

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-755-765

PROSPECTS OF APPLYING THE UNIPOLAR MACHINES IN THE ELECTRICAL PROPULSION INSTALLATIONS

A. Yu. Rumyantsev, V. F. Samosejko, A. V. Saushev

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

The perspective directions of electrical propulsion installations development are considered. It is shown that using unipolar DC machines with superconducting exciting windings from niobium-titanium alloy is advisable as the main generators and electric propulsion motors. The advantages of these machines, which allow us to successfully solve the issues of reducing the specific gravity and dimensions of the machine, increasing the indicators of their energy efficiency, maneuverability and controllability, as well as the problems of noise and electromagnetic disturbances reduction, are highlighted. The analysis of the existing developments of unipolar machines, presented by the domestic scientists and the leading international companies, is carried out. The designs and parameters of recent years developments are considered. An example of implementing the liquid-metal current collection technology in the unipolar machine bus, which makes it possible to increase the current density by several orders of magnitude compared with the existing technology of the brush current collection, is given. The assumed structure of constructing the ship electric power system, consisting of the unipolar propulsion motor, is shown. A comparative analysis of the main parameters of the electric propulsion AC installation with the asynchronous electric propulsion motor and the electric propulsion installation with the unipolar propulsion DC motor with the power of 19 MW and the nominal rotation speed of the anchor of 150 rpm is carried out. The significant superiority of the electrical propulsion installation with the unipolar DC electric motor in terms of the weight and dimensions of all main elements of the installation compared to the classical DC machines has been revealed. The conclusion on the new technologies development in the field of building the unipolar DC machines and emerging a promising direction for the synthesis of electrical propulsion installations based on these machines is made.

Keywords: electric propulsion installation, unipolar DC electric motor, superconducting excitation coils, liquid metal current collection, ship electric power system.

For citation:

Rumyantsev, Aleksey Yu., Veniamin F. Samosejko, and Alexander V. Saushev. "Prospects of applying the unipolar machines in the electrical propulsion installations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 755–765. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-755-765.

УДК 629.123

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УНИПОЛЯРНЫХ МАШИН В ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев

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

Рассмотрены перспективные направления развития гребных электрических установок. Показано, что в качестве главных генераторов и гребных электродвигателей целесообразно применение униполярных машин постоянного тока со сверхпроводниковыми обмотками возбуждения из ниобий-титанового сплава. Выделены преимущества данных машин, позволяющие успешно решать вопросы снижения удельной массы и габаритов машины, повышения показателей их энергетической эффективности, маневренности и управляемости, а также проблемы снижения шума и электромагнитных возмущений. Выполнен

анализ существующих разработок униполярных машин, представленных отечественными учеными и ведущими международными компаниями. Рассмотрены конструкции и параметры разработок последних лет. Приведен пример реализации технологии жидкометаллического токосъема в униполярной машине, позволяющий увеличить плотность тока на несколько порядков по сравнению с существующей технологией щеточного токосъема. Показана предполагаемая структура построения судовой электроэнергетической системы, имеющая в своем составе униполярный гребной электродвигатель. Проведен сравнительный анализ основных параметров гребной электрической установки переменного тока с асинхронным гребным электродвигателем и гребной электрической установки с униполярным гребным электродвигателем постоянного тока мощностью 19 МВт и номинальной скоростью вращения якоря 150 об/мин. Выявлено значительное превосходство гребной электрической установки с униполярным электродвигателем постоянного тока по массогабаритным показателям всех основных элементов установки по сравнению с классическими машинами постоянного тока. Сделан вывод о развитии новых технологий в сфере построения униполярных машин постоянного тока и появлении перспективного направления синтеза гребных электрических установок на базе этих машин.

Ключевые слова: гребная электрическая установка, униполярный электродвигатель постоянного тока, сверхпроводящие катушки возбуждения, жидкометаллический токосъем, судовая электроэнергетическая система.

