

DOI: 10.18721/JEST.26202
УДК 621.327

*И.О. Иванов¹, А.Е. Монастырский¹, А.С. Резник¹,
В.В. Титков¹, А.О. Гребцов², Г.Н. Федоренко³*

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

² Красный квадрат, Выборг, Россия

³ ООО «Системы светодиодного света», Выборг, Россия

ПЕРВАЯ РОССИЙСКАЯ СИСТЕМА ПОСТОЯННОЙ СВЕТОВОЙ МАРКИРОВКИ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В работе описана разработка системы перманентной световой маркировки проводов воздушных линий электропередачи высокого напряжения на основе отечественной элементной базы. Выполнен расчет и выбор источника питания газонаполненных ламп, использующего энергию электростатического поля проводов высокого напряжения. Выполнены стендовые исследования вольт-амперной характеристики газонаполненного источника света и показана возможность непосредственного использования электростатического поля трехфазной линии электропередачи высокого напряжения для питания лампы. Проведены высоковольтные импульсные испытания устройства с параметрами воздействий характерными для грозовых разрядов. Экспериментально показана устойчивость разработанной системы к перенапряжениям на проводах воздушных линий. Проведены стендовые высоковольтные испытания устройства в сборе на макете воздушной линии собранной в лаборатории Техники высоких напряжений СПбПУ Петра Великого. Исследованы спектральные характеристики применяемых ламп. Устройство введено в опытную эксплуатацию.

Ключевые слова: световая маркировка воздушных линий; газонаполненные лампы, использование электростатического поля проводов воздушной линии, параметры электростатической антенны, высоковольтные испытания, фотометрические исследования.

Ссылка при цитировании:

Иванов И.О. и др. Первая российская система постоянной световой маркировки проводов линий электропередач высокого напряжения // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 20–30. DOI: 10.18721/JEST.26202

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

*I.O. Ivanov¹, A.E. Monastyrskiy¹, A.S. Reznik¹,
V.V. Titkov¹, A.O. Grebtsov², G.N. Fedorenko³*

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

² Red square, Vyborg, Russia

³ LLC "LED Light Systems", Vyborg, Russia

THE FIRST RUSSIAN SYSTEM OF PERMANENT LIGHT MARKING OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD POWER LINES

The paper describes the development of a permanent light marking system for high-voltage overhead power lines based on the domestic element base. We calculated and chose a power source for gas-filled lamps using the energy of the electrostatic field of high-voltage cables. The

paper presents laboratory studies of the volt-ampere characteristic of a gas-filled light source and the possibility of direct use of the electrostatic field of a three-phase high-voltage power line for the lamp power supply. We performed high-voltage pulse tests of the device with the pulse parameters typical for lightning discharges and experimentally proved the stability of the developed system to overvoltage on overhead lines. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University provided a model of an overhead transmission line in the laboratory of high-voltage equipment for assembly and bench high-voltage tests of the device. We studied the spectral characteristics of the lamps and put the device into trial operation.

Keywords: light marking of overhead lines; gas-filled lamps, use of the electrostatic field of overhead line wires, parameters of the electrostatic antenna, high-voltage tests, photometric studies.

Citation:

I.O. Ivanov and etc., The first Russian system of permanent light marking of high voltage overhead power lines, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (02) (2020) 20–30, DOI: 10.18721/JEST.26202

