

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УЛЬТРАЗВУКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ДОСТАВКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ ЛАЗЕРНОМУ КАНАЛУ ДИНАМИЧЕСКОМУ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЮ

**AUTOMATION AND ULTRASONIC
CONTROL OF THE PROCESS
OF ELECTRIC POWER DELIVERY VIA THE
INTELLIGENT LASER CHANNEL
TO THE DYNAMIC
ELECTROMECHANICAL CONVERTER**

V. Terentiev

Summary. Automation and control of the process of electricity delivery through the optical channel from a powerful laser source to dynamic Electromechanical converters of transport facilities serves as an actual direction of alternative electric power industry. There are known intellectual analogies in the functioning of multimode lasers and complex biological systems. The phenomenon of self-regulation is observed in dynamic Electromechanical converters. In the present work, the problems of automation and ultrasonic control of the process of electric power delivery to a dynamic Electromechanical transducer through an intelligent laser channel, when a multimode laser is used in the self-regulation mode, are theoretically and experimentally studied. It is shown that under the influence of ultrasonic waves in the q-factor modulator on the radiation field inside the resonator, the multimode laser exhibits the property of self-regulation, the ability to independently, automatically move from one stable state of generation to another in response to weak ultrasonic action. Self-regulation of the laser attaches to the optical channel of intellectual properties, promotes increase of efficiency of management of process of delivery of electricity through the laser channel dynamic Electromechanical converters.

Keywords: automation, ultrasonic control, intelligent laser channel, electricity, energy efficiency, dynamic transport Electromechanical Converter.

Терентьев Владислав Евгеньевич

*Профессор, академик Российской академии
транспорта, ФГБОУ ВО "Государственный университет
морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова"*

Аннотация. Автоматизация и управление процессом доставки электроэнергии по оптическому каналу от мощного лазерного источника динамическим электромеханическим преобразователям транспортных объектов служит актуальным направлением альтернативной электроэнергетики. Известны интеллектуальные аналогии в функционировании многомодовых лазеров и сложных биологических систем. Явление саморегулирования наблюдается и в динамических электромеханических преобразователях. В настоящей работе теоретически и экспериментально исследованы вопросы автоматизации и ультразвукового управления процессом доставки электроэнергии динамическому электромеханическому преобразователю по интеллектуальному лазерному каналу, когда применяется многомодовый лазер в режиме саморегулирования. Показано, что под воздействием ультразвуковых волн в модуляторе добротности на поле излучения внутри резонатора многомодовый лазер проявляет свойство саморегулирования, способность самостоятельно, автоматически переходить от одного устойчивого состояния генерации к другому в ответ на слабое ультразвуковое воздействие. Саморегулирование лазера придает оптическому каналу интеллектуальные свойства, способствует повышению энергоэффективности управления процессом доставки электроэнергии по лазерному каналу динамическим электромеханическим преобразователям.

Ключевые слова: автоматизация, ультразвуковое управление, интеллектуальный лазерный канал, электроэнергия, энергоэффективность, динамический транспортный электромеханический преобразователь.

Введение

Достижения в создании мощных лазеров [1], фотоэлектронных преобразователей [2], бесколлекторных оптомашин [3] делают реальной доставку электроэнергии по оптическому лазерному каналу транспортным динамическим электромеханическим преобразователям [4]. Этот метод электроснабжения может служить одним из направлений альтернативной электроэнергетики [5].

При разработке энергоэффективных автоматизированных и управляемых процессов электроснабжения по оптическим каналам целесообразно использовать интеллектуальные аналогии в функционировании многомодовых лазеров и сложных биологических систем [6], [7]. Общая структурно-функциональная модель (ОСФМ) головного мозга выделяет три связанных функциональных блока: энергетический, регуляции уровня активности мозга; приема, переработки, хранения информации; программирования, регуляции и контроля протекания жизнедеятельности [8].

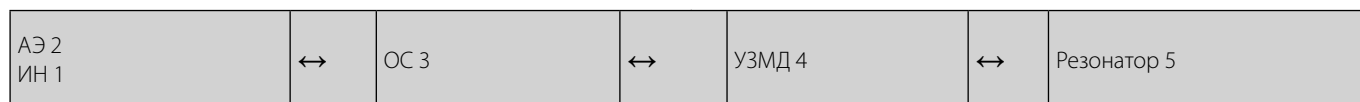


Рис. 1. Структура ИИК ЛУЗМД: 1 — источник электрической энергии накачки (ИН) — регулирование уровня генерируемого излучения; 2 — активный элемент (АЭ) лазера — преобразование электрической энергии ИН в оптическое излучение, генерация, хранение сообщений; АЭ преобразуется в генератор сообщений о своем состоянии под действием энергии ИН; 3 — оптическая среда (ОС) — среда распространения оптического излучения, сообщений; 4 — ультразвуковой модулятор добротности (УЗМД), установленный между торцом АЭ и одним из зеркал резонатора — управление ультразвуком: дифракционное преобразование оптического излучения по интенсивности, частоте и направлению распространения, преобразование сообщений; 5 — резонатор лазера — программирование, регулирование, контроль процесса генерации, представление сообщений; ↔ — обобщенное направление распространения оптического излучения в резонаторе.

Цель настоящей работы заключается в теоретическом и экспериментальном исследовании вопросов автоматизации и ультразвукового управления процессом доставки электроэнергии транспортному динамическому электромеханическому преобразователю по интеллектуальному лазерному каналу, когда применяется многомодовый лазер в режиме саморегулирования.

Предложена классификация структуры многомодового лазера с ультразвуковым модулятором добротности в зависимости от степени связи структурных элементов. Проведено сравнение измерительно-информационного комплекса (ИИК) многомодового лазера в режиме саморегулирования с ОСФМ.

Исследованы условия сохранения целостности и устойчивости процесса генерации твердотельного многомодового лазера с ультразвуковым модулятором добротности (ЛУЗМД) в зависимости от мощности ультразвука и накачки.

Материалы и методы

Согласно работе [9], измерительно-информационный комплекс (ИИК) ЛУЗМД может включать пять структурных элементов, рис. 1.

Из сравнения структуры рис. 1 со структурой ОСФМ головного мозга можно сделать вывод, что функционально они аналогичны, если элементы 1,2 рис. 1 считать блоком 1; элементы 3,4 рис. 1 — блоком 2, а элемент 5 рис. 1 — блоком 3 ОСФМ.

Известна классификация ИИК по признаку совмещения функций структурных элементов [9]. В настоящей работе ИИК ЛУЗМД классифицируется по признаку связи оптических зон и структурных элементов, которая обеспечивается оптическим излучением, дифрагированным на стоячих немодулированных ультразвуковых волнах в режиме дифракции Рамана-Ната. Для описания

возможных вариантов связи применена, как и в [9], матричная модель:

$$A = [aik], \quad (1)$$

где номера строк ($i = 2, \dots, 5$) и столбцов ($k = 2, \dots, 5$) отвечают номерам структурных элементов.

Диагональная матрица с элементами $aik \neq 0$ при $i = k$, $aik = 0$ при $i \neq k$

описывает единственный класс ИИК ЛУЗМД с несвязанными структурными элементами, что соответствует выключенному ультразвуку в модуляторе добротности, хаотической «пичковой» генерации лазера.

Остальные классы ИИК ЛУЗМД описываются недиагональными матрицами, которые приводятся к диагональному виду преобразованием подобия:

$$\tilde{A} = T^1 A T, \quad (2)$$

где T — соответствующие преобразующие матрицы.

Поля оптического излучения S и S' , соответственно на входе и выходе ИИК, связаны матричным уравнением

$$S' = \tilde{A} S. \quad (3)$$

ИИК ЛУЗМД классифицируются по степени связи (по числу независимых комбинаций связанных структурных элементов): 1 — структурные элементы не связаны (один вариант), 2 — связаны два (шесть вариантов), 3 — три (четыре варианта), 4 — четыре (один вариант).

Из структурного анализа следует, что с увеличением номера класса ИИК должна повышаться чувствительность ЛУЗМД к ультразвуковому воздействию, поскольку слабое воздействие на один структурный элемент многократно повторяется всеми связанными элементами

