

УДК 629.5.03

© Л. Ю. Бочаров, 2014

Институт проблемных исследований РАЕН, Серпухов  
ipraes@online.stack.net

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ-ДВИЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ И КОРАБЛЕЙ

Приведена характеристика состояния зарубежных разработок по созданию новых типов электродвигателей-двигателей – кольцевых электродвигателей движителей для подводных аппаратов и кораблей. Обобщены и рассмотрены различные конструктивные решения зарубежных установок, созданные в рамках следующих технологических концепций: ERP, IMP, RDT, EPS и др.

**Ключевые слова:** кольцевой электродвигатель-двигатель, кольцевой гребной винт, автономный необитаемый подводный аппарат, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат.

Выбор типа конструкции кольцевых электродвигателей движителей (КЭДД) для подводных аппаратов и кораблей, обладающих несколькими сильно отличающимися режимами движения, является нетривиальной задачей. Имеющиеся альтернативы обладают своими преимуществами и недостатками. Следовательно, для принятия обоснованного проектного решения о выборе типа пропульсивного комплекса необходимо более строго подходить к вопросам оценки возможных вариантов его конструктивного исполнения. В настоящее время можно выделить следующие базовые типы конструкций КЭДД (рис. 1).

1. КЭДД, состоящий из: электродвигателя, в котором кольцевой ротор размещен внутри статора; кольцевого гребного винта со ступицей и вала, поддерживающего (не вращающего) ГВ. Далее этот тип конструкций будет условно именоваться как «КЭДД с ГВ со ступицей на валу».

2. КЭДД, состоящий из: электродвигателя, в котором кольцевой ротор размещен внутри статора; кольцевого гребного винта со ступицей, закрепленного внутри кольцевого ротора или на нем. Далее по тексту такой тип конструкции будет сокращенно именоваться «КЭДД с ГВ со ступицей без вала».

3. КЭДД, состоящий из: электродвигателя, в котором кольцевой ротор размещен внутри статора; кольцевого гребного винта без ступицы, закрепленного внутри кольцевого ротора или на нем. Такой тип конструкции будем сокращенно обозначать как «КЭДД с ГВ без ступицы».

**КЭДД с кольцевым гребным винтом со ступицей на валу.** Достаточно универсальную конструкцию такого типа КЭДД, получившую название «Rim-Driven Propulsor» (RDP), разработала компания General Dynamics Electric Boat (GD EB). В американских публикациях погруженная колонка с КЭДД по этой технологии получила название «Rim-Driven Permanent Magnet Motor Propulsor Pod» — погруженная движительная колонка с КЭДД (погруженный движитель или винторулевая колонка — ВРК). В дальнейшем технология RDP легла в основу формирования новой технологической концепции ВМС США «Двигатель с интегрированным двигателем» — «Integrated Motor Propulsion» (IMP).

Первая конструкция КЭДД по технологии RDP, созданная компанией GD EB (является усовершенствованной конструкцией движителя, запатентованного компанией Westinghouse Electric Corp.), состояла из насадки, ротора — кольцевого ГВ с постоянными магнитами, расположенными на ободке (со ступицей на валу), статора, встроенного в корпус насадки и непод-

вижного «винта», прикрепленного к задней части корпуса насадки. Основная отличительная особенность этой конструкции КЭДД заключалась в том, что кольцевой гребной винт являлся ротором двигателя (т. е. ПМ встроены в кольцевой ГВ). Конструкция неподвижного «винта» служит консолью, поддерживающей вал, на котором устанавливается ГВ. Лопастей неподвижного «винта» выполняют функцию формирователя необходимых характеристик струи двигателя на выходе насадки (в частности, для разрушения завихренности струи — приблизительно аналогично функциям решеток, устанавливаемым в задней (выходной) части насадки (трубы) двигателя).

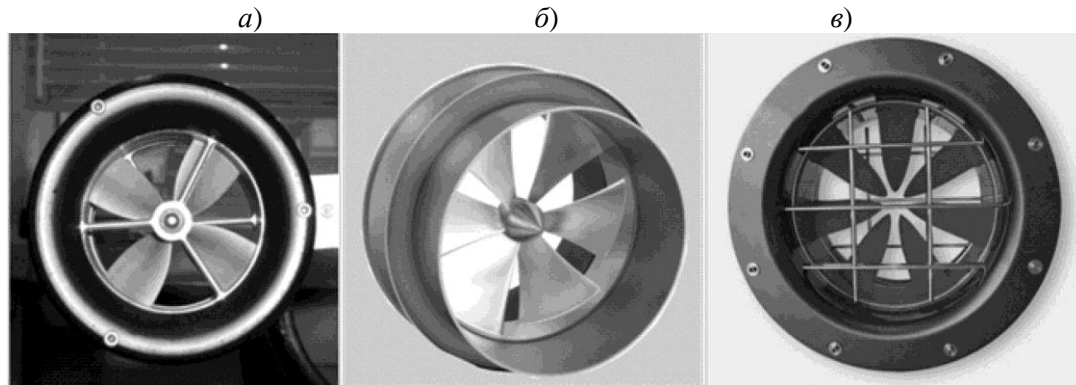


Рис. 1. Базовые типы конструкций КЭДД.  
*а* — КЭДД с кольцевым ГВ со ступицей на валу; *б* — КЭДД с кольцевым ГВ со ступицей без вала; *в* — КЭДД с кольцевым ГВ без ступицы.

Впоследствии, усилиями компании Electric Boat данная конструкция приобрела высокую степень универсальности. Так, например, на ее базе были созданы: ВРК типа Azipod с составными КЭДД (например, с одним КЭДД «тянущего» типа и с одним КЭДД «толкающего типа»); ВРК типа CRP AziPod с КЭДД и ГВ противоположного вращения, водометный движитель по технологии RIM Jet.

Как показал проведенный анализ, конструкции КЭДД, созданные по практически аналогичной американской технологии RDP (КЭДД с кольцевым гребным винтом со ступицей на валу) в европейских публикациях получили название «Tip-Driven Thruster». На ее основе коллектив ученых из Саутгемптонского университета (University of Southampton, Великобритания) под руководством профессора С. М. Абу-Шаркх совместно с компанией TSL Technology Ltd. (Великобритания) разработал конструкцию КЭДД (ГВ со ступицей на валу) для движительно-рулевых комплексов малогабаритных необитаемых подводных аппаратов (НПА). Научно-технические разработки Саутгемптонского университета в области КЭДД были использованы компанией TSL Technology при создании технологии RDE (Rim Driven Electric — электрический кольцевой привод). В настоящее время компания TSL Technology по лицензии Саутгемптонского университета осуществляет серийный выпуск четырех моделей КЭДД под торговой маркой «Integrated Thruster™». Примером практического применения КЭДД производства TSL Technology Ltd. может служить подруливающее устройство (ПУ) туннельного типа автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) проекта Delphin 2. В 2011 г. к изучению вопросов, связанных с организацией производства выдвигаемых ВРК на основе КЭДД по технологии RDP, приступила компания OYS. Предполагается, что эти установки найдут применение в качестве вспомогательных (маневровых) движителей на яхтах категории А (океанские суда).

Практически аналогичного типа конструкцию КЭДД, получившего название «Prop-Eye», спроектировала и изготовила немецкая компания Klingenburg GmbH. В отличие от КЭДД, созданного в Саутгемптонском университете, в этом устройстве отсутствует вал, поддерживающий ГВ (гребной винт устанавливается на двух втулках, закрепленных в центре опорных кожухов). КЭДД «Prop-Eye» состоит из СДПМ, кольцевого ГВ с лопастями из угле-

пластика (не сегментной конструкции) и управляющей электроники. Обод ГВ представляет собой многослойную конструкцию со встроенными в него постоянными магнитами. На базе конструкции «Prop-Eye» компания Klingenburg GmbH производит две модели КЭДД с ГВ диаметром 170 мм и 265 мм.

**КЭДД с кольцевым гребным винтом со ступицей без вала.** Разработку такой конструкции КЭДД по технологии RDT в 2002—2004 гг. осуществило норвежское подразделение компании Rolls-Royce (Rolls-Royce Marine System AS) совместно с компанией SmartMotor (Норвегия) [1]. Базовый облик конструкции КЭДД компании Rolls-Royce составляют: кольцевой СДПМ, разработанный и изготовленный компанией SmartMotor (Ring Motor — двигатель с кольцевым ротором и статором); кольцевой гребной винт со ступицей, закрепленный внутри ротора (без поддерживающего ГВ вала и консоли).

Несомненно, что одним из положительных моментов этой конструкции с одной стороны является отказ от использования вала (для ГВ) с поддерживающей его консолью, с другой стороны возможность использования хорошо отработанной технологии проектирования и изготовления гребных винтов со ступицей (постоянного шага), а также накопленным опытом их практического применения в ПУ и винторулевых колонках с Z-образной передачей. В начале 2006 г. первое носовое ПУ (Bow Thruster) с КЭДД мощностью 800 кВт, изготовленное норвежским подразделением компании Rolls-Royce Marine AS (Ulsteinvik) было установлено на буксире UT712L типа «Anchor-handler». Данное устройство было выполнено в габаритах серийно поставляемых ПУ с Z-образной передачей RT1600 Kamewa Ulstein (диаметр винта 1600 мм). Согласно официальным данным в процессе разработки компанией КЭДД по технологии Rim Drive Thruster (RDT) использовался СДПМ, изготовленный компанией SmartMotor (Норвегия).

В настоящее время компанией SmartMotor освоено серийное производство комплектов кольцевых СДПМ (ring motor) мощностью от 800 кВт до 4 МВт для носовых подруливающих устройств (Bow Thruster) и ВРК на базе КЭДД. Дальнейшая судьба разработок компании Rolls-Royce Marine AS в области КЭДД по технологии RDT (с кольцевым ГВ со ступицей) остается неизвестной. В ее рекламных проспектах последних пяти лет сведения об использовании таких движителей в ВРК или ПУ отсутствуют.

**КЭДД с кольцевым гребным винтом без ступицы.** На основе патента института НВОИ американская компания Schilling Robotics в 1998—2001 гг. разработала технологию «Electric Ring Thruster» для производства движителей, размещаемых на корпусе тяжелого телеуправляемого (привязного) необитаемого подводного аппарата (ТНПА) проекта QUEST [2].

Всего на ТНПА проекта QUEST (масса аппарата 3.5 т, предельная рабочая глубина 4000 м) устанавливалось 7 движителей типа «Electric Ring Thruster» одинаковой мощности и массой ~ 25 кг каждый (мощность 7.5 кВт). Для повышения плотности крутящего момента компания Schilling Robotics уделила особое внимание системе охлаждения КЭДД.

В дальнейшем компания Schilling Sub-Atlantic освоила производство унифицированного КЭДД мощностью ~ 11 кВт (максимальная тяга ~ 2 кН при скорости вращения 1000 об/мин) со следующими габаритными характеристиками: ширина 480 мм, длина 230 мм и высота 610 мм. Это устройство было также предназначено для движительно-рулевого комплекса ТНПА проекта QUEST. Надо отметить, что в последних проектах ТНПА рабочего класса (проект HD — масса аппарата 3.5 т и проект UHD — масса аппарата 5.0 т) компания Schilling Robotics по неизвестным пока причинам отказалась от применения движителей типа «Electric Ring Thruster», при этом общая концепция размещения семи КЭДД на рамной конструкции осталась неизменной. В движительно-рулевом комплексе этих аппаратов стали применяться движители, стоящие из электродвигателя прямого привода, на валу которого размещается трехлопастной ГВ и насадки.

В Германии группой компаний Voith на основе базовой конструкции института НВОИ была разработана технология «Inline Thruster», позволяющая создавать КЭДД для подруливающих устройств (ПУ) и ВРК. На основе этой технологии подразделением Voith Turbo было освоено серийное производство унифицированного ряда КЭДД. Анализ конструкций этих

устройств показал, что в них, как правило, используются семилопастные (лопатообразные) гребные винты без ступицы (диаметром 240, 380 и 550 мм), выполненные из полимерных материалов и синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). Основными отличительными особенностями КЭДД компании Voith Turbo от разработки американского института WHOI являются: способ подвеса ротора внутри статора на керамических подшипниках скольжения, смазываемых и охлаждаемых забортной водой; модульное герметичное исполнение электрических подсистем; сегментная конструкция ГВ из композиционного материала, позволяющая проводить быструю замену лопастей, выполненных из композиционного материала, без проведения демонтажа самой установки (в том числе и на плаву).

КЭДД компании Voith Turbo уже нашли применение в носовых ПУ, в главной ВРК большого прогулочного судна с системой электродвижения (Amsterdam canal boat — главным источником энергии является электрохимический генератор на топливных элементах), а также в ПУ движительно-рулевого комплекса уникального АНПА проекта DeepC, созданного в 2005 г. компанией Atlas Elektronik.

Норвежской группой ученых и инженеров из технологического университета NTNU, компаний SmartMotor AS, Norpropeller AS в 2002—2003 гг. был разработан макетный образец ВРК с внутренним диаметром насадки 600 мм и электроприводом номинальной мощностью 100 кВт [3]. Основу конструкции КЭДД составлял высокомоментный СДПМ, спроектированный и изготовленный компанией SmartMotor AS. Постоянные магниты (редкоземельные магниты Nd-Fe-B) были расположены на внешней поверхности кольцевого ротора (SPM-технология), чем обеспечивалась простота конструкции, хорошие динамические характеристики и сравнительно низкая стоимость. На кольцевом роторе, размещенном внутри статора, мог крепиться кольцевой гребной винт со ступицей или без нее. Судя по опубликованным сведениям, в конструкции этого КЭДД использовались гидродинамические подшипники (подача воды (жидкости) в них осуществляется посредством всасывания в результате вращения подшипника) подвеса ротора.

В 2005 г. норвежской компанией Brunvoll было объявлено о завершении освоения промышленного производства выдвигаемых поворотных колонок и подруливающих устройств на базе КЭДД с ГВ без ступицы. На основе технологии «Rim Driven Thruster — RDT» компанией Brunvoll был разработан типовой модельный ряд движителей с электроприводами мощностью 200, 300, 450, 600 и 900 кВт (соответствующие диаметры кольцевых ГВ составляют: 0,8, 1,0, 1,25, 1,5, 1,75 м). Известно, что в конструкции КЭДД по RDT-технологии применяются СДПМ переменного тока производства SmartMotor AS, имеющие большое количество (свыше 60) обмоток якоря на статоре и относительно малое число постоянных магнитов на кольцевом роторе. Такое построение электродвигателя, естественно, приводит (для достижения высоких моментных характеристик) к удлинению ротора, но позволяет уменьшить стоимость привода. Первое практическое применение главной ВРК (типа Azipod) с КЭДД по технологии RDT компании Brunvoll AS было осуществлено в 2011 г. в рамках модернизации (замены) энергетической установки норвежского парома Eiksund водоизмещением 216 т.

В 2005—2006 гг. компания Van der Velden™ Marine System (Нидерланды) осуществила разработку технологии промышленного производства выдвигаемых движительно-рулевых колонок на базе КЭДД с гребным винтом без ступицы. Эта технология была зарегистрирована под торговой маркой «EPS» и на ее базе компания освоила производство модельного ряда КЭДД (диаметры гребных винтов от 0,45 до 1,05 м и приводами соответствующей электрической мощностью 30—295 кВт, производства Combimas), предназначенных для использования в ПУ, выдвигаемых колонках и ВРК небольших судов. Благодаря успеху рекламной кампании (в частности, о возможности существенного снижения шумности движителя на нижних частотах) и вручении в ноябре 2005 г. престижной премии DAME Design Award авторам EPS-технологии (Van der Velden Marine Systems), конструкции КЭДД с гребным винтом без ступицы приобрели большую популярность в научных кругах. Однако многие эксперты и специалисты не выявляют принципиальных отличий EPS-технологии от других, ранее созданных, аналогичных концепций, например, от разработок американского института

НВОI, технологий G-TEC (немецкая фирма L&W Bischewski), «Inline Thrustertm» (группа компаний Voith, Германия), «Electric Ring Thruster» (компания Schilling Robotics, США) или RDT-RIM Driven Technology (совместная разработка норвежских организаций: NTNU, Brunvoll AS, Norpropeller AS).

Практическая реализация КЭДД требует предварительного решения ряда задач, в том числе выбора типа и конструктивного решения ЭД, в наибольшей степени удовлетворяющего оптимальному решению подобной конструкции. Анализ современного состояния технологий создания КЭДД показал, что в их конструкциях распространение получили гребные электроприводы, созданные на основе вентильных (синхронных двигателей с постоянными магнитами) и вентильно-индукторных двигателей.

Таким образом, проведенный анализ состояния зарубежных разработок в области КЭДД для подводных аппаратов и кораблей показал следующее.

1. В настоящее время в открытой литературе отсутствуют сведения, позволяющие обеспечить принятие обоснованных проектных решений по выбору типа конструкции КЭДД для ПУ и ВРК (т. е. осуществлять выбор оптимального конструктивного варианта, в наибольшей степени удовлетворяющий противоречивым требованиям в части получения минимальных массогабаритных характеристик при высоком КПД). Существующие и возможные варианты-альтернативы обладают своими преимуществами и недостатками, но требуют проведения углубленного изучения в рамках отдельных теоретических и экспериментальных работ.

2. Большинство публикаций разработчиков и компаний-производителей КЭДД не содержат сведений, позволяющих оценить пропульсивные и виброакустические характеристики этих изделий.

3. В научно-технических публикациях, посвященных конструкциям КЭДД, в основном (при их относительно небольшом количестве) рассматриваются вопросы, связанные с результатами расчетно-теоретических и экспериментальных исследований соответствующих электроприводов.

## Литература

1. Rolls-Royce introduces Rim Drive thruster technology. Режим доступа: <http://www.rolls-royce.com/marine/overview/news/2005/newsitem12.htm>.
2. The Schilling electric ring thruster. Режим доступа: [www.saalliance.com](http://www.saalliance.com).
3. Krøvel Ø. Design of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines, Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, Department of Electric Power Engineering, Trondheim, February 2011. 187 p.

Статья поступила в редакцию 10.04.2014 г.



L. U. Bocharov

Institute of Problems Research RAES, Serpukhov

## The Foreign Technologies Characteristics of New Types of Electric Thrusters Creation for Unmanned Underwater Vehicles and Ships

The condition of foreign workings out on creation of new types of electric thrusters (Ring Electric Motors-Thrusters - REMT) for UUV (AUV & ROV) and ships is analysed. The various constructive decisions of foreign installations created within the limits of following technical concepts are generalised and considered: ERP, IMP, RDT, EPS and other.

**Key words:** ring electric motors-thrusters, ring propeller, ring rotor, podded propulsion, autonomous underwater vehicle, remotely operated vehicle.