

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-03-60-67

УДК 535.421

Оптическая схема устройства диагностики высоковольтного оборудования на базе дихроичных фильтров

Александр Николаевич Чеплаков¹, Андрей Николаевич Мельников²,
Анатолий Васильевич Лукин³

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия

^{1, 2, 3}Государственный институт прикладной оптики, Казань, Россия

¹alexandr.cheplov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9396-8587>

²mr.melnikov@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3318-9853>

³luk371@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>

Аннотация

Предмет исследования. Возможность использования оптической системы, в состав которой входят два дихроичных фильтра, в устройстве дистанционной диагностики состояния высоковольтного оборудования и линий электропередач. **Цель работы.** Разработка оптической схемы устройства диагностики высоковольтного оборудования с улучшенными спектральными характеристиками и получением изображения в ультрафиолетовом диапазоне спектра, в состав которой входят зеркальный объектив типа Кассегрена, дихроичные фильтры и матричные фотоприемники. **Метод** основан на использовании лучевого расчета исследуемой и оптимизируемой оптической системы устройства дистанционной диагностики высоковольтного оборудования. Компьютерное моделирование и абберационный расчет позволили определить конструктивные и качественные параметры оптической системы. **Основные результаты.** Приведены конструктивные параметры разработанной оптической схемы, в состав которой входят дихроичные фильтры для разделения излучений разных спектральных диапазонов на отдельные оптические каналы, а также спектральные коэффициенты пропускания предлагаемых рассчитанных дихроичных фильтров и варианты матричных фотоприемных устройств для каждого оптического диапазона. Представлены результаты абберационного расчета и оценки интегрального коэффициента пропускания. **Практическая значимость.** Предложенная оптическая схема с применением дихроичных фильтров позволяет повысить спектральное пропускание и получить изображения в ультрафиолетовом спектральном диапазоне, которая может быть использована в устройстве диагностики высоковольтного оборудования и линий электропередач.

Ключевые слова: высоковольтное оборудование, коронный разряд, ультрафиолетовый диапазон, зеркальный объектив, дихроичный фильтр

Благодарность: создание прототипа устройства диагностики высоковольтного оборудования проводится при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках договора № 33ГССС15-L/78995.

Ссылка для цитирования: Чеплаков А.Н., Мельников А.Н., Лукин А.В. Оптическая схема устройства диагностики высоковольтного оборудования на базе дихроичных фильтров // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 3. С. 60–67. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-60-67>

Коды OCIS: 110. 2970, 310.1620

Optical scheme of high voltage equipment diagnostics device based on dichroic filters

ALEKSANDR N. CHEPLAKOV¹, ANDREI N. MELNIKOV², ANATOLY V. LUKIN³

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

^{1,2,3}State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

¹alexandr.cheplakov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-9396-8587>

²mr.melnikov@bk.ru <https://orcid.org/0000-0002-3318-9853>

³luk371@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>

Abstract

Subject of study. The possibility of using an optical system, which includes two dichroic filters, in a device for remote diagnostics of the state of high voltage equipment and power lines was investigated. **Aim of study.** Development of a new optical circuit of the device for diagnostics of high voltage equipment with improved spectral characteristics and obtaining images in the ultraviolet range of the spectrum, which includes a Cassegrain-type mirror lens, dichroic filters and matrix photodetectors. **Method.** It is based on the use of ray calculation of the investigated and optimized optical system of the device for remote diagnostics of high voltage equipment. Computer modeling and aberration calculations made it possible to determine the design and quality parameters of the optical system. **Main results.** The design parameters of the developed optical scheme, which includes dichroic filters to separate radiation different spectral ranges into separate optical channels, are given. Spectral transmission coefficients of the proposed calculated dichroic filters and options of matrix photo-receiving devices for each optical range are given. Results of aberration calculation and integral transmittance estimation are presented. **Practical significance.** The proposed optical scheme using dichroic filters allows increasing spectral transmission and obtaining images in the ultraviolet spectral range, and can be used in a device for diagnostics of high voltage equipment and power lines.