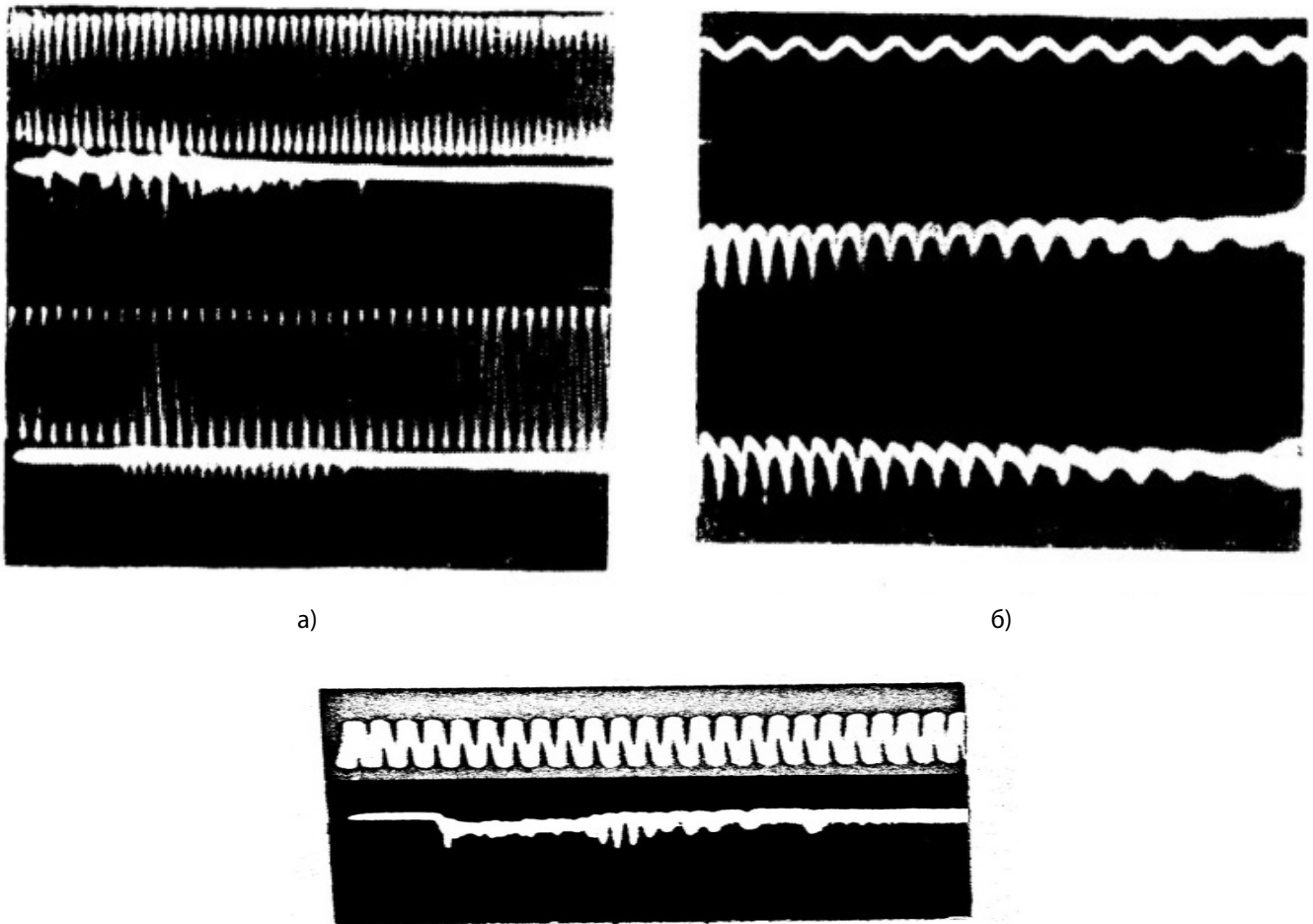


Рис. 2. Осциллограммы генерации ЛУЗМД:

лазера. Следовательно, наибольшей энергоэффективностью будут характеризоваться лазеры с ИИК 4 класса.

Результаты. Динамическая модель ЛУЗМД. Рассмотрим динамическую модель твердотельного лазера со всеми связанными зонами, в котором активная среда и другие внутрирезонаторные элементы расположены в однородных участках поля излучения. Временная зависимость интенсивности генерации может быть описана системой двух дифференциальных уравнений:

$$\dot{m} = \tau_p^{-1} [n_a - (1 + \alpha_y(v) \sin(\Omega t))] m, \quad (4)$$

$$\dot{n}_a = \tau_{эфф}^{-1} [(n_{0a} - n_a) - n_a m], \quad (5)$$

где: $m = MB^a \tau_p$, M — число фотонов в резонаторе, B^a — коэффициент Эйнштейна для атомов активной среды, $\tau_p = 2L/(C\alpha)$ — время жизни фотона в резонаторе с оптической длиной L , C — скорость света, α — потери резонатора в отсутствие ультразвука; $n_a = (N_e^a - N_n^a) B^a \tau_p$, $n_{0a} = (N_{e0}^a / N_n^a) [\chi W_n \tau^a - 1] [\chi W_n \tau^a + 1]^{-1}$; $N_{e0}^a = (N_e^a + N_n^a)$; N_e^a, N_n^a — насе-

ленности верхнего и нижнего энергетических уровней активной среды; N_n^a — пороговое значение инверсной населенности; τ^a — время жизни, $\tau_{эфф} = \tau^a / (1 + \chi n_a m)$ — эффективное время жизни возбужденного состояния активной среды, χ — характеристика системы накачки, W_n — энергия накачки; $\alpha_y(v)$ — отношение потерь излучения с ультразвуком к потерям α без ультразвука; $\alpha_y(v) \sin(\Omega t)$ — ультразвуковое воздействие на удвоенной частоте ультразвука ($\Omega = 2f$).

Из анализа системы уравнений (4), (5) следует, что лазер со связанными зонами излучает устойчиво, если сохраняется условие $n_a m = \text{const}$. При той же энергии накачки W_n с увеличением потерь излучения $\alpha_y(v)$ интенсивность излучения (число фотонов m) уменьшится согласно уравнению (4). Одновременно возрастет избыточная населенность n_a в соответствии с уравнением (5), т.е. динамическая модель автоматически перейдет в новое устойчивое состояние с сохранением условия $n_a m = \text{const}$. Динамическая модель ЛУЗМД, следовательно, может проявлять свойство саморегулирования. Частота

повторения импульсов генерации обратно пропорциональна эффективному времени жизни возбужденного состояния активной среды и не зависит от частоты ультразвука. Оптическое излучение в импульсах генерации модулировано с удвоенной частотой ультразвука.

Экспериментальная модель ЛУЗМД. Исследования динамики генерации в зависимости от энергии импульсной накачки и интенсивности ультразвука выполнены на рубиновом лазере. Источник накачки импульсный с длительностью участка постоянной амплитудой 50 мкс. Модулятор добротности с акустооптической средой ксилол, прозрачной на длине волны генерации $\lambda = 694$ нм; частота ультразвука $f = 5$ МГц, интенсивность ультразвука в режиме дифракции Рамана-Ната характеризовалась уменьшением интенсивности оптического излучения в нулевом дифракционном максимуме ΔI_0 , направление распространения ультразвука перпендикулярно оси резонатора, параллельно оптической оси кристалла рубина. Зеркала резонатора имели диэлектрические отражающие покрытия, длина резонатора 500 мм. На рис. 2 представлены экспериментальные осциллограммы излучения ЛУЗМД:

а — вверху «пиковая» генерация в отсутствие ультразвука; внизу регулярная генерация лазера, стоячая УЗ волна частотой $f = 5$ МГц в ксилоле с интенсивностью, соответствующей $\Delta I_0 = 35\%$; б — то же, что а при одновременном осциллографировании двух различных дифракционных максимумов. Энергия накачки превышает пороговое значение без УЗ: в 2 раза (а, б), в 3 раза (в). Частота калибровок 100 кГц.

Частота следования регулярных импульсов ≈ 230 кГц в части импульса накачки с постоянной амплитудой. Оптическое излучение в регулярных импульсах модулировано с частотой 10 МГц. Целостность и устойчивость параметров регулярных импульсов наблюдается на участке импульса накачки с постоянной энергией; на спадающем участке амплитуда и частота следования импульсов уменьшались, повторяя контур заднего фронта импульса накачки.

Обсуждение. Рассмотренная структурная модель ИИК ЛУЗМД, рис. 1, позволяет сформулировать общие и практически значимые требования к структурным элементам интеллектуального лазера. Каждый структурный элемент должен входить в единое системно-информационное целое как подсистема. Для обеспечения целостности и устойчивости ЛУЗМД необходима материальная и информационная связь структурных элементов. Эта связь в исследованном лазере обеспечивалась оптическим излучением, дифрагированным на стоячей ультразвуковой волне. Структурная модель ИИК ЛУЗМД аналогична Общей структурно-функциональной модели головного мозга.

Анализ экспериментальных осциллограмм рубинового лазера с ультразвуковым МД, в согласии со структурной и динамической моделями, убеждает в энергоэффективности ультразвукового метода управления лазером за счет эффекта самоорганизации под действием слабого ультразвукового сигнала. Следует отметить целостность и устойчивость параметров регулярных импульсов на участке импульса накачки с постоянной энергией. Переход от одного устойчивого состояния генерации к другому свидетельствует о том, что лазер под воздействием ультразвука приобрел способность эффективного саморегулирования и стал более энергоэффективным. Частота повторения регулярных лазерных импульсов (при той же частоте ультразвука) определялась мощностью накачки и ультразвука.

Заключение

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования автоматизации и ультразвукового управления процессом доставки электроэнергии динамическому электромеханическому преобразователю по интеллектуальному лазерному каналу, когда многомодовый лазер может функционировать в режиме саморегулирования. Саморегулирование возникало в результате связывания всех зон поперечного сечения активного элемента оптическим излучением, дифрагированным на ультразвуковых волнах, возбужденных в модуляторе добротности. При переходе в режим саморегулирования многомодовый лазер автоматически изменял процесс генерации с хаотического «пикового» на излучение регулярных пульсаций, частота повторения которых определялась не частотой ультразвука, а мощностью ультразвука и накачки. Исследования динамической и экспериментальной моделей рубинового лазера со всеми связанными зонами показали, что устойчивость процесса генерации реализуется, когда произведение избыточной населенности на число фотонов в резонаторе остается постоянным при изменении внешних воздействий на лазер. Сохраняя целостность и устойчивость процесса генерации регулярных пульсаций, лазер в режиме саморегулирования проявляет высокую чувствительность к изменению мощности ультразвука и высокую энергоэффективность.

2. Предложена классификация структуры измерительно-информационного комплекса (ИИК) многомодового лазера с ультразвуковым модулятором добротности в зависимости от степени связи структурных элементов. Для описания возможных вариантов связи применена матричная 4×4 модель $A = [a_{ik}]$, где номера строк (i) и столбцов (k) отвечают номерам структурных элементов. Можно выделить четыре класса ИИК: 1 — структурные элементы не связаны (1 вариант), 2 — связаны два (6 вариантов), 3 — три (4 варианта), 4 — четыре (1 вариант). Из структурного

анализа следует, что с увеличением номера класса ИИК чувствительность к внутривибрационному ультразвуковому воздействию должна повышаться, поскольку слабое воздействие на один структурный элемент многократно повторяется всеми связанными элементами лазера.

Проведено сравнение структур измерительно-информационного комплекса многомодового лазера в режиме саморегулирования с Общей структурно-функ-

циональной моделью головного мозга. Структура ИИК исследованного лазера аналогична Общей структурно-функциональной модели головного мозга. Кроме того, саморегулирующийся лазер придает всему оптическому каналу интеллектуальный, когнитивный характер, способствует повышению энергоэффективности управления процессом доставки электроэнергии по лазерному каналу динамическим транспортным электромеханическим преобразователям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gapontsev, V. P. Modern state and prospects of applications high-power fiber lasers. 8th International Symposium on high-power lasers and their applications. SPb, Russia, June 27-July 1, 2016.
2. Andreev, V.M., Emelyanov, V.M., Kaluzhnyy, N.A., Khvostikov, V.P., Mintairov, S.A., Potapovich, N.S., Sorokina, S.V. and Timoshina, N. Kh. Photovoltaic laser-power converter based on AlGaAs/GaAs heterostructures. *Semiconductors*, 50(9), 2016, pp.1242–1246.
3. Терентьев В. Е. Бесколлекторная электрическая машина. Патент на изобретение RU № 2563974, 2015.
4. Terentiev, V.E., Artamokhin, S.G., Pikhtin, N.A., Shvarts, M.Z. Modeling the complex delivery of electric energy by optical channel to dynamic electromechanical transformer. *IJMET*, volume 9, issue 2, February 2018, pp. 765–774.
5. Сидорович В. Мировая энергетическая революция: как возобновляемые источники энергии изменят наш мир. Москва: Изд. Алпина, 2015, с. 208
6. Данилов О. Б., Розанов Н. Н., Соловьев Н. А., Сомс Л. Н. Многомодовые лазеры как аналоги сложных биологических систем (обзор). *Оптика и спектроскопия*, 2016, том 120, № 4, с. 682–690.
7. Е. Р. Что такое когнитивные функции? <https://nevrologytoyou-elena.blogpost.Ru/2014/01/blog-post.html>.
8. Лурия Д. Р. Общая структурно-функциональная модель мозга как субтрата психической деятельности. «ПСИ-СИНТЕЗ», Челябинский интерактивный центр интегративной психологии и парапсихологии.
9. Терентьев В. Е. Моделирование электрических цепей и систем с оптико-электронными устройствами: Монография. — СПб.: СПГУВК, 2009. — 201 с.

© Терентьев Владислав Евгеньевич.

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова