

УДК 621.317

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-54-59

## Разработка конструкции датчика напряжения для системы диагностики подвесной изоляции линий электропередач 110 кВ

Е.С. Андреенков, С.А. Шунаев

Рассмотрена проблема оперативного поиска поврежденных гирлянд изоляторов линий электропередач (ЛЭП) 110 кВ. Проведены измерения емкостей как новых, так и разрушенных в результате электрического пробоя стеклянных изоляторов типа ПС-70Е. Исследованы зависимости остаточной электрической прочности и емкости разрушенных изоляторов от величины зернистости стеклодетали. На основе системы уравнений узловых потенциалов в матричной форме выполнено моделирование гирлянды изоляторов, позволяющее учитывать в ней наличие поврежденных изоляторов. Предложен метод телеметрического контроля состояния многоэлементной подвесной изоляции, основанный на регистрации изменения емкости гирлянды изоляторов при появлении в ней поврежденного элемента. Метод подразумевает оснащение каждой гирлянды собственным устройством контроля (датчиком) напряжения на емкостном сопротивлении, включенным последовательно с гирляндой изоляторов. Разработана конструкция емкостного датчика напряжения, позволяющего реализовать описанную систему. Датчики рекомендовано связать по беспроводному каналу с центром сбора данных, где по величине изменения напряжения делается вывод о наличии повреждения в изоляции. Рассчитаны параметры предлагаемого датчика, на основании которых создан действующий макетный образец. Оригинальная конструкция датчика напряжения обладает рядом существенных преимуществ перед аналогичными устройствами.

*Ключевые слова:* датчик, изолятор, делитель, емкость, напряжение.

*Для цитирования:* Андреенков Е.С., Шунаев С.А. Разработка конструкции датчика напряжения для системы диагностики подвесной изоляции линий электропередач 110 кВ // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 54—59. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-54-59.

## Designing a Voltage Sensor for the Diagnostic System of 110 kV Overhead Power Line Suspension Insulation

E.S. Andreenkov, S.A. Shunaev

The problem of promptly finding faulty insulator strings of 110 kV overhead power lines is addressed. The capacitances of PS-70E glass insulators in their new (delivered) state and in the state destroyed as a result of electric breakdown are measured. The residual dielectric strength and capacitance of destroyed insulators as a function of the glass part's grain size are investigated. An insulator string model is developed based on the system of nodal potential equations in matrix form, using which the availability of damaged insulators in the string can be taken into account. A method for remotely monitoring the state of multicomponent suspension insulation is proposed, which is based on recording a change in the capacitance of an insulator string when a faulty element appears in it. The proposed method implies the fitting of each insulator string with its own device (sensor) for monitoring the voltage across the capacitive impedance connected in series with the insulator string. The capacitive voltage sensor design, using which the described system can be implemented, has been developed. Supposedly, the sensors are to be connected via a wireless communication channel with the data acquisition center, in which a conclusion on whether a fault is contained in the insulation is drawn proceeding from the measured change of voltage. The parameters of the proposed sensor were calculated, based on which an operating prototype sensor has been constructed. The newly proposed voltage sensor design has a number of essential advantages over similar devices.

*Key words:* sensor, insulator, divider, capacitance, voltage.

*For citation:* Andreenkov E.S., Shunaev S.A. Designing a Voltage Sensor for the Diagnostic System of 110 kV Overhead Power Line Suspension Insulation. MPEI Vestnik. 2017; 6:54—59. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-54-59.

### Введение

Решение множества поставленных перед электроэнергетикой задач невозможно без широкого внедрения цифровых (микропроцессорных) систем измерения, учета, релейной защиты, автоматики и диагностики линий электропередач (ЛЭП).

Одной из основных причин выхода из строя ЛЭП являются повреждения гирлянд изоляторов [1] по при-

чине появления в них изоляторов, утративших свои диэлектрические свойства («нулевых»).

Существующие способы диагностики изоляции ЛЭП нуждаются в серьезной модернизации, так как не обеспечивают требуемого быстродействия и точности определения места повреждения, а также трудореализуемы на практике. В настоящее время чрезвычайно актуальна задача разработки системы диагностики изоляции ЛЭП, лишенной отмеченных недостатков.

Для ее реализации можно взять предлагаемый в [2] метод телеметрического контроля состояния подвесной изоляции. Он подразумевает оснащение каждой гирлянды изоляторов собственным устройством контроля (датчиком) напряжения на емкостном сопротивлении, включенном последовательно с гирляндой. Данные устройства связаны по беспроводному каналу в единую сеть с центром сбора данных, где по изменению напряжения делается вывод о наличии повреждения в изоляции. При этом устройства контроля напряжения предполагается запитывать по принципу индукционного отбора мощности, передаваемой по ЛЭП.

Данная система позволит с достаточно высокой точностью и быстродействием локализовать места повреждения изоляции воздушных ЛЭП и распределительных устройств. Ключевым звеном является емкостной датчик напряжения, поэтому прежде всего следует разработать его конструкцию.

### Выбор типа первичного датчика напряжения

Конструирование высоковольтного датчика напряжения представляет собой сложную задачу, на начальном этапе которой нужно выбрать оптимальный тип устанавливаемого в системе первичного датчика напряжения. С учетом специфичности его расположения и требований к функционалу были сформулированы следующие критерии для дальнейшего подбора вариантов:

- чувствительность работы;
- точность измерений;
- компактность исполнения;
- простота и удобство эксплуатации;
- конечная стоимость продукта.

Указанным критериям отвечают два основных типа датчиков напряжения:

- полевой датчик (датчик электрического поля);
- емкостный датчик, который условно делится на построенный на соотношении частичных емкостей электродов и чисто емкостный.

Анализ сильных и слабых сторон указанных датчиков [3] позволил сделать вывод, что в системе мониторинга и контроля изоляции наиболее уместны емкостные датчики напряжения.

В основе его работы лежит использование емкостного делителя для измерения значения подведенного напряжения, состоящего из высоковольтного  $C_1$  и низковольтного  $C_2$  плечей (рис. 1).

Входное и выходное напряжения делителя связаны друг с другом коэффициентом деления

$$k = U_{\text{вх}} / U_{\text{вых}} = (C_1 + C_2) / C_1. \quad (1)$$

Емкость высоковольтного плеча должна быть много меньше емкости низковольтного, в этом случае практически все высокое напряжение  $U_{\text{вх}}$  ляжет на высоковольтное плечо, которое часто выполнено как последовательное соединение нескольких конденсаторов.

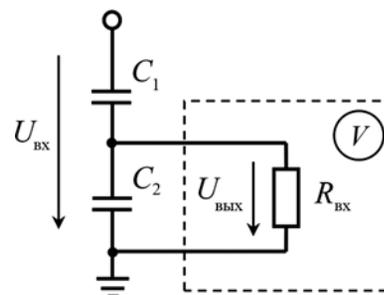


Рис. 1. Схема емкостного делителя

Следует обратить внимание на емкостные датчики, построенные на соотношении частичных емкостей системы электродов. Их отличительной особенностью является зависимость от геометрических размеров и физических параметров электродов.

Гирлянду подвесных изоляторов можно рассматривать как систему последовательно соединенных элементов, обладающих определенной емкостью. Тогда становится возможным ее использование в качестве конструктивного элемента датчика, так как при появлении поврежденного изолятора (изменении его диэлектрической проницаемости) будет меняться и емкость всей гирлянды, что, в свою очередь, можно зафиксировать на низковольтном плече в виде возросшего напряжения.

Возникает задача выбора конструктивного исполнения и параметров низковольтного плеча, в качестве которого предлагается цилиндрический конденсатор, расположенный на высоком потенциале фазного провода (рис. 2).

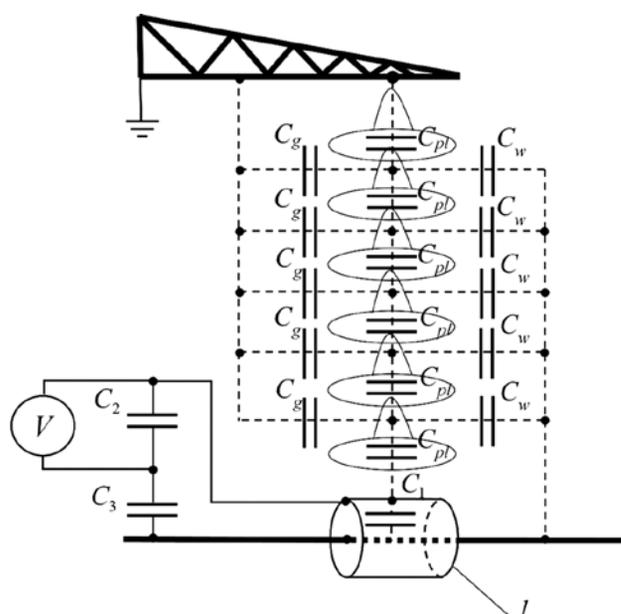


Рис. 2. Конструктивная схема датчика напряжения:

$C_{pl}$  — емкости тарелок изоляторов;  $C_w, C_g$  — паразитные емкости относительно провода и заземленных частей опоры;  $I$  — цилиндрический конденсатор

**Выбор конструктивного исполнения и параметров датчика напряжения**

Установим на высоком потенциале фазного провода двухступенчатый емкостный делитель, первой ступенью которого станет цилиндрический конденсатор  $I$  емкостью  $C_1$  (рис. 3) с радиусами изоляционных слоев  $r_1, R_1$ . В качестве второй ступени выступят конденсаторы емкостями  $C_2, C_3$ .

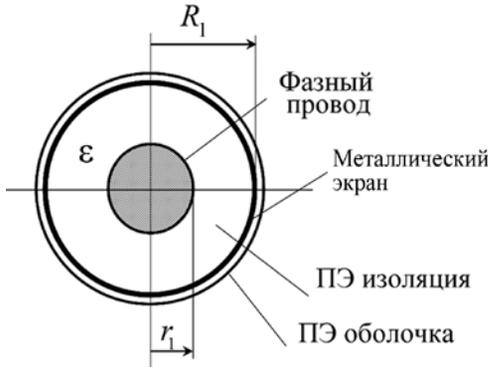


Рис. 3. Конструктивная схема двухслойного цилиндрического конденсатора

Рассчитаем емкостный делитель для ЛЭП 110 кВ. Фазное напряжение такой линии  $U_1 = 110\sqrt{3}$  кВ. Рассмотрим случай гирлянды изоляторов, состоящей из шести тарелок.

Расчет указанного делителя предполагает вычисление геометрических параметров цилиндрического конденсатора  $C_1$ , его емкости с учетом диэлектрической проницаемости материала применяемого диэлектрика и определение емкостей  $C_2, C_3$ . Для этого рассчитаем эквивалентную емкость  $C_{э\text{кв}}$  двухступенчатого емкостного делителя из условия падения напряжения на цилиндрическом конденсаторе  $U_{э\text{кв}} = 500$  В. При этом схема замещения примет вид, представленный на рис. 4.

Емкость  $C_{э\text{кв}}$  определим исходя из значения сопротивления  $X_{с\text{э\text{кв}}}$ , которое для данной схемы выглядит как

$$X_{с\text{э\text{кв}}} = \frac{U_{э\text{кв}}}{I_1} = \frac{U_{э\text{кв}}}{(U_1 - \varphi_2 - U_{э\text{кв}}) g_{pl1}}, \quad (2)$$

где  $g_{pl1} = j\omega C_{pl1}$  — проводимость ветви, содержащей емкость  $C_{pl1}$  тарелки изолятора, См;  $U_1$  — фазное напряжение линии, В;  $\varphi_2$  — потенциал второго узла, В.

Согласно проведенным лабораторным исследованиям, емкость одного стеклянного изолятора типа ПС-70 составляет в среднем  $C_{pl} = 50$  пФ. Значения паразитных емкостей относительно провода  $C_w = 0,5$  пФ и заземленных частей опоры  $C_g = 4$  пФ приняты по данным [4].

Потенциал  $\varphi_2$  можно найти из системы уравнений узловых потенциалов, которая в матричной форме имеет вид

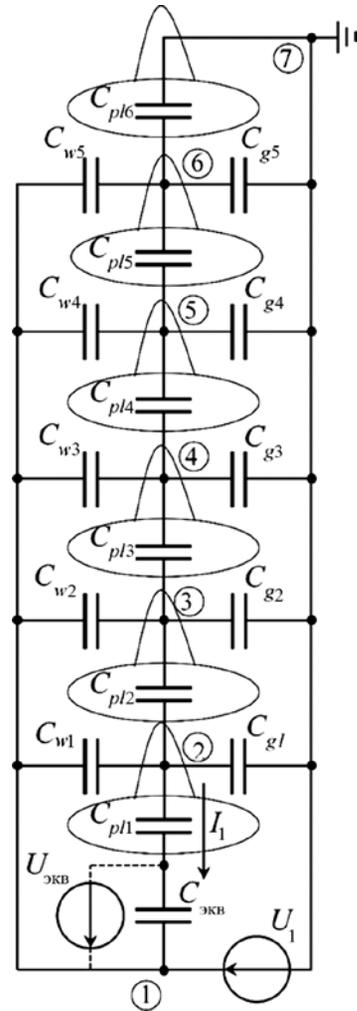


Рис. 4. Схема замещения

$$\|\varphi\| = \|\mathbf{g}^{(y)}\|^{-1} \|\mathbf{J}_c\|,$$

где  $\|\varphi\|$  — матрица-столбец потенциалов узлов;  $\|\mathbf{g}^{(y)}\|^{-1}$  — матрица, обратная матрице узловых проводимостей схемы;  $\|\mathbf{J}_c\|$  — матрица-столбец токов источников тока в узлах.

Матрицу узловых проводимостей составляют по соответствующей схеме с применением формулы

$$\|\mathbf{g}^{(y)}\| = \|\mathbf{A}\| \|\mathbf{g}_d\| \|\mathbf{A}\|^T,$$

где  $\|\mathbf{A}\|$  — матрица соединения узловых проводимостей ветвей схемы;  $\|\mathbf{g}_d\|$  — диагональная матрица проводимостей ветвей.

При заданных параметрах схемы замещения матрица-столбец потенциалов узлов

$$\varphi = \begin{pmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \\ \varphi_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4,722 \cdot 10^4 \\ 3,455 \cdot 10^4 \\ 2,435 \cdot 10^4 \\ 1,569 \cdot 10^4 \\ 0,782 \cdot 10^4 \end{pmatrix} \text{ В.}$$

Из выражения (2) выведем значение сопротивления

$$X_{\text{экв}} = \frac{500}{(6,40 \cdot 10^4 - 4,722 \cdot 10^4 - 500)j 1,53 \cdot 10^{-8}} = -j1,96 \cdot 10^6,$$

тогда емкость

$$C_{\text{экв}} = \frac{1}{j\omega X_{\text{экв}}} = \frac{1}{-j314 \cdot 1,96 \cdot 10^6} = 1,628 \cdot 10^{-9}.$$

Найдем емкости конденсаторов  $C_1$  —  $C_3$  двухступенчатого делителя (рис. 5). Подключение измерительного цифрового тракта предполагается с выхода емкости  $C_2$ . С учетом требований к уровню напряжения для работы вторичных цепей зададим значение данного напряжения  $U_{\text{вых}} = 100$  В.

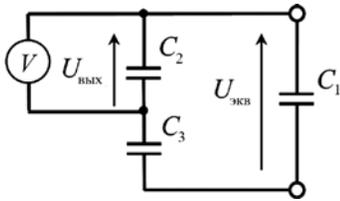


Рис. 5. Схема двухступенчатого емкостного делителя

При этом коэффициент деления второй ступени рассматриваемого емкостного делителя составит

$$k_d = \frac{U_{\text{экв}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{500}{100} = 5.$$

Пусть значения емкостей  $C_2, C_3$  из стандартного ряда для обеспечения равенства по выражению (1) равны  $C_2 = 3,9$  нФ,  $C_3 = 1,0$  нФ, тогда

$$k = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{C_2 + C_3}{C_3} = \frac{3,9 + 1,0}{1,0} = 4,9 \approx 5.$$

Вычислим

$$C_{\text{экв}} = C_1 + \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3},$$

откуда

$$C_1 = C_{\text{экв}} - \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} = 1,628 - \frac{3,9 \cdot 1,0}{3,9 + 1,0} = 0,832.$$

Геометрическими параметрами делителя являются его длина и отношение наружного и внутреннего радиусов слоев  $r_n/R_n$ . Отношение  $K_n = r_n/R_n$  можно получить из выражения для определения емкости цилиндрического конденсатора [5]

$$C_x = \frac{1, l_x \varepsilon}{2 \ln(R_x/r_x)} = \frac{0,555 \varepsilon l_x}{\ln(R_x/r_x)}.$$

Длина цилиндрического конденсатора  $l_x = 20$  см, в качестве материала диэлектрика возьмем сшитый полиэтилен с  $\varepsilon = 2,4$ , тогда

$$\ln(K_1) = \frac{0,555 \varepsilon l_x}{C_1}, \quad K_1 = 1,033.$$

Рассмотрим пример, в котором радиус фазного провода составляет  $R = 1,0$  см. Определим толщину слоя диэлектрика цилиндрического конденсатора

$$r_1 = R = 1,0 \text{ см}; \\ R_1 = r_1 = 1,0 \cdot 1,033 = 1,033 \text{ см}.$$

Толщина слоя диэлектрика с емкостью  $C_1$  составит 0,33 мм.

Рассчитаем величину изменения напряжения на выходе емкостного делителя  $U_{\text{вых}}$  при появлении в гирлянде поврежденного изолятора. Поскольку распределение напряжения вдоль гирлянды изоляторов нелинейно, то значения  $U_{\text{вых}}$  будут отличаться в зависимости от положения «пробитого» изолятора.

Чтобы учесть появление поврежденного изолятора, в математической модели нужно заменить значение соответствующей проводимости  $g_{pl}$  на  $-j$  в диагональной матрице проводимостей ветвей. Рассчитанные значения напряжения  $U_{\text{вых}}$  в зависимости от положения «нулевого» изолятора для гирлянды ЛЭП 110 кВ из шести изоляторов приведены в табл. 1. Полученные значения  $U_{\text{вых.расч}}$  имеют хорошую сходимость с результатами компьютерного моделирования  $U_{\text{вых.мод}}$ .

Таблица 1

**Зависимость выходного напряжения делителя от положения поврежденного изолятора**

Номер поврежденного изолятора	$U_{\text{вых.мод}}, \text{ В}$	$U_{\text{вых.расч}}, \text{ В}$
1	140,4	141,0
2	123,4	123,7
3	115,1	115,3
4	111,0	111,1
5	109,2	109,3
6	109,0	109,1
Без повреждений	102,0	102,0

Таким образом, при появлении поврежденного изолятора изменение напряжения  $\Delta U$  варьируется от 7 до 38 В. Это позволяет фиксировать изменение состояния гирлянды подвесной изоляции, однако возникает вопрос отстройки от различных перенапряжений. При этом следует обеспечить надежную работу изоляции конденсатора  $C_1$ , создавая максимально допустимую напряженность электрического поля.

Найдем напряженность электрического поля, входящую на слой диэлектрика конденсатора  $C_1$ . При

напряжении  $U_1 = 110\sqrt{3}$  кВ напряжение на конденсаторе  $C_1$  составит  $U_{\text{экр}} = 500$  В, тогда максимальная напряженность электрического поля на изоляции конденсатора [5]

$$E_{\text{max}} = \frac{U_{\text{экр}}}{r_1 \ln(R_1/r_1)} = \frac{500}{1,0 \ln(1,033/1,0)} = 1,54 \cdot 10^3.$$

По данным изготовителя среднее значение электрической прочности полиэтилена  $E = 40$  кВ/мм, поэтому такая конструкция может быть применима для измерений в сетях до 110 кВ.

### Экспериментальные исследования

Были проведены лабораторные исследования емкостей стеклянных тарельчатых изоляторов типа ПС-70Е, как новых, так и изоляторов с электрическим пробоем (рис. 6).



Рис. 6. Общий вид поврежденных изоляторов

Стоит отметить, что при электрическом пробое разрушается стеклянное тело изолятора, при этом стеклодеталь, которая остается под шапкой изолятора, имеет зернистую структуру.

По результатам измерения емкостей и токов утечки поврежденных изоляторов установлена зависимость емкости поврежденного изолятора и его электрической прочности от величины зерна стеклодетали. При крупнозернистой структуре поврежденный изолятор имел большую остаточную электрическую прочность (меньшую емкость) по сравнению с изолятором мелкозернистой структуры.

Измерения емкостей проводили с помощью измерительного моста типа P5026 по схеме, приведенной на рис. 7. Первичное напряжение задавалось испытательным трансформатором типа СКАТ-70.

По результатам измерения емкостей 17-ти неповрежденных изоляторов типа ПС-70Е было установлено, что их емкость незначительно варьируется в диапазоне от 44 до 46 пФ, а емкость поврежденных изоляторов — от 161 до 3500 пФ. Результаты измерений емкости и токов утечки для семи разрушенных изоляторов приведены в табл. 2.

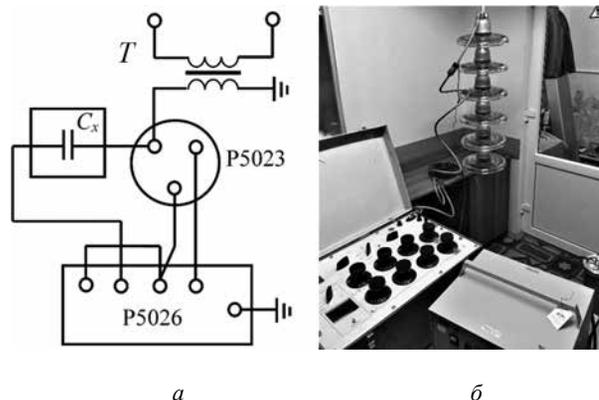


Рис. 7. Схема эксперимента по измерению емкостей (а) и ход эксперимента (б):

$C_x$  — измеряемая емкость;  $T$  — испытательный трансформатор типа СКАТ-70; P5023 — образцовый воздушный конденсатор  $U_n = 10$  кВ с емкостью 489 пФ

Таблица 2

### Результаты измерения емкостей поврежденных изоляторов

Номер измерения	$C_{\text{тар}}, \text{пФ}$	$I_{\text{л}}, \text{мкА}$
1	390	710
2	2936	4800
3	2567	4200
4	161	514
5	3468	6200
6	1896	1600
7	3147	5700

Анализ результатов измерений с применением предложенной математической модели показал, что наличие в гирлянде изолятора с емкостью порядка 2000 пФ и выше эквивалентно появлению проводящего звена, что было учтено при компьютерном моделировании.

Для проведения экспериментов был изготовлен макетный образец цилиндрического конденсатора, представленный на рис. 8. В качестве диэлектрика использовалась пленка из полиэтилена толщиной 0,3 мм. В качестве металлического экрана использовалась алюминиевая (Al) лента. Емкость полученного цилиндрического конденсатора по результатам измерений составила 950 пФ, что показало хорошую сходимость с результатами расчета.

Исследование значения напряжения  $U_{\text{вых}}$  на выходе низковольтного плеча проектируемого датчика было проведено на компьютерной модели в среде Multisim. Результаты исследования при различных состояниях гирлянды, состоящей из шести изоляторов, приведено в табл. 1. Для имитации пробоя тарелки изолятора производилось шунтирование проводящим звеном.



Рис. 8. Макетный образец цилиндрического конденсатора

## Заключение

Установлена зависимость между зернистостью стеклотела разрушенного при электрическом пробое изолятора, его емкостью и остаточной электрической прочностью.

Предложен способ контроля состояния изоляции высоковольтных ЛЭП посредством регистрации изменения значения напряжения при появлении в гирлянде поврежденного изолятора на емкостном датчике, включенном последовательно с гирляндой. Данный способ позволяет в перспективе реализовать систему телеметрического контроля состояния изоляции высоковольтных ЛЭП.

Разработана конструкция емкостного датчика напряжения, использующая диагностируемую гирлянду изоляторов в качестве высоковольтного плеча емкостного делителя. Вся высоковольтная часть датчика закрепляется на фазном проводе и не имеет электрической связи с землей, что позволяет значительно упростить конструкцию и снизить стоимость изготовления изделия при значительном повышении надежности измерительной системы.

## Литература

1. Шунаев С.А. Сравнительный анализ методов диагностики подвесной изоляции ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения // Энергетика, информатика, инновации — 2014: Сб. трудов IV Междунар. науч.-техн. конф. Смоленск: филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 2014.
2. Андреенков Е.С., Шунаев С.А. Система диагностики подвесной изоляции воздушных линий электропередачи напряжением 110...750 кВ // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 105—110.
3. Булычева Е.А., Шунаев С.А. Сравнительный анализ датчиков напряжения для системы телеметрического контроля подвесной изоляции ЛЭП // Электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные

технологии в производстве: Сб. трудов XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Смоленск: Универсум, 2015. С. 15—20.

4. Резевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1976.

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Высшая школа, 1986.

## References

1. Shunaev S.A. Sravnitel'nyy Analiz Metodov Diagnostiki Podvesnoy Izolyatsii VL Vysokogo i Sverhvyssokogo Napryazheniya. Energetika, Informatika, Innovatsii — 2014: Sb. Trudov IV Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Smolensk: Filial NRU «MPEI» v g. Smolenske, 2014. (in Russian).
2. Andreenkov E.S., Shunaev S.A. Sistema Diagnostiki Podvesnoy Izolyatsii Vozdushnyh Liniy Elektroperedachi Napryazheniem 110...750 kV. Nauchnoe Obozrenie. 2015;8:105—110. (in Russian).
3. Bulycheva E.A., Shunaev S.A. Sravnitel'nyy Analiz Datchikov Napryazheniya dlya Sistemy Telemetricheskogo Kontrolya Podvesnoy Izolyatsii LEP. Elektroenergetika, Elektrotekhnik i Teploenergetika, Matematicheskoe Modelirovanie i Informatsionnye Tekhnologii v Proizvodstve: Sb. Trudov XII Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov. Smolensk: Universum, 2015:15—20. (in Russian).
4. Rezevig D.V. Tekhnika Vysokih Napryazheniy. M.: Energiya, 1976. (in Russian).
5. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhnik. Elektromagnitnoe pole. M.: Vysshaya shkola, 1986. (in Russian).

## Сведения об авторах

**Андреенков Евгений Сергеевич** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетических систем филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, e-mail: root67@mail.ru

**Шунаев Сергей Анатольевич** — ассистент кафедры электроэнергетических систем филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, e-mail: sergey\_shunaev@mail.ru

## Information about authors

**Andreenkov Evgeniy S.** — Ph.D. (Techn.), Senior Lecturer of Electrical Power Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: root67@mail.ru

**Shunaev Sergey A.** — Assistant of Electrical Power Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: sergey\_shunaev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2017