

Научная статья

УДК 631.371: 621.327

Код ВАК: 4.3.2

doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-141-150

Памяти учителя, профессора В.Н. Карпова посвящается

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ОТНОШЕНИЙ К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ ЭТАПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯХ

С.А. Ракутько¹ ✉, С.В. Гулин²

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия
✉ sergej1964@yandex.ru

² Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат. Важнейшей проблемой в АПК является проблема энергосбережения. Повышение энергетической эффективности оптических электротехнологий, использующих оптическое излучение как специфический энергетический фактор, представляется весьма наукоемкой задачей. Метод конечных отношений (МКО) разработан профессором В.Н. Карповым как комплекс операций, основанных на анализе энергозатрат в статических и динамических процессах. Метод является важным инструментом для анализа и оптимизации энерготехнологических процессов, а также для разработки энергосберегающих систем по единому показателю энергоэффективности – энергоемкости процесса. Цель исследований – адаптация МКО для его использования в облучательных установках с газоразрядными лампами. Методика применения МКО для выявления резервов энергосбережения предусматривает «разметку» схемы, которая заключается в выделении энергетических блоков, соответствующих этапам преобразования энергии. В работе для схемы с газоразрядной лампы выделено два блока: балласт (преобразование полной энергии в активную) и газоразрядная лампа (преобразование активной энергии в энергию светового потока). Представлены выражения для вычисления энергоемкости этих блоков. В первой серии экспериментов исследовали работу лампы типа ЛБ 40 с активным, индуктивным и емкостным балластами. Во второй серии экспериментов исследовали работу той же лампы с индуктивными балластами марок АБИ и УБИ. Мгновенные значения величин тока, напряжения и светового потока определяли с помощью осциллографа С1-82. Общая энергоемкость схемы с исследованными марками балласта составляет 0,022 и 0,017 ВА·Лм⁻¹ соответственно. Эффективность замены балласта АБИ на УБИ как энергосберегающего мероприятия, согласно МКО, составляет 26%. Таким образом, показана возможность использования МКО для анализа электрических схем с газоразрядными лампами, питаемыми от балластов различных марок.

Ключевые слова: энергосбережение, оптические электротехнологии, технологический процесс облучения, газоразрядные лампы, балласт, энергоемкость

Цитирование. Ракутько С.А. Гулин С.В. Применение метода конечных отношений к энергетическому анализу этапов технологического процесса облучения в оптических электротехнологиях // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – №1 (75). – С. 141–150, doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-141-150.

APPLICATION OF THE FINITE RATIO METHOD TO ENERGY
ANALYSIS OF IRRADIATION PROCESS STEPS IN OPTICAL
ELECTROTECHNOLOGIESS.A. Rakutko¹ ✉, S.V. Gulin²

¹ Institute for Engineering and Environmental
Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM,
St. Petersburg, Russia
✉ sergej1964@yandex.ru

² Saint-Petersburg State Agrarian University
St. Petersburg, Russia

Abstract. The most important problem in agro-industrial complex is the problem of energy saving. Increasing the energy efficiency of optical electro-technologies, which use optical radiation as a specific energy factor, seems to be a very science-intensive task. The Finite Ratio Method (FRM) was developed by Professor V.N. Karpov as a set of operations based on the analysis of energy consumption in static and dynamic processes. The method is an important tool for the analysis and optimisation of energy-technological processes, as well as for the development of energy-saving systems according to a single indicator of energy efficiency – the energy intensity of the process. The aim of the research is to adapt FRM for its use in irradiation plants with gas-discharge lamps. The methodology of FRM application for revealing the energy saving reserves provides "marking" of the scheme, which consists in allocation of energy blocks corresponding to the stages of energy conversion. In the paper, two blocks are allocated for the circuit with a discharge lamp: ballast (conversion of total energy into active energy) and discharge lamp (conversion of active energy into light flux energy). Expressions for calculating the energy intensity of these blocks are presented. In the first series of experiments, the operation of the LB 40 type lamp with active, inductive and capacitive ballasts was investigated. In the second series of experiments the operation of the same lamp with inductive ballasts of ABI and UBI brands was investigated. Instantaneous values of current, voltage and luminous flux were determined using oscilloscope C1-82. The total power consumption of the circuit with the investigated ballast brands is 0.022 and 0.017 VA.Lm⁻¹ respectively. The efficiency of replacing ABI ballast with UBI as an energy saving measure, according to FRM, is 26%. Thus, the possibility of using FRM to analyse electrical circuits with discharge lamps fed from ballasts of different brands is shown.

Keywords: energy saving, optical electrical technologies, technological process of lighting, gas-discharge light sources, ballast, energy consumption

Citation. Rakutko S.A., Gulin S.V. 'Application of the finite ratio method to energy analysis of irradiation process steps in optical electrotechnologies', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 75, no. 1, pp. 141–150. (In Russ.), doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-141-150.

Введение. Научное наследие профессора В.Н. Карпова (1939–2023) еще во многом до конца не осмыслено и требует тщательного изучения. Вершиной творчества ученого является разработанный им метод конечных отношений (МКО). Как его характеризовал сам автор, метод представляет собой комплекс операций, основанных на анализе энергозатрат в статических и динамических процессах [1, 2]. Метод является важным инструментом для анализа и оптимизации энерготехнологических процессов (ЭТП), а также для разработки энергосберегающих систем в ЭТП по показателю энергоэффективности – относительной энергоемкости процесса [3]. На основе МКО создана прикладная теория энергосбережения в энерготехнологических процессах ПТЭЭТП [4]. В ней теоретической моделью реального

энергетического объекта или процесса, описывающей преобразование набора входных параметров в выходные, является виртуальный энергетический блок (ВЭБ). Технологический процесс облучения (ТПО) как один из видов ЭТП также может быть представлен последовательностью из ВЭБ различной природы.

В данной работе проиллюстрировано применение МКО для энергетического анализа оптических электротехнологий (ОЭТ), основанных на использовании оптического излучения (ОИ) для облучения животных, птицы, растений. Это весьма энергоемкие процессы [5]. Повышение энергетической эффективности и экологичности ОЭТ, разработка энергосберегающих мероприятий (ЭСМ) представляется для сельскохозяйственного производства наиболее наукоемкой задачей [6].

Широко распространенным в ОЭТ источником ОИ являются газоразрядные лампы (ГЛ) [7, 8]. Принцип действия ГЛ заключается в использовании явления возникновения потока излучения при протекании электрического тока через разрядный промежуток [9]. На практике распространены люминесцентные ГЛ, переизлучающие свет в нужном спектральном диапазоне с помощью специального покрытия на колбе [10]. Будучи элементом электрической цепи, ГЛ имеют ряд особенностей, требующих учета при анализе и расчете схем на их основе. Данный тип ламп включается в сеть с помощью пускорегулирующего аппарата (ПРА), необходимого для зажигания разряда в лампе и его стабилизации. В простейшем случае ПРА представляет собой балластное сопротивление (или просто балласт). В силу того, что ПРА имеет некоторое электрическое сопротивление, а также в силу реактивного характера его элементов часть энергии, потребляемой схемой из сети, формирует потери, что приводит к снижению коэффициента мощности [11].

В связи с этим вопросы энерго- и ресурсосбережения в установках с ГЛ, изучение их характеристик и разработка методов оценки эффективности представляет собой важную научную и практическую задачу.

Цель исследования – адаптация МКО для его использования в облучательных установках с газоразрядными лампами для выявления резервов энергосбережения.

Материалы, методы и объекты исследования. Протекающие в ВЭБ как этапе преобразования энергии в ТПО процессы связаны с перемещением различного вида субстанции при возникновении градиента потенциала в направлении выравнивания последнего и подчиняются общему закону энергопроводности. Уравнения ВЭБ содержат продольные (потенциалы различной природы) и поперечные (векторы плотности потока носителей энергии) переменные для его входа и выхода, произведение которых образует соответственно подаваемую на вход Q_n и фиксируемую на выходе Q_k энергию [12].

На рис. 1 показана принципиальная электрическая схема включения балласта L и лампы E . На вход схемы подается синусоидальное сетевое напряжение $u_c(t)$. Мгновенные значения тока через цепь составляют $i(t)$, напряжения на лампе $u_n(t)$, светового потока $f(t)$.

Схема «размечена» для проведения энергетического анализа согласно правилам МКО. Разметка заключается в выделении ВЭБ, соответствующих этапам преобразования энергии в ТПО. В рассматриваемом случае в качестве $ВЭБ_I$ выделен балласт L , в качестве $ВЭБ_{II}$ – лампа E . Их совокупность представляет собой общий $ВЭБ_o$, состоящий из этих элементов электрической схемы, включенных последовательно.

Потребляемая из электрической сети энергия Q_o^H подается на вход $BЭБ_I$ ($Q_I^H = Q_o^H$). В содержательной трактовке эта энергия соответствует полной мощности S $BЭБ_I$.

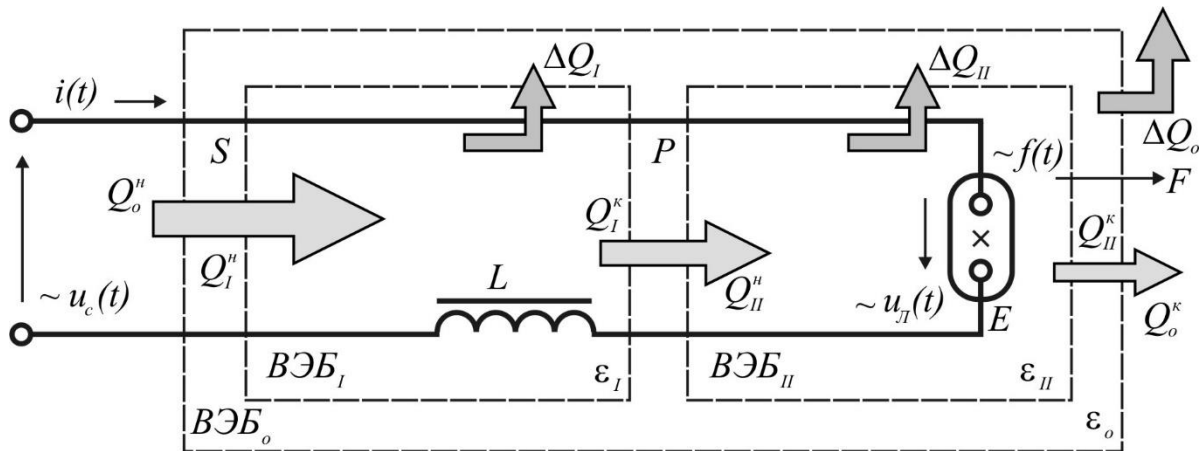


Рисунок 1. Схема к энергетическому анализу ТПО
 Figure 1. Scheme for energy analysis of TPI

На выходе первого блока фиксируется энергия Q_I^K , соответствующая активной мощности P лампы. Природа потерь на этом этапе ΔQ_I заключается в несинусоидальном характере мгновенных значений тока и напряжения на лампе. Величина этих потерь

$$\Delta Q_I = Q_I^H - Q_I^K. \quad (1)$$

Энергоемкость $BЭБ_I$ составляет

$$\varepsilon_I = \frac{Q_I^H}{Q_I^K} = \frac{S}{P} = \frac{UI}{P}. \quad (2)$$

Полагаемая полезной энергия Q_I^K с выхода $BЭБ_I$ поступает на вход $BЭБ_{II}$, т. е. $Q_{II}^H = Q_I^K$. На его выходе полезной является энергия светового потока (доза) $Q_{II}^K = F$. Потери на этом этапе ΔQ_{II} объясняются не полным использованием электрической энергии при генерировании светового потока в газовом разряде и потерями в люминофоре.

$$\Delta Q_{II} = Q_{II}^H - Q_{II}^K. \quad (3)$$

Энергоемкость $BЭБ_{II}$ составляет

$$\varepsilon_{II} = \frac{Q_{II}^H}{Q_{II}^K} = \frac{P}{F}. \quad (4)$$

Общая энергоемкость $BЭБ_o$

$$\varepsilon_o = Q_o^H / Q_o^K = \varepsilon_I \varepsilon_{II}. \quad (5)$$

Общие потери

$$\Delta Q_o = Q_o^H - Q_o^K = \Delta Q_I + \Delta Q_{II}. \quad (6)$$

Величины $u_c(t)$, $i(t)$ и $f(t)$ при работе схемы принимают различные мгновенные значения при изменении $u_c(t)$ в течение периода $T = 2\pi$. При вычислениях полупериод $T/2$ разбивали на $m=12$ интервалов.

Особенностью данной методики по сравнению с известным подходом является учет этапа генерации светового потока лампой как этапа преобразования энергии [13]. Световой поток определяли численным интегрированием кривой мгновенных значений f по методу Симпсона:

$$F = \int_0^T f dt \approx \frac{2}{3m} \left[f_0 + f_m + 2 \sum_{i=1}^{m-1} f_{2i} + 4 \sum_{i=1}^m f_{2i-1} \right]. \quad (7)$$

Действующее значение напряжения определяли по формуле

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m u^2}. \quad (8)$$

Действующее значение тока определяли по формуле

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m i^2}. \quad (9)$$

Степень искажения формы кривой тока оценивали по значению коэффициента амплитуды

$$k_a = \frac{I_m}{I}, \quad (10)$$

где I_m – амплитудное (максимальное) значение тока.

Известно, что для синусоидального тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2}.$$

Чем больше значение k_a отличается от $\sqrt{2}$, тем больше форма кривой тока далека от синусоидальной. Балластное устройство должно обеспечивать выполнение условия $k_a < 1,7$. При больших значениях k_a существенно сокращается продолжительность работы ГЛ.

ЭСМ для ВЭБ является выбор элементов схем с такими свойствами, что обеспечивается меньшая энергоёмкость $\varepsilon'_o < \varepsilon_o$. Общее значение коэффициента эффективности ЭСМ обоих мероприятий $k^{\text{ЭСМ}}$, отн. ед., определяли по формуле

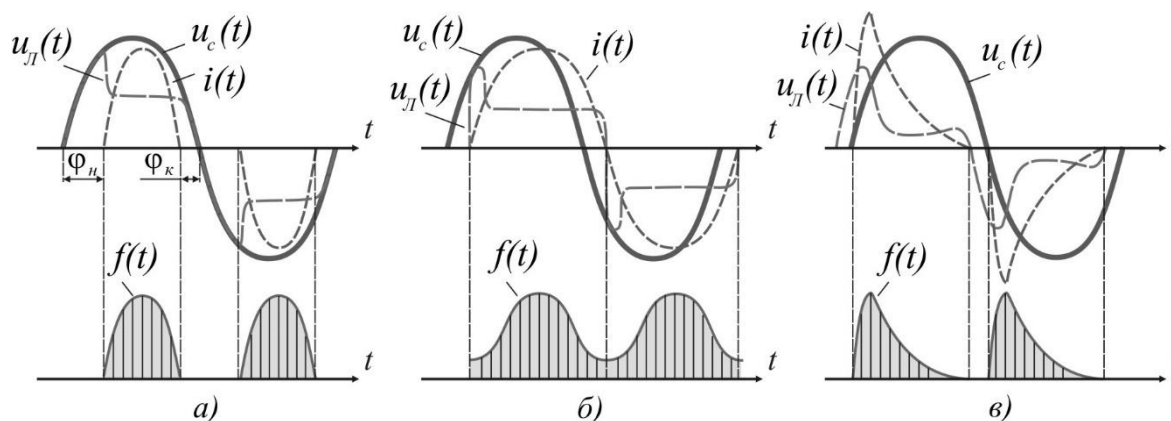
$$k^{\text{ЭСМ}} = \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon'_o}. \quad (11)$$

В первой серии экспериментов исследовали работу лампы типа ЛБ 40 (мощностью $P = 40$ Вт) с балластами различных типов: а) активным, в качестве которого использовали сопротивление; б) индуктивным (брали балласты различных марок); в) емкостным. Во второй серии экспериментов исследовали работу той же лампы с индуктивными балластами марок АБИ и УБИ.

Мгновенные значения величин определяли с помощью осциллографа С1-82. Экспериментальные данные обрабатывали с использованием пакета EXCEL.

Результаты исследования. На рис. 2 показаны усредненные (с сохранением характерных соотношений) осциллограммы мгновенных значений величин, характеризующих работу ГЛ при работе с различными типами балластного сопротивления. Эксперименты с балластами различных типов показали существенные различия мгновенных значений тока и напряжения в цепи питания, а также светового потока, генерируемого лампой.

Активный балласт характеризуется наличием больших токовых пауз и, как следствие, пульсацией потока излучения, что приводит к стробоскопическому эффекту. Срок службы электродов при таком балласте уменьшается вследствие ускоренного распыления оксидного слоя и потери эмиссионных свойств. Большой расход электрической энергии в активном балластном сопротивлении резко снижает энергетические показатели работы схемы. Индуктивный балласт обеспечивает кривую тока, близкую к синусоидальной. Его недостатками являются большой расход металла, низкий коэффициент мощности, высокая стоимость. Емкостный балласт существенно искажает форму кривой тока, броски которого обуславливают большие пульсации светового потока. Полученные экспериментально данные хорошо согласуются с известными закономерностями [14, 15].



**Рисунок 2. Осциллограммы мгновенных значений величин
для различных видов балласта**

**Figure 2. Oscillograms of instantaneous values of quantities
for various types of ballast**

Для обеспечения нормального срока службы ГЛ форма кривой мгновенных значений тока должна быть близка к синусоидальной. Поэтому дальнейшие измерения проводили на индуктивных балластах двух различных марок. Форма кривой тока у них близка к синусоидальной.

На рис. 3 показаны снятые с экрана осциллографа мгновенные значения тока i (масштаб $\mu_i = 0,01$ А/дел) и напряжения (масштаб $\mu_u = 2$ В/дел.). Переводной коэффициент датчика освещенности в значения светового потока f составляет $\mu_f = 50$ Лм/дел.

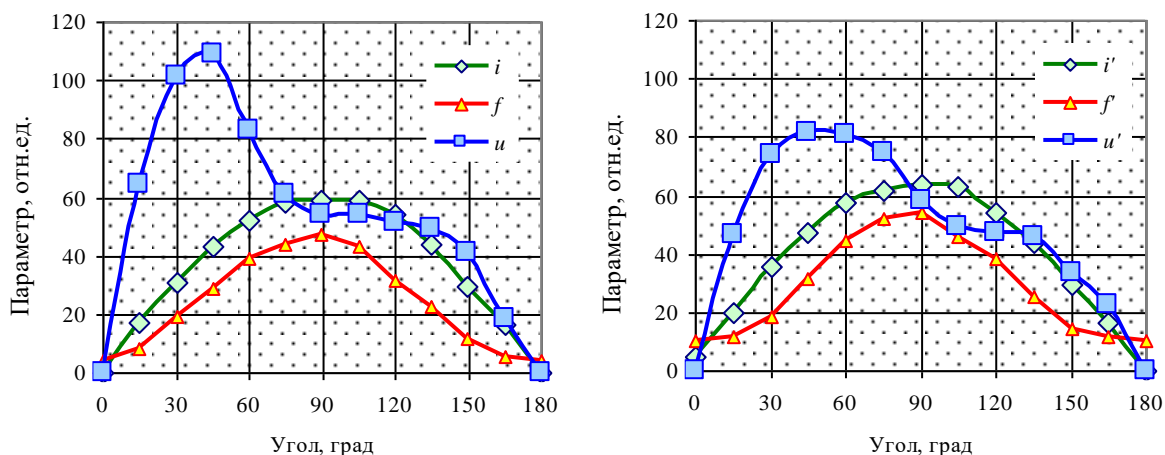


Рисунок 3. Осциллограммы тока, напряжений и светового потока
 Figure 3. Oscillograms of current, voltage and light flux

Кривые i , u и f (вариант I ТПО) соответствуют балласту марки АБИ 40/220 при работе с лампой ЛБ-40, кривые i' , u' и f' (вариант II ТПО) – балласту марки УБИ при работе с той же лампой.

В таблице указаны итоговые значения показателей, рассчитанные по полученным осциллограммам.

Таблица. Итоговые значения показателей
 Table. Total indicator values

Показатель	Вариант ТПО	
	I	II
Действующее значение тока i , А	0,43	0,46
Коэффициент амплитуды тока k_a	1,38	1,40
Действующее значение напряжения u , В	129,1	112,8
Полная мощность S , ВА	55,4	51,7
Световой поток F , Лм	2537	2988
Энергоемкость ε_I , ВА·Вт ⁻¹	1,385	1,292
Энергоемкость ε_{II} , Вт·Лм ⁻¹	0,016	0,013
Энергоемкость общая ε_o , ВА·Лм ⁻¹	0,022	0,017

ЭСМ в рассмотренном примере ТПО в облучательной установке с ГЛ является выбор марки балласта с такими электрическими характеристиками, при которых обеспечивается меньшая энергоемкость. Энергоемкость ТПО при использовании балласта марки АБИ $\varepsilon_o = 0,022$ ВА·Лм⁻¹. Энергоемкость ТПО при использовании балласта марки УБИ $\varepsilon'_o = 0,017$ ВА·Лм⁻¹. Применение балласта марки УБИ по сравнению с балластом марки АБИ обеспечивает значение коэффициента эффективности ЭСМ:

$$k^{\text{ЭСМ}} = \varepsilon_o / \varepsilon'_o = 1,26 \text{ отн. ед.}$$

Таким образом, замена балласта более старой марки АБИ на более современные марки УБИ обеспечивает повышение энергоэффективности на 26%.

Выводы. Показана приемлемость использования МКО для анализа электрических схем питания ГЛ в ТПО. Полученные осциллограммы токов и напряжений в цепи питания ГЛ через балласты различных типов показали большую несинусоидальность тока, протекающего через лампу при резистивном и емкостном балласте. При этом наблюдаются большие пульсации генерируемого светового потока, неприемлемые в случае облучения биологических объектов. Для индуктивных балластов двух типов (АБИ и УБИ) коэффициент амплитуды тока принимает допустимое значение 1,38...1,40 отн. ед. Энергоемкость ТПО с применением этих марок балласта составляет 0,022 и 0,017 ВА·Лм⁻¹ соответственно. Эффективность замены балласта АБИ на УБИ как энергосберегающего мероприятия составляет 26%.

Список литературы

1. Карпов, В.Н. Энергосбережение. Метод конечных отношений. – Санкт-Петербург. гос. аграр. ун-т. – Санкт-Петербург: СПбГАУ, 2010. – 146 с.
2. Карпов, В.Н. Практическое управление энергоэффективностью предприятия // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 55.– С. 118–125.
3. Карпов, В.Н. Методика исследования по определению энергоэффективности обработки воды УФ / В. Н. Карпов, З. Ш. Юлдашев, Р. З. Юлдашев // Peasant. – 2022. – № 4 (97). – С. 88–93.
4. Гулин, С.В. Эффективность спектростабилизирующего регулирования потока разрядных источников излучения с позиций прикладной теории энергосбережения / С. В. Гулин, С. А. Ракутько // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 28. – С. 377–383.
5. Ovchukova, S.A. Energy saving in lighting technologies of agricultural production / S. A. Ovchukova., N. P. Kondratieva, O. Yu. Kovalenko // Light & Engineering, 2021, 29 (2), pp. 21–25.
6. Карпов, В.Н. Энергосбережение в оптических электротехнологиях АПК. Прикладная теория и частные методики / В. Н. Карпов, С. А. Ракутько. – Санкт-Петербург, 2010. – 100 с.
7. Левченко, В.А. Увеличение физического срока службы мощных газоразрядных ламп низкого давления // Прикладная физика. – 2015. – № 5. – С. 90–94.
8. Середенко, Р.А. Классификация электрических разрядов на основе различных параметров // Качество жизни населения и экология. – Пенза, 2023. – С. 116–119.
9. Козлов, Д.Г. К вопросу о процессах зажигания и стабилизации функционирования газоразрядных ламп / Д.Г. Козлов, Р.К. Савицкас // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 2 (45).– С. 61–64.
10. Lister G. Low-Pressure Gas Discharge Lamps / G. Lister, Y. Liu // Handbook of Advanced Lighting Technology, 2017, pp. 1065–1079.
11. Сапрыка, А.В. Влияние вольт-амперных характеристик газоразрядных ламп на работу осветительных установок в городских электрических сетях / А. В. Сапрыка, С. В. Вендин, П.В. Рошубкин // Научные технологии и инновации. Белгород: Белгородский ГТУ, 2019.– С. 54–58.
12. Ракутько, С.А. Энергодинамические основы прикладной теории энергосбережения // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2014.– № 37. – С. 268–271.

13. Ракутько, Е.Н. Энергетическая оценка эффективности балластов для газоразрядных источников света / Е.Н Ракутько, С.А. Ракутько // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024.– № 1 (73). – С. 373-381.
14. Лаптев, В.А. Анализ характеристик газоразрядной лампы в электрической цепи синусоидального тока / В. А. Лаптев, Ю. М. Соловьев // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2002. – № 1 (1). – С. 76–81.
15. Малышев, А. Новое – хорошо забытое старое: особенности питания бактерицидных и люминесцентных ламп и выбор ЭПРА для них // Полупроводниковая светотехника.– 2021. – № 6 (74). – С. 26–30.

References

1. Karpov V.N. Energoberezhenie. Metod konechnyh otnoshenij [Energy saving. Finite ratio method]. St. Petersburg, 2005. – 146 p.
2. Karpov V.N. (2019) Prakticheskoe upravlenie energoeffektivnost'yu predpri-yatiya [Practical management of enterprise energy efficiency] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. № 2, pp. 118-125.
3. Karpov V.N., Yuldashev Z.Sh., Yuldashev R.Z. (2022) Metodika issledovaniya po opredeleniyu energoeffektivnosti obrabotki vody UF [Research methodology for determining the energy efficiency of UV water treatment], *Peasant*. 2022, vol. 97, no. 4, pp. 88-93.
4. Gulin S.V., Rakutko S.A. (2012) Effektivnost' spektrostabiliziruyushchego regulirovaniya potoka razryadnyh istochnikov izlucheniya s pozicij prikladnoj teorii energoberezheniya [Efficiency of spectrum-stabilizing regulation of the flow of discharge radiation sources from the perspective of applied theory of energy saving], *Izvestia of the Saint-Petersburg State Agrarian University*. No. 28. pp. 377-383.
5. Ovchukova S.A., Kondratieva N.P., Kovalenko O.Yu. (2021) Energy saving in lighting technologies of agricultural production. *Light & Engineering*. No 2, Vol. 29, pp. 21–25.
6. Karpov V.N., Rakutko S.A. Energoberezhenie v opticheskikh elektrotekhnologiyah APK. Prikladnaya teoriya i chastnye metodiki [Energy saving in optical electrical technologies of agro-industrial complex. Applied theory and private methods] St. Petersburg, SPbGAU, 2010. – 100 p.
7. Levchenko V.A. (2015) Uvelichenie fizicheskogo sroka sluzhby moshchnyh gazorazryadnyh lamp nizkogo davleniya [Increasing the physical service life of high-power low-pressure gas-discharge lamps]. *Applied Physics*. No. 5. pp. 90-94.
8. Seredenko R.A. Klassifikaciya elektricheskikh razryadov na osnove razlichnykh parametrov [Classification of electrical discharges based on various parameters] In the collection: Quality of life of the population and ecology. Penza, 2023. pp. 116-119.
9. Kozlov D.G., Savickas R.K. (2015) K voprosu o processah zazhiganiya i stabilizacii funkcionirovaniya gazorazryadnyh lamp [On the issue of ignition processes and stabilization of the functioning of gas-discharge lamps]. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*. No. 2, Vol. 45, pp. 61-64.
10. Lister G. Liu Y. Low-Pressure Gas Discharge Lamps. In book: Handbook of Advanced Lighting Technology. 2017. pp.1065-1079.
11. Sapryka A.V., Vendin S.V., Roshchubkin P.V. (2019) Vliyanie vol't-ampernyh [The influence of current-voltage characteristics of gas-discharge lamps on the operation of lighting installations in urban electrical networks] *In the collection: High technology and innovation*. 2019. pp. 54-58.
12. Rakutko S.A. (2014) Energodinamicheskie osnovy prikladnoj teorii energoberezheniya [Energy-dynamic foundations of the applied theory of energy saving] *Izvestia of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 37, pp. 268-271.

13. Rakutko E.N., Rakutko S.A. (2024) Energeticheskaya ocenka effektivnosti ballastov dlya gazorazryadnyh istochnikov sveta [Energy assessment of the efficiency of ballasts for gas-discharge light sources] // *Izvestia of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. No. 1, Vol. 73.
14. Laptev V.A., Solovyov Yu.M. (2002) Analiz harakteristik gazorazryadnoj lampy v elektricheskoy cepi sinusoidal'nogo toka [Analysis of the characteristics of a gas-discharge lamp in an electrical circuit of sinusoidal current] *Design, use and reliability of agricultural machines*. No. 1, Vol. 1, pp. 76-81.
15. Malyshev A. (2021) Novoe – horosho zabytoe staroe: osobennosti pitaniya baktericidnyh i lyuminescentnyh lamp i vybor EPRA dlya nih [New – well forgotten old: power supply features of bactericidal and fluorescent lamps and the choice of electronic ballasts for them] *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. No 6, vol. 74, pp. 26-30.

Сведения об авторах

Ракутько Сергей Анатольевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, <http://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, SPIN-код: 5103-4590; sergej1964@yandex.ru.

Гулин Сергей Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры энергообеспечения производств и электротехнологии, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», <http://orcid.org/0000-0002-7355-0498>, SPIN-код: 7418-4418, Scopus author ID: 57221205780; serg.gulin2010@yandex.ru.

Information about the authors

Sergei A. Rakutko, Doc.Sci. (Eng), chief researcher of Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, <http://orcid.org/0000-0002-2454-4534>, SPIN-code: 5103-4590.

Sergei V. Gulin, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor of the department of energy supply of enterprises and electrical technologies of Saint-Petersburg State Agrarian University, <http://orcid.org/0000-0002-7355-0498>, SPIN-code: 7418-4418, Scopus author ID: 57221205780; serg.gulin2010@yandex.ru.

Авторский вклад. Все авторы статьи принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и поиске литературы. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution. All authors of this paper have directly participated in the study planning and execution, and literature survey. All authors have read and approved the final version of the paper submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 01.12.2023; одобрена после рецензирования 15.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 01.12.2023; approved after reviewing 15.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.