

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-165-173

**OPTOELECTRONIC MEANS OF ENERGY AND INFORMATION TRANSMISSION  
IN THE ELECTROMECHANICAL TRANSFORMERS OF THE ROBOTIC  
DIGITAL COMPLEX FOR MANAGING AND CONTROLLING MOTION  
OF SMALL-DISPLACEMENT SURVEYING VESSEL**

**V. E. Terentiev, L. B. Ochina**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The actual direction of maritime and inland water transport is alternative energy supply by the optoelectronic means. The study of brushless electromotor with electric energy delivery by the laser ray with using the fiber optic elements and photoelectronic transformers for the robotic digital complex for management and control of small-displacement surveying vessel motion is perspective. The connection between energy and information transmitted in the dynamic electromechanical transformers of the robotic digital complex is examined in the paper. It has been showed that the information and energy methods for processing the same experimental data lead to the identical results, namely, measuring information and energy are transmitted simultaneously through the measuring and information channel. Based on the conducted researches of brushless motor model and patents for inventions obtained by the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, a four-propellers robotic digital complex for managing and controlling the small-displacement self-propelled electric propulsion surveying vessel motion. The robotic small – displacement surveying vessels in conjunction with the base automatic surveying posts, combined by the atmospheric radio-optical and terrestrial fiber-optic communication channels, can be the basis of terrestrial segment of the digital measuring and information network of the Russian inland waterways.*

*Keywords: electric power, information, electromechanical transformer, brushless motor, robotic digital complex for motion management and control, small-displacement surveying vessel.*

**For citation:**

Terentiev, Vladislav E., and Ludmila B. Ochina. "Optoelectronic means of energy and information transmission in the electromechanical transformers of the robotic digital complex for managing and controlling motion of small-displacement surveying vessel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 165–173. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-165-173.

**УДК 656.09**

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ  
В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ  
РОБОТИЗИРОВАННОГО ЦИФРОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ  
И КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ МАЛОМЕРНОГО СУДНА**

**В. Е. Терентьев, Л. Б. Очина**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Отмечается, что актуальным направлением развития инфраструктуры морского и внутреннего водного транспорта является альтернативное энергоснабжение с применением оптоэлектронных средств. Применение оптоэлектронных средств для электроснабжения на водном транспорте в настоящее время ограничено недостаточной изученностью вопросов одновременной передачи мощности и информации по оптическому каналу, а также отсутствием производства фотоэлектронных преобразователей, парных к изготавливаемым мощным лазерным источникам. Для решения вопросов управления и контроля движения маломерного промерного судна перспективными являются исследования бесколлекторного электродвигателя с доставкой электроэнергии по лучу лазера с использованием волоконно-оптических элементов и фотоэлектронных преобразователей. В настоящей работе рассмотрена*

связь между энергией и информацией, передаваемой в динамических электромеханических преобразователях. Показано, что информационный и энергетический методы обработки одних и тех же экспериментальных данных приводят к одинаковым результатам — измерительная информация и мощность передаются по измерительно-информационному каналу одновременно. На основе проведенных исследований макета бесколекторного электродвигателя и полученных ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова патентов на изобретения предложен четырехвинтовой роботизированный цифровой комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна. Две пары винтов, вращающихся в противоположные стороны, образуют связанную систему. Анализ динамики показывает, что устойчивая работа РЦК управления и контроля при переходе из одного состояния в другое под влиянием внешних воздействий сохраняется при постоянном значении произведения момента на угловую скорость вращения. Роботизированные маломерные промерные суда в сочетании с базовыми автоматическими промерными постами, объединенными атмосферным радиооптическим и наземным волоконно-оптическим каналами связи, могут явиться основой наземного сегмента цифровой измерительно-информационной сети ВВП РФ.

*Ключевые слова:* электроэнергия, информация, электромеханический преобразователь, бесколекторный электродвигатель, роботизированный цифровой комплекс управления и контроля движения, маломерное промерное судно.

**Для цитирования:**

Терентьев В. Е. Оптоэлектронные средства передачи энергии и информации в электромеханических преобразователях роботизированного цифрового комплекса управления и контроля движения маломерного судна / В. Е. Терентьев, Л. Б. Очина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 165–173. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-165-173.

### Введение (Introduction)

Достижения в создании таких оптоэлектронных средств, как мощные лазеры с выводом энергии через волоконно-оптические элементы (ВОЭ) [1], а также фотоэлектронные преобразователи (ФЭП) [2], [3] открывают возможности практического использования новых альтернативных, в том числе лазерных, источников энергии. В 2020-е гг. предполагается доставлять солнечную энергию на Землю по лучу кислород-йодного лазера «Фойл», размещенного на стационарной космической орбите [4], [5]. Однако существуют факторы, сдерживающие практическое применение мощного оптического излучения на морском и речном флоте, к которым относятся: недостаточная изученность оптоэлектронных методов и средств доставки электрической энергии динамическим электромеханическим преобразователям (ДЭМП), а также связи между энергией и информацией, передаваемые в ДЭМП; отсутствие промышленного производства пар источников оптического излучения киловаттной мощности — ФЭП. Моделированию комплекса доставки электрической энергии по оптическому каналу посвящена работа [6], автоматизации и ультразвуковому управлению процессом доставки электроэнергии по интеллектуальному лазерному каналу — работа [7].

*Цель настоящей работы* состоит в исследовании связи энергии и информации, передаваемых в ДЭМП, а также анализе возможности создания на основе полученных ранее результатов роботизированного цифрового комплекса (РЦК) управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна (СЭПС). Рассмотрена возможность создания РЦК на базе бесколекторного электродвигателя с доставкой электроэнергии по лучу лазера с использованием волоконно-оптических элементов (ВОЭ) и фотоэлектронных преобразователей (ФЭП), сокращенно — оптоэлектрической машины [8], а также устройства управления электроприводным транспортным средством [9], запатентованных ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. Роботизированные маломерные промерные суда в сочетании с базовыми автоматическими промерными постами, объединенными атмосферным радиооптическим и наземным волоконно-оптическим каналами связи, могут явиться основой наземного сегмента цифровой измерительно-информационной сети ВВП РФ, что будет способствовать повышению безопасности судоходства, оптимизации гидрографических работ на ВВП и транзитного потенциала России.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

**Связь энергии и информации в сообщении.** Во время электрических измерений объект функционирует как источник сообщений о своем состоянии, которое описывается множеством физических величин. Физическая величина регистрируется соответствующим измерительным преобразователем приемного устройства, с выхода которого электрический сигнал в аналоговой либо цифровой форме поступает в средства обработки и представления сообщений. Путь от источника сообщения до приемника и средств обработки называют *измерительно-информационным каналом* или *комплексом* (ИИК).

В состав ИИК, кроме исследуемого объекта, входит источник энергии, под воздействием которой объект генерирует сообщения. Роль источника энергии в оптоэлектронном ИИК могут выполнять генераторы как оптического излучения, так и электроэнергии. Далее по ходу сообщения идут среда передачи сообщений, приемное устройство и средства обработки и представления сообщений. В средствах обработки сигнал преобразуется в измерительную информацию, доступную для непосредственного восприятия наблюдателем в виде модели физической величины, описывающей состояние источника. Там же вырабатываются управляющие воздействия на структурные элементы ИИК либо измерительная информация передается другим техническим средствам для дальнейшего использования. Таким образом, в общем случае номинальное число структурных элементов, образующих ИИК ДЭМП, равно пяти: объект-генератор сообщений, источник энергии, среда передачи сообщений, приемное устройство, средства обработки и представления сообщений.

Матричный анализ показывает, что в зависимости от роста числа связанных структурных элементов можно выделить пять классов ИИК. При связывании структурных элементов проявляются интеллектуальные свойства саморегулирования — ИИК под влиянием внешней помехи переходит из одного устойчивого состояния в другое. Измерительная информация в сообщении образуется в результате обмена энергией между основными физическими системами, а именно: объектом, свойство которого определяется количественно; средством измерения с метрологически обеспеченными характеристиками; фоном, создающим шум или помеху измерениям. Сущность и условия обмена энергией оказывают влияние на результат измерения и его вероятностные свойства. Для оценки меры изменения энергии систем применяется понятие *энтропия* (от греч. *entropia* — превращение). Для дискретного источника сообщений, описываемых множеством величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и вероятностей  $p_1, p_2, \dots, p_n$  появления этих величин в сообщении, информационная энтропия определяется, согласно К. Шеннону, величиной

$$H_u(X_i) = \sum_{i=1}^n p_i \log p_i. \quad (1)$$

Непрерывный источник сообщений характеризуется значением энтропии

$$H_n(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log p(x) dx, \quad (2)$$

где  $p(x)$  — плотность распределения вероятности случайной величины  $X$ .

