

УДК 628.95
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-103-110>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование и разработка импульсных электронных пускорегулирующих аппаратов в комплекте с ультрафиолетовыми лампами

О.Ю. Коваленко ¹, С.А. Микаева ^{2, @}, Ю.А. Журавлёва ²

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, 430005 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: mikaeva_s@mirea.ru

Резюме

Цели. В облучательных приборах, работающих в светотехнических установках с трубчатыми ультрафиолетовыми (УФ) лампами низкого давления, к электронным пускорегулирующим аппаратам (ЭПРА) предъявляются следующие требования: невысокая стоимость, обеспечение надежного зажигания разрядных ламп низкого давления в условиях пониженных температур и надежная работа ламп при повышенной энергетической эффективности. По сравнению с электромагнитными пускорегулирующими аппаратами, ЭПРА обеспечивают повышение светотдачи разрядных ламп и коэффициента мощности, снижение расхода дефицитных материалов, уменьшение массы. Для повышения энергетической эффективности УФ ламп в комплекте с ними целесообразно использовать импульсные ЭПРА, обеспечивающие питание на частоте 22–50 кГц. Различные схемные решения ЭПРА включают в себя такие основные узлы как сетевой фильтр, выпрямитель, корректор коэффициента мощности, сглаживающий фильтр, высокочастотный (ВЧ) преобразователь, балласт и зажигающее устройство. Целью работы является разработка электронной полупроводниковой схемы включения и питания разрядной лампы повышенной энергетической эффективности с импульсным ЭПРА.

Методы. Использованы классические методы математического исследования с применением структурной схемой ЭПРА, его математическим описанием и адаптивной модели для определения потока резонансной линии ртути с длиной волны 254 нм.

Результаты. Для разных моментов времени представлены уравнения определения параметров импульсов, образованных огибающей в форме входного напряжения и тока промышленной частоты. Дано математическое описание для определения длительности импульсов и тока лампы в зависимости от значений номинального и рабочего напряжения и номинального тока. Представлены диаграмма мгновенных значений напряжения на входе ВЧ ключа и диаграмма формируемого импульсного тока. В работе проведен расчет параметров комплекта «УФ лампа – импульсный ЭПРА» при условии постоянства мощности лампы и использовании адаптивной модели для определения потока резонансной линии ртути длиной волны 254 нм.

Выводы. В результате расчетов были определены относительные значения лучистой отдачи резонансной линии ртути исследуемых УФ ламп. Теоретические исследования ЭПРА позволили разработать электронную полупроводниковую схему включения и питания разрядной лампы прямоугольными импульсами высокой частоты. В ходе работы для предложенного схемного решения импульсного ЭПРА проведен расчет параметров элементной базы с выбранными основными исходными характеристиками блокинг-генератора.

Ключевые слова: электронный пускорегулирующий аппарат, мощность, математическое описание, фильтр, преобразователь, импульс, резонансная линия ртути, блокинг-генератор

• Поступила: 20.10.2021 • Доработана: 24.02.2022 • Принята к опубликованию: 18.04.2022

Для цитирования: Коваленко О.Ю., Микаева С.А., Журавлёва Ю.А. Исследование и разработка импульсных электронных пускорегулирующих аппаратов в комплекте с ультрафиолетовыми лампами. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):103–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-103-110>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Research and development of pulse electronic control devices with UV lamps

Olga Yu. Kovalenko ¹, Svetlana A. Mikaeva ^{2, @}, Yulia A. Zhuravleva ²

¹ Ogarev Mordovia State University, Saransk, 430005 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: mikaeva_s@mirea.ru

Abstract

Objectives. When used in lighting installations with tubular low-pressure ultraviolet (UV) lamps, electronic ballasts should meet the following basic requirements: low cost, reliable ignition at low temperatures, as well as combining high energy efficiency with reliable lamp operation. As compared with electromagnetic ballasts, electronic ballasts allow the luminous efficiency and power factor of discharge lamps to be increased, reducing the consumption of scarce materials along with the weight of devices. In order to improve their energy efficiency, complete UV lamps are based on low-pressure discharge lamps with pulsed electronic ballasts supplying power at the frequency of 22–50 kHz. Various circuit designs include such basic units as mains filter, rectifier, power factor corrector, smoothing filter, high-frequency converter, ballast, and ignition device. The present study aimed to develop an electronic semiconductor circuit for switching on and powering a discharge lamp of increased energy efficiency using a pulsed electronic ballast.

Methods. Classical methods of mathematical research were applied for determining the flux of the 254-nm mercury resonance line using a structural electronic ballast diagram along with a mathematical description and adaptive model.

Results. Equations for determining the parameters of pulses formed by an envelope having the form of input voltage and current supplied at industrial frequency were formulated for different instants of time. A mathematical description is given for determining pulse duration and lamp current depending on the values of nominal and operating voltage, as well as nominal current. Diagrams for instantaneous voltage values at the high-frequency switch input and generated pulsed current are presented. The parameters of the ‘UV lamp–electronic ballast’ set were calculated using an adaptive model for determining the flux of the 254-nm mercury resonance line according to the condition of lamp power constancy.

Conclusions. Relative values for radiant efficiency of the 254-nm mercury line for UV lamps under study were determined. Theoretical research of electronic ballasts led to the development of a semiconductor switching and power supply circuit for the discharge lamp based on high-frequency rectangular pulses. The parameters of the element base were calculated along with selected basic initial characteristics of the blocking generator.

Keywords: electronic ballast, power, mathematical description, filter, converter, pulse, mercury resonance line, blocking generator

• Submitted: 20.10.2021 • Revised: 24.02.2022 • Accepted: 18.04.2022

For citation: Kovalenko O.Yu., Mikaeva S.A., Zhuravleva Yu.A. Research and development of pulse electronic control devices with UV lamps. *Russ. Technol. J.* 2022; 10(3):103–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-103-110>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития электротехнологий требует применения эффективных УФ разрядных ламп низкого давления в комплекте с электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА) [1, 2]. Исследование УФ излучения, а также эффективность применения УФ ламп низкого давления отражены в работах^{1, 2, 3} [3–5]. В облучательных приборах, работающих в светотехнических установках с трубчатыми УФ лампами низкого давления, ЭПРА должны удовлетворять основным требованиям: иметь невысокую стоимость; обеспечивать надежное зажигание разрядных ламп низкого давления в условиях пониженных температур; обеспечивать надежную работу ламп при повышенной энергетической эффективности.

По сравнению с электромагнитными пускорегулирующими аппаратами, ЭПРА обеспечивают повышение светоотдачи разрядных ламп и коэффициента мощности, снижение расхода дефицитных материалов, уменьшение массы в 2–4 раза. Выпускаемые в настоящее время ВЧ ЭПРА обладают дополнительными функциями, такими как предварительный подогрев электродов ламп, возможность регулировки потока излучения и др.

¹ Heathcote J. State of UV LED curing applications. *UV+EB Technology*. 2019;1. URL: <https://uvebtech.com/articles/2019/state-of-uv-led-curing-applications/>, дата обращения 01.10.2021. [Heathcote J. State of UV LED curing applications. *UV+EB Technology*. 2019;1. URL: <https://uvebtech.com/articles/2019/state-of-uv-led-curing-applications/>. Accessed October 1, 2021.]

² Lawal O., et al. Proposed method for measurement of output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamps. *IUVA News*. 2008;10(1):14–17. URL: https://uvsolutionsmag.com/stories/pdf/archives/100103LawalEtAl_Article.pdf, дата обращения 01.10.2021. [Lawal O., et al. Proposed method for measurement of output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamps. *IUVA News*. 2008;10(1):14–17. URL: https://uvsolutionsmag.com/stories/pdf/archives/100103LawalEtAl_Article.pdf. Accessed October 1, 2021.]

³ Lee P. Advancements in UV LED curing technology and solutions for print. *UV+EB Technology*. 2015;1. URL: <https://uvebtech.com/articles/2015/advancements-in-uv-led-curing-technology-and-solutions-for-print/>, дата обращения 01.10.2021. [Lee P. Advancements in UV LED curing technology and solutions for print. *UV+EB Technology*. 2015;1. URL: <https://uvebtech.com/articles/2015/advancements-in-uv-led-curing-technology-and-solutions-for-print/>. Accessed October 1, 2021.]

В ходе работы было предложено схемное решение ЭПРА с питанием лампы прямоугольными импульсами высокой частоты. Из литературных источников установлено, что ВЧ импульсные режимы питания более эффективны, чем синусоидальные [6, 7].

Для повышения энергетической эффективности УФ ламп, относящихся к разрядным лампам низкого давления, целесообразно использовать в комплекте с ними импульсные ЭПРА, обеспечивающие питание на частоте 22–50 кГц. Различные схемные решения ЭПРА включают в себя такие основные узлы как сетевой фильтр, выпрямитель, корректор коэффициента мощности, сглаживающий фильтр, ВЧ преобразователь, балласт и зажигающее устройство [8–12].

ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭПРА

Для практической реализации импульсного ЭПРА была рассмотрена структурная схема, представленная на рис. 1.

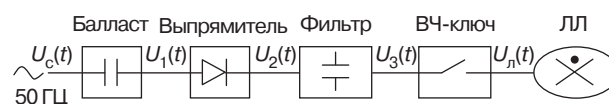


Рис. 1. Структурная схема импульсного ЭПРА. $U_c(t)$ – напряжение сети (напряжение на входе импульсного ЭПРА), $U_n(t)$ – рабочее напряжение на лампе, ЛЛ – люминесцентная лампа

Из схемы и рис. 2 видно, что амплитуда ВЧ импульсов ограничивается кривой сетевого напряжения $U_1(t)$, преобразованной выпрямителем. На входе ВЧ ключа имеется сглаживающий фильтр. В точке диаграммы (рис. 2), где синусоидальное напряжение $U_2(t)$ становится ниже напряжения на конденсаторе фильтра, напряжение начинает падать по экспоненте $U_3(t)$. Здесь штриховой линией обозначено напряжение на входе сглаживающего фильтра, сплошной линией – напряжение на его выходе.

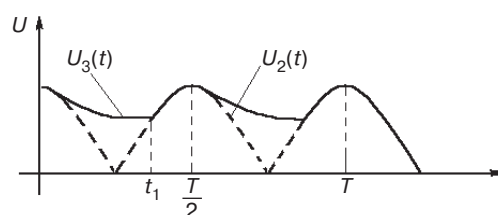


Рис. 2. Диаграмма мгновенных значений напряжения на входе ВЧ ключа

Для разных моментов времени можно записать два уравнения, описывающих параметры импульсов, образованных огибающей в форме входного напряжения $U_c(t)$ и тока промышленной частоты. Выходное напряжение ВЧ ключа имеет амплитуду, соответствующую амплитуде напряжения $U_3(t)$, длительность импульсов $t_{\text{и}}(t)$ (или паузы $t_{\text{п}}(t)$) зависит от их амплитуды. Определить величину $t_{\text{и}}(t)$ можно через значение рабочего напряжения на лампе $U_{\text{л}}(t)$ и эмпирические постоянные коэффициенты a , b .

Зависимость тока лампы от напряжения определяется по ее вольт-амперной характеристике при известных значениях номинального напряжения $U_{\text{ном}}(t)$ и тока $I_{\text{ном}}(t)$, а также рабочего напряжения на лампе $U_{\text{л}}(t)$.

Математическое описание может быть представлено системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{л}}(t) = U_{\text{м}} \exp\left(-\frac{1}{RC}t\right) & \text{при } 0 < t < t_1, \\ U_{\text{л}}(t) = U_{\text{м}} \cos 314t & \text{при } t_1 < t < \frac{T}{2}, \\ t_{\text{и}}(t) = \frac{a}{U_{\text{л}}(t) + b}, \\ i(t) = I_{\text{ном}} \exp\left(\frac{\ln U_{\text{л}}(t) - \ln U_{\text{ном}}(t)}{\rho}\right), \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{\text{м}}$ – амплитудное значение сетевого напряжения, В; C – емкость сглаживающего фильтра, Ф; R – активная составляющая сопротивления лампы, Ом; $i(t)$ – ток на входе ВЧ ключа, А; значение угловой частоты ω при частоте сигнала $f = 50$ Гц равно $\omega = 2\pi f = 314 \text{ с}^{-1}$; ρ – постоянный коэффициент, равный 0.2–0.26; a , b – постоянные коэффициенты, равные соответственно 0.0025 с · В и 30 В.

Для исследуемых УФ ламп по уравнениям (1) и при использовании адаптивной модели для определения потока резонансной линии ртути с длиной волны 254 нм, представленной в работе⁴, проводился расчет параметров комплекта «УФ лампа – ЭПРА» при условии постоянства мощности лампы.

Основные результаты расчета отражены в таблице.

В результате расчетов были определены относительные значения лучистой отдачи ртутной линии 254 нм исследуемых УФ ламп типа ЛЭ 30 и ЛЭР 40 в комплекте с импульсным ЭПРА (отношение лучистых отдач при импульсном и стационарном

Таблица. Относительные значения лучистой отдачи линии 254 нм УФ ламп в комплекте с импульсным ЭПРА (отношение лучистых отдач при импульсном ($H_{\text{имп}}$) и стационарном ($H_{\text{стац}}$) режимах). $P_{\text{ср}}$ – усредненное значение мощности лампы в комплекте с импульсным ЭПРА

$P_{\text{ср}}$, Вт	f , кГц	$t_{\text{п}}$, мкс	Скважность	C , мкФ	$H_{\text{имп}}/H_{\text{стац}}$
30.1	23.1	25	2.35	30	0.687
30.0	23.7	25	2.42	50	0.822
30.0	41.0	6	1.32	50	0.927
29.9	43.8	10	1.77	50	0.975
40.0	23.6	25	2.41	50	0.746
39.9	43.6	10	1.77	50	0.880

режимах). За стационарный режим принимался режим работы лампы с постоянным напряжением питания. Стационарный режим для разрядных ламп, несмотря на эффективность, не может быть использован из-за явления катафореза, приводящего к снижению потока излучения лампы в течение непродолжительного промежутка времени.

Из таблицы видно, что наиболее эффективными для исследуемых УФ ламп в комплекте с импульсным ЭПРА можно считать режимы на частоте 41–44 кГц при скважности 1.77.

РАЗРАБОТКА СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭПРА

Теоретические исследования ЭПРА позволили разработать электронную полупроводниковую схему включения и питания разрядной лампы с выбранными исходными элементами, которая при нестабильном входном напряжении обеспечивает высокую стабильность лучистого потока в результате применения обратной связи, определяющей зависимость скважности импульсов тока $t_{\text{и}}(t)$ от величины входного напряжения (рис. 3).

Предложенная схема включения и питания разрядной лампы, представленная на рис. 3, является автогенераторной (самовозбуждающейся). Рабочие частоты ВЧ ключа находятся выше 25 кГц. В качестве силового полупроводникового элемента можно применять среднечастотный транзистор. При подаче напряжения на вход на коллекторе транзистора VT появляется скачок напряжения, передаваемый через конденсатор $C5$ на первичную обмотку трансформатора Tr с сердечником из феррита, имеющим петлю гистерезиса прямоугольной формы.

При расчетах параметров элементов выбранного варианта импульсного ЭПРА выбирались значения мощности лампы и режимы ВЧ питания.

Расчетные формулы и результаты расчета основных параметров для схемы (рис. 3) представлены

⁴ Коваленко О.Ю. *Светотехнические установки для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных*: дис. докт. техн. наук. Саранск: МГУ им. Н.П. Огарёва; 2009. [Kovalenko O.Yu. *Lighting installations for increasing the productivity of farm animals*. Dr. Sci. Thesis (Eng.). Saransk: Ogarev MSU; 2009 (in Russ.).]

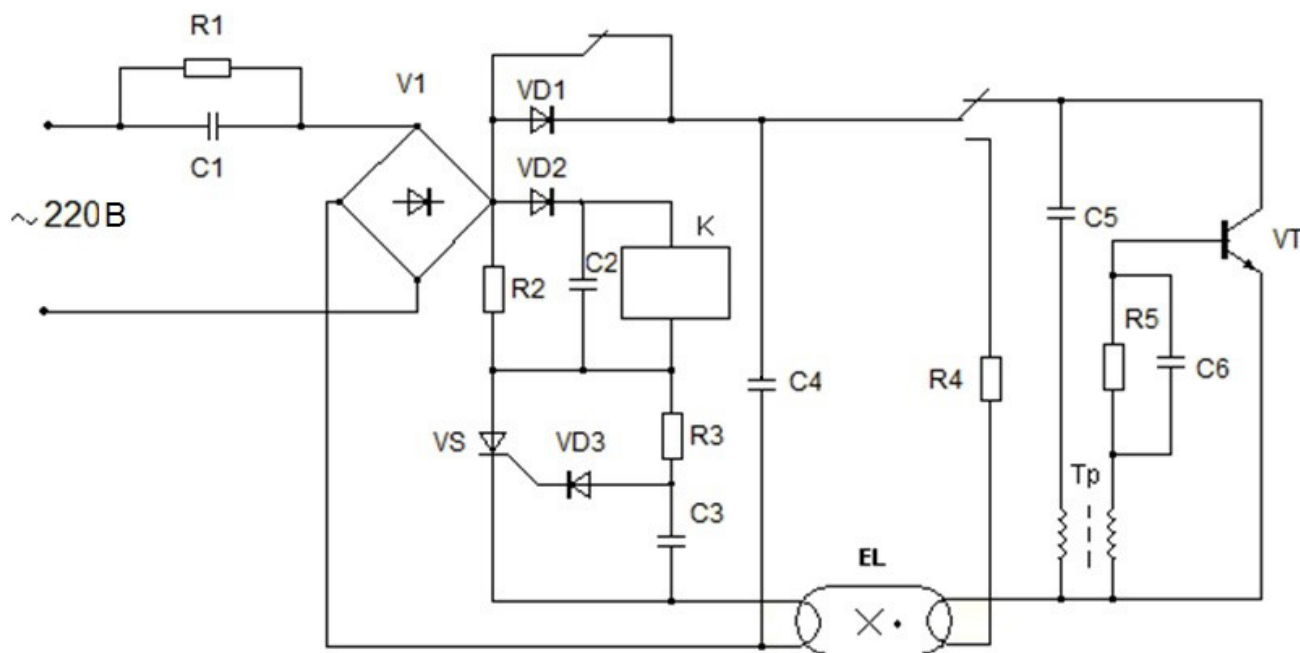


Рис. 3. Схема включения и питания УФ разрядной лампы с номинальным напряжением 220 В

с учетом параметров импульсов: амплитудных значений тока и напряжения, их длительности и частоты.

Для примера можно принять следующие основные исходные параметры для расчета блокинг-генератора (ВЧ ключа):

$E_K = 150$ В, $t_{и} = 6-10$ мкс, $f = 40-50$ кГц, $R_H = 239$ Ом, $I_{ср} = 0.43$ А, $T^0 = 20-25$ °С, $R_d = 20$ Ом, $R_6 = 100$ Ом,

где E_K – электродвижущая сила в выходной цепи транзистора; R_H – сопротивление источника сигнала или выходное сопротивление предыдущего каскада; $I_{ср}$ – среднее значение импульсного тока лампы; T^0 – температура корпуса транзистора в рабочем режиме; R_d – сопротивление демпфирующей цепи; R_6 – объемное сопротивление базы.

С учетом таких параметров транзистора, как мощность, рассеиваемая на коллекторе, коллекторное напряжение и длительность импульса, был выбран транзистор КТ809А.

Значение индуктивности L первичной обмотки вычисляется из соотношения:

$$L = \frac{(E_K - U_{КО})t_{и}}{I_{КДОП} - (I_{КН} - 0.8E_K/r_{вх})}, \quad (2)$$

где $U_{КО}$ – остаточное коллекторное напряжение насыщенного транзистора ($U_{КО} = 3$ В); $I_{КДОП}$ – допустимый коллекторный ток транзистора ($I_{КДОП} = 5$ А); $I_{КН}$ – начальный ток в коллекторной цепи; $r_{вх}$ – входное сопротивление транзистора по схеме с общим эмиттером ($r_{вх} = 34$ Ом).

Максимальное значение коллекторного напряжения определим по формуле:

$$U_{Km} = E_K \left(1 + \frac{t_{и}}{L} R_3 \right), \quad (3)$$

где R_3 – эквивалентное сопротивление коллекторной цепи:

$$R_3 = \frac{R_H (R_d + r_d)}{R_H + R_d + r_d}, \quad (4)$$

R_d принимаем равным 20 Ом; r_d – прямое сопротивление диода ($r_d = 5$ Ом).

При увеличении температуры ($T^0 > T_1^0$) можно определить величину теплового тока, создаваемого остаточным коллекторным напряжением насыщенного транзистора:

$$I_{КО} = I_{КО}(T_1^0) e^{0.08(T^0 - T_1^0)}, \quad (5)$$

где T_1^0 – температура окружающей среды. Ток $I_{КО}$ (тепловой ток перехода) примерно удваивается при увеличении температуры на 10 °С. Определяем значение электрической емкости $C5$ при сопротивлении $R_6 = 100$ Ом, полагая потенциал базы (источник постоянного напряжения) $E_6 = E_K$,

$$C5 = \frac{\tau_H}{\left(1 - \theta \frac{\tau_H}{\tau_{и}} \right) (r_6 + R_6)}, \quad (6)$$

где τ_H – постоянная времени накопления (для транзистора КТ809А $\tau_H = 28.9$ мкс); $\tau_{и}$ – длительность импульса, мкс; r_6 – входное сопротивление базы транзистора; θ – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\theta = \frac{t_i (\tau_{\text{BX}} - \tau_{\text{H}})}{\tau_{\text{BX}} \tau_{\text{H}}}, \quad (7)$$

где τ_{BX} – постоянная времени заряда емкости, характеризующаяся временем переднего фронта импульса. Примем τ_{BX} равной 40 мкс.

В соответствии с расчетом выберем конденсатор С6, необходимый для компенсации индуктивного сопротивления вторичной обмотки трансформатора и сопротивления R_1 , R_d . Сопротивление нагрузки примем равным $R_{\text{H}} = 349$ Ом. Диоды выберем с учетом величины тока через нагрузку, равного среднему значению импульсного тока лампы $I_{\text{cp}} = 0.43$ А.

Коэффициент пульсации K выпрямительного напряжения принимаем равным 0.3.

Емкость сглаживающего фильтра определяется по формуле:

$$C4 = \frac{1}{\omega R_{\text{H}}} \sqrt{\frac{1.68}{\text{arth}^2 K}} - 4. \quad (8)$$

Емкость цепи переменного тока при значении постоянного эмпирического коэффициента m , зависящего от типа выпрямителя (для двухполупериодного выпрямителя $m = 0.34$) определялась по формуле:

$$C1 = \frac{(0.455K + 1.15)}{\omega R_{\text{H}} \sqrt{\frac{1}{m^2} - (1 + K)^2 \frac{K}{0.57} \left(2 - \frac{K}{0.57}\right) - (1 + K) \left(1 - \frac{K}{0.57}\right)}}. \quad (9)$$

Таким образом, в результате расчетов определена элементная база с установленными значениями основных параметров для блокинг-генератора:

- конденсаторы С1 – 5 мкФ × 250 В (КБГ-МП); С4 – 50.0 мкФ × 350 В (К-50-7), С5 – 470 мкФ; С6 – 5 мкФ;
- резисторы R1 = 10 Ом; R2 = 20 Ом; R3 = 200 Ом; R4 = 2 Ом; R5 = 5.1 Ом;
- диоды VD1–VD4 – Д 229 Л; VD5 – Д 226 Б;
- транзистор VT – КТ 809 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования проведены расчеты относительных значений лучистой отдачи ртутной линии 254 нм УФ ламп в комплекте с импульсным ЭПРА (отношение лучистых отдач при импульсном и стационарном режимах). В процессе работы для них были определены наиболее эффективные режимы, предложено схемное решение импульсного ЭПРА, которое при использовании обратной связи, контролирующей длительности импульсов тока и напряжения, обеспечивает управление работой ВЧ ключа и дает высокую стабильность лучистого потока.

Вклад авторов

О.Ю. Коваленко – общее руководство, планирование и проведение исследований.

С.А. Микаева – проведение исследований, сбор и обработка данных, обзор литературы.

Ю.А. Журавлёва – проведение исследований, анализ результатов, написание статьи.

Authors' contributions

O.Yu. Kovalenko – overall supervision, planning and conducting research.

S.A. Mikaeva – conducting research, data collection and processing, and literature review.

Yu.A. Zhuravleva – conducting research, analysis of results, and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко О.Ю., Сарычев П.А., Микаева С.А., Микаева А.С. Совершенствование ультрафиолетовых разрядных ламп низкого давления. *Автоматизация и современные технологии*. 2011;12:13–15.
2. Коваленко О.Ю., Пильщикова Ю.А., Гусева Е.Д. Повышение эффективности и контроль параметров источников излучения облучательных установок в сельском хозяйстве. *Фотоника*. 2017;8(68):68–73. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.68.8.68.73>
3. Николаева Е.В., Алексеев Ю.В., Ларюшин А.И., Соснин Э.А. Применение ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 305–315 нм в терапии ряда дерматологических заболеваний. *Лазерная медицина*. 2014;18(4):51. URL: https://www.goslasmed.ru/wp-content/uploads/2016/09/Lazer-med_4_2014.pdf
4. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*. Berlin: Springer; 2009. 501 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>

REFERENCES

1. Kovalenko O.Yu., Sarychev P.A., Mikaeva S.A., Mikaeva A.S. Improvement of the ultra-violet low pressure digit lamps. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii = Automation and Modern Technologies*. 2011;12:13–15 (in Russ.).
2. Kovalenko O.Yu., Pil'shchikova Yu.A., Guseva E.D. Efficiency improvement and parameter checkout of emission sources of irradiation equipment in agriculture. *Fotonika = Photonics Russia*. 2017;8(68):68–73 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.68.8.68.73>
3. Nikolaeva E.V., Alekseev Yu.V., Laryushin A.I., Sosnin E.A. Ultraviolet irradiation in the wavelength range 305–315 μm for treating a number of dermatological diseases. *Lazernaya meditsina = Laser Medicine*. 2014;18(4):51 (in Russ.). Available from URL: https://www.goslasmed.ru/wp-content/uploads/2016/09/Lazer-med_4_2014.pdf

5. Sankar G.U. A survey on wavelength based application of ultraviolet LED. *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.* 2016;2(6):23–24. URL: <https://ijsrset.com/paper/1986.pdf>
6. Охонская Е.В. Эффективность люминесцентных ламп при высокочастотном питании. *Светотехника.* 1987;2:10–12.
7. Цветков Е.И. О результатах исследования комплекта люминесцентная лампа – импульсный полупроводниковый ПРА. *Человек и свет: Межвуз. сб. науч. трудов.* Саранск: Изд-во Мордовского гос. ун-та; 1982. С. 86.
8. Микаева С.А., Микаева А.С. *Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем.* М.: РУСАЙНС; 2017. 136 с. ISBN 978-5-4365-1785-8
9. Поляков В.Д., Смирнов Е.М. Характеристики люминесцентных ламп при управлении подогревом электрода с помощью ЭПРА. *Светотехника.* 2008;4:46–49.
10. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Оборудование для испытаний управляющих устройств для светильников со светодиодами и ЭПРА для люминесцентных ламп. *Светотехника.* 2017;4:42–46.
11. Малышев А. Новое – хорошо забытое старое: особенности питания бактерицидных и люминесцентных ламп и выбор ЭПРА для них. *Полупроводниковая светотехника.* 2021;6(74):26–30.
12. Терентьев Б. Электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА): история, принцип работы, проблемы. Популярны микросхемы для ЭПРА. *Компоненты и технологии.* 2008;5(82):106–110. URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2008_5_106.pdf
4. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook.* Berlin: Springer; 2009. 501 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>
5. Sankar G.U. A survey on wavelength based application of ultraviolet LED. *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.* 2016;2(6):23–24. Available from URL: <https://ijsrset.com/paper/1986.pdf>
6. Okhonskaya E.V. The efficiency of fluorescent lamps with high-frequency power supply. *Svetotekhnika = Light & Engineering.* 1987;2:10–12 (in Russ.).
7. Tsvetkov E.I. On the results of the study of a set of fluorescent lamp-pulsed semiconductor ballast. In: *Chelovek i svet: Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov (Man and light: Interuniversity collection of scientific papers).* Saransk: Mordovia State University Publishing House; 1982. P. 86 (in Russ.).
8. Mikaeva S.A., Mikaeva A.S. *Eksperimental'nye issledovaniya kharakteristik perspektivnykh istochnikov sveta, priborov i system (Experimental study of characteristics of advanced light sources, devices and systems).* Moscow: RUSAINS; 2017. 136 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4365-1785-8
9. Polyakov V.D., Smirnov E.M. Investigation the characteristics of luminescent lamps' cathode heating control by means of electron start-control devices (ESCD). *Light & Engineering.* 2008;16(4):43–47.
10. Bespalov N.N., Il'in M.V., Kapitonov S.S. Testing equipment for LED luminaire control devices and fluorescent lamp electron ballasts. *Light & Engineering.* 2017;25(4):86–91.
11. Malyshev A. New – well-forgotten old: nutritional features of bactericidal and fluorescent lamps and the choice of electronic ballasts for them. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika = Solid – State Lighting.* 2021;6(74):26–30.
12. Terent'ev B. Electronic ballasts (EPRA): history, principle of operation, problems. Popular microcircuits for electronic ballasts. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies.* 2008;5(82):106–110 (in Russ.). Available from URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2008_5_106.pdf

Об авторах

Коваленко Ольга Юрьевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры метрологии, стандартизации и сертификации Института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (430005, Россия, Саранск, Большевикская ул., д. 68). E-mail: crystal2000@mail.ru. Scopus Author ID 57190227678.

Микаева Светлана Анатольевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры электроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mikaeva_s@mirea.ru. Scopus Author ID 57214070393, <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X>

Журавлёва Юлия Алексеевна, к.т.н., доцент, доцент кафедры электроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ulypil@mail.ru. Scopus Author ID 57217961848, <https://orcid.org/0000-0003-3919-5127>

About the authors

Olga Yu. Kovalenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Metrology, Standardization and Certification, Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University (68, Bolshhevistskaya ul., Saransk, 430005 Russia). E-mail: crystall2000@mail.ru. Scopus Author ID 57190227678.

Svetlana A. Mikaeva, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Electronics Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mikaeva_s@mirea.ru. Scopus Author ID 57214070393, <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X>

Yulia A. Zhuravleva, Cand. Sci., (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Electronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ulypil@mail.ru. Scopus Author ID 57217961848, <https://orcid.org/0000-0003-3919-5127>