Для цитирования:

Румянцев А. Ю. Перспективы применения униполярных машин в гребных электрических установках / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 755–765. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-755-765.

Введение (Introduction)

В последние годы в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) продолжается устойчивая тенденция совершенствования существующих технологий, появляются и внедряются новые технологии, связанные с выработкой, преобразованием и передачей энергии от двигателя к движителю (винту). Одним из перспективных направлений является развитие электрических генераторных и двигательных гребных установок, а также применение перспективных видов электрических машин. Исследования в этой области направлены на снижение удельной массы и габаритов этих установок, повышение показателей энергетической эффективности, маневренности и управляемости, а также решение проблем с шумом и электромагнитным возмущением.

Ряд работ [1]–[5] посвящен выбору состава и типа электрических и механических преобразователей в системах гребных электрических установок (ГЭУ). Среди них можно выделить перспективные разработки в области развития униполярных машин постоянного тока. Несмотря на недостатки, присущие этим машинам, такие как малое напряжение и наличие большого числа кольцевых щеток, они имеют ряд преимуществ в отличие от других видов электрических машин. Основными достоинствами униполярных машин по сравнению с биполярными машинами постоянного тока являются:

- отсутствие коллектора из медных пластин;
- широкое использование активных материалов, как токопроводов, так и магнитопроводов;
- меньший относительный вес при низких напряжениях;
- высокий КПД из-за отсутствия потерь в стали на гистерезис и вихревые токи;
- простота конструкции вследствие малого количества деталей;
- высокие показатели термостойкости и долговечности;
- простота обслуживания;
- относительно низкая стоимость машины.

Важными отличительными свойствами униполярных машин являются также малые электромагнитные шумы и отсутствие пульсаций электромагнитного момента. Благодаря этим достоинствам униполярные электрические машины находят применение в различных областях промышленности и транспорта, включая их применение при синтезе ГЭУ. При этом продолжают теоретические и конструкторские исследования, направленные на повышение показателей качества этих машин в составе электроприводов и систем автоматики.

Целью работы является анализ перспективных разработок в области совершенствования конструктивных решений и повышения показателей качества униполярных электрических машин и особенности их применения при синтезе гребных электрических установок.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Униполярные электрические машины. Униполярная электрическая машина (УЭМ) — это электромеханический преобразователь энергии, особенностью которого является неизменность направления протекания магнитного потока по магнитопроводу. УЭМ делятся на два типа: с дисковым и с цилиндрическим ротором. При вращении ротора в магнитном поле в его обмотке возникают ЭДС.

В классической схеме УЭМ, реализованной на практике в различных конструктивных исполнениях, принцип работы сводится к пересечению одиночным линейным проводником (в виде ротора во вращающейся электрической машине или подвижного якоря в линейной машине) однонаправленного, т. е. «униполярного», магнитного поля в рабочем зазоре магнитопровода. В результате такого пересечения появляется униполярная ЭДС, которая обусловлена силой Лоренца, действующей на движущийся электрический заряд со стороны магнитного поля:

$$F_L = q[v, B], \quad (1)$$

где q — величина движущегося электрического заряда; v — линейная скорость пересечения проводником магнитного поля; B — магнитная индукция.

Из данного выражения, в общем случае, следует:

$$E_{ui} = 1/q \int_l F_L dl, \quad (2)$$

где E_{ui} — ЭДС униполярной индукции; l — длина проводника.

В частном случае, при перемещении одиночного проводника в плоскопараллельном рабочем зазоре УЭМ перпендикулярно линиям магнитного поля справедливо выражение:

$$E_{ui} = vBl_a, \quad (3)$$

где v — средняя (по длине проводника) скорость перемещения проводника в рабочем зазоре; B — средняя (по длине проводника) магнитная индукция в рабочем зазоре; l_a — активная длина проводника, определяемая длиной рабочего зазора магнитопровода УЭМ.

Из выражения (3) следует, что величина ЭДС имеет принципиальное ограничение по параметру l_a или параметру $l_a n_a$, где $n_a = 1$ — число последовательно соединенных активных проводников электрической машины. Для получения больших значений ЭДС униполярной индукции обмотку якоря необходимо выполнять с последовательно соединенными активными проводниками и числом $n_a > 1$. Последовательное соединение активных проводников в электрическую цепь образует многовитковые контуры (секций, катушек) обмотки якоря в условиях униполярной индукции. При этом направление токов в активных проводниках должно быть одинаковым по всей длине рабочего зазора. В работе [5] приведено описание 3D-модели варианта конструкции УЭМ с числом последовательно соединенных активных проводников $n_a = 180$.

В работе [6] рассматривается возможность применения униполярной электрической машины для привода направленной антенно-фидерной системы. При этом разработана конструкция компенсационной обмотки, позволяющей полностью скомпенсировать реакцию якоря машины. Такой подход является перспективным и при использовании УЭМ в ГЭУ. Действительно, реакция якоря в УЭМ является одним из основных вопросов теории и расчета этих машин, поскольку большие значения тока якоря и его поле оказывают существенное влияние на работу машины. Относительное значение МДС якоря в УЭМ значительно выше, чем в биполярных машинах постоянного тока. Характер реакции якоря зависит от типа токосъема. Если рабочая точка машины лежит на прямолинейных участках кривой намагничивания, т. е. когда магнитная система машины не насыщена результирующим магнитным полем или сильно насыщена, то искажение основного поля в стали не приводит к снижению наводимой ЭДС [7]. Однако, поскольку рабочая

точка машины, как правило, находится на нелинейном участке кривой намагничивания, т. е. магнитная цепь имеет «среднее» насыщение, происходит насыщение индуктора, снижение полного потока и соответствующее уменьшение ЭДС. Для сохранения величины ЭДС увеличивают МДС обмотки возбуждения. Таким образом, дополнительный ток возбуждения компенсирует размагничивающее влияние поперечной реакции якоря. Насыщение магнитной цепи снижает возможность регулирования напряжения УЭМ. При необходимости широкого регулирования необходимо либо уменьшить поток реакции якоря путем увеличения магнитного сопротивления на его пути, либо скомпенсировать реакцию якоря с помощью специальной обмотки, имеющей направление тока, противоположное направлению тока в якоре. В работе [6] рассматривается конструкция компенсационной обмотки, позволяющая полностью скомпенсировать реакцию якоря.

Как известно, токосъемный аппарат позволяет получать напряжение на выводах и подключать к ним нагрузку. В этом случае УЭМ работает в режиме генератора. Если в цепь ротора подать ток, то взаимодействие этого тока с магнитным потоком приводит к возникновению механических сил, однопольного электромагнитного момента и вращению ротора. По сравнению с классическими машинами постоянного тока в УЭМ отпадает необходимость в коллекторе, что существенно упрощает конструкцию. Однако вопрос выбора токосъемного аппарата является одним из ключевых. В работе [8] рассматривается проблема выбора токосъемного аппарата униполярной электрической машины. Выполнен анализ и сравнение различных типов токосъемов, а именно: системы из щеток и контактных колец, токосъема на основе жидкого металла и катящегося токосъема. Наибольшее внимание уделяется катящемуся токосъему, приводятся рекомендации по определению контактного сопротивления катящихся тел, обоснован выбор материалов контактирующих электродов. Для достижения поставленной цели были выполнены расчеты, а также создан опытный макет, на котором проведены натурные эксперименты. В результате была выбрана конструкция с катящимися медными роликами.

Достоинства УЭМ способствовали разработке ряда оригинальных конструктивных решений, защищенных патентами на изобретения [9]–[11], и 3D-моделей этих машин [5], [12]. Особый интерес представляет применение униполярных электрических машин при синтезе ГЭУ.

Результаты (Results)

Применение униполярных машин в СЭЭС в перспективе должно существенно упростить процесс распределения мощности в ГЭУ, уменьшить общее число компонентов преобразования энергии и, соответственно, стоимость всей установки. Общая эффективность системы ГЭУ будет повышена за счет уменьшения потерь преобразования мощности, что позволит снизить эксплуатационные расходы на топливо и техническое обслуживание [1], [13]–[15]. На рис. 1 приведена принципиальная схема гребной дизель-электрической установки с УЭМ, в состав которой входит дизель, электрический генератор и электродвигатель с возбуждением со стороны ротора постоянным током, а также преобразователи электрической энергии. В качестве движителя используется винт фиксированного шага.

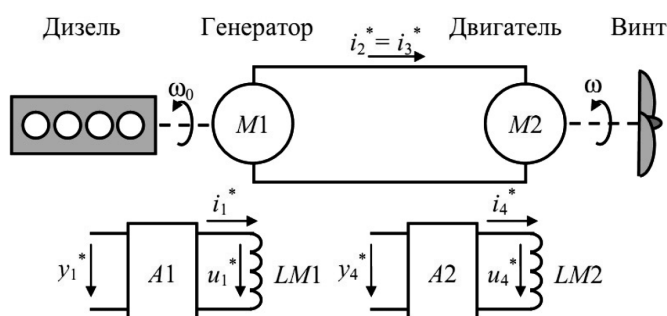


Рис. 1. Принципиальная схема гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами

На сегодняшний день исследованием униполярных машин в составе перспективных видов ГЭУ занимаются ведущие международные компании, среди которых General Atomics Electric Electromagnetic Systems Division (США), Guina Energy Technologies Pty Ltd (Австралия), Thyssen Krupp Marine Systems (Германия). Так, в 2005 г. Управление военно-морских исследований США заключило с компанией General Atomics крупный контракт на проектирование, изготовление и заводские испытания полномасштабного униполярного двигателя постоянного тока с целью его применения в качестве судового двигателя [16], [17]. В соответствии с этим контрактом компания General Atomics должна поставить гребной электродвигатель (ГЭД) мощностью 36,5 МВт и номинальными оборотами 120 об/мин, привод двигателя и вспомогательное оборудование, которые будут отправлены на объект военно-морских сил США для полнофункциональных испытаний. Эта полномасштабная система рассчитана на продвижение крупных судов, таких как эсминцы, которые в настоящее время разрабатываются военно-морскими силами США. В соответствии с предыдущими контрактами General Atomics, гребной двигатель был спроектирован, изготовлен и прошел испытания на экспериментальном стенде мощностью 300 кВт, а также был модернизирован до уровня 3,7 МВт с целью дальнейших испытаний. Модель в поперечном разрезе базовой конфигурации униполярного двигателя 3,7 МВт приведена на рис. 2.

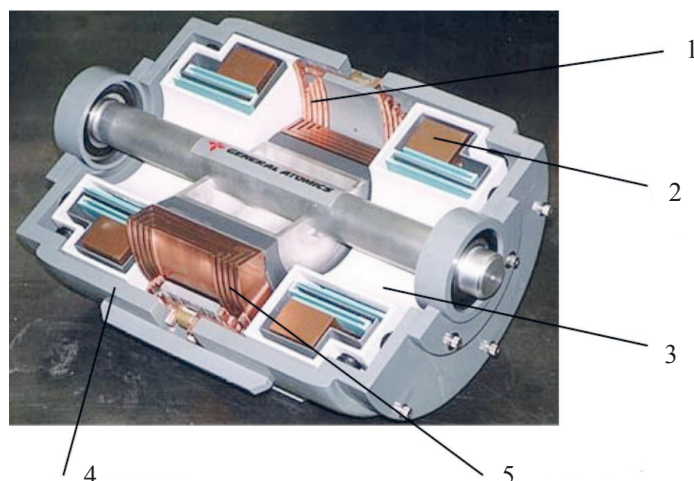


Рис. 2. Поперечный разрез базовой конфигурации униполярного двигателя 3,7 МВт компании General Atomics: 1 — статорная часть токоприемника; 2 — сверхпроводниковая катушка возбуждения; 3 — криостат; 4 — металлический корпус; 5 — многослойные проводники якоря

В униполярном двигателе компании General Atomics используются щетки из медного волокна и две сверхпроводящие катушки возбуждения из ниобий-титанового сплава (NbTi). Данная машина имеет множество преимуществ, включая очень малый диаметр и малый вес. По данным компании General Atomics, униполярная машина мощностью 3,7 МВт и оборотами 500 об/мин имеет следующие параметры:

- диаметр — 1,38 м;
- длина — 1,87 м;
- масса — 11,4 т;
- скорость под щетками — 25 м/с;
- максимальное напряжение — 145 В;
- максимальный ток — 26 кА;
- плотность тока в щетках — 155 А/см²;
- средняя магнитная индукция в роторе — 2 Тл.

Одновременно на аналогичную тему ведутся разработки в Австралии фирмой Guina Energy Technologies Pty Ltd. Одним из направлений этой компании является использование

на судах в качестве главных генераторов и ГЭД униполярных машин со сверхпроводниковыми обмотками и жидкометаллическим токосъёмом (рис. 3) [18], [19].

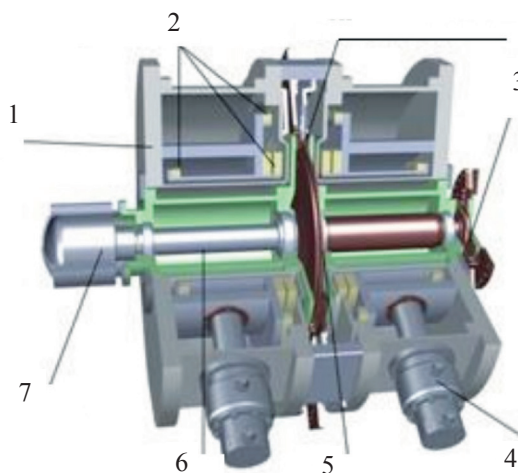


Рис. 3. Униполярная машина со сверхпроводниковыми обмотками и жидкометаллическим токосъёмом компании Guina Energy Technologies Pty Ltd:
1 — криостат; 2 — сверхпроводниковая катушка; 3 — жидкометаллический токосъём;
4 — криокамера; 5 — диск ротора; 6 — крутящий вал; 7 — выходное соединение

Жидкометаллические щетки, по мнению разработчиков компании Guina, являются ключевым компонентом технологии. По сравнению с настоящей технологией скользящего контакта, которая позволяет достичь значений плотности тока порядка $90\text{--}150\text{ А/см}^2$, щетки жидкостного металла могут достигать значений до 3000 А/см^2 на поверхностных скоростях до 200 м/с и выше и по сравнению с предыдущими имеют более низкое трение и электрические потери [20], [21]. В этой технологии применяется натрий-калиевый сплав (NaK), который имеет плотность более низкую, чем вода, и идеально подходит для такого применения. Разработчики компании Guina исследуют и другие сплавы с низкой температурой плавления, которые, по мнению ученых, могут обеспечить более высокую производительность. Данные щетки не имеют никакого механического износа и, в конечном итоге, имеют более продолжительный срок службы.

Компания Guina Energy Technologies Pty Ltd предлагает использовать униполярные машины в судовых двигательных установках в составе винто-рулевых колонок (рис. 4) [19]. По мнению компании, униполярные машины идеально подходят для безредукторной передачи энергии на винт.

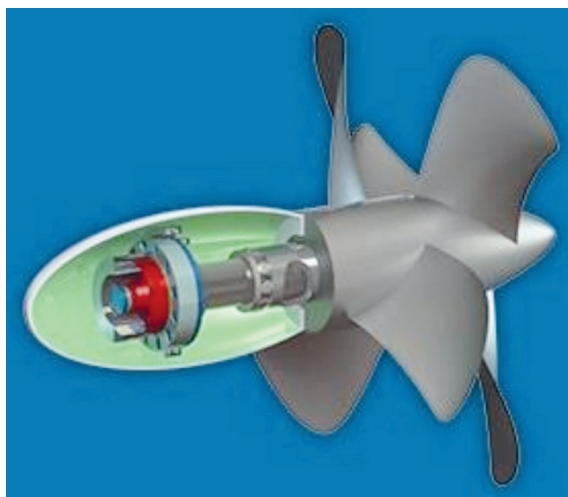


Рис. 4. Униполярная машина судовой двигательной установки в составе винто-рулевой колонки

Для интеграции униполярного ГЭД в СЭЭС компанией General Atomics предлагается упрощенная архитектура, представленная на рис. 5 [22]. Источником электроэнергии в качестве генераторной установки в данном случае предлагается высокоскоростная турбина с генератором переменного тока (*TURBINE*), который затем выпрямляется, тем самым обеспечивая относительно высокое напряжение 1500 В постоянного тока (*RECTIFIED ALTERNATOR*).

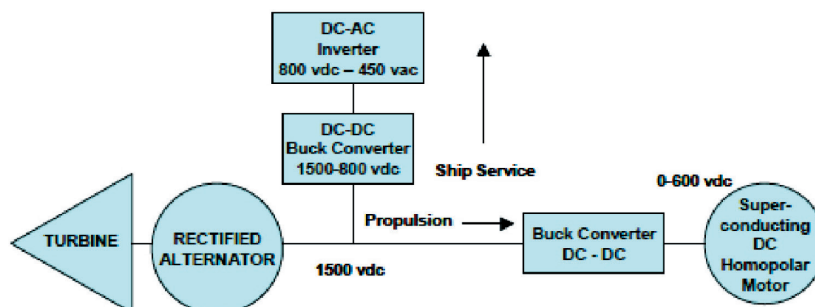


Рис. 5. Структурная схема судовой электроэнергетической системы с униполярным ГЭД фирмы General Atomics

Далее часть энергии направляется на собственные нужды судна (*Ship Service*) через понижающий преобразователь, в котором уровень напряжения снижается до 800 В (*Buck Converter DC-DC*), преобразуясь затем в переменное напряжение 450 В стандартной частоты (*DC-AC Inverter*). Основная часть энергии направляется на электродвижение (*Propulsion*), проходит через управляемый конвертер постоянного напряжения (*Buck Converter DC-DC*), который выдает необходимое напряжение от 0 до 600 В, управляя униполярным ГЭД (*Superconducting DC Homopolar Motor*).

Обсуждение (Discussion)

При сопоставлении ГЭУ с униполярным ГЭД и аналогичной системы на переменном токе с асинхронной машиной был выполнен сравнительный анализ элементов установки, представленный в следующей таблице:

Сравнительные характеристики основных элементов ГЭУ переменного тока и униполярной ГЭУ мощностью 19 МВт, 150 об/мин

Элемент ГЭУ	ГЭУ переменного тока		Униполярная ГЭУ	
	м³	т	м³	т
Генератор	34,7	50,5	38	51,5
Преобразователь частоты	21,0	9,0	—	—
Фильтр	10,6	4,3	—	—
Выпрямитель	—	—	2,8	0,85
Понижающий преобразователь	—	—	12	4,1
ГЭД	44,7	117,4	15,0	63,2
Всего	111	181,2	67,8	120 + 5 (шинопровод)

Сравнение проводилось для ГЭУ мощностью 19 МВт, генераторная установка напряжением 4160 В, 3600 об/мин. Для ГЭУ с униполярным ГЭД предполагается использовать аналогичный

генератор как для ГЭУ переменного тока, но с выпрямительным блоком. Для управления асинхронного ГЭД используется преобразователь частоты и фильтр, тогда как для ГЭУ с униполярной машиной вместо данных элементов используются выпрямитель тока и понижающий преобразователь общей массой порядка 5 т. При учете массы униполярного ГЭД было добавлено 2 т на вес компрессоров криогенной системы. Результат показал, что при использовании ГЭУ с униполярными машинами появляется существенное преимущество в экономии веса и объема порядка, соответственно, 56 т и 43 м³ (экономия более 30 %).

Заключение (Conclusion)

По мнению специалистов ведущих фирм-производителей и проектировщиков электрических машин, униполярные машины отличаются своей простотой и высокой эффективностью [6], [19], [23], [24]. Будучи чистыми электрическими устройствами постоянного тока, они являются перспективными двигателями с постоянным крутящим моментом, а также генераторами тока. Униполярные двигатели и генераторы имеют главные преимущества, а именно: низкий коэффициент веса на единицу мощности, длительный эксплуатационный период обслуживания, высокая эффективность, низкий уровень шума. Униполярные машины характеризуются присущим им низким напряжением и высокими рабочими токами, что делает задачу обеспечения связи между двигателями и генераторами трудновыполнимой. Однако применение новых технологий в области высокотемпературных сверхпроводников и жидкометаллического токосъема позволяет создавать машины достаточной мощности, удовлетворяющие жестким требованиям для применения их в системах электродвижения на судах. Передовые конструкции униполярных двигателей указывают на то, что эти электрические машины дают значительное уменьшение веса и пульсаций момента по отношению к существующим системам, таким образом, указывая на перспективность концепции применения их в составе ГЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровцинова Л. М. Перспективность гребных электрических установок с униполярными машинами / Л. М. Бровцинова, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев, А. Ю. Румянцев // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. — 2014. — № 7. — С. 37–39.
2. Романовский В. В. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок / В. В. Романовский, М. А. Сюбаев, И. М. Болвашенков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 172–178. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-172-178.
3. Ратников В. И. О применении гребных электрических установок в единых электроэнергетических системах на научно-исследовательских судах рыбопромыслового флота / В. И. Ратников // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 31–33.
4. Романовский В. В. Перспективы модернизации гребных электрических установок ледоколов / В. В. Романовский, В. С. Иванов, А. И. Лебедев // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 56–59.
5. Лазаревский Н. А. Структурные схемы гребных установок, анализ и перспективы развития / Н. А. Лазаревский, В. А. Хомяк, Ф. А. Гельвер, В. Ф. Самосейко // Судостроение. — 2012. — № 3 (802). — С. 44–47.
6. Геча В. Я. Конструкция компенсационной обмотки униполярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2014. — Т. 139. — № 2. — С. 7–10.
7. Суханов Л. А. Электрические униполярные машины / Л. А. Суханов, Р. Х. Сафиуллина, Ю. А. Бобков; под ред. Л. А. Суханова. — М.: ВНИИЭМ. Отд-ние науч.-техн. информации, стандартизации и нормализации в электротехнике, 1964. — 136 с.
8. Геча В. Я. Определение контактного сопротивления для токосъёма униполярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2015. — Т. 145. — № 2. — С. 3–7.

9. Пат. 2037942 Российская Федерация, МПК H02K 31/02. Униполярная электрическая машина / В. Р. Терровере; заяв. Пермский госуниверситет им. А. М. Горького; патентообл. Терровере Владимир Родрихович. — № 4880113/07; заявл. 05.11.1990; опубл. 19.06.1995.

10. Пат. 2158462 Российская Федерация, МПК H02K 31/00, H02K 1/06. Униполярная электрическая машина / В. А. Урманов; заяв. и патентообл. Владимир Алексеевич Урмаев. — № 99126877/09; заявл. 16.12.1999; опубл. 27.10.2000, Бюл. № 30.

11. Пат. 109350 Российская Федерация, МПК H02K 31/02. Униполярная электрическая машина постоянного тока / А. В. Стыскин, Р. Р. Ишмухаметов; заяв. и патентообл. Уфимский государственный авиационный технический университет. — № 2011116714/07; заявл. 27.04.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28.

12. Смирнов А. Ю. Синтез 3D-моделей униполярной индукторной машины / А. Ю. Смирнов, А. Б. Дарьенков, А. Ю. Зимин, Т. Н. Уснунц-кригер // *Электротехника*. — 2018. — № 3. — С. 12–17.

13. Романовский В. В. Качество электроэнергии гребных электрических установок судов ледового плавания и ледоколов / В. В. Романовский, А. И. Лебедев, А. Г. Гостев // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 6 (28). — С. 56–60.

14. Румянцев А. Ю. Направление развития гребных электрических установок / А. Ю. Румянцев // Сборник тезисов докладов национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 56–58.

15. Румянцев А. Ю. Пути повышения энергоэффективности судовых электроэнергетических систем / А. Ю. Румянцев // Труды научно-методической конференции «Инновационные технологии в области электропривода и электрооборудования». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 37–38.

16. General Atomics Company [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ga.com/general-atomics-to-design-and-fabricate-advanced-propulsion-motor-for-us-navy> (дата обращения: 26.04.2019).

17. Gieras J. F. Superconducting electrical machines-State of the art / J. F. Gieras // *Organ*. — 2009. — Vol. 12. — Pp. 09.

18. Fuger R. Superconducting Motor Developments at Guina Energy Technologies / R. Fuger, A. Guina, D. Sercombe, J. Kells, A. Matsekh, K. Labes, T. Lissington, C. Fabian, G. Chu // 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). — IEEE, 2015. — Pp. 362–363. DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453613.

19. Fuger R. A superconducting homopolar motor and generator—new approaches / R. Fuger, A. Matsekh, J. Kells, D. B. T. Sercombe, A. Guina // *Superconductor Science and Technology*. — 2016. — Vol. 29. — Is. 3. — Pp. 034001.

20. Schaubel K. M. Development of A superconducting Magnet System for The ONR / GENERAL Atomics Homopolar Motor / K.M. Schaubel, A.R. Langhorn, W.P. Creedon, N.W. Johanson, S. Sheynin, R.J. Thome // AIP Conference Proceedings. — AIP, 2006. — Vol. 823. — Is. 1. — Pp. 1819–1826. DOI: 10.1063/1.2202611.

21. Исследовательский портал [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://revolution-green.com/homopolar-motor-liquid-metal-brushes/#disqus_thread (дата обращения: 26.04.2019).

22. Thome R. J. Homopolar motor technology development / R. J. Thome, W. Creedon, M. Reed, E. Bowles, K. Schaubel // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. — IEEE, 2002. — Vol. 1. — Pp. 260–264. DOI: 10.1109/PESS.2002.1043229.

23. Maleki T. Homopolar micromotor with liquid metal rotor / T. Maleki, B. Ziaie // TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. — IEEE, 2007. — Pp. 1135–1138. DOI: 10.1109/SENSOR.2007.4300335.

24. Wang Z. Performance of twin-rotor DC homopolar motor (2011). LSU Master's Theses. 1136 [Электронный ресурс] / Z. Wang. — Режим доступа: https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/1136 (дата обращения: 26.04.2019).

REFERENCES

1. Brovtsinova, L. M., V. F. Samoseyko, A. V. Saushev, and A. Yu. Romyantsev. “Prospects of rowing electrical units with unipolar cars.” *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya* 7 (2014): 37–39.

2. Romanovskiy, Viktor Viktorovich, Mirza Alimovich Sjubayev, and Igor Markovich Bolvashenkov. "Selection basic data of electrical machines for electrical propulsion systems." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(34) (2015): 172–178. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-172-178.
3. Ratnikov, V. I. "O primeneni grebnykh elektricheskikh ustanovok v edinykh elektro-energeticheskikh sistemakh na nauchno-issledovatel'skikh sudakh rybopromyslovogo flota." