

DOI: 10.18721/JEST.27302

УДК 621.327

*Г.С. Астафьев, К.В. Волошин, В.В. Титков*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ПЕРМАНЕНТНОЙ СВЕТОВОЙ МАРКИРОВКИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Важными элементами системы непрерывной световой маркировки проводов воздушных линий 35 – 110 кВ являются газоразрядная лампа и электростатическая антенна. В работе рассмотрена возможность применения электростатических антенн сложной конфигурации для повышения светимости газоразрядных ламп. Показано, что рамочные антенны в условиях ограничения максимального габарита позволяют получить больший рабочий ток и яркость газоразрядной лампы, чем в случае стандартно прямолинейной антенны. Для оценки электрической емкости сложных пространственных антенн из тонкого профиля кругового сечения использовался метод интегрального уравнения первого рода относительно распределения линейной плотности заряда на элементах конструкции. С использованием инструментов COMSOL Compiler и MATLAB Compiler было разработано прикладное программное обеспечение, в котором осуществляется ввод геометрических параметров, визуализация конструкции антенны и расчет электрической емкости. Выполнены оценки пространственных смещений сложных антенн под воздействием ветровых нагрузок.

Ключевые слова: световой маркер воздушной линии, газоразрядная лампа, электрическая емкость, расчет методом интегрального уравнения, прямолинейная антенна, рамочная антенна, ветровые нагрузки.

Ссылка при цитировании:

Астафьев Г.С., Волошин К.В., Титков В.В. Повышение характеристик электростатической системы питания перманентной световой маркировки воздушных линий электропередачи // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 17–26. DOI: 10.18721/JEST.27302

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*G.S. Astafiev, K.V. Voloshin, V.V. Titkov*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF ELECTROSTATIC POWER SUPPLY SYSTEM OF PERMANENT LIGHT MARKING OF OVERHEAD POWER LINES

Gas-discharge lamp and electrostatic antenna are important elements of the system of permanent light marking of 35–110 kV overhead power lines. The paper considers the possibility of using electrostatic antennas of irregular shape to increase the luminous intensity of gas-discharge lamps. It is shown that the frame antennas under the conditions of limiting the maximum size allow higher operating current and brightness of the gas-discharge lamp than in case of a standard rectilinear antenna. To estimate the electrical capacity of the irregularly shaped antennas made of a thin circular cross-section profile, the authors applied the method of an integral equation of the

first kind with respect to the distribution of the linear charge density on the structural elements. Using the COMSOL Compiler and MATLAB Compiler tools, the authors developed application software, which allows geometric parameters input, antenna design visualization, and calculation of the electrical capacitance. The spatial displacements of irregularly shaped antennas under the influence of wind loads are estimated.

Keywords: overhead power line light marker, gas-discharge lamp, electric capacity, integral equation calculations, rectilinear antenna, frame antenna, wind loads.

Citation:

G.S. Astafiev, K.V. Voloshin, V.V. Titkov, Improving the characteristics of electrostatic power supply system of permanent light marking of overhead power lines, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 17–26, DOI: 10.18721/JEST.27302

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Широко применяющиеся системы световой маркировки проводов воздушных линий электропередачи высокого напряжения с помощью газоразрядных ламп используют принцип емкостного отбора энергии в электрическом поле фазных проводов [1–4]. Типичное устройство подобного типа показано на рис. 1.

Необходимый уровень напряжения на газоразрядной лампе (1) обеспечивается разностью напряжения, наводимого на линейной электростатической антенне (5) и фазном проводе, соединенным проводящим шлейфом (4) со вторым полюсом газоразрядной лампы. Потенциал антенны определяется ее емкостными связями с остальными фазными проводами линии C_b , C_c и землей $C_{аз}$ [5–8]. Данная схема успешно применяется для линий класса напряжения 220 кВ и выше [9]. В этом случае достаточный ток лампы обеспечивает габарит линейной антенны в несколько метров. При этом для линий указанного класса, как показано в [9] необходимый уровень напряжения на лампе обеспечивается емкостями C_b , C_c . Адаптация данной системы маркировки проводов для воздушных линий класса 110 кВ и ниже требует при обеспечении необходимой яркости свечения в прежнем дизайне непомерно длинных антенн, превосходящих 10 м. Поэтому задачей данной работы является более тщательный анализ электрических процессов в системе питания перманентного маркера на основе газоразрядной лампы и изучение возможностей модификации электростатических антенн в приемлемых габаритах для повышения разрядного тока лампы.

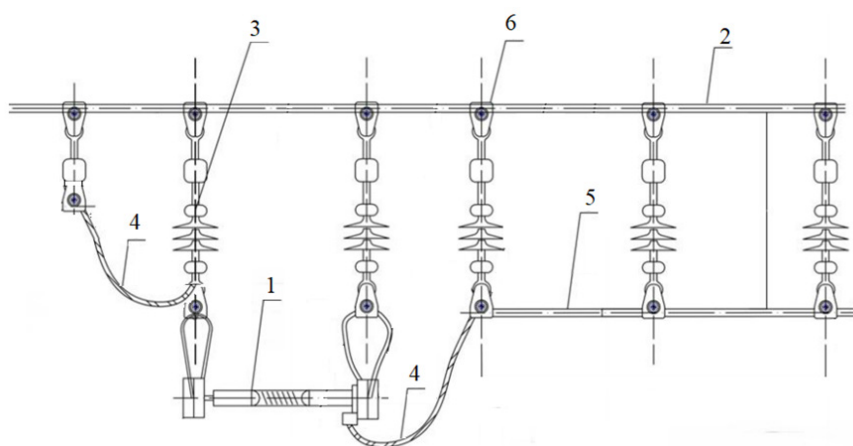


Рис. 1. Схема расположения лампы (1) и антенны (5) на фазном проводе (2):
3 – изолятор, 4 – проводниковый шлейф, 6 – зажим

Fig. 1. The installation scheme of a gas-discharge lamp (1) and antenna (5) on the phase wire (2):
3 – insulator, 4 – connecting wire, 6 – clip

Методы

Простейшим и в тоже время достаточно эффективным подходом к анализу токов и напряжений в системе питания светового маркера (рис. 1) является модель постоянного электрического сопротивления лампы. При этом рассчитываемые действующие значения токов и напряжений в схеме замещения (рис. 2) соответствуют стендовым измерениям тока лампы, сохраняющего форму, близкую к синусоидальной.

Средняя величина сопротивления лампы по данным измерений составляет величину $R_{\text{лампы}} = 0.3 \text{ МОм}$.

Рассмотрим токи и напряжения в схеме рис. 2 применительно к линиям класса 110 кВ, для которых обнаружена недостаточная яркость свечения маркера. В случае антенн линейной формы (рис. 1) входящие в схему замещения емкости оцениваются простыми формулами для длинных проводников цилиндрической формы. В частности, емкость антенны длиной L относительно фазного провода рассчитывается как

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{D}{R}\right)},$$

где D – расстояние между проводом и антенной, R – радиус сечения антенны.

Оценка емкостей в базовой системе питания (рис. 1) с помощью последней формулы применительно к ВЛ 110 кВ на опорах ПСБ-110-1 (рис. 3) дает при установке антенны на фазу А следующие значения: емкость между антенной и фазой А $C_a = 78.9 \text{ пФ}$, между антенной и фазой В $C_b = 58 \text{ пФ}$, между антенной и фазой С $C_c = 57.7 \text{ пФ}$, между антенной и землей $C_{\text{аз}} = 56.5 \text{ пФ}$.

Действующие значения фазных напряжения для линии класса напряжения – 110 кВ составляют $U_{\text{фаз } 110 \text{ кВ}} = 63.5 \text{ кВ}$. Аналогичный [9] расчет тока лампы без учета емкости антенны по отношению к земле дает для тока лампы $I_{\text{л}} = 3.47 \text{ мА}$. При этом уточненное с учетом емкости $C_{\text{аз}}$ значение тока составит $I_{\text{л}} = 4.59 \text{ мА}$.

При вариации высоты подвеса (расстояния между антенной и фазным проводом, на котором она закрепляется) величина отбираемой мощности зависит от соотношения между емкостью антенны на землю и всеми остальными емкостями – C_a , C_b и C_c . С увеличением высоты подвеса антенны растет емкость между ней и землей. При этом емкости антенна-фазные провода снижаются в меньшей степени. Поэтому расчеты показывают увеличение тока через лампу, а наблюдения – увеличение яркости ее свечения.

Для увеличения предела отбираемой мощности (прежде всего увеличения тока через лампу) и оценки возможностей снижения линейных габаритов целесообразно исследовать отличные от прямолинейной формы антенн. Это позволит оптимизировать конструкцию путем уменьшения некоторых геометрических размеров, например длины антенны. При этом простые формулы для емкости между длинными цилиндрами становятся не применимыми. Поэтому для антенн сложной формы использовался численный метод площадок [10–12]. Применительно к рассматриваемой задаче речь идет о линейном распределении линейной плотности заряда $\tau(l_1)$ и $\tau(l_2)$, которые находятся в результате решения интегрального уравнения

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{l_1, l_2} \frac{\tau(l) dl}{\sqrt{(x(l)-x)^2 + (y(l)-y)^2 + (z(l)-z)^2}} = U(x, y, z), \quad (1)$$

где x, y, z – координаты точек лежащих на проводниках l_1 и l_2 . При этом если точка x, y, z находится на первом проводнике $U(x, y, z) = U_1$, а в случае принадлежности точки x, y, z к проводнику 2

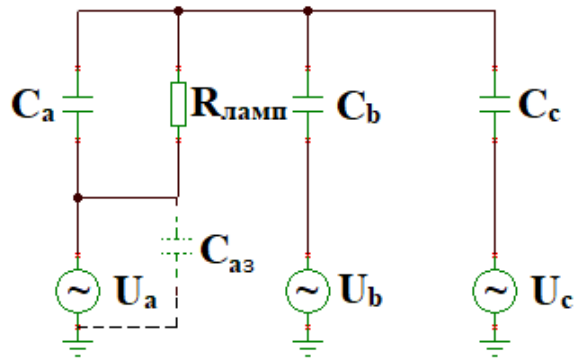


Рис. 2. Схема замещения системы питания с моделью постоянного сопротивления лампы $R_{\text{лампы}}$
 Fig. 2. The equivalent circuit of the power supply system with the constant lamp resistance

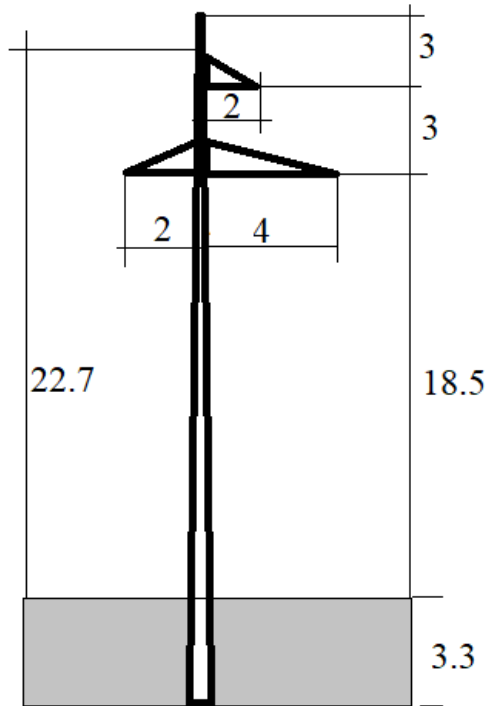


Рис. 3. Эскиз опоры ПСБ-110-1
 Fig. 3. Sketch of transmission tower ПСБ-110-1

$U(x, y, z) = U_2$. В результате решения уравнения (1) определяется распределения линейной плотности заряда $\tau(l)$, которое позволяет рассчитать полный заряд одного из проводников, например, $q_1 = \int_{l_1} \tau(l) dl$ и искомую емкость $C_{12} = q_1 / |U_1 - U_2|$.

При численной реализации интеграл в левой части (1) заменяется конечной суммой с аппроксимацией ядра уравнения какой-либо квадратурой, связанной с разбиением отрезков l_1 и l_2 на малые конечные элементы. например с использованием метода трапеций. При этом интегральное уравнение (1) трансформируется в линейную систему уравнений относительно заряда на

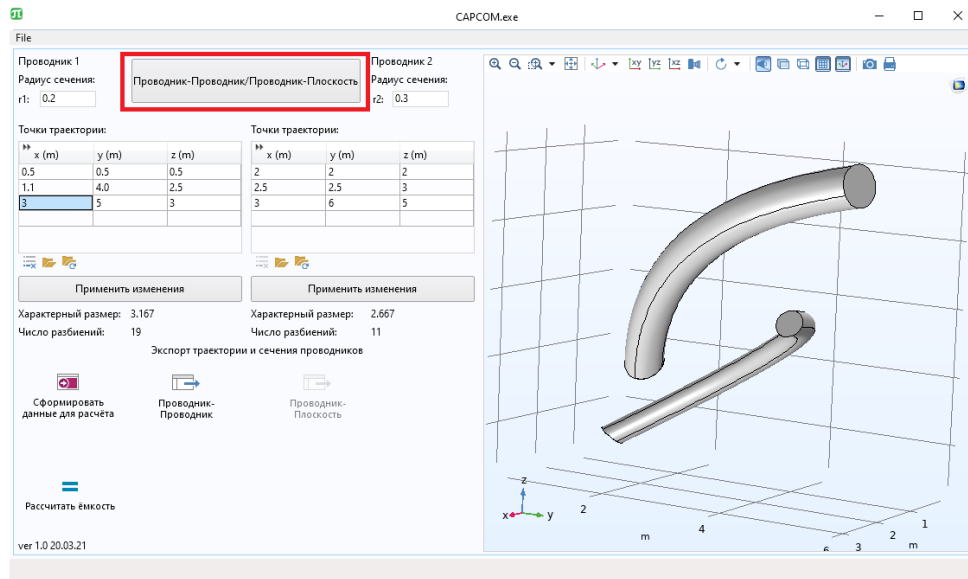


Рис. 4. Интерфейс приложения CAPCOM
 Fig. 4. The interface of CAPCOM application

каждом из таких элементов. После решения системы заряд проводника 1 вычисляется простым суммирование зарядов его элементов. Описанный метод расчета емкости тонких проводников произвольной формы реализован в качестве автономного приложения, использующего для ввода траекторий проводников интерфейс на базе COMSOL Multiphysics (рис. 4).

Результаты и обсуждение

С помощью описанной выше технологии были выполнены оценки емкостей в схеме замещения (рис. 2) применительно к конфигурации промежуточной опоры (рис. 3) для антенн различной конфигурации и размеров. В частности анализировались: стандартная линейная антенна длиной 6 и 10 м, рамочные прямоугольные антенны 6×0.5 мм с продольной линейной вставкой (рис. 5) и без нее. Результаты этих расчетов представлены табл. 1.

Таблица 1

Расчетные емкости антенн из трубчатого профиля диаметром 21.6 мм различной конфигурации по отношению к фазам и поверхности земли ВЛ-110 кВ при высоте подвеса 0.25 м

Table 1

Calculated capacities of antennas made of a tubular profile with a diameter of 21.6 mm for different configurations with respect to the phases and the earth's surface for power line 110 kV at suspension antenna size of 0.25 m

Антенна	C_a	C_b	C_c	$C_{ЗЕМ}$
	Φ			
1. Прямолинейная (6 м)	3.94E-11	2.81E-11	2.78E-11	2.65E-11
2. Прямолинейная (10 м)	6.65E-11	4.56E-11	4.51E-11	4.21E-11
3. Рамочная 6×0.5 мм	7.33E-11	5.23E-11	5.18E-11	5.03E-11
4. Рамочная 6×0.5 мм с продольной линейной вставкой (вертикальный подвес)	8.73E-11	5.90E-11	5.84E-11	5.70E-11
5. Рамочная 6×0.5 мм с продольной линейно вставкой (горизонтальный подвес)	8.16E-11	5.96E-11	5.93E-11	5.80E-11