Keywords: high voltage equipment, corona discharge, ultraviolet range, mirror lens, dichroic filter

Acknowledgment: the creation of a prototype device for diagnosing high voltage equipment is carried out with the financial support of the Innovation Promotion Fund under contract № 33GSSS15-L/78995.

For citation: Cheplakov A.N., Melnikov A.N., Lukin A.V. Optical scheme of high voltage equipment diagnostics device based on dichroic filters [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 3. P. 60–67. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-60-67>

OCIS codes: 110. 2970, 310.1620

ВВЕДЕНИЕ

Количество эксплуатируемого высоковольтного оборудования (ВВО) и линий электропередач (ЛЭП) непрерывно возрастает, и чтобы обеспечить его своевременной профилактической диагностикой для предотвращения аварийных ситуаций, необходимы дефектоскопические устройства. Так, на территории Российской Федерации еженедельно происходит порядка 200 обрывов ЛЭП, что влечет серьезные экономические потери [1].

Высоковольтное оборудование и ЛЭП регулярно подвергаются неблагоприятному воздействию природных явлений и человека. Среди самых частых причин повреждений можно

выделить следующие: старение или окончание срока эксплуатации, перенапряжение, тепловая перегрузка, коррозия, некачественная прокладка ЛЭП, дефекты производства, а также дефекты, возникающие при транспортировке и хранении оборудования. Такие повреждения могут вызывать поверхностные, в том числе, коронные разряды, характеризующиеся излучением в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра (рис. 1) [2, 3]. Эти же повреждения также могут приводить к дополнительному нагреву элементов конструкций ВВО, вызывая интенсивное излучение в дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра.

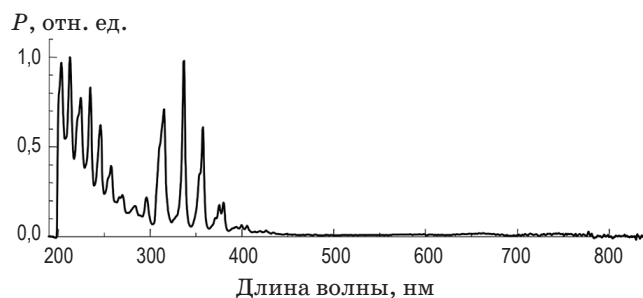


Рис. 1. Спектр излучения коронного разряда.
P — интенсивность излучения

Fig. 1. The corona discharge emission spectrum.
P is radiation intensity

Оптическая схема устройства диагностики неисправностей ВВО с возможностью исследования спектра ранее была предложена в публикации [4] и усовершенствована в работе [5]. В настоящей статье представлена иная оптическая схема с одновременным получением изображения в трех спектральных диапазонах для повышения эффективности проведения процесса диагностики, в составе которой зеркальный объектив типа Кассегрена, дихроичные фильтры и матричные фотоприемники. Разработка и определение конструктивных и качественных параметров этой схемы и являлись целью работы.

ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ СХЕМЫ

Предлагаемая в настоящей работе оптическая схема (рис. 2) содержит зеркальный объектив типа Кассегрена, который является общим для трех спектральных диапазонов: УФ (225–325 нм), видимого (400–780 нм) и дальнего ИК (8–10 мкм). Дихроичные фильтры представляют собой плоскопараллельные пластинки со специальным интерференционным покрытием. Первый дихроичный фильтр (поз. 2) позволяет пространственно отделить излучение УФ диапазона спектра от видимого и ИК излучений. Матричное фотоприемное устройство (МФПУ) УФ диапазона имеет хорошую чувствительность в этом диапазоне. Второй дихроичный фильтр (поз. 4) позволяет пространственно отделить излучение видимого диапазона спектра от ИК излучения. Матричное фотоприемное устройство видимого спектра имеет максимальную чувствительность в видимой области и позволяет получить цветное изображение объекта наблюдения. Матрич-

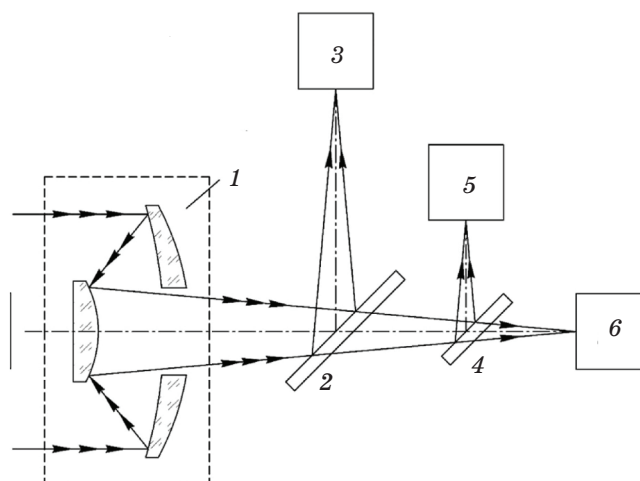


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема устройства диагностики ВВО. 1 — зеркальный объектив типа Кассегрена, 2 — первый дихроичный фильтр, 3 — МФПУ УФ диапазона спектра, 4 — второй дихроичный фильтр, 5 — МФПУ видимого диапазона спектра, 6 — МФПУ дальнего ИК диапазона спектра

Fig. 2. Principle optical scheme of the high voltage equipment diagnostic device. (1) Cassegrain type mirror lens, (2) first dichroic filter, (3) UV spectrum range matrix photo-receiving device, (4) second dichroic filter, (5) visible spectrum range matrix photo-receiving device, (6) long-wave infrared spectrum range matrix photo-receiving device

ное фотоприемное устройство дальнего ИК диапазона спектра имеет максимальную чувствительность в дальнем инфракрасном диапазоне, позволяющую видеть объект наблюдения с хорошим контрастом на фоне земли или неба.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Расчет параметров предложенной оптической схемы и ее моделирование выполнялись в программе “OpticStudio ZEMAX” [6, 7]. Конструктивные параметры оптической схемы приведены в табл. 1.

Дихроичные фильтры представляют собой плоскопараллельные пластины, установленные под углом 45° по разным осям (табл. 1) для обеспечения удобного размещения МФПУ разных спектральных диапазонов.

Первый дихроичный фильтр (поз. 2) отражает излучения УФ диапазона и пропускает излучения видимого и ИК диапазонов, его предлагается выполнить на подложке из флюорита, чтобы спектры отражения и пропускания

Таблица 1. Конструктивные параметры оптической схемы

Table 1. Optical circuit design parameters

№	Радиус, мм	Толщина, мм	Материал	Коническая постоянная	Наклон, град
1	–138,283	–40	MIRROR	–1,143	–
2	–84,239	55	MIRROR	–4,620	–
3	0	1	CaF ₂	–	45 по оси <i>y</i>
4	0	20	–	–	45 по оси <i>y</i>
5	0	1	Germanium	–	45 по оси <i>x</i>
6	0	–	–	–	45 по оси <i>x</i>

Фокусное расстояние объектива 224 мм, поле зрения $\pm 1,414^\circ$

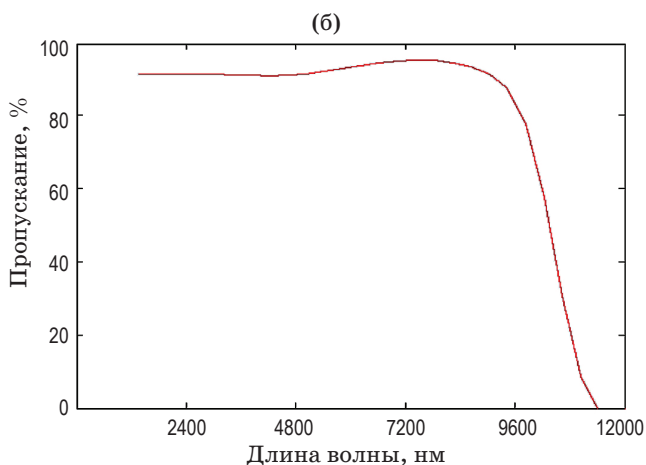
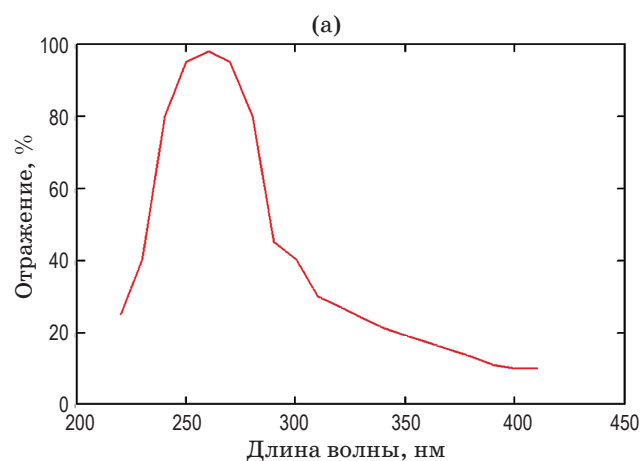


Рис. 3. Спектры отражения (а) и пропускания (б) первого дихроичного фильтра

Fig. 3. (a) Reflection and (b) transmission spectra of the first dichroic filter

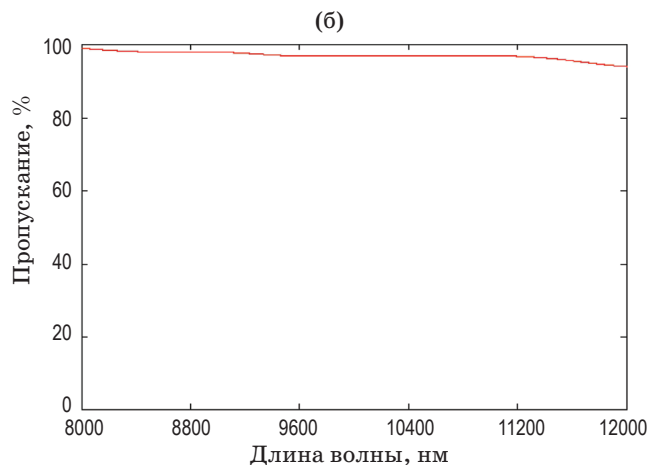
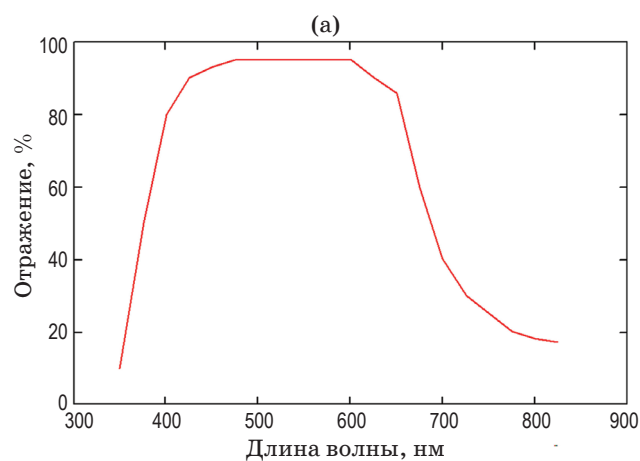


Рис. 4. Спектры отражения (а) и пропускания (б) второго дихроичного фильтра

Fig. 4. (a) Reflection and (b) transmission spectra of the second dichroic filter

соответствовали изображенным на рис. 3. Такой вариант исполнения первого дихроичного фильтра позволяет получить отражение излучения коронного разряда в УФ диапазоне

более 80%, и пропускание более 90% в видимом и ИК диапазонах спектра.

Второй дихроичный фильтр (поз. 4) отражает излучение видимого диапазона и пропускает

излучение ИК диапазона [8], его предлагается выполнить на оптическом германии, чтобы спектры отражения и пропускания соответствовали изображенному на рис. 4. Такой вариант исполнения второго дихроичного фильтра позволяет получить отражение излучения объекта в видимом диапазоне более 85% и пропускание более 90% в ИК диапазоне спектра.

Использование двух дихроичных фильтров повышает интегральный коэффициент пропускания в УФ диапазоне, рассчитанный по методике [9, 10] до 0,289, что в 5 раз больше, чем рассчитанный ранее интегральный коэффициент пропускания для варианта оптической системы с дифракционной решеткой [11]. При этом интегральный коэффициент пропускания для видимого и ИК диапазонов практически не изменился.

Для оценки качества изображения в разных спектральных поддиапазонах были рас-

считаны точечные диаграммы и графики геометрического распределения энергии.

Для УФ диапазона точечные диаграммы приведены на рис. 5, для видимого диапазона — на рис. 6, для ИК диапазона — на рис. 7.

Диаметры пятен рассеяния, в которых сконцентрировано 80% энергии, в их центрах и на краях поля представлены в табл. 2.

Таблица 2. Диаметры пятен рассеяния
Table 2. Scatter spots diameters

Диапазон	Центр поля, мкм	Левый край поля, мкм	Правый край поля, мкм
УФ	14	96	96
Видимый	80	100	110
ИК	104	136	154

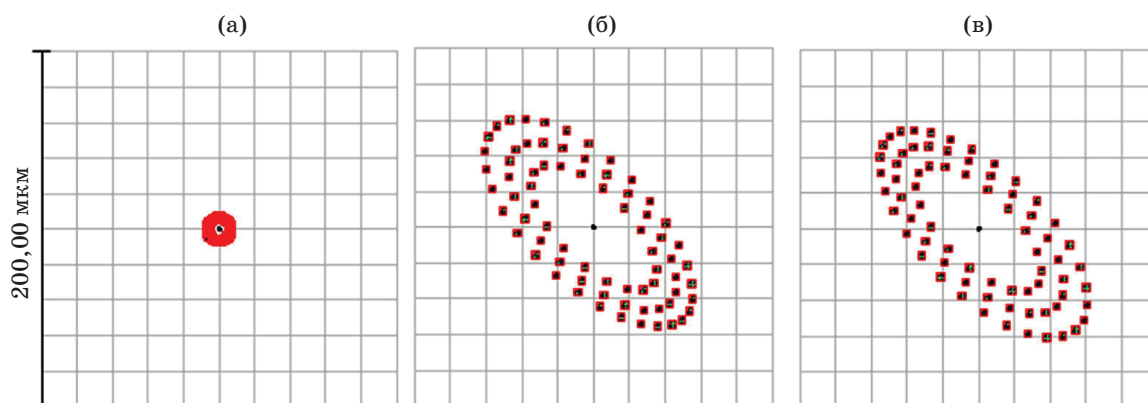


Рис. 5. Точечные диаграммы для УФ диапазона в центре поля (а) и на его краях (б, в)

Fig. 5. Dot plots for the UV range (a) in the center of the field and (б, в) at its edges

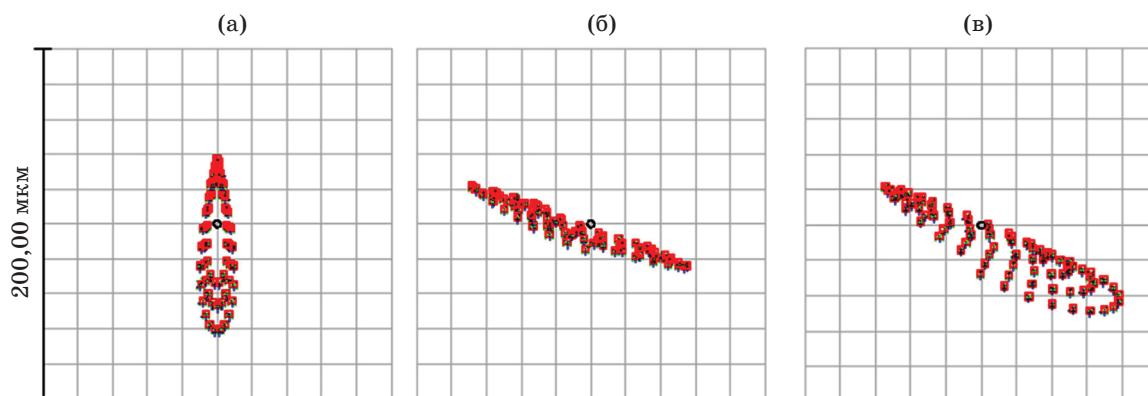


Рис. 6. Точечные диаграммы для видимого диапазона в центре поля (а) и на его краях (б, в)

Fig. 6. Dot plots for the visible range (a) in the center of the field and (б, в) at its edges

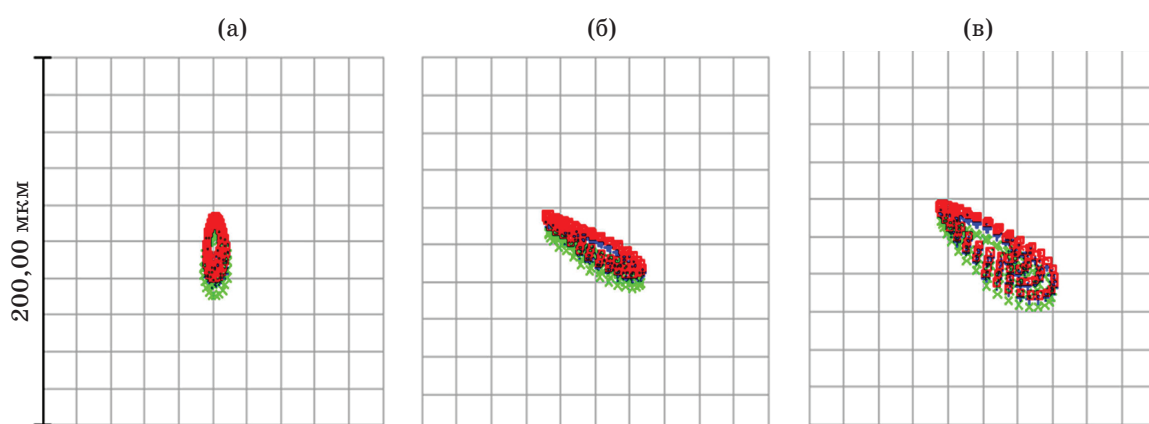


Рис. 7. Точечные диаграммы для ИК диапазона в центре поля (а) и на его краях (б, в)
Fig. 7. Dot plots for the IR range (a) in the center of the field and (б, в) at its edges

В качестве приемников изображения предлагается использовать следующие МФПУ [12]:

- для УФ диапазона — монохромную матрицу GSENSE2020BSI с разрешением 2048×2048, шагом пиксела 6,5 мкм и спектральной чувствительностью 200–1100 нм [13],

- для видимого диапазона — цветную матрицу Sony IMX 477 с разрешением 4056×3040, шагом пиксела 1,55 мкм и спектральной чувствительностью 400–700 нм [14],

- для ИК диапазона — неохлаждаемый микроболометр из оксида ванадия FLIR Boson 640 с разрешением 640×512, шагом пиксела 12 мкм и спектральной чувствительностью 7,5–13,5 мкм [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, описан предложенный вариант оптической системы устройства диагностики высоковольтного оборудования, в состав которой входят дихроичные фильтры для разделения спектральных диапазонов на три

разные оптические каналы. При этом оптическая система позволяет получить диаметр пятна рассеяния в плоскости изображения в УФ диапазоне в центре поля 14 мкм, на краях поля 96 (левый) и 96 (правый) мкм, в видимом диапазоне — 80, 100 и 110 мкм соответственно, в ИК диапазоне — соответственно 103, 136 и 154 мкм. Выбраны современные и подходящие варианты МФПУ для каждого канала устройства. Использование МФПУ УФ диапазона создает возможность одновременного проведения измерений и наблюдения коронных разрядов. Первый предлагаемый дихроичный фильтр позволяет отразить более 80% излучения в УФ диапазоне спектра, в котором предполагается проведение исследований, второй — 85% излучения объекта наблюдения в видимом диапазоне спектра. Пересчитанный интегральный коэффициент пропускания в УФ диапазоне спектра составил 0,289, что в 5 раз больше, чем в варианте оптической схемы с использованием дифракционной решетки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Электронный ресурс URL: https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/texts/04/21/5022/10._Ob_avariynyh_i_neshtatnyh_situaciyah_na_obektah_TEK_v_period_s_9_po_15_marta_2017.pdf
2. Guo X., Ji Z., Gao Y., Ding J., Zhang L. 3D corona discharge model and its use in the presence of wind during a thunderstorm // *Frontiers in Environmental Sci.* 2022. July. P. 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.946020>

REFERENCES

1. Electronic resource URL: https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/texts/04/21/5022/10._Ob_avariynyh_i_neshtatnyh_situaciyah_na_obektah_TEK_v_period_s_9_po_15_marta_2017.pdf
2. Guo X., Ji Z., Gao Y., Ding J., Zhang L. 3D corona discharge model and its use in the presence of wind during a thunderstorm // *Frontiers in Environmental Sci.* 2022. July. P. 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.946020>

3. Abahazem A., Merbahi N., Guedah H., Yousfi M. Electric and spectroscopic studies of pulsed corona discharges in nitrogen at atmospheric pressure // *J. Analytical Sciences, Methods and Instrumentation*. 2017. July. P. 57–74. <https://doi.org/10.4236/jasmi.2017.73006>
4. Лукин А.В., Мельников А.Н., Павлычева Н.К., Чеплаков А.Н. Трёхдиапазонная оптическая система для устройства обнаружения электрического разряда высоковольтного оборудования // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2021. № 1. С. 109–117.
5. Лукин А.В., Мельников А.Н., Павлычева Н.К., Чеплаков А.Н. Устройство обнаружения электрического разряда с возможностью исследования спектра в ультрафиолетовом диапазоне // *XI междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. Сб. научн. труд. М.: НИЯУ МИФИ*, 2022. С. 543–544.
6. Geary J.M. Introduction to lens design with practical ZEMAX examples. Library of Congress Cataloging in Publication Data, 2002. 462 p.
7. Smith W. Modern optical engineering: The design of optical systems. Carisbad, California: Kaiser Electro- Optics Inc., 2008. 771 p
8. Amra C., Lequime M., Zerrad M. Electromagnetic optics of thin-film coatings: Light scattering, giant field enhancement, and planar microcavities. Cambridge University Press, 2020. 396 p. ISBN: 9781108488877. <https://doi.org/10.1017/9781108772372>
9. Осипович И.Р. Определение интегрального коэффициента пропускания объективов тепловизионных систем в условиях производственного контроля // *Научно-технический журнал «Контенант»*. 2015. № 4. С. 11–18.
10. Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л. О возможности обнаружения тепловизионными приборами препятствий // *Авиакосмическое приборостроение*. 2020. № 7. С. 12–23.
11. Чеплаков А.Н. Определение интегральных коэффициентов пропускания для трёхдиапазонной оптической системы обнаружения и измерения электрического разряда высоковольтного оборудования // *Сб. докл. междунар. науч. конф. XXV Туполевские чтения*. 2021. Т. 4. С. 299–303.
12. Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора. М.: изд. МИИГАиК, 2017. 58 с.
13. Gill A.S., Shaaban M.M., Tohuvavohu A., Sivanandam S. A low-cost ultraviolet-to-infrared absolute quantum efficiency characterization system of detectors // *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation. Conf.* 2022. P. 15. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.13052>
3. Abahazem A., Merbahi N., Guedah H., Yousfi M. Electric and spectroscopic studies of pulsed corona discharges in nitrogen at atmospheric pressure // *J. Analytical Sciences, Methods and Instrumentation*. 2017. July. P. 57–74. <https://doi.org/10.4236/jasmi.2017.73006>
4. Lukin. A.V., Melnikov A.N., Pavlycheva N.K., Cheplakov A.N. Tri-band optical system for high voltage electrical discharge detection device [in Russian] // *Bulletin of KSTU named after A.N. Tupolev*. 2021. № 1. P. 109–117.
5. Lukin A.V., Melnikov A.N., Pavlycheva N.K., Cheplakov A.N. Electric discharge detection device with the ability to study the spectrum in the ultraviolet range [in Russian] // *XI Internat. Conf. Photonics and Information Optics: Collection of scientific papers*. Moscow: NRNU MEPhI Publisher, 2022. P. 543–544.
6. Geary J.M. Introduction to lens design with practical ZEMAX examples. Library of Congress Cataloging in Publication Data, 2002. 462 p.
7. Smith W. Modern optical engineering: The design of optical systems. Carisbad, California: Kaiser Electro- Optics Inc., 2008. 771 p
8. Amra C., Lequime M., Zerrad M. Electromagnetic optics of thin-film coatings: Light scattering, giant field enhancement, and planar microcavities. Cambridge University Press, 2020. 396 p. ISBN: 9781108488877. <https://doi.org/10.1017/9781108772372>
9. Osipovich I.R. Determination of the integral transmission coefficient of thermal imaging lenses under production control conditions [in Russian] // *Sci. and Technical J. "Kontenant"*. 2015. № 4. P. 11–18.
10. Ovsyannikov V.A., Ovsyannikov Y.V., Filippov V.L. On the ability of thermal imaging devices to detect obstacles [in Russian] // *J. Aerospace Instrumentation*. 2020. № 7. P. 12–23.
11. Cheplakov A.N. Determination of integral transmission coefficients for a tri-band optical system for the detection and measurement of electrical discharge of high voltage equipment [in Russian] // *Collection of Reports. Internat. Sci. Conf. XXV Tupolev Readings*. 2021. V. 4. P. 299–303.
12. Torshina I.P., Yakushenkov Y.G. Selection of a radiation receiver when designing an optoelectronic device. [in Russian] Moscow: MIIGAiK Publisher, 2017. 58 c.
13. Gill A.S., Shaaban M.M., Tohuvavohu A., Sivanandam S. A low-cost ultraviolet-to-infrared absolute quantum efficiency characterization system of detectors // *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation. Conf.* 2022. P. 15. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.13052>

14. Suder J. Parameters evaluation of cameras in embedded systems // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. № 9. V. 1. P. 218–221. <https://doi.org/10.15199/48.2022.09.50>
15. Montes de Oca A., Flores G. A UAS equipped with a thermal imaging system with temperature calibration for Crop Water Stress Index computation // 2021 Internat. Conf. Unmanned Aircraft Systems. 2021. P. 714–720. <https://doi.org/10.1109/ICUAS51884.2021.9476863>

АВТОРЫ

Александр Николаевич Чеплаков — инженер-технолог 2 категории, Государственный институт прикладной оптики, Казань, 420075, Россия; аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия; <https://orcid.org/0000-0001-9396-8587>; alexandr.cheplakov@gmail.com

Андрей Николаевич Мельников — кандидат технических наук, доцент, начальник отдела, Государственный институт прикладной оптики, Казань, 420075, Россия; Scopus ID: 1659222; <https://orcid.org/0000-0002-3318-9853>; mr.melnikov@bk.ru

Анатолий Васильевич Лукин — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Государственный институт прикладной оптики, Казань, 420075, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>; luk371@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 01.12.2022
Одобрена после рецензирования 28.12.2022
Принята к печати 26.01.2023

14. Suder J. Parameters evaluation of cameras in embedded systems // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. № 9. V. 1. P. 218–221. <https://doi.org/10.15199/48.2022.09.50>
15. Montes de Oca A., Flores G. A UAS equipped with a thermal imaging system with temperature calibration for Crop Water Stress Index computation // 2021 Internat. Conf. Unmanned Aircraft Systems. 2021. P. 714–720. <https://doi.org/10.1109/ICUAS51884.2021.9476863>

AUTHORS

Aleksandr N. Cheplakov — Engineer-technologist of the 2nd category, JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, 420075, Russia; PhD Student, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-9396-8587>; alexandr.cheplakov@gmail.com

Andrei N. Melnikov — PhD, Associate Professor, Head of Department, JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, 420075, Russia; Scopus ID: 1659222; <https://orcid.org/0000-0002-3318-9853>; mr.melnikov@bk.ru

Anatoly V. Lukin — Doctor of Engin. Sci., Professor, Chief Researcher, JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, 420075, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>; luk371@yandex.ru

The article was submitted to the editorial office 01.12.2022
Approved after review 28.12.2022
Accepted for publication 26.01.2023