

Научная статья
УДК 621.3.01
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-39-45>
EDN CMEGRV

Лазерно-ультразвуковое когнитивное преобразование энергии и информации в электроприводе

Владислав Евгеньевич Терентьев

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
Санкт-Петербург, Россия, TerentievVE@gumrf.ru*

Аннотация. Энергоэффективность современных электромашиных технологий зависит от характеристик используемых электроприводов, что требует оптимизации существующих и поиска новых структурных элементов. Исследована модель автоматического оптоэлектронного электропривода с лазерно-ультразвуковым когнитивным преобразованием энергии и информации. Модель включает следующие основные элементы: электродвигатель, приводящий в действие рабочий механизм; измерительно-информационный комплекс, контролирующий и управляющий электродвигателем; усилитель сигналов управления на базе многомодового твердотельного лазера с ультразвуковым модулятором добротности (ЛУЗМД); преобразователь лазерных импульсов в напряжение либо ток или магнитное поле электродвигателя. Исследования динамики генерации в зависимости от мощности накачки и интенсивности ультразвука выполнены на рубиновом лазере. Переходная характеристика электропривода определяется инерционностью электромеханических элементов, значительно превышающей инерционность оптоэлектронных устройств. Инерционность электропривода сглаживает пульсации частотно-импульсной энергии (ЧИЭ). При оценке переходной характеристики электропривода, учитывая его инерционность, ЧИЭ лазерного излучения принималась квазипостоянной в течение неизменной энергии источника накачки, и определение изменений частоты вращения и силы тока якоря электродвигателя проводилось на основе законов Кирхгофа и Ньютона в приближении постоянного тока, с использованием среды MATLAB, пакета Simulink. В отсутствие ультразвука лазер излучает хаотические импульсы. При управлении ультразвуком ЛУЗМД переходит в устойчивый режим частотно-импульсной генерации. Частота повторения регулярных импульсов определяется уровнем накачки при той же мощности ультразвука и не зависит от частоты ультразвука. Рассмотрены вопросы: саморегулирование частотно-импульсной генерации, когнитивность ЛУЗМД; динамика электропривода (ЭП) с ЛУЗМД; эквивалентность мощностей источников частотно-импульсного и постоянного тока; инерционность ЭП с ЛУЗМД; структурная схема и динамика автоматического ЭП с ЛУЗМД. Саморегулирование ЛУЗМД придает оптоэлектронному электроприводе когнитивные свойства, способствует повышению его энергоэффективности, расширяет возможности автоматизации и цифровизации электроприводных технологий.

Ключевые слова: лазер с ультразвуковым модулятором добротности, оптоэлектронный электропривод, энергоэффективность, управление, автоматизация, цифровизация

Для цитирования: Терентьев В. Е. Лазерно-ультразвуковое когнитивное преобразование энергии и информации в электроприводе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 1. С. 39–45. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-39-45>. EDN CMEGRV.

Original article

Laser-ultrasound cognitive transformation of energy and information in an electric drive

Vladislav E. Terentiev

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint Petersburg, Russia, TerentievVE@gumrf.ru*

Abstract. Energy-efficiency in contemporary electromachine technology depend on characteristics electrodrives, that requires optimization his exist and new structural elements. A model of optoelectronic electrodrive with laser-