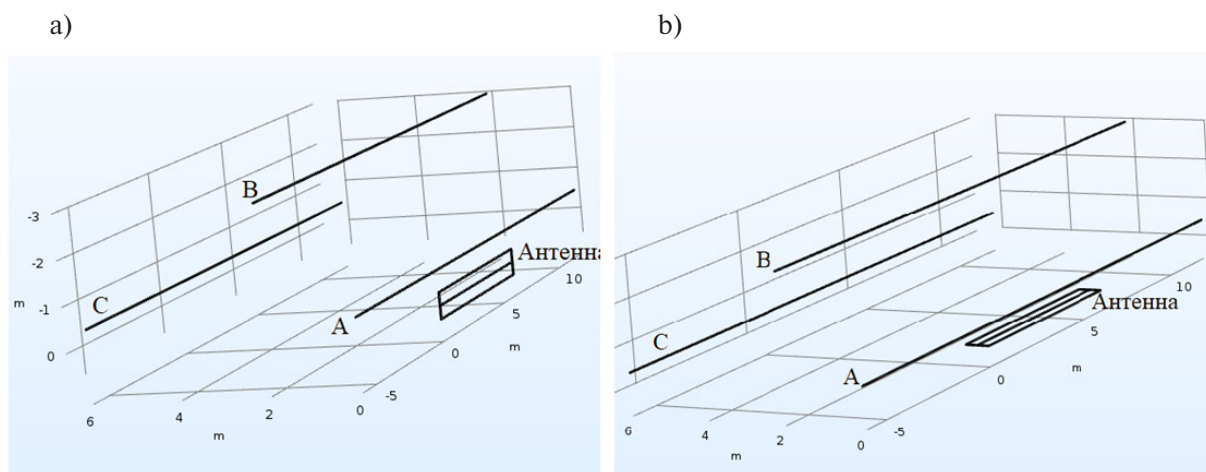


Рис. 5. Рамочная антенна с продольной линейной вставкой.
а – вертикальное, б – горизонтальное крепление к проводу

Fig. 5. Loop antenna with longitudinal linear insert. a – vertical, b – horizontal fastening to the wire

При численных оценках тока лампы, с использованием приведенной выше схемы замещения, установлено, что в независимости от соотношения между емкостями величина рабочего тока зависит от средней величины емкости по отношению ко всем элементам системы, что видно из табл. 2.

Таблица 2

Расчетный рабочий ток лампы (мА) при различных конфигурациях антенн

Table 2

Calculated lamp operating current (mA) for various antenna configurations

Антенна	Линейная, 10 м	Рамка 6 × 0.5 м со вставкой,	
		параллельно земле	перпендикулярно земле
Высота подвеса 0.5 м Диаметр профиля, 24 мм	3.86	4.73	4.72
Высота подвеса, 0.25 м Диаметр профиля, 24 мм		4.73	4.72
Диаметр профиля, 12 мм Высота подвеса, 0.25 м		4.36	4.4
Диаметр профиля, 12 мм Высота подвеса, 0.5 м		4.41	4.44

В частности, применение рамочной антенны с уменьшенным до 6 м максимальным габаритом позволяет получить превосходящий на 20% ток лампы по сравнению со случаем стандартной линейной антенны длиной 10 м. (табл. 2). Следует отметить также, что на величину электрической емкости и, следовательно, на рабочий ток лампы влияет размер сечения профиля, из которого изготавливается антенна. Уменьшение диаметра профиля в два раза приводит к уменьшению рабочего тока лампы на 5%, в то время как масса конструкции уменьшается в два раза.

Применение антенн сложных конфигураций, в частности рамочных, нуждается также в оценке влияния ветровых нагрузок на конструкцию, поскольку ее аэродинамическое сопротивление возрастает [13–14]. Для оценки отклонения конструкции при вертикальном подвесе рамки от

равновесного положения под воздействием ветра воспользуемся стандартными соотношениями, применяемыми для подобных расчетов применительно к проводам воздушных линий [15]. При этом сила ветровой нагрузки на провод длиной l и диаметром сечения d оценивается формулой

$$F = 0.6 * \rho v^2 l d \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

где v – скорость ветра, $\rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха, φ – угол между направлением ветра и осью провода. Поскольку диаметр профиля значительно меньше расстояния между линейными элементами антенны, то обтекание каждого из них потоком ветра можно считать независимым и рассчитывать аэродинамическую силу как сумму аэродинамических сил, действующих на отдельные элементы. Поэтому в (2) в качестве длины l используется сумма длин всех элементов конструкции антенны. В частности, для рассматриваемой здесь рамочной антенны $6 \times 0.5 \text{ м}$ с линейной вставкой $l = 19 \text{ м}$. Угол отклонения γ конструкции от вертикального положения находится из соотношения $\text{tg } \gamma = F/Mg$, где $M = m'l$ – масса конструкции, m' – погонная масса профиля, $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. Для наименее благоприятного режима обтекания конструкции $\varphi = 90^\circ$ имеем:

$$\text{tg } \gamma = \frac{0.6\rho v^2 d}{m'g}. \quad (3)$$

Смещение нижней кромки антенны от оси провода составит:

$$h_a = d_a \text{tg } \gamma,$$

где $d_a = 0.5 \text{ м}$ высота рамки антенны.

Для принимаемой для средней полосы РФ нормативной скорости ветра 10 м/с . Расчетные смещения от оси провода вертикально ориентированной рамочной антенны $6 \times 0.5 \text{ м}$ со вставкой приведены в табл. 3.

Таблица 3

Отклонения (см) рамочной антенны $6 \times 0.5 \text{ м}$ со вставкой при скорости ветра 10 м/с

Table 3

Deviations (cm) of the loop antenna $6 \times 0.5 \text{ m}$ with linear insert at a wind speed of 10 m/s

Сталь $24 \times 2 \text{ мм}$	Сталь $12 \times 1 \text{ мм}$	Алюминиевый сплав $24 \times 2 \text{ мм}$	Алюминиевый сплав $12 \times 1 \text{ мм}$
8	16	23	47

Из рассмотренных здесь профилей наименьшие смещения обеспечивает антенна из стальной трубы $24 \times 2 \text{ мм}$. При размещении маркера на некотором удалении от стойки опоры приведенные значения смещений антенны не являются опасными, т.к. расстояния между фазами составляет величину около 6 м . Как следует из (3), наименьшими углами отклонения характеризуется профиль сплошного сечения (пруток), обладающий наименьшим значением отношения d/m' .

Для анализа поведения рамочной антенны с горизонтальным (параллельно земле) размещением, приведенные выше оценки неприменимы, поскольку протяженные элементы попадают в возмущенный впереди расположенным элементом поток (рис. 6). В общем случае целесообразны более тщательные натурные или численные исследования аэродинамических характеристик разрабатываемых антенн сложной формы.

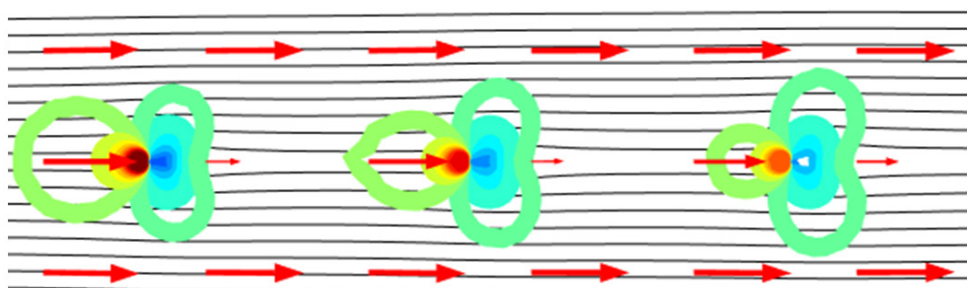


Рис. 6. Изобары и вектор скорости воздушного потока при обтекании рамочной антенны с горизонтальным размещением

Fig. 6. Isobars and vector of air flow velocity in flowing around a loop antenna with horizontal fastening

Заключение

Эффективность систем перманентной световой маркировки газоразрядными лампами проводов воздушных линий электропередачи может быть повышена путем применения электростатических антенн сложной формы. В частности, рамочные антенны позволяют при меньшей длине увеличить рабочий ток и яркость лампы. Такой подход позволяет избежать чрезмерно длинных антенн при маркировке линий 35 – 110 кВ.

Снижение массовых характеристик сложных антенн достигается применением трубчатых профилей меньшего диаметра. При этом электрическая емкость антенны снижается незначительно.

Наличие у антенны сложной формы делает необходимым в общем случае исследование их аэродинамических характеристик и перемещений системы маркировки под действием ветровых нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Маркеры воздушных линий электропередач. СТО 34.01-2.2-016-2016 ПАО РОССЕТИ 02.11.2016.
- [2] РУЭСТОП ГА-95 Руководство по электросветотехническому обеспечению полетов в гражданской авиации Российской Федерации. Департамент воздушного транспорта Российской Федерации.
- [3] ИКАО, Руководство по проектированию аэродромов – Часть 4 – Визуальные средства, 2004.
- [4] **Jenkins A.R.** Avian collisions with power lines: A global review of causes and mitigation with a South African perspective / Jenkins A.R., Smallie J.J., Diamond M. // Bird Conservation International. – 2010. – Т. 20. – № 3. – С. 263–278. DOI: 10.1017/S0959270910000122
- [5] **Oliveira J., Carrasco G.** Electromagnetic transient study in the signaling system of the towers of the Orinoco river crossing // 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC'06. – 2006. – С. 1–6. DOI: 10.1109/TDCLA.2006.311581
- [6] Capacitive power tapping from insulated shield wire of overhead high voltage transmission lines with tuning / Shu S., Zheng Y., Xia K. [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2021. – Т. 36. – № 1. – С. 191–204. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2980163
- [7] Development of power supply system for obstruction lights exploiting induced current which flows through overhead ground wires / Yamaguchi T., Takano S., Naganuma O. [et al.] // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. – 2002. – Т. 3. – № ASIA PACIFIC. – С. 2176–2180. DOI: 10.1109/tdc.2002.1177800
- [8] Electric field analysis in warning light for power lines of high voltage / Güemes J.A., Iraolagoitia A., Fernández P. [et al.] // Renewable Energy and Power Quality Journal. – 2012. – Т. 1. – № 10. – С. 1230–1234. – DOI: 10.24084/repqj10.659

[9] Первая Российская система постоянной световой маркировки проводов линий электропередач высокого напряжения / И.О. Иванов, А.Е. Монастырский, А.С. Резник [и др.] // *Материаловедение. Энергетика.* – 2020. – Т. 26. – № 2. – С. 20–30. DOI: 10.18721/JEST.26202

[10] **Иоссель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г.** Расчет электрической емкости // Ленинград, Энергоиздат, 1981.

[11] **Бессолицын А.В.** Использование численного расчета трехмерного электростатического поля для определения собственных и взаимных емкостей проводов воздушной линии / А.В. Бессолицын, М.Г. Попов, Е.Н. Хорошина // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.* – 2010. – № 2-2(100). – С. 55–59.

[12] **Юфанова Ю.В.** Расчет электрической емкости тонких осесимметричных тел / Ю.В. Юфанова // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика.* – 2002. – № 3. С. 6–9.

[13] *Правила устройства электроустановок – 7-е издание. Глава 2.5.* – 2003.

[14] Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко, Е.Г. Пономаренко [и др.] // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ.* – 2012. – № 1. – С. 38–44.

[15] **Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.** Изоляция установок высокого напряжения // М.: Энергоатомиздат, 1987.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АСТАФЬЕВ Георгий Сергеевич – студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: astafiev.gs@edu.spbstu.ru

ВОЛОШИН Кирилл Валерьевич – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: kir_vol@mail.ru

ТИТКОВ Василий Васильевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: titkovprof@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 26.06.2021

REFERENCES

[1] Markery vozdushnykh liniy elektroperedach (Markers for overhead power lines. corporative standart). STO 34.01-2.2-016-2016 PAO ROSSETI 02.11.2016.

[2] RUESTOP GA-95 Rukovodstvo po elektrosvetotekhnicheskomu obespecheniyu poletov v grazhdanskoj aviatsii Rossiyskoy Federatsii. Departament vozdušnogo transporta Rossiyskoy Federatsii (The Guide to electrical and lighting equipment flights in the civil aviation of the Russian Federation. Air transport Department of the Russian Federation). 1995.

[3] ICAO, Aerodrome Design Manual – Part 4 – Visual Aids, 2004.

[4] **A.R. Jenkins, J.J. Smallie**, Avian collisions with power lines: a global review of causes and mitigation with a South African perspective, *Bird Conservation International*, 20(3) (2010) 263–278. DOI: 10.1017/S0959270910000122

- [5] **J. Oliveira, G. Carrasco**, Electromagnetic Transient Study in the Signaling System of the Towers of the Orinoco River Crossing, 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America (2006) 1–6. DOI: 10.1109/TDCLA.2006.311581
- [6] **S. Shu, Y. Zheng, K. Xia, G. Qi**, Capacitive Power Tapping From Insulated Shield Wire of Overhead High Voltage Transmission Lines With Tuning, IEEE Transactions on Power Delivery, 36(1) (2021) 191–204. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2980163
- [7] **T. Yamaguchi, S. Takano, O. Naganuma, M. Matsuoka, H. Nakamura, K. Tomonaga**, Development of power supply system for obstruction lights exploiting induced current which flows through overhead ground wires, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 3(ASIA PACIFIC) (2002) 2176–2180. DOI: 10.1109/TDC.2002.1177800
- [8] **J.A. Güemes, A. Iraolagoitia, P. Fernández, J. Sánchez**, Electric field analysis in warning light for power lines of high voltage, Renewable Energy and Power Quality, 1(10) (2012) 1230–1234. DOI: 10.24084/repqj10.659
- [9] **I.O. Ivanov, A.Y. Monastyrskiy, A.S. Reznik, V.V. Titkov, A.O. Grebtsov, G.N. Fedorenko**, The first Russian system of permanent light marking of high voltage overhead power lines, Materials Science. Power Engineering, 26(2) (2020) 20–30. DOI: 10.18721/JEST.26202
- [10] **Yu.Ya. Iossel, E.S. Kachanov, M.G. Strunskiy**, Raschet elektricheskoy yemkosti (Calculation of electrical capacity)//Leningrad, Energoizdat, 1981.
- [11] **A.V. Bessolitsyn, M.G. Popov, E.N. Horoshinina**, Using the numerical calculation of three-dimensional electrostatic field to determine self and mutual capacitance wires overhead line, Materials Science. Power Engineering, 2 (2010) 55–59.
- [12] **Yu.V. Yufanova**, Raschet elektricheskoy yemkosti tonkikh osesimmetrichnykh tel (Calculation of electrical capacity of thin axisymmetric bodies), Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika, 3(2002) 6–9.
- [13] **Pravila ustroystva elektroustanovok (National Electrical Code)**, (2003).
- [14] **I. Sergey, Y. Bladyko, Y. Panamarenka, B. Tsemekhman, V. Tarasov**, Action analysis for ice, wind and electro dynamic loads in spans with arbitrary wire layout, Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, (1) (2012) 38–44.
- [15] **G.S. Kuchinskiy, V.Ye. Kizevetter, Yu.S. Pinal**, Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya (Insulation of high voltage installations) // M.: Energoatomizdat, 1987.

THE AUTHORS

ASTAFIEV Georgiy S. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: astafiev.gs@edu.spbstu.ru

VOLOSHIN Kirill V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: kir_vol@mail.ru

TITKOV Vasily V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: titkovprof@yandex.ru

Received: 26.06.2021