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

Введение. Заградительные огни опор и маркеры на проводах воздушных линий электропередач высокого напряжения предназначены для обеспечения авиационной безопасности для участков ЛЭП, расположенных вблизи аэропортов, а также во всех случаях, когда необходима световая маркировка линий и их элементов [1–5]. До настоящего времени в качестве автономных источников света для указанных целей в странах ЕС и Российской Федерации применялись неоновые лампы с холодным катодом, производства компании OBSTA (Франция) [6]. Автономность таких источников света обеспечивается размещением неоновой лампы, оборудованной электростатической антенной, непосредственно на проводе высокого напряжения. Вследствие наличия емкостных связей антенны, подключенной к одному из полюсов лампы, с остальными проводами трехфазной системы, на лампе, второй полюс которой подключен непосредственно к удерживающему ее проводу, возникает достаточная для зажигания разряда разность потенциалов (рис. 1). Лампы BALISOR производства OBSTA [6] до последнего времени были уникальной продукцией, применяемой по всему миру. Лампа обеспечивает свечение с силой света порядка 10 Кандел, что соответствует требованиям и нормам ИКАО. Согласно данным производителя лампы BALISOR оборудованы блоком электромагнитной совместимости, предназначенным по заявлению производителя «для исключения влияния наводок на свечение лампы» По сути данный блок является высокоомным балластным сопротивлением, ограничивающим рабочий ток лампы на уровне 10 мА. Наличие большого балластного сопротивления даже при данных токах является причиной потерь на уровне сотен Ватт. Кроме того указанный блок ЭМС, как дополнительный элемент, снижает надежность и повышает массогабаритные показатели системы.

Длина антенны, необходимая для устойчивого горения лампы BALISOR, согласно [6] составляет 5 м для линий класса 220 кВ и выше и до 40 м в случае установки на линии 35 кВ. В последнем случае массогабаритные показатели заметно возрастают. Применение электростатических антенн большой длины связано с необходимостью создания достаточного для зажигания разряда начального напряжения на лампе.

Отечественные предприятия «Красный Квадрат», «АО ПЛАЗМА» «Системы светодиодного света» (г. Выборг) в кооперации с Санкт-Петербургским Политехническим университетом и рядом других предприятий разработали альтернативную систему маркировки проводов АППС-С, на основе принципа, применяемого в системе BALISOR. Одним из важных отличий новой разработки является лампа с увеличенной площадью электродов и низким, порядка 4 мА, рабочим током. При этом обеспечивается устойчивое горение лампы с излучением красного цвета в диапазоне длин волн 639–704 нм. В рамках данной статьи рассмотре-

ны некоторые детали исследований, выполненных в процессе разработки системы световой маркировки проводов.



Рис. 1. Лампа BALISOR с антенной, на высоковольтном проводе

Fig. 1. BALISOR lamp with antenna, high voltage wire

Стендовые исследования рабочих параметров лампы

С помощью стендовых исследований и осциллографических измерений была исследована работа лампы, получены значения напряжения зажигания лампы и рабочие значения силы тока, осциллограммы напряжения и тока, а также проведен анализ частоты перезажигания. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

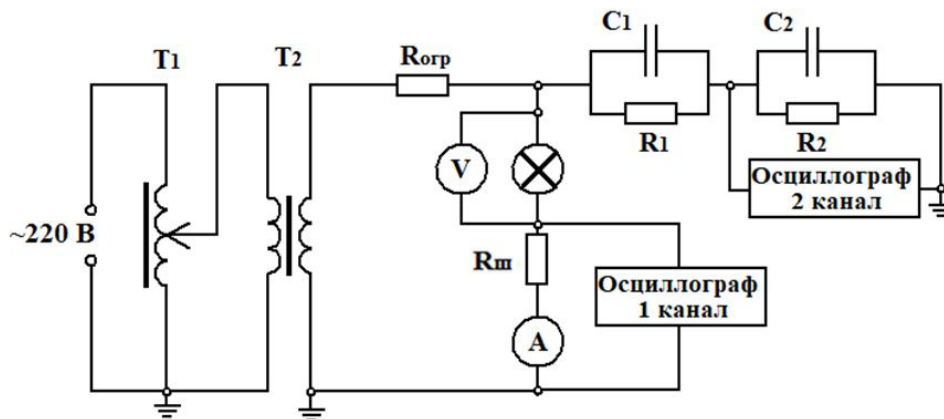


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проведения осциллографических исследований

Fig. 2. Scheme of the experimental setup for conducting oscillographic studies

Высокое напряжение создавалось с помощью автотрансформатора T_1 и повышающего высоковольтного трансформатора T_2 . В качестве трансформатора T_2 использовались трансформатор с высокой индуктивностью рассеяния (представлен заказчиком) и трансформатор с низкой индуктивностью рассеяния (НОМ–10). Питание лампы осуществлялось через ограничительное сопротивление $R_{огр}$. Вольтметр V и амперметр A , предназначенные для измерения действующего значения напряжения и тока в цепи. Для измерения осциллограмм напряжения и тока ис-

пользовался цифровой осциллограф GW Instek GDS-72072. Осциллограммы тока были получены с помощью токового шунта $R_{ш} = 50\Omega$, а напряжения с помощью резистивно-емкостного делителя.

Исследования показали, что зажигание лампы происходит при напряжении 3.3–3.4 кВ и токе 1.5–1.8 мА. При этом наблюдается стабильное свечение лампы. При дальнейшем увеличении напряжения происходит уменьшение активного сопротивления лампы, что приводит к незначительному снижению напряжения до рабочего значения ~ 3.1 –3.2 кВ и росту тока в цепи. При достижении величины тока 6–10 мА напряжение на лампе практически не меняется. Зависимость изменения напряжения на лампе от тока в цепи представлена на рис. 3. Результаты получены с использованием трансформатора с высокой индуктивностью рассеяния, при этом ограничительное сопротивление $R_{огр}$ отсутствовало.

Исследовалась также схема с трансформатором с низкой индуктивностью рассеяния без ограничительного сопротивления: стабильной работы лампы не удалось добиться. Наблюдалось мерцание лампы и броски тока в цепи ~ 40 –60 мА. Работа лампы стабилизировалась и наблюдалось устойчивое горение при добавлении ограничительного сопротивления ~ 20 М Ω .

По результатам данных исследований можно сделать вывод, что для стабильной работы лампы необходимо включать в цепь последовательное сопротивление – балласт. В проводимых исследованиях в качестве последовательного сопротивления выступали ограничительный резистор, индуктивное сопротивление трансформатора или емкостное сопротивление относительно земли в случае имитации работы лампы на ЛЭП. В реальных условиях при работе лампы на ЛЭП оцениваемое ниже емкостное сопротивление, образующееся между фазами, оказывается достаточным для стабилизации работы.

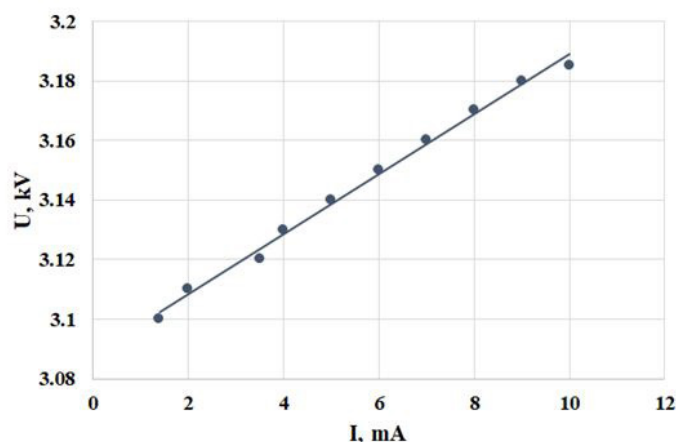


Рис. 3. Зависимость напряжения на лампе от тока в цепи

Fig. 3. The dependence of the voltage on the lamp from the current in the circuit

В ходе исследований были получены осциллограммы тока и напряжения. Типичная осциллограмма представлена на рис. 4. Используемый цифровой осциллограф имеет полосу пропускания 70 МГц и частоту дискретизации измеряемого сигнала 2 Гвыб/с (т.е. $2 \cdot 10^9$ измерений в секунду). На полученных осциллограммах в диапазоне тока 1.5–10 мА высокочастотных колебаний не обнаружено, что свидетельствует о том, что переза зажигания лампы происходят в соответствии с колебаниями напряжения промышленной частоты при каждом максимуме напряжения, т.е. с удвоенной промышленной частотой – 100 Гц.

Система автономного питания лампы

Полученные в предыдущем разделе параметры устойчивого горения лампы можно обеспечить за счет использования емкостной связи антенны устройства с другими фазными проводниками воздушной линии. Используя стандартную оценку электрической емкости C , образующуюся между проводниками с радиусом кругового сечения R , длиной L (длина антенны), находящихся на расстоянии D друг от друга

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

для ламп с арматурой, размещаемых на проводах воздушной линии электропередачи класса 330 кВ получаем характерные значение емкости антенны по отношению к соседним фазам.

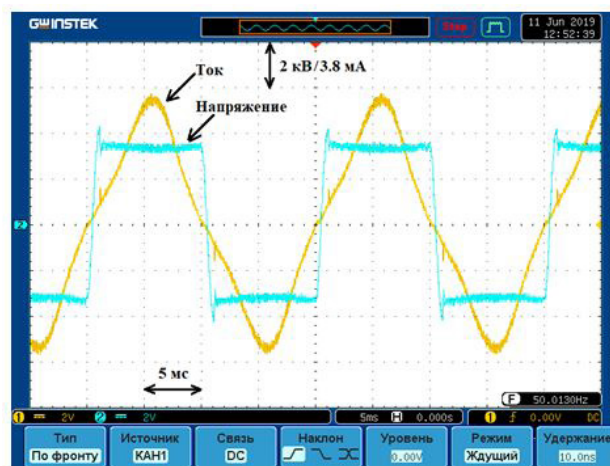


Рис. 4. Типичная осциллограмма тока и напряжения
Fig. 4. Typical waveform of current and voltage

$C_a = 111,8$ пФ – емкость между фазой А и антенной лампы, $C_b = 65,2$ пФ – емкость между антенной и фазой В, $C_c = 58,6$ пФ – емкость между антенной и фазой С, В схему замещения рис. 5 входит также емкость антенны на землю $C_{аз}$. Однако последняя на порядок ниже междофазных и в расчетах не учитывалась. Как нетрудно видеть из рис. 3 активное электрическое сопротивление лампы имеет порядок 500 кОм, в то время как емкостные сопротивления связей антенна-соседние фазы оказываются на порядок выше. Поэтому именно последние в совокупности с фазными напряжениями линии определяют ток лампы, который можно регулировать, изменяя длину антенны L .

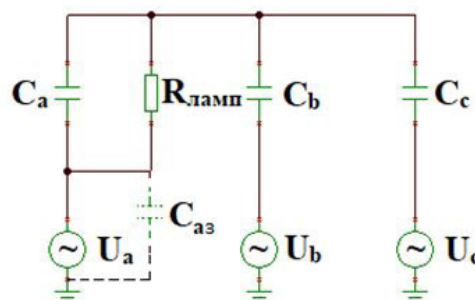


Рис. 5. Схема замещения автономной системы питания лампы с установкой на проводе
Fig. 5. The equivalent circuit of an autonomous lamp power system with installation on a cable

Испытания на макете воздушной линии электропередачи

Объектом испытаний являлось устройство в сборе (рис. 6), размещаемое на высоковольтном проводе, подключенном к испытательному трансформатору.

Устройство АППС-С для маркировки воздушных ЛЭП 330 кВ состоит из газоразрядной лампы (14), антенны (8) и арматуры для подвеса их на фазный провод ЛЭП. Использовались два варианта подвеса лампы: с помощью подвесного изолятора (1) и шунта в виде изолированного проводника, соединяющего фазный провод с точкой (2) и с помощью металлического шунта в виде трубки, установленной вместо подвесного изолятора. Эскизный чертеж устройства показан на рис. 6, а внешний вид на рис. 7.

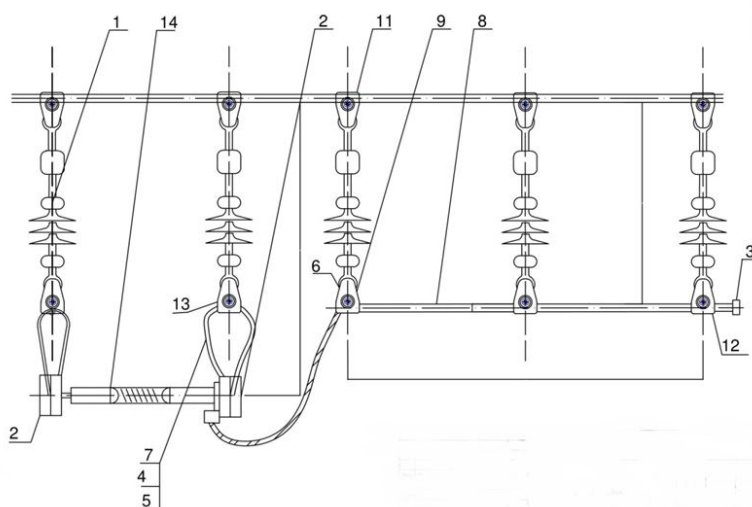


Рис. 6. Конструкция устройства АППС-С

Fig. 6. APPS-S device design

Работоспособность антенной системы электропитания лампы проверялась на макете однофазной линии электропередачи класса 190 кВ, что соответствует условиям эксплуатации на реальной трехфазной линии электропередачи напряжением 330 кВ (рис. 5). В качестве источника высокого напряжения использовался каскад трансформаторов KOCH & STERZEL 330 кВ. Измерение высокого напряжения производилось путем измерения напряжения на низкой стороне с использованием градуировочной кривой.

Первоначальная длина установленной антенны составила 6 м. В процессе экспериментов напряжение плавно поднималось до напряжения зажигания, которое составило 30 кВ, а затем плавно было поднято до напряжения 110 кВ, при котором лампа вышла на режим устойчивого горения, после чего напряжение линии было увеличено до рабочего уровня 190 кВ.

По аналогичной методике было испытано устройство АППС-С с длиной антенны 3 и 2 м. Напряжение зажигания для этих длин составило соответственно 45 и 75 кВ, а напряжение устойчивого горения – 140 и 180 кВ.

Наряду с проверкой характеристик зажигания смонтированной на проводе воздушной линии лампы производились измерения интенсивности коронного разряда на конструктивных элементах (антенна, крепежные узлы изоляторов, внешние электроды лампы). Измерения проводились для условий сухого воздуха и при интенсивном искусственном дожде, обеспечивающим относительную влажность воздуха до 100%. Измерения выполнялись с помощью УФ-камеры Даусог. Во всех режимах приложения напряжения и увлажнения наличия короны на элементах устройства не обнаружено.



Рис. 7. АППС-С: лампа с арматурой на макете однофазной линии 190 кВ
 Fig. 7. APPS-S: lamp with fittings on the model of a single-phase line 190 kV

Также в рамках данной серии экспериментов производились измерения тока лампы с помощью специально разработанного прибора, включаемого вместо шунта между полюсом лампы и точкой подключения антенны. Результаты замеров тока лампы (рис. 8) при этом хорошо согласуются с данными, полученными при описанных выше стендовых исследованиях.

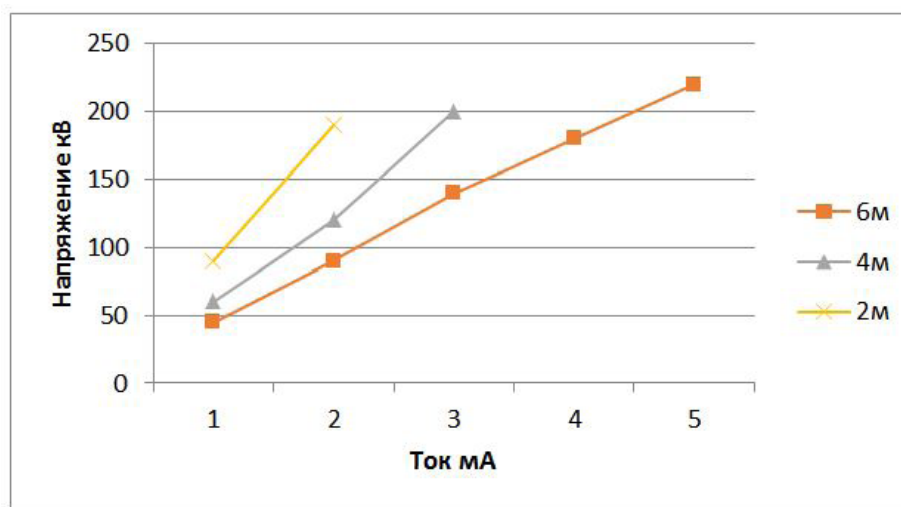


Рис. 8. Внешняя ВАХ устройства АППС-С в сборе при испытаниях на макете однофазной линии при различных длинах антенны.

Fig. 8. External CVC of the APPS-S device assembled during tests on a single-phase line model at various antenna lengths.

Устойчивость к импульсным воздействиям

В процессе эксплуатации воздушных линий в результате коммутаций и грозовой деятельности на проводах возникают импульсные перенапряжения, многократно превышающие амплитуду фазных напряжений. Очевидно, что лампа должна сохранять работоспособность в условиях воздействия перенапряжений. Наиболее высокую кратность имеют грозовые импульсы перенапряжения, поэтому в качестве испытательного выбран импульс такого типа [7].

Амплитуда грозового импульса напряжения, воздействующего на лампу в процессе эксплуатации, определяется импульсной электрической прочностью поддерживающих гирлянд

изоляторов. В соответствии с [8] импульсная электрическая прочность изоляторов для линий электропередачи класса 330 кВ при воздействии грозового импульса 1.2/50 мкс ограничена на уровне $U_{\text{имп.пр.}} = 1300$ кВ. Таким образом, максимальная амплитуда грозового импульса, воздействующего непосредственно на лампу для исследованных и апробированных условий эксплуатации с рабочим напряжением $U_p = 5$ кВ, составит $U_m = (5/330) \cdot 1300 \cdot 1.73 \cdot 1.41 = 48$ кВ

Исследуемый образец лампы подвергался многократному воздействию импульсов генератора импульсных напряжений (ГИН) с амплитудой 50 кВ, длительностью 200 мкс. Время нарастания напряжения составляло ~ 1 мкс. Для ограничения тока использовалась емкость 235 пФ, подключенная последовательно исследуемому образцу (рис. 9). Выбор номинала ограничивающей емкости соответствует суммарной емкости связи антенна лампы – провода ВЛ, составляющей около 220 Пф. После последовательного приложения серий из 10, 50, 70 и 100 импульсов проверялась работоспособность лампы и напряжение зажигания.

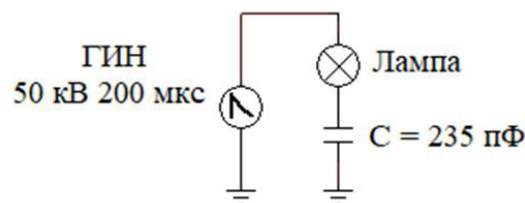


Рис. 9. Упрощенная схема импульсных испытаний лампы

Fig. 9. Simplified impulse lamp test circuit

В ходе исследований изменений в работе лампы не обнаружено. После воздействия 100 импульсов перенапряжения напряжение зажигания лампы и ее светимость не изменились.

Оценка теплового режима работы лампы

Принимая во внимание длительный непрерывный режим работы лампы, целесообразно оценить температуру устройства, повышение которой может привести к деструкции его элементов.

Организация прямого измерения температуры лампы в условиях реальной эксплуатации является технически достаточно сложной проблемой, поэтому оценка теплового поля устройства выполнена путем численного моделирования по методу конечных элементов. Для оценки максимального нагрева в качестве температуры окружающей среды использовалось значение 40 град. С. Опуская детали расчета, отметим, что учитывались все физические механизмы теплообмена: кондуктивная и конвективная теплопередача внутри колбы лампы, радиационный сброс энергии из плазменной области, конвективная теплоотдача на поверхности колбы лампы. Установившееся распределение температуры в сечении лампы представлено на рис. 10. Максимальная температура при этом является допустимой для эксплуатации устройства.

Фотометрические исследования

Фотометрические характеристики лампы исследовались в специализированной лаборатории в соответствии со стандартными методиками определения характеристик источников света [9]. В частности были получены спектральные характеристики излучения лампы и колориметрическая характеристика по МК-31, где показана положение цвета исследованного источника и границ, допускаемых стандартом МАК в цветовых координатах МК-31 (рис. 11). Световой поток, лампы при рабочих токах 5-6 мА составляет величину около 200 лм.

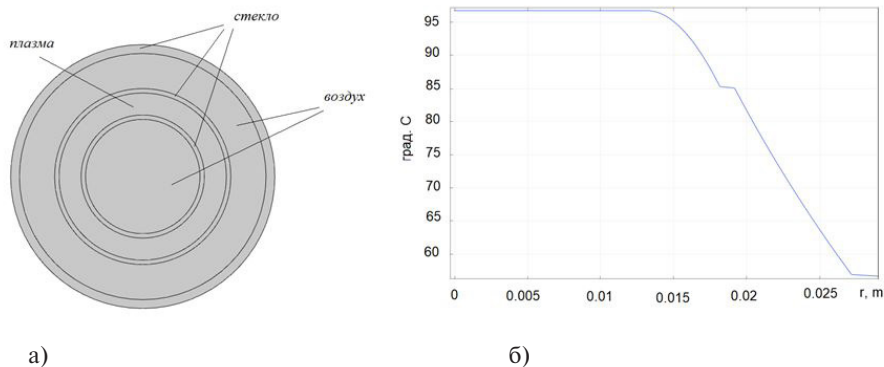


Рис. 10. Результаты расчета теплового режима лампы при температуре окружающей среды 40 град.С: а) расчетная модель; б) установившееся радиальное распределение температуры (град. С) в сечении лампы

Fig. 10. The results of the calculation of the heating mode of the lamp at an ambient temperature of 40 degrees C. With: a) calculation model; b) steady-state radial temperature distribution (degrees C) in the lamp section

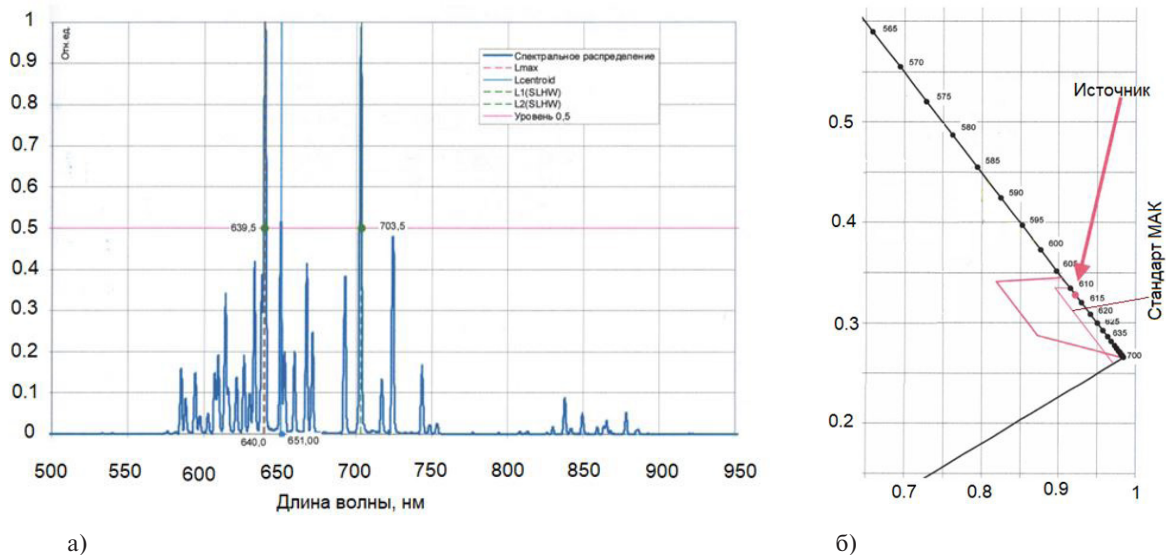


Рис. 11. Цветовые характеристики лампы: а) относительное спектральное распределение мощности излучения; б) положение цвета источника в стандартных цветовых координатах МК-31

Fig. 11. Color characteristics of the lamp: a) relative spectral distribution of radiation power; b) the color position of the source in standard color coordinates MK-31

Опытная эксплуатация

Пилотные образцы изделия АППС-С находятся в опытной эксплуатации на ВЛ 330 кВ Копорская –Пулковская МРСК Северо-запада начиная с октября 2018 года. В течение полу- годового периода использования данных маркеров не отмечалось как выхода их и строя, так и изменения визуальных характеристик светимости. Изделия АППС-С поставляются на ЛЭП 750, 500,330, 220,110 Кв и прошли аттестацию по основным параметрам в сертифицированных лабораториях НТЦ ФСК.

Выводы

В кооперации специалистов промышленности и науки разработана первая российская система автономной подсветки (маркировки) проводов высокого напряжения АППС-С, состоящая исключительно из компонент и узлов отечественного производства. Система обладает рядом преимуществ по сравнению с зарубежным аналогом, заключающимися в меньших электрических потерях, массогабаритных показателях и более высоких светотехнических характеристиках.

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] Руководство по проектированию аэродромов. Часть 4. Глава 14. Визуальные средства. ИКАО. Издание четвертое – 2004.
- [4] Информация о случаях столкновения воздушных судов с проводами линий электропередачи. Федеральное агентство воздушного транспорта. – М., 2013.
- [5] Конвенция о международной гражданской авиации. Приложение 14. Аэродромы. Том 1 Проектирование и эксплуатация аэродромов. Глава 6. Визуальные средства для обозначения препятствий. Издание 5 2009 г.
- [6] Интернет ресурс: obsta.ru, 04.05.2020.
- [7] **Титков В.В., Халилов Ф.Х.** Молниезащита // Спб: «Лань», 2012.
- [8] **Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.** Изоляция установок высокого напряжения // М.: Энергоатомиздат, 1987.
- [9] **Гуревич М.М.** Фотометрия // Л.: Энергоатомиздат, 1983.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Иван Олегович – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

МОНАСТЫРСКИЙ Александр Евгеньевич – внс, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: monalex2008@yandex.ru

РЕЗНИК Александр Сергеевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
E-mail: alexreznik85@gmail.com

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

ГРЕБЦОВ Андрей Олегович – гл. инженер, Красный квадрат, без степени.
E-mail: grebtsov@gmail.com

ФЕДОРЕНКО Геннадий Николаевич – технический директор, ООО «Системы светодиодного света», канд. техн. наук.
E-mail: fedorenkogn@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 12.05.2020

REFERENCES

- [1] Markers for overhead power lines. corporate standart 34.01-2.2-016-2016 PJSC ROSSETI 02.11.2016.
- [2] 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] Aerodrome design guide. Visual AIDS of ICAO. Fourth edition-2004.
- [4] Information on the incidents of collision of aircraft with the wires power lines. Federal air transport Agency. – Moscow, 2013.
- [5] Convention on international civil aviation. Annex 14 Airfields. Volume 1 Design and operation of airfields. Chapter 6 Visual means for marking obstacles. Edition 5 2009.
- [6] Online resource: obsta.ru, 04.05.2020.
- [7] **V.V. Titkov, F.H. Khalilov**, Lightning Protection // Saint Petersburg: LAN, 2012.
- [8] **G.S. Kuchinsky, V.E. Kiesevetter, Yu.S. Pintal**, Isolation of high-voltage installations // Moscow: Energoatomizdat, 1987.
- [9] **M.M. Gurevich**, Photometry // L.: Energoatomizdat, 1983.

THE AUTHORS

IVANOV Ivan O. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

MONASTYRSKIY Aleksandr E. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: monalex2008@yandex.ru

REZNIK Aleksandr S. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: alexreznik85@gmail.com

TITKOV Vasilij V. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: titkovprof@yandex.ru

GREBTSOV Andrey O. – *Red square.*
E-mail: grebtsov@gmail.com

FEDORENKO Gennadiy N. – *LLC "LED Light Systems".*
E-mail: fedorenkogn@gmail.com

Received: 12.05.2020