Единицы измерительной энтропии зависят от выбора основания логарифма. Из выражений (1) и (2) следует, что энтропия обращается в нуль, когда одно из состояний источника является достоверным (вероятность состояния равна единице), а остальные невозможными (их вероятности равны нулю). Действие случайной погрешности, фона, шума или помехи при передаче сигнала выражается энтропией шума. Количество измерительной информации  $I$ , передаваемой по ИИК при наличии шума, равно разности:

$$I = H(X) - H(\Delta), \quad (3)$$

где  $H(X)$  — энтропия передаваемого сообщения (исходная, или априорная, энтропия измеряемой величины  $X$ , определяемая законом ее распределения);  $H(\Delta)$  — энтропия шума (энтропия случайной погрешности измерения или условная энтропия).

Если имеется средство измерений со шкалой  $0 \dots X_N$ , то можно получить значения измеряемой величины только в этих пределах, вне указанного диапазона ее значение равно нулю. Если

плотность распределения вероятности измеряемой величины вдоль шкалы одинакова, то вероятность любого отсчета в интервале от 0 до  $X_N$ , т. е. до измерения, составит

$$p_0(X) = 1/X_N. \quad (4)$$

После измерения значения исследуемой величины находятся в более узком диапазоне:

$$2\Delta < X_N \text{ и } p_H(X) = 1/(2\Delta). \quad (5)$$

Поскольку полная вероятность отсчета в пределах  $0-X_N$  составляет единицу, площадь зависимостей (4) и (5) равна единице, откуда следует, что значения исследуемой величины после измерения характеризуются большей плотностью вероятности. Результат измерения, с точки зрения теории информации, заключается в том, что после измерения область неопределенности сокращается и характеризуется большей плотностью вероятности, чем до измерения. Количество информации  $I$  в измерении определяется уменьшением энтропии от исходного значения (перед измерением) с вероятностью (4) до энтропии с вероятностью (5):

$$I = - \int_0^{X_N} (X_N)^{-1} \log (X_N)^{-1} dX - [ - \int_{2\Delta}^{X_N} (2\Delta)^{-1} \log (2\Delta)^{-1} dX ] = \log X_N - \log (2\Delta) = - \log [(2\Delta)/X_N]. \quad (6)$$

Из анализа выражения (6) видно, что в теории информации операция вычитания оставшейся после измерения неопределенности из исходной заменяет операцию деления абсолютной погрешности на диапазон изменения измеряемой величины при определении класса точности средства измерения энергетическим методом по приведенной погрешности. Обнаруженное совпадение результатов информационного и энергетического методов позволяет сделать вывод о том, что энергия и информация, заключенные в передаваемом сообщении, связаны между собой и передаются по ИИК ДЭМП одновременно. В соответствии с физической природой исследуемых объектов различают следующие виды энергии: механическую, электромагнитную, тепловую, оптического излучения и др. Оптоэлектронные средства способны передавать в электромеханических преобразователях различные виды энергии и соответствующей информации.

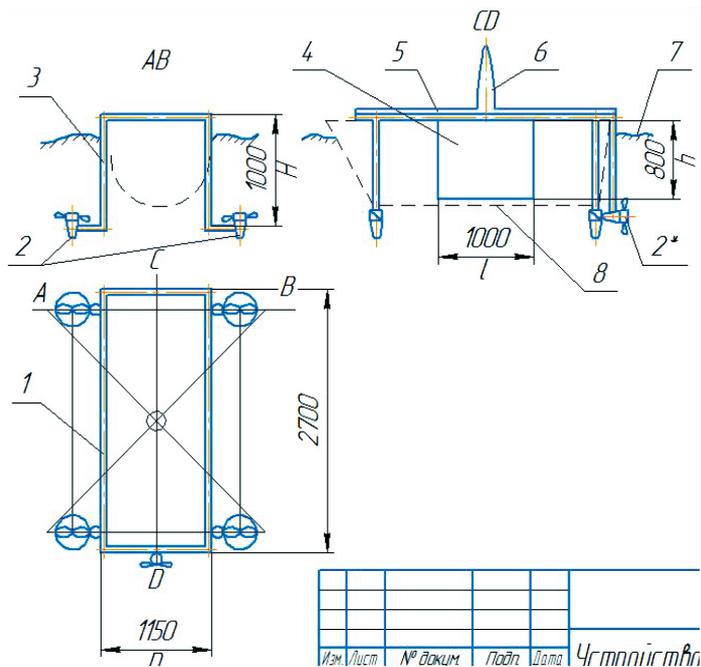
***Бесконтактная передача электроэнергии и информации в оптоэлектрической машине.***

Передача энергии и информации в электромеханических преобразователях с помощью лазеров и ВОЭ возможна как в видимом диапазоне спектра, так и при длинах волн  $\lambda \geq 1,5 \dots 10,6$  мкм в спектральном диапазоне и при уровнях сигнала, безопасных для человека. Имеющийся обширный научно-технический потенциал может быть применен при создании оптических аналогов электрических ветвей в электрических цепях и системах. Введение в оптические ветви оптических модуляторов позволяет осуществить более точную регулировку электрического сопротивления цепи, чем с помощью электрических устройств. Важное преимущество ВОЭ заключается в возможности передачи большей плотности мощности, чем по металлическим проводам: максимальная плотность мощности для медного провода составляет не более 220 кВт/см<sup>2</sup>, а для идеального оптоволокна критическая интенсивность вводимого излучения может превышать 140 МВт/см<sup>2</sup> [10]. Достоинством ВОЭ служит невосприимчивость к высокочастотным и импульсным электромагнитным помехам, а также высокий уровень пожарной безопасности. Кроме того, доставка электроэнергии по лазерному лучу электромеханическому преобразователю может осуществляться через океанскую толщу и границу раздела атмосфера – океан, что позволяет решать по-новому задачу взаимодействия с погруженным объектом.

Бесконтактная передача электроэнергии и информации в оптоэлектронной машине реализуется при замене электрических ветвей якоря с щеточно-коллекторными контактами на ветви с динамическими оптронами. В режиме двигателя лазерное излучение подводится по ВОЭ в плоскости геометрической нейтрали магнитных полюсов статора. ФЭП размещаются на роторе и подключаются по два элемента встречно-параллельно к концам каждой секции обмотки ротора с возможностью обеспечения согласованного положения с лазерным лучом. Доставка электроэнергии в обмотки якоря осуществляется бесконтактно через воздушный зазор между якорем и статором в моменты совпадения оптической оси ФЭП и лазерного луча.

Проведены лабораторные испытания макета оптоэлектрической машины, синтезированной в соответствии с патентом [8]. В макете был применен мощный непрерывный полупроводниковый лазер с волоконным выводом излучения с длиной волны  $\lambda = 809$  нм, а также согласованные с ним по диапазону спектральной чувствительности фотоэлектронные преобразователи на основе AlGaAs-GaAs и GaInP-GaAs гетероструктур. В соответствии с предложенной математической моделью переходный процесс нарастания скорости вращения вала электродвигателя имел монотонный характер, длительность которого определялась величиной  $L/R_{\text{я}}$  ( $L$  — индуктивность,  $R_{\text{я}}$  — сопротивление секции обмотки якоря). При близких пусковых характеристиках (к исходному электродвигателю с щеточно-коллекторным коммутатором) оптоэлектрическая машина отличалась меньшим шумом и отсутствием искрения из-за устранения трения щеток о пластины коллектора [6].

**Комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна.** Роботизированный цифровой комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна (СЭПС) должен обеспечивать заданное направление во время мониторинга, стабилизацию в водном потоке при измерениях в фиксированной точке, а также возвращение судна на исходную базу. Для этой цели может быть применено устройство управления электроприводным транспортным средством [9], в котором в качестве движителей использованы четыре гребных винта. Функциональная схема устройства имеет два блока: управления и исполнения. В *блоке управления* размещены: тяговый аккумулятор и солнечная батарея; источник излучения оптического диапазона электромагнитного спектра (лазер); переключатели реверса каждой оптоэлектрической машины; ПИД-регуляторы каждой оптоэлектрической машины с силовыми ключами (драйверами), управляющими оптическими модуляторами; компьютерно-измерительная система (КИС) с функцией контроллера движения, входящая совместно с датчиком положения ротора (ДПР), ПИД-регуляторами, драйверами и оптическими модуляторами в контур цифрового управления и контроля движения СЭПС. В *исполнительный блок* входят: четыре оптоэлектрических машины, выполненных в соответствии с патентом [8], с гребными винтами; ВОЭ, распределяющие между оптоэлектрическими машинами энергию, поступающую из блока управления в исполнительный блок по коннекторам. Конструкция комплекса управления показана на следующей схеме:



Комплекс управления СЭПС: 1 — рама; 2 — оптоэлектрические машины с гребными винтами; 3 — выдвигная штанга; 4 — отсек для аппаратуры комплекса управления и контроля; 5 — крышка; 6 — солнечная батарея и приемо-передающие антенны; 7 — граница раздела вода – воздух; 8 — контур СЭПС

Конструктивной основой устройства служит рама 1 из профильного материала, на которой для жесткости установлена крышка 5. На раме по углам расположены выдвижные штанги 3, к концам которых, находящимся в воде, закреплены оптоэлектрические машины 2 с гребными винтами. На крышке размещены отсек 4 для бортовой аппаратуры, солнечная батарея и приемо-передающие антенны 6. Комплекс в сборе закрепляется на СЭПС 8 с применением средств герметизации. Размеры даны для судна серии «Бестер–280».

Управление движением надводного объекта мультивинтовым методом основано на изменении угловой скорости вращения винтов, так же, как и для воздушных моделей [11]. Для балансировки вращательных моментов одинаковые оптоэлектрические машины с винтами расположены симметрично на равных расстояниях относительно центра масс СЭПС на взаимно перпендикулярных направлениях  $X$ ,  $Y$  ортогональной системы координат. Направление вращения любого винта противоположно направлению вращения двух ближайших винтов, а направления вращения симметричных относительно центра масс винтов совпадают.

Суммарный момент вращения винтов  $M$ , в отсутствие внешних моментов, направлен по оси  $Z$ . Применительно к надводному маломерному судну наиболее важными являются пять основных режимов управления движением в слое раздела сред *река – атмосфера* (плоскость  $XU$ ): управление по углам крена, тангажа, рыскания; движение вперед-назад, вбок. Две пары винтов, вращающиеся в противоположные стороны, образуют связанную систему, динамика которой может быть описана системой двух дифференциальных уравнений:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{T_m} \left( \frac{2\pi J n}{C_m \Phi} + mn \right), \quad (7)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{T_n} \left[ \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{(R_y + R_{y\delta})}{C_e C_m \Phi^2} m - mn \right], \quad (8)$$

где  $m = M/M_{\max}$  — вектор относительного момента вращения,  $n = \omega/\omega_{\max}$  — вектор относительной угловой скорости гребных винтов;  $J$  — тензор инерции вращающихся масс;  $C_m$ ,  $C_e$  — постоянные коэффициенты электродвигателей в выражениях для момента вращения  $M = C_m \Phi I_y$  и ЭДС якоря  $E_y = C_e \Phi \omega$ , соответственно;  $U$ ,  $I_y$ ,  $\Phi^2$  — напряжение, ток якоря, квадрат магнитного потока оптоэлектрической машины;  $R_y$ ,  $R_{y\delta}$  — электрическое сопротивление якоря с добавочным элементом, включенным последовательно с обмоткой якоря;  $T_m$ ,  $T_n$  — характеристики нарастания тока и скорости вращения вала оптоэлектрической машины соответственно.

Согласно уравнениям (7) и (8), управление по углу крена осуществляется, когда скорость переднего винта увеличивается, а скорость заднего винта уменьшается в том же отношении (направление вращения переднего и заднего винтов одинаковое). При этом остаются неизменными момент вращения и тяга. Управление по углу тангажа осуществляется по тому же принципу, что и по углу крена: увеличивается скорость вращения одного бокового винта и одновременно в том же отношении уменьшается скорость вращения второго бокового винта. Сохраняются момент вращения и тяга. Управление по углу рыскания выполняется за счет нарушения баланса вращающихся моментов: для поворота направо уменьшается скорость вращения винтов по часовой стрелке и в том же отношении увеличивается скорость винтов, вращающихся против часовой стрелки. Тяга сохраняется неизменной, но нарушается баланс вращающихся моментов, и комплекс управления вместе с СЭПС поворачивается. Управление движением вперед требует отрицательного угла наклона комплекса управления к плоскости  $YZ$  для возникновения горизонтальной составляющей тяги. Аналогично происходит управление движением назад и вбок.

Таким образом, четырехвинтовой комплекс управления позволяет маломерному СЭПС двигаться в любом заданном направлении, в том числе поворачиваться на месте. Практический интерес представляет также стабилизация положения СЭПС в водном потоке для повышения точности промерных работ. В соответствии с динамической моделью (7) и (8), при выполнении условия сохранения произведения вращающего момента на угловую скорость вращения ( $mn = \text{const}$ ) комплекс управления и контроля движения судна автоматически переходит из одного устойчивого

режима работы в другой в ответ на внешнее воздействие (например, изменение тормозного момента), т. е. осуществляется *саморегулирование*. Подобные интеллектуальные свойства, присущие многим сложным связанным системам и многомодовому лазеру с внутриврезонаторным управлением [7], способствуют повышению энергоэффективности процесса управления.

В аппаратно-программных средствах комплекса управления и контроля можно выделить следующие модули: цифрового контроля и управления в составе КИС – микроконтроллера движения с устройством связи ГЛОНАСС/GPS; датчиков крена, дифферента, рыскания, угловой скорости вращения гребных винтов; оптоэлектронных систем контроля и идентификации объектов, сканирующего лазерного дальномера; гидролокатора, эхолота; силовых устройств — тяговых аккумуляторов с контролем тока заряда, а также гребных винтов; солнечных батарей; средств связи — атмосферной оптической линии связи АОЛС с резервным радиоканалом для обмена информацией между базовыми автоматическими промерными постами (БАПП) и цифровым комплексом управления и контроля (ЦКУК), установленным на СЭПС, а также наземной волоконно-оптической линией связи для соединения с другими БАПП; программных средств на основе системы MATLAB с пакетами расширения Simulink, Simelectron [12].

### Обсуждение (Discussion)

На основе совпадения результатов информационного и энергетического подходов к анализу одних и тех же экспериментальных данных можно сделать вывод о связи энергии и информации в сообщении и их одновременной передаче по измерительно-информационному каналу. На базе оптоэлектрической машины — патент [8] и устройства — патент [9] (патентообладатель — ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) может быть создан роботизированный цифровой четырехвинтовой комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна. Действие комплекса управления и контроля движения надводного судна с помощью четырехвинтового устройства осуществляется аналогично подводному и воздушному аналогам. Роботизированные маломерные промерные суда во взаимодействии с базовыми автоматическими промерными постами могут явиться основой создания цифровой измерительно-информационной сети, которая будет способствовать оптимизации гидрографических работ на ВВП РФ.

### Выводы (Conclusions)

1. Информационный и энергетический методы обработки одних и тех же экспериментальных данных приводят к одинаковым результатам. Можно полагать, что измерительная информация и энергия, содержащиеся в сообщении, одновременно передаются по измерительно-информационному каналу динамического электромеханического преобразователя. Предложенная оптоэлектронная (фотонная) коммутация в электрических машинах имеет ряд преимуществ по сравнению с коллекторно-щеточной: отсутствие гальванической связи ротора с внешней цепью, а также наводок, электрических и механических шумов, искрения. Оптоэлектрическая машина становится бесшумной, простой в управлении, пожаробезопасной и энергоэффективной. Эффективность оптоэлектронных средств передачи энергии и информации в динамических электромеханических преобразователях зависит от характеристик применяемых элементов. Так, волоконно-оптические элементы (ВОЭ) более чем на два порядка ( $140 \text{ МВт/см}^2$  по сравнению с  $220 \text{ кВт/см}^2$ ) могут превосходить медный провод по максимальной пропущенной плотности мощности. Достоинством ВОЭ служит невосприимчивость к высокочастотным и импульсным электромагнитным помехам, а также высокий уровень пожарной безопасности. КПД фотоэлектронных преобразователей (ФЭП) из AlGaAs/GaAs может превышать 50 % ( по лабораторным измерениям 70 %) при плотности фототока до  $100 - 120 \text{ А/см}^2$ , при фототоке свыше  $40 \text{ А/см}^2$  ФЭП необходимо интенсивное охлаждение. Применение оптоэлектронных средств как альтернативных источников электроснабжения на водном транспорте в настоящее время сдерживает отсутствие производства фотоэлектронных преобразователей парных к изготавливаемым лазерным источникам киловаттной мощности.

2. На основе изобретений бесколлекторного электродвигателя с передачей электроэнергии по ВОЭ и динамическим оптронным коммутатором секций обмотки якоря [8] и устройства управления электроприводным транспортным средством [9] (правообладатель патентов — ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) предложен четырехвинтовой роботизированный цифровой комплекс управления и контроля движения маломерного самоходного электроприводного промерного судна. Две пары винтов, вращающиеся в противоположные стороны, образуют связанную систему. Анализ динамики показывает, что устойчивая работа комплекса управления и контроля при переходе из одного состояния в другое под влиянием внешних воздействий сохраняется при постоянном значении произведения момента на угловую скорость вращения. Роботизированные маломерные промерные суда в сочетании с базовыми автоматическими промерными постами, объединенными атмосферным радиооптическим и наземным волоконно-оптическим каналами связи, могут явиться основой для создания цифровой измерительно-информационной сети ВВП РФ, что будет способствовать повышению безопасности судоходства, оптимизации гидрографических работ на ВВП и транзитного потенциала России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gapontsev V. P.* Modern state and prospects of application high-power fiber lasers/ V.P. Gapontsev // 8th International Symposium on high-power lasers and their applications. — SPb., 2016.
2. *Tarasov I. S.* High-power semiconductor separate-confinement double heterostructure lasers / I. S. Tarasov // Quantum Electronics. — 2010. — Vol. 40. — Is. 8. — Pp. 661. DOI: 10.1070/QE2010v040n08ABEH014375.
3. *Emelyanov V. M.* Photovoltaic optical sensors for high-power conversion and information transmission / V.M. Emelyanov, E.D. Filimonov, S.A. Kozhuhovskaya, M.Z. Shvarts // Optical Sensors 2017. — International Society for Optics and Photonics, 2017. — Vol. 10231. — Pp. 102311B. DOI: 10.1117/12.2264083.
4. *Данилов О. Б.* Кислород-йодные лазеры с оптической (солнечной) накачкой / О. Б. Данилов, А. П. Жевлаков, М. С. Юрьев // Оптика и спектроскопия. — 2014. — Т. 117. — № 1. — С. 151. DOI: 10.7868/S0030403414070058.
5. Энергию Солнца доставят на Землю // Деловая Россия. — 2017. — № 3-4 (1). — С. 94.
6. *Terentiev V. E.* Modeling the complex delivery of electric energy by optical channel to dynamic electromechanical transformer / V. E. Terentiev, S. G. Artamokhin, N. A. Pikhtin, M. Z. Shvarts // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. — 2018. — Vol. 9. — Is. 2. — Pp. 765–774.
7. *Терентьев В. Е.* Автоматизация и ультразвуковое управление процессом доставки электроэнергии по интеллектуальному лазерному каналу динамическому электромеханическому преобразователю / В. Е. Терентьев // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2019. — № 3. — С. 94–98.
8. Пат. 2563974 Российская Федерация, МПК H02P 9/14. Бесколлекторная электрическая машина / В. Е. Терентьев; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (RU). — № 2014129152/07; заявл. 15.07.2014; опубл. 27.09.2015, Бюл. № 27. — 7 с.
9. Пат. 166091 Российская Федерация, МПК B60L 11/18. Устройство управления движением электроприводных транспортных средств / В. Е. Терентьев, С. В. Сабуров; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова» (RU). — № 2016101349/11; заявл. 18.01.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31. — 9 с.
10. *Biryukov A. S.* On the limiting light intensities in quartz optical fibers. VCR as the main thermal source of optical destruction / A. S. Biryukov, E. M. Dianov // Quantum Electronics. — 2000. — Vol. 30. — Is. 6. — Pp. 559–564.
11. *Luukkonen T.* Modelling and control of quadcopter. Independent research project in applied mathematics / T. Luukkonen. — Espoo: School of Science, 2011. — 26 p.
12. *Дьяконов В. П.* MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. — М.: ДМК Пресс, 2016. — 976 с.

#### REFERENCES

1. Gapontsev, V. P. “Modern state and prospects of application high-power fiber lasers.” *8th International Symposium on high-power lasers and their applications*. SPb., 2016.

2. Tarasov, Il'ya Sergeevich. "High-power semiconductor separate-confinement double heterostructure lasers." *Quantum Electronics* 40.8 (2010): 661. DOI: 10.1070/QE2010v040n08ABEH014375
3. Emelyanov, Viktor M., E.D. Filimonov, S.A. Kozhuhovskaya, and M.Z. Shvarts. "Photovoltaic optical sensors for high-power conversion and information transmission." *Optical Sensors 2017*. Vol. 10231. International Society for Optics and Photonics, 2017. DOI: 10.1117/12.2264083
4. Danilov, O.B., A.P. Zhevlakov, and M.S. Yur'Ev. "Optically (solar) pumped oxygen-iodine lasers." *Optics and Spectroscopy* 117.1 (2014): 145–151. DOI: 10.1134/S0030400X14070054
5. "Energiyu Solntsa dostavyat na Zemlyu." *Delovaya Rossiya* 3-4(1) (2017): 94.
6. Terentiev, V. E., S. G. Artamokhin, N. A. Pikhtin, and M. Z. Shvarts. "Modeling the complex delivery of electric energy by optical channel to dynamic electromechanical transformer." *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* 9.2 (2018): 765–774.
7. Terentiev, Vladislav Evgenievich. "Automation and ultrasonic control of the process of electric power delivery via the intelligent laser channel to the dynamic Electromechanical Converter." *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series «Natural and Technical Sciences»* 3 (2019): 94–98.
8. Terent'ev, V. E. Beskollektornaya elektricheskaya mashina. RU 2 563 974, IPC H02P9/14. Russian Federation assignee. Publ. 27 Sept. 2015.
9. Terent'ev, V. E., and S. V. Saburov. Ustroistvo upravleniya dvizheniem elektroprivodnykh transportnykh sredstv. RU 166 091, IPC B60L 11/18. Russian Federation assignee. Publ. 10 Nov. 2016.
10. Biryukov, A. S., and E. M. Dianov. "On the limiting light intensities in quartz optical fibers. VCR as the main thermal source of optical destruction." *Quantum Electronics* 30.6 (2000): 559–564.
11. Luukkonen, T. *Modelling and control of quadcopter. Independent research project in applied mathematics*. Espoo: School of Science, 2011.
12. D'yakonov, V. P. *MATLAB i SIMULINK dlya radioinzhenerov*. M.: DMK Press, 2016.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Терентьев Владислав Евгеньевич** —  
 кандидат технических наук,  
 старший научный сотрудник  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [TerentievVE@gumrf.ru](mailto:TerentievVE@gumrf.ru)

**Очина Людмила Борисовна** —  
 кандидат технических наук, доцент  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [kaf\\_electricautomatic@gumrf.ru](mailto:kaf_electricautomatic@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Terentiev, Vladislav E.** —  
 PhD,  
 Senior Researcher  
 Admiral Makarov State University  
 of Maritime and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [TerentievVE@gumrf.ru](mailto:TerentievVE@gumrf.ru)

**Ochina, Ludmila B.** —  
 PhD, associate professor  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [kaf\\_electricautomatic@gumrf.ru](mailto:kaf_electricautomatic@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 29 октября 2019 г.  
 Received: October 29, 2019.