводах оседают капли воды и начинается лавинообразный процесс образования толстой ледяной корки, достигающей толщины в несколько десятков миллиметров и многократно утяжеляющей провода.

В частности, 5 декабря 2010 г. в ряде районов РТ начался ледяной дождь. Гололедообразование на проводах, опорах, деревьях и электрооборудовании превысило допустимые нормы. Начались массовые отключения практически 40 % воздушных линий 6 (10), 35, 110 кВ. За период с 5 по 12 декабря 2010 г. в системе электроснабжения произошло 572 нарушения, что составляет 42,4% от всех отключений за 11 месяцев. За период 5–12 декабря количество отключений ВЛ по отдельным причинам варьируется в довольно широких пределах. В Альметьевском районе с 2013 по 2015 годы по причине гололедообразования отключалось по 15 линий ежегодно в периоды интенсивного гололедообразования в течение недели. Одно из последних явлений гололедообразования отмечено 11 ноября 2016 г. Помимо аварий на ЛЭП, вследствие гололедообразования была парализована работа аэропорта Казани, осложнено движение транспортных средств и пешеходов.

Отложения гололеда, изморози и мокрого снега представляют большую опасность для нормальной эксплуатации воздушных линий электропередачи (ВЛ). Они могут вызывать: а) разрегулировку линейной арматуры и тросов и их сближение между собой; б) сближение проводов и тросов при подскоке вследствие одновременного сброса гололеда; в) интенсивную пляску, вызывающую короткие замыкания между проводами и между проводами и тросами, ожоги проводов и тросов, а в некоторых случаях повреждения линейной арматуры и креплений; г) значительную перегрузку проводов и тросов и их обрывы; д) разрушение опор в результате обрыва проводов и тросов при перегрузке от гололеда, когда возникающие неуравновешенные тяжения на опоры от оставшихся целыми проводов и тросов значительно превышают расчетные, а также при сочетании гололеда с сильным ветром; е) перекрытие линейной изоляции ВЛ при таянии вследствие значительного снижения льдоразрядных характеристик изоляторов по сравнению с влагоразрядными характеристиками, по которым обычно выбирается необходимый уровень линейной изоляции [1].

При этом следует учесть, что необходима достаточно точная локализация проблемного по гололёду участка или дефекта, так как часто проезд вдоль ВЛ затруднён (размытые дороги после дождя; глубокие снежные сугробы; естественные преграды, т.е. болотистая местность, рельеф и пр.).

В настоящее время для мониторинга состояния ВЛ разработаны стационарные приборы, устанавливаемые на линии электропередачи [2, 3, 4, 5, 6, 7]. На их основе создана система мониторинга гололёдообразования СМГ-16. Аппаратная часть данных устройств имеет распределённую архитектуру (рис. 1), которая включает набор датчиков для измерения параметров состояния проводов линии и окружающей среды, и средства приёма и передачи данных.

Для контроля гололёдообразования на ВЛ изменяются следующие параметры:

- температура провода и окружающей среды;
- относительная влажность воздуха;
- угол провиса провода.

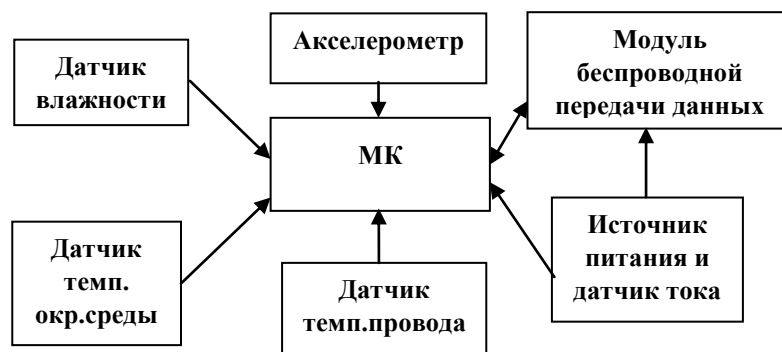


Рис.1. Структура элемента (устройства) сети

### 1. Методика мониторинга гололёдных отложений на проводах ВЛ

Любая высоковольтная воздушная линия электропередачи включает в себя опоры, сооружения для удержания проводов на заданном расстоянии от поверхности земли и друг от друга. В зависимости от способа подвески проводов опоры делятся на две основные группы:

- опоры *промежуточные*, на которых провода закрепляются в поддерживающих зажимах;
- опоры *анкерного типа*, служащие для тяжения проводов (на этих опорах провода закрепляются в натяжных зажимах).

При этом следует учитывать, что на изношенных воздушных линиях электропередачи наблюдается эффект перетягивания провода с одного пролёта на другой (разрегулировка), что с течением времени приводит к появлению и развитию дефектов в линейной арматуре (траверсах, стяжках, сцепной арматуре, штырях, крюках и т.д.).

В связи с этим предлагается математическая модель, учитывающая разрегулировку линейной арматуры на ВЛ.

Рассмотрим, какое влияние оказывает на провод упругая деформация, подчиняющаяся закону Гука. Задачу будем решать строгими методами (в рамках модели абсолютно гибкой нити) [8, 9, 10]. Расположим провод, как показано на рис. 2.

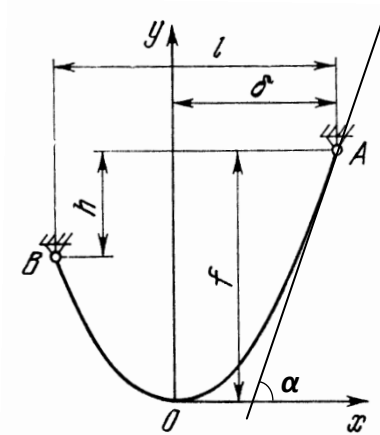


Рис. 2. Кинематическая схема провиса провода с обозначениями основных геометрических параметров

Для растянутого провода сила тяжести  $q$ , отнесенная к единице длины провода, является величиной переменной, зависящей от тангенциального натяжения  $T$ . Поэтому для провода, подверженного линейной деформации, в уравнении величину  $q$  можно выразить следующей зависимостью:

$$q = \frac{q_0}{f(T)}, \quad (1)$$

где  $q_0$  – сила тяжести, отнесенная к единице длины еще нерастянутого провода;  $f(T)$  – закон удлинения.

При растяжении по закону Гука

$$f(T) = 1 + \beta T, \quad (2)$$

где  $\beta$  – удельное относительное удлинение провода, следовательно,

$$q = \frac{q_0}{1 + \beta T}. \quad (3)$$

На основании известной гиперболической модели равновесия провода [8] при условии  $h=0$  уравнения равновесия провода примут вид

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{1}{2} \left( \frac{l}{a} - \beta q_0 L_0 \right) \\ \text{sh } u = \frac{L_0}{2a} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где  $u = \text{Intg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} \right)$ ;  $L_0$  – длина провода без растяжения;  $a$  – коэффициент формы гиперболы.

При  $h=0$  выражения для длины провода  $L$  и стрелы провисания  $f$  имеют вид:

$$L = L_0 + \frac{\beta}{2} a q_0 \left[ l + L_0 (\operatorname{ch} u - \beta a q_0) \right] \quad (5)$$

$$f = a \left( \operatorname{ch} u - 1 + \frac{\beta}{8} q_0 \frac{L_0^2}{a} \right) \quad (6)$$

В сделанных предположениях все полученные формулы являются точными. Если исключить  $a$  и выразить  $L_0$ , получим

$$L_0 = \frac{-u \pm \sqrt{2\beta l q_0 \operatorname{sh} u + u^2}}{\beta q_0} \quad (7)$$

Модуль реальных значений переменной  $u$  лежит в диапазоне  $10^{-3} < u < 1$ . Знаменатель последнего выражения имеет порядок  $10^{-6}$ . Число  $u$  положительное, следовательно, отрицательный корень будет побочным.

## 2. Результаты и обсуждение

Предлагается следующая методика мониторинга гололеда на проводах ВЛ, описанная для случая одного датчика. На ВЛ устанавливается датчик [2–7] вблизи точки закрепления провода. Собирается входная информация с датчика: угол наклона касательной к проводу относительно горизонта, температура провода. Предполагается, что монтируемые ВЛ при запуске системы мониторинга находятся в установившемся отрегулированном состоянии, гололедные отложения отсутствуют. Возможны три состояния системы:

1. СМГ находится в режиме калибровки. При отсутствии условий возникновения гололеда (влажность менее 80%, температура провода выше  $0^\circ$ ) циклически проводится вычисление длины нерастянутого провода – по формуле (8) вычисляется  $L_{0t}$  и запоминается соответствующее ему значение температуры провода  $t_0$ . Показания статистически усредняются.

2. В момент возникновения условий гололедообразования СМГ из режима калибровки переходит в режим слежения. Длина  $L_0$  рассчитывается по формуле

$$L_{0t} (1 + \delta(TK - TK_0)) \quad (8)$$

Коэффициент формы гиперболы рассчитывается по формуле [8]:

$$a = \frac{L_0}{2 \operatorname{sh} u}, \quad (9)$$

вычисляется погонная масса провода со льдом

$$q = \frac{\left( \frac{l}{a} - 2u \right)}{\beta L_0}, \quad (10)$$

сила тяжести находится по формуле

$$T = a q \operatorname{ch} u \quad (11)$$

3. При изменении параметров окружающей среды и исчезновении условий гололедообразования (влажность менее 80%, температура провода выше  $0^{\circ}$ ) и возвращении  $q$  к значению  $q_0$  СМГ вновь переходит в режим, описанный в пункте 1.

На изношенных ВЛ низкого и среднего напряжения во время гололедообразования возникает разрегулировка линейной арматуры (перетягивание провода между пролетами) из-за неравномерного сброса гололедных отложений, например при пляске проводов. Наблюдение показало, что в большинстве случаев процесс освобождения пролета от гололедных отложений происходит лавинообразно, и пролет освобождается полностью.

Предлагаем следующую методику учета этих фактов в режиме слежения. Отслеживаем скачкообразные изменения угла наклона касательной к проводу через первую и вторую производную. В процессе слежения возможны два варианта развития событий:

1. Изменение угла в меньшую сторону свидетельствует о сбросе гололедных отложений. В этом случае принимаем, что погонная масса провода  $q$  вернулась к значению  $q_0$ . Тогда по формуле (7) можно вычислить новую длину нерастянутого провода  $L_0$  (заново провести калибровку) и вернуться в нормальный режим слежения.

2. Изменение угла в большую сторону свидетельствует о перетягивании провода из соседнего пролета (рис. 3). В этом случае считаем, что погонная масса провода со льдом после скачка не изменилась. По формуле (7), приняв в качестве  $q_0$  величину  $q$ , вычисляем новую длину нерастянутого провода  $L_0$ . Зафиксируем текущую температуру провода в качестве  $t_0$ . Возвращаемся к нормальному режиму слежения.

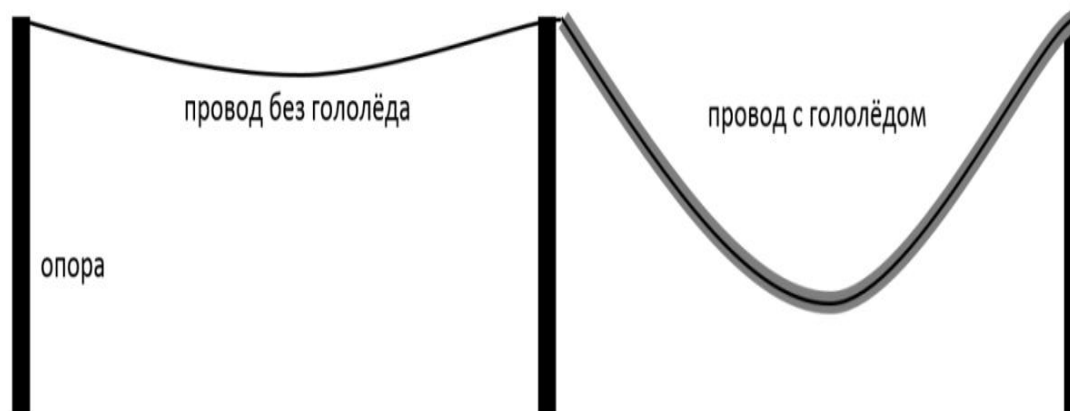


Рис. 3. Линия с разрегулировкой линейной арматуры в соседних пролётах

Данные предположения проверяются на системе СМГ-16 [2–7], введенной в опытную эксплуатацию в ПАО «Татнефть».

В качестве примера использования разработанной модели проведем расчет состояния провода марки А70 на момент отсутствия и наличия гололедных отложений на опытном участке линии 6 кВ (табл.).

Длина пролета, на котором был установлен датчик СМГ-16,  $l = 53,659$  м. Удельное относительное удлинение провода марки А70 на опытном участке  $\beta = 2,3274 \cdot 10^{-7}$ , коэффициент линейного расширения равен  $\delta = 2,3 \cdot 10^{-5}$ .

Расчеты состояния провода марки А70 на опытном образце 6 кВ

Наименование величины	Расчет на момент отсутствия гололедных отложений	Расчет на момент наличия гололедных отложений
Угол провиса провода в точке подвеса, градусы	4,41	5,74
Длина провода без растяжения $L_0$ , м (7)	53,704	-
Длина провода без растяжения $L_{0f}$ , м (8)	-	53,693
Коэффициент формы гиперболы, $a$ (9)	348,9	267,03
Погонная масса провода со льдом $q$ , Н (10)	4,15	16,75
Температура провода на момент измерения угла провиса провода, $K$	$TK_0 = 264,7$	$TK = 264,23$
Сила тяжения в точке подвеса $T$ , Н (11)	660,68	4496,3
Стрела провиса провода $f$ , м (6)	1,03	1,34

### Заключение

Разработана методика мониторинга гололедных отложений на проводах ВЛ на основе математической модели провиса провода [8, 9, 10], позволяющая определять текущие провис и удлинение провода в пролёте, силу его тяжения, учитывая разрегулировку линейной арматуры на линии. Реализация данной методики позволит выявлять появление гололедных отложений на ВЛ, благодаря чему возможно своевременное осуществление мер по предотвращению аварийных ситуаций на линии (оптимизация графика плавки гололеда на проводах).

Разработанные методика и математическая модель для мониторинга гололеда на проводах ВЛ успешно применяется в системе СМГ-16, введенной в опытную эксплуатацию в ПАО «Татнефть».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта 17-48-160878 p\_a.

### Литература

1. Сацук Е.И. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях: дис... д-ра техн. наук / Е. И. Сацук. Новочеркасск, 2011. 314 с.
2. Yang Y. et al. Design and implementation of power line sensor net for overhead transmission lines // Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE. – IEEE, 2009. – С. 1-8.
3. Пат. №2098904 РФ на полезную модель. Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи // Садыков М.Ф., Мисбахов Р.Ш., Савельев О.Г., Чугунов Ю.С. №2016112004/28 Заяв. 30.03.2016. Опубл. 27.11.2016.
4. Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Goryachev M.P., Savelyev O.G., Misbakhov R.S., 2016. Real-Time Operating Systems for Wireless Modules. Journal of Engineering and Applied Sciences, 11: 1168-1171. DOI: 10.3923/jeasci.2016.1168.1171.
5. Ivanov D.A., Savelyev O.G., Sadykov M.F. Sensor monitoring system of ice-wind load // In the collection: Intellectual energy systems works of the IV International Youth Forum: in 3 volumes. Tomsk Polytechnic University. 2016. P. 138-140.
6. Huang X. et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries [J] // Power System Technology. – 2008. – Т. 4. – С. 005.
7. Ярославский Д.А., Иванов Д.А., Горячев М.П., Гайнутдинов А.Р., Садыков М.Ф. Выбор операционной системы реального времени для беспроводного устройства. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – изд. КНИТУ-КАИ. 2016.
8. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.

9. Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчёт линий электропередачи. / 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. 312 с.

10. Кесельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 352 с.

#### **Авторы публикации**

**Ярославский Данил Александрович** – старший научный сотрудник НИЛ «СТИВПС» при Казанском государственном энергетическом университете (КГЭУ).

**Садиков Марат Фердинантович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: s-marik@yandex.ru, sadykov@kgeu.ru.

**Конов Андрей Борисович** – канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории спиновой физики и спиновой химии Казанского физико-технического института имени Е.К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук (КФТИ КазНЦ РАН). E-mail: andrey654@yandex.ru.

**Иванов Дмитрий Алексеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: light.technology.lab@gmail.com.

**Горячев Михаил Петрович** – инженер Центра компетенций и технологий в области энергосбережения при Казанском государственном энергетическом университете (КГЭУ), ассистент кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ).

**Ямбаева Татьяна Геннадьевна** – инженер кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: 79534929817@ya.ru

#### **References**

1. Satsuk E.I. Software and hardware for monitoring overhead power lines and managing the power system in extreme weather conditions [Text]: Dissertation of PhD / E.I. Satsuk – Novocheboksary, 2011. – P. 314.

2. Yang Y. et al. Design and implementation of power line sensor network for overhead transmission lines // Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE. – IEEE, 2009. – С. 1-8.

3. Utility model patent RF №2098904. Device of operational monitoring of the technical condition of high-voltage electric transmission lines // Sadykov M.F., R.S. Misbakhov, O.G. Savelyev, Y.S. Chugunov. Application №2016112004/28 30.03.2016. Published on 27.11.2016.

4. D.A. Yaroslavsky, D.A. Ivanov, M.F. Sadykov, M.P. Goryachev, O.G. Savelyev and R.S. Misbakhov, 2016. Real-Time Operating Systems for Wireless Modules. Journal of Engineering and Applied Sciences, 11: 1168-1171. DOI: 10.3923/jeasci.2016.1168.1171.

5. Ivanov D.A., Savelyev O.G., Sadykov M.F. Sensor monitoring system of ice-wind load // In the collection: Intellectual energy systems works of the IV International Youth Forum: in 3 volumes. Tomsk Polytechnic University. 2016. P. 138-140.

6. Huang X. et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries [J] // Power System Technology. – 2008. – Т. 4. – С. 005.

7. Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Goryachev M.P., Gaynutdinov A.R., Sadykov M.F. Selection Of Real Time Operating System For Wireless Device // Bulletin of Kazan State Technical University named after. A.N. Tupolev. 2016. Т. 72. № 4. P. 95-100.

8. Merkin D.R. Introduction in mechanics of flexible stripe – М.: Science. General editorial office of physical and mathematical literature, 1980. – P. 240.



©Д.А.Ярославский, М.Ф.Садыков, А.Б.Конов, А.Иванов, М.П.Горячев, Т.Г. Ямбаева

9.К.П. Kryukov, В.Р. Novgorodtsev. Construction and mechanical estimation of power lines. – 2 edition, L.: Power energy, Leningrad Branch, 1979, P. 312.

10. Keselman L.M. Fundamentals of the mechanics of overhead power lines – M.: Energoatomizdat, 1992. – P. 352.

#### **Authors of the publication**

**Danil A. Yaroslavskiy** – Senior Researcher, Laboratory "LT and AIE" at of Kazan State Power Engineering University.

**Marat F. Sadykov** – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Docent of Kazan State Power Engineering University.. E-mail: s-marik@yandex.ru, sadykov@kgeu.ru.

**Andrei B. Konov** – candidate of Physical and Mathematical Sciences, research associate of the Laboratory of Spin Physics and Spin Chemistry of the Kazan Physico-Technical Institute named after EK Zavoisky of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Email andrey654@yandex.ru

**Dmitriy A. Ivanov** – Candidate of Engineering Sciences, Docent of the Department of Industrial Electronics and Lighting Engineering (PES) of the Kazan State Energy University (KSPU). E-mail: light.technology.lab@gmail.com

**Mikhail P. Goryachev** – Engineer of the "Center of Competences and Technologies in Energy Saving" at the Kazan State Power Engineering University, Assistant Professor.

**Tatyana G. Yambaeva** – Engineer of the of the Department Theoretical basics of electrotechnicsof the Kazan State Energy University (KSPU). Tel. 89534929817. E-mail: 79534929817@ya.ru

**Поступила в редакцию**

**21 апреля 2017 г.**