ultrasound cognitive transformation of energy and information is investigated. Model includes following basic elements: electromotor, driving a working mechanism; measuring-information complex, controlling and operating electromotor; amplifier on basis multi-modes solid laser with ultrasound quality modulator (UQML); transformer of laser pulses into voltage either current or magnetic field of electromotor. Researches dynamics of generating depend on pumping power and ultrasound intensity execution on the rubin laser. Transition characteristic of electrodrive is defines by inertia of electromechanic elements, considerably exceed inertia of optoelectronic equipments. Inertia of electrodrive smooth out pulses of frequency-impulse energy (FIE). When estimation transition characteristic of electrodrive, take into account his inertia, FIE of laser radiation was accepted quasyconstant in time interval constant energy of pumping source and estimates alteration of rotation frequency and current force of electromotor were conducting on basic laws Kirchgof and Newton in approximation constant current by medium Matlab, Simulink. In the absence of ultrasound UQML radiates a chaotic optical impulse. By ultrasound control UQML passes into establish regime of frequency-impulse radiation. Repetition frequency of regular pulses is determination by pumping level when ultrasound power is constant, but did not depend on ultrasound frequency. Examined questions: self-regulation frequency-pulse generation, cognitive transformation of UQML; dynamics of electrodrive (ED) with UQML; equivalent powers sources of frequency-pulse and constant current; inertness ED with UQML; structure scheme of automatic ED with UQML. Self-regulation of UQML attach to increase energy-efficiency, possibility automatical of electrodrive.

Keywords: laser with ultrasonic Q modulator, optoelectronic electric drive, energy efficiency, control, automation, digitalization

For citation: Terentiev V. E. Laser-ultrasound cognitive transformation of energy and information in an electric drive. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2025;1:39-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2025-1-39-45>. EDN CMEGRV.

Введение

В условиях цифровой трансформации при разработке автоматизированных систем используются аналогии функций головного мозга [1, 2]. Аналогичные функциональные блоки могут наблюдаться в многомодовых лазерах [3]. Достижения в создании мощных лазеров [4], фотоэлектронных преобразователей [5], оптоэлектронных бесколлекторных электродвигателей [6], оптоэлектронных систем связи, обнаружения и распознавания [7], альтернативной электроэнергетики [8] делают актуальным применение интеллектуальных оптоэлектронных технологий в электротехнических системах, например электроприводах.

В статье [1] уже были проанализированы экспериментальные данные по генерации твердотельного лазера с ультразвуковым модулятором добротности (ЛУЗМД). Цель настоящей работы заключается в рассмотрении ЛУЗМД как модели «управляемого хаоса» при оптоэлектронном преобразовании информации и энергии, а также особенности применения ЛУЗМД в контуре управления электропривода.

Саморегулирование, когнитивность ЛУЗМД

Кроме формирования мощных лазерных импульсов, с помощью ультразвукового модулятора добротности можно кардинально менять характер генерации многомодового лазера. Благодаря дифракции света на ультразвуковых волнах активная среда лазера может стать оптически однородной, что приводит к генерации (вместо хаотических пиков в отсутствие ультразвука) регулярных импульсов, частота повторения которых не зависит от частоты ультразвука, а определяется мощностью накачки. Лазер с ультразвуковым модулятором доб-

ротности при этом приобретает способность саморегулирования частотного режима генерации при изменении мощности накачки под действием внешних воздействий, что является признаком когнитивности. Это свойство присуще электроприводе как системе, содержащей когнитивное звено, в котором осуществляется лазерно-ультразвуковое когнитивное преобразование энергии и информации.

Модель ЛУЗМД, согласно работе [9], может быть представлена 5×5 матрицей, классифицирована по признаку связи структурных элементов и сопоставлена с моделями сложных систем [2]. Модель ЛУЗМД позволяет управлять хаосом излучения. Вместо хаотической «пичковой» генерации без ультразвука многомодовый ЛУЗМД при включении ультразвука излучает регулярную последовательность импульсов, частота повторения и амплитуда которых не зависят от частоты ультразвука, а определяется мощностью накачки и ультразвука. Благодаря дифракции на ультразвуковых волнах в модуляторе добротности все потоки излучения в активной среде лазера информационно и энергетически оказываются связанными. При этом ЛУЗМД проявляет когнитивные свойства, аналогичные головному мозгу: регуляция и сохранение уровня функционирования по преобразованию информации и энергии. Примеры управляемого хаоса представлены на рис. 1.

Целостность и устойчивость регулярной генерации, наблюдаемой на участке импульса накачки с постоянной амплитудой, сохраняется в широком диапазоне изменения мощности накачки. В этом проявляется способность лазерной системы к саморегулированию, когнитивности. Частота регулярных импульсов не зависит от частоты ультразвука, а пропорциональна мощности накачки при

той же интенсивности ультразвука. Лазер с ультразвуковым модулятором добротности в режиме саморегулирования позволяет управлять частотой

генерации импульсов изменением мощности накачки и интенсивности ультразвука.

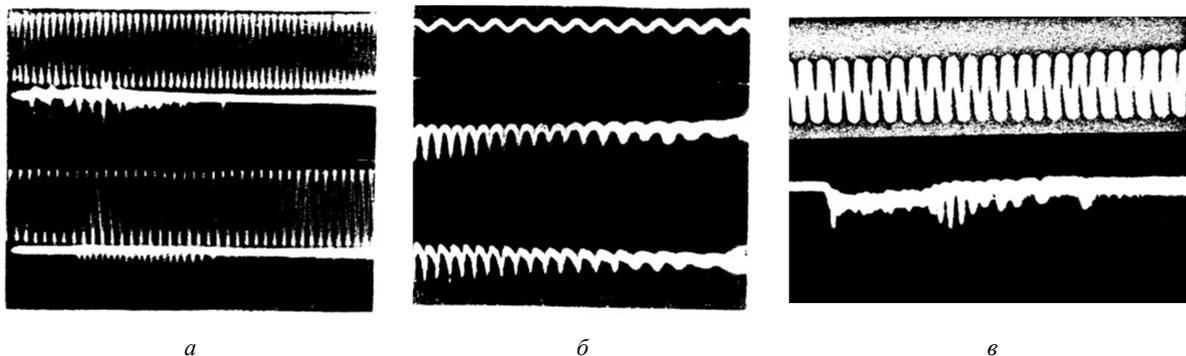


Рис. 1. Управляемый хаос в ЛУЗМД: *a* – ультразвук выключен (пиковая генерация); *б* – ультразвук включен (осциллограммы двух дифракционных максимумов, регулярная генерация); *в* – высокочастотная регулярная генерация при увеличении мощности накачки в 2 раза, по сравнению с *a* и *б* мощность ультразвука не менялась. Частота калибровки 100 кГц (верхние осциллограммы)

Fig. 1. Controlled chaos in the UQML: *a* – ultrasound is turned off (peak generation); *b* – ultrasound is turned on (oscillograms of two diffraction maxima, regular generation); *c* – high-frequency regular generation with a 2-fold increase in pumping power, compared with *a* and *b* ultrasound power did not change. Calibration frequency of 100 kHz (upper wave forms)

Динамика электропривода с ЛУЗМД

Эквивалентность мощностей источников частотно-импульсного и постоянного тока. Под эквивалентностью мощностей источников постоянного и частотно-импульсного тока понимается равенство их мощностей P , которое достигается при частоте повторения импульсов $F_{и}$, равной

$$F_{и} = P / W_{и}, \quad (1)$$

где $W_{и}$ – энергия в одном импульсе. Например, для питания бесколлекторного электродвигателя постоянного тока электропривода требуется мощность 10 Вт, энергия в одном импульсе $W_{и} = 60$ мДж, длительность 10 нс. Частота $F_{и}$, следуя (1), составит $F_{и} = 160$ Гц.

Инерционность электропривода с ЛУЗМД.

Процессы преобразования энергии характеризуются инерционностью всего комплекса электропривода, которая в основном определяется инерционностью его электромеханической части, поскольку на порядок превышает инерционность оптоэлектронных звеньев. Так, для электропривода с бесколлекторным электродвигателем постоянного тока БУВП-60 в номинальном режиме момент инерции оценивают величиной $J = 2$ кг·м², при этом система управления обеспечивает аperiodический переходный процесс. В ходе эксплуатации момент инерции может изменяться в пределах 0,5–10 кг·м² за время ~0,8 с [10].

Учитывая большую инерционность электропривода по сравнению с периодом регулярных пульсаций при саморегулировании лазера, можно считать мощность лазерного излучения квазипо-

стоянной в течение действия источника накачки. Поэтому изменение тока и частоты вращения якоря во времени может быть исследовано в приближении источника постоянного тока с помощью системы динамических уравнений на основе законов Кирхгофа и Ньютона [11]

$$u = k\Phi\omega + ir + L \frac{di}{dt}; \quad (2)$$

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

где u – напряжение; k – конструктивный коэффициент; Φ – магнитный поток двигателя; ω – угловая скорость якоря; i – ток якоря; r – активное сопротивление; L – индуктивность якорной цепи; t – время; $M = k\Phi \cdot i$ – номинальный момент двигателя; M_c – момент нагрузки; J – момент инерции двигателя и нагрузки.

Если положить $c = k\Phi$, то $M = ci$; электродвижущая сила двигателя $e_d = c\omega$. Пример расчета динамики электропривода постоянного тока, согласно системе уравнений (2), (3), зависимостей $\omega = f(t)$ и $i = f(t)$ в пакете MATLAB для номинальных значений: мощности $P_{н} = 2$ кВт; напряжения $u_{н} = 110$ В; частоты вращения $n_{н} = 3\,000$ об/мин; КПД = 0,785; сопротивления якорной цепи $r = 0,336$ Ом; индуктивности обмотки якоря $L = 6,6$ мГн; момента инерции электропривода $J = 0,01375$ кг·м² приведен на рис. 2 (по оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – сила тока (нижняя кривая), частота вращения (верхняя кривая) в относительных единицах).

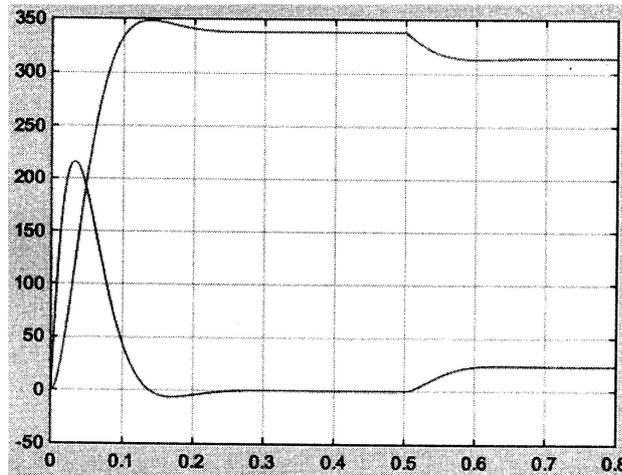


Рис. 2. Пример расчета в системе MATLAB для электропривода с двигателем постоянного тока [11]

Fig. 2. Calculation example in the MATLAB system for an electric drive with a DC motor [11]

На рис. 2 можно видеть, что на участке запуска двигателя без нагрузки пусковой ток резко увеличивается. Управление частотой следования регулярных лазерных пульсаций в зависимости от мощности накачки и интенсивности ультразвука повышает энергоэффективность, расширяет возможности автоматизации и цифровизации электропривода.

Структурная схема и динамика комплекса автоматического электропривода с ЛУЗМД

Основные элементы структурной схемы общего вида комплекса автоматического оптоэлектронного когнитивного электропривода с ЛУЗМД приведены на рис. 3.

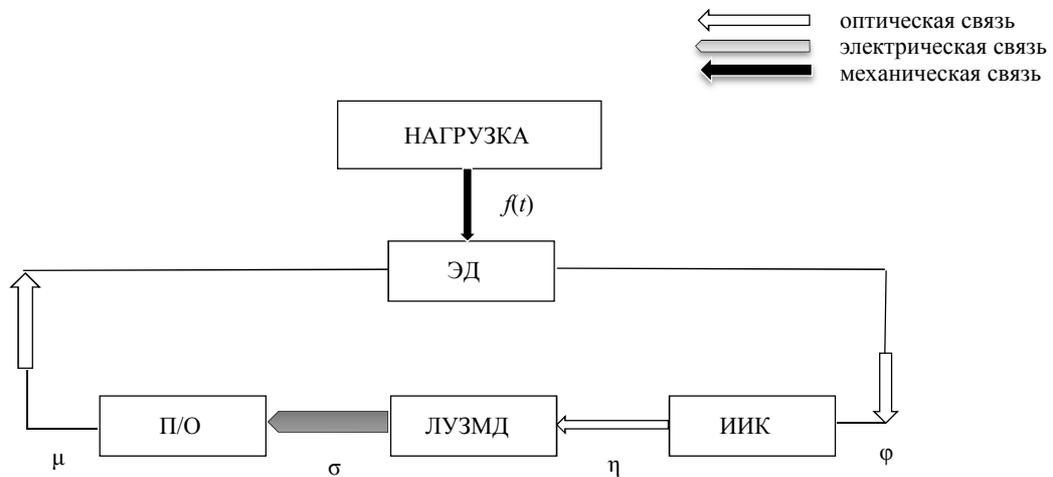


Рис. 3. Структурная схема автоматического оптоэлектронного когнитивного электропривода: $f(t)$ – сигнал НАГРУЗКИ (возмущающее воздействие); ЭД – электродвигатель; П/О (преобразователь импульсного лазерного излучения в электрический ток и магнитное поле якоря ЭД); ИИК – измерительно-информационный комплекс; μ – выходной сигнал П/О (регулирующее воздействие); σ – выходной сигнал усилительного элемента ЛУЗМД; η – выходной сигнал ИИК; φ – выходной сигнал ЭД

Fig. 3. Block diagram of an automatic optoelectronic cognitive electric drive: $f(t)$ is the load (НАГРУЗКИ) signal (disturbing effect); ЭД is an electric motor; П/О (converter of pulsed laser radiation into electric current and magnetic field of the ЭД armature); ИИК is a measuring and information complex; μ is the output signal of the П/О (regulating effect); σ – the output signal of the amplifying element of the ЛУЗМД; η – the output signal of the ИИК; φ – the output signal of the ЭД

Схема включает два связанных блока: электро-механический со звеньями ЭД и НАГРУЗКА; опто-электронный регулятор со звеньями ИИК, ЛУЗМД, П/О. Возможные связи между звеньями обозначены значками.

Координатами системы служат: φ – выходной сигнал ЭД; η – выходной сигнал ИИК; σ – выходной сигнал усилительного элемента ЛУЗМД; μ – выходной сигнал П/О (регулирующее воздействие); $f(t)$ – сигнал НАГРУЗКИ (возмущающее воздействие).

Объектом управления является электродвигатель ЭД электропривода. Измерительно-информационный комплекс контролирует динамику ЭД при изменении параметров нагрузки $f(t)$ и формирует управляющие воздействия на структурные элементы для обеспечения энергоэффективности электропривода [9]. Под действием источника накачки ЛУЗМД генерирует импульсы световой энергии, которые преобразуются и передаются с помощью средств П/О электродвигателю ЭД, обеспечивая его работу на холостом ходу и с НАГРУЗКОЙ. При этом П/О может преобразовывать лазерные импульсы как в ток, так и в магнитное поле якоря ЭД [12, 13].

Структурную схему рис. 3 можно отнести к системам непрямого регулирования. Общий вид уравнений четвертого порядка в приращениях и с безразмерными переменными динамики системы автоматического управления приведен в работе [14]:

– уравнение электромеханического блока

$$T_a \frac{d\varphi}{dt} + k\varphi = \mu - f(t);$$

– уравнение измерителя ИИК

$$T_r^2 \frac{d^2\eta}{dt^2} + T_k \frac{d\eta}{dt} + \gamma\eta + \varphi = \pm \frac{\varepsilon}{2};$$

– уравнение усилительного элемента ЛУЗМД

$$\sigma = \eta - \beta\mu;$$

– уравнение исполнительного элемента П/О

$$\frac{d\mu}{dt} = F(\sigma),$$

где k , β , $\varepsilon / 2$ – коэффициенты саморегулирования объекта, обратной связи регулятора, нечувствительности измерительного элемента соответственно; φ – входное воздействие для ИИК; μ – регулирующее воздействие; $f(t)$ – возмущающее воздействие; η – выходной сигнал ИИК; γ – коэффициент неравномерности измерителя; σ – выходной сигнал усилительного элемента; $F(\sigma)$ – сила, действующая на преобразователь П/О; T_a , T_r^2 , T_k – постоянная времени объекта регулирования, с, постоянная времени измерительного элемента, с², коэффициент

демпфирования соответственно.

Рассматриваемая система автоматического регулирования содержит импульсный элемент ЛУЗМД, который непрерывные сигналы, подаваемые на его вход, преобразует в дискретные: равно отстоящие друг от друга по времени импульсы (режим частотно-импульсной энергии). Соответственно, уравнениями динамики системы электропривода могут быть разностные уравнения.

Обсуждение

Рассмотренная лазерная модель «управляемого хаоса» при внутривибраторном управлении ультразвуковым модулятором добротности на немодулированной стоячей ультразвуковой волне позволяет вместо хаотической «пичковой» генерации без ультразвука получать регулярную последовательность импульсов, частота повторения и амплитуда которых не зависят от частоты ультразвука, а определяется мощностью накачки и ультразвука. При этом ЛУЗМД проявляет когнитивные свойства, аналогичные головному мозгу: регуляция и сохранение уровня функционирования по преобразованию информации и энергии. Актуальным видится применение ЛУЗМД в электромеханических системах, например в электроприводах.

Анализ структуры, динамической модели, инерционности электропривода с ЛУЗМД показывает, что источник частотно-импульсной энергии (ЧИЭ) может иметь преимущество перед источником постоянного тока. Например, диагностика состояния саморегулирования электропривода в режиме ЧИЭ может осуществляться по контролю изменения частоты повторения регулярных лазерных пульсаций.

Динамическая модель электропривода с ЛУЗМД позволяет оптимизировать энергоэффективность оптоэлектронного преобразования, исследовать пространственно-энергетические, динамические характеристики электропривода в среде MATLAB, пакете Simulink.

Заключение

Исследована модель «управляемого хаоса» на основе многомодового ЛУЗМД. Ультразвуковой модулятор добротности, благодаря дифракции на стоячей немодулированной ультразвуковой волне, связывает все световые волны лазера в однородное поле, динамика которого не зависит от частоты ультразвука, и может изменяться с ростом мощности накачки от режима ЧИЭ до квазинепрерывной генерации. Лазер с ультразвуковым модулятором добротности проявляет свойство саморегулирования, способность самостоятельно, автоматически переходить от одного устойчивого состояния генерации к другому в ответ на внешнее воздействие, приводящее к изменению мощности накачки. Саморегу-

лирование ЛУЗМД, в случае его применения в контуре управления электропривода, придает электроприводу когнитивные свойства, способствует повышению его энергоэффективности, расширяет возможности автоматизации и цифровизации.

Переходная характеристика всего комплекса электропривода определяется инерционностью электромеханических элементов, значительно превышающей инерционность оптоэлектронных устройств. Инерционность электропривода сглаживает пульсации ЧИЭ. Учитывая большую инерционность электропривода, можно считать ЧИЭ лазерного излуче-

ния квазипостоянной в течение действия источника накачки и оценку частоты вращения и силы тока якоря проводить на основе законов Кирхгофа и Ньютона в приближении источника постоянного тока, используя среду MATLAB, пакет Simulink. Как показывают расчеты, на участке запуска двигателя без нагрузки пусковой ток значительно превышает номинальный. Когнитивный режим ЧИЭ позволяет проводить диагностику и управлять электроприводом, контролируя частоту следования регулярных импульсов при изменении мощности накачки.

Список источников

1. Терентьев В. Е. Автоматизация и ультразвуковое управление процессом доставки электроэнергии по интеллектуальному лазерному каналу динамическому электромеханическому преобразователю // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные науки. 2019. № 3. С. 94–98.
2. Лурья Д. Р. Общая структурно-функциональная модель мозга как субстрата психической деятельности. URL: <https://nauka.jofo.me/1598543.html> (дата обращения: 09.09.2024).
3. Данилов О. Б., Розанов Н. Н., Соловьев Н. А., Сомс Л. Н. Многомодовые лазеры как аналоги сложных биологических систем (обзор) // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 4. С. 682–690.
4. Самарцев И. Э. Мощные волоконные лазеры – 20 лет развития. URL: <C:/Users/user/Documents/Мощные%20волоконные%20лазеры%20-%202020%20лет%20развития.html> (дата обращения: 09.09.2024).
5. Andreev V. M., Emelyanov V. M., Kaluzhnyy N. A., Khvostikov V. P., Mintairov S. A., Potapovich N. S., Sorokina S. V., Timoshina N. Kh. Photovoltaic laser-power converter based on AlGaAs/GaAs heterostructures // *Semiconductors*. 2016. V. 50 (9). P. 1242–1246.
6. Пат. 2727934, Российская Федерация, МПК H02P 9/14. Бесколлекторный электродвигатель / Терентьев В. Е.; № 2020107395; заявл. 19.02.2020; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 21.
7. Мирошников М. М. Оптические характеристики излучения целей и фонов – физическая основа создания

- оптико-электронной аппаратуры // *Вопр. оборонной техники*. Сер. 10. 1992. Вып. 1-2. С. 3–10.
8. Сидорович В. Мировая энергетическая революция: как возобновляемые источники энергии изменят наш мир. М.: Алпина, 2015. 240 с.
9. Терентьев В. Е. Моделирование электрических цепей и систем с оптико-электронными устройствами: моногр. СПб.: Изд-во СПГУВК, 2009. 201 с.
10. Алексеев А. С., Замятин С. В., Плотноков Д. А. Определение момента инерции электропривода по временным характеристикам // *Изв. Том. политехн. ун-та*. 2009. Т. 314. № 5. С. 65–69.
11. Джендубаев А.-З. Р., Алиев И. И. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике: учеб. пособие. Черкесск: БИЦ СевКавГГАТ, 2014. 136 с. URL: <https://s.siteapi.org/ca7cf74119b6a4e/docs/59d7f5f72cdd7ddd621e63fffa3d7c68b9b58142.pdf> (дата обращения: 09.09.2024).
12. Терентьев В. Е., Очина Л. Б., Белоусова И. М., Русов В. А., Андреев А. А. Оптическая генерация тока и магнитного поля в динамических электротехнических комплексах // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та*. 2022. № 2 (74). С. 38–47.
13. Терентьев В. Е., Белоусова И. М., Русов В. А., Андреев А. А. Исследование преобразования лазерного импульсного излучения системой «конденсатор-катушка» // *Мониторинг. Наука и технологии*. 2024. № 2. С. 64–70.
14. Нелепин Р. А. Теория управления. СПб.: ВМИИ, 2006. 416 с.

References

1. Terent'ev V. E. Avtomatizatsiya i ul'trazvukovoe upravlenie processom dostavki elektroenergii po intellektual'nomu lazernomu kanalu dinamicheskomu elektromekhanicheskomu preobrazovatelyu [Automation and ultrasonic control of the electric power delivery process via an intelligent laser channel and a dynamic electromechanical converter]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki*. Seriya: Estestvennye nauki, 2019, no. 3, pp. 94–98.
2. Luriya D. R. *Obshchaya strukturno-funktsional'naya model' mozga kak substrata psihicheskoy deyatel'nosti* [The general structural and functional model of the brain as a substrate of mental activity]. Available at: <https://nauka.jofo.me/1598543.html> (accessed: 09.09.2024).
3. Danilov O. B., Rozanov N. N., Solov'ev N. A., Soms L. N. *Mnogomodovye lazery kak analogi slozhnykh biologicheskikh sistem (obzor)* [Multimode lasers as ana-

- logues of complex biological systems (review)]. *Optika i spektroskopiya*, 2016, vol. 120, no. 4, pp. 682–690.
4. Samarcev I. E. *Moshchnye volokonnye lazery – 20 let razvitiya* [High-power fiber lasers – 20 years of developments]. Available at: <C:/Users/user/Documents/Мощные%20волоконные%20лазеры%20-%202020%20лет%20развития.html> (accessed: 09.09.2024).
5. Andreev V. M., Emelyanov V. M., Kaluzhnyy N. A., Khvostikov V. P., Mintairov S. A., Potapovich N. S., Sorokina S. V., Timoshina N. Kh. *Photovoltaic laser-power converter based on AlGaAs/GaAs heterostructures*. *Semiconductors*, 2016, vol. 50 (9), pp. 1242–1246.
6. Terent'ev V. E. *Beskollektornyj elektrodvigatel'* [Brushless electric motor]. Patent 2727934, Rossijskaya Federatsiya, МПК H02P 9/14; no. 2020107395; 27.07.2020.

7. Miroschnikov M. M. Opticheskie karakteristiki izlucheniya celej i fonov – fizicheskaya osnova sozdaniya optiko-elektronnoj apparatury [Optical characteristics of radiation from targets and backgrounds are the physical basis for the creation of optoelectronic equipment]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 10*, 1992, iss. 1-2, pp. 3-10.

8. Sidorovich V. *Mirovaya energeticheskaya revolyuciya: kak vozobnovlyaemye istochniki energii izmenyat nash mir* [The Global Energy Revolution: how renewable energy sources will change our world]. Moscow, Alpina Publ., 2015. 240 p.

9. Terent'ev V. E. *Modelirovanie elektricheskikh cepej i sistem s optiko-elektronnyimi ustrojstvami: monografiya* [Modeling of electrical circuits and systems with optoelectronic devices: monograph]. Saint Petersburg, Izd-vo SPGUVK, 2009. 201 p.

10. Alekseev A. S., Zamyatin S. V., Plotnikov D. A. Opredelenie momenta inercii elektroprivoda po vremennym karakteristikam [Determination of the moment of inertia of an electric drive based on time characteristics]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 314, no. 5, pp. 65-69.

11. Dzhendubaev A.-Z. R., Aliev I. I. *MATLAB, Simulink i SimPowerSystems v elektroenergetike: uchebnoe posobie* [MATLAB, Simulink and SimPowerSystems in the electric power industry: a study guide]. Cherkessk, BIC SevKavGGTAb, 2014. 136 p. Available at: <https://s.siteapi.org/ca7cf74119b6a4e/docs/59d7f5f72cdd7ddd621e63fffa3d7c68b9b58142.pdf> (accessed: 09.09.2024).

12. Terent'ev V. E., Ochina L. B., Belousova I. M., Rusov V. A., Andreev A. A. Opticheskaya generaciya toka i magnitnogo polya v dinamicheskikh elektrotekhnicheskikh kompleksah [Optical generation of current and magnetic field in dynamic electrical engineering complexes]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, no. 2 (74), pp. 38-47.

13. Terent'ev V. E., Belousova I. M., Rusov V. A., Andreev A. A. Issledovanie preobrazovaniya lazernogo impul'snogo izlucheniya sistemoj «kondensator-katushka» [Investigation of the conversion of laser pulse radiation by a capacitor-coil system]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2024, no. 2, pp. 64-70.

14. Nelepin R. A. *Teoriya upravleniya* [Management theory]. Saint Petersburg, VMII, 2006. 416 p.

Статья поступила в редакцию 08.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 20.01.2025
The article was submitted 08.10.2024; approved after reviewing 02.12.2024; accepted for publication 20.01.2025

Информация об авторе / Information about the author

Владислав Евгеньевич Терентьев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник; профессор кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; TerentievVE@gumrf.ru

Vladislav E. Terentiev – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher; Professor of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; TerentievVE@gumrf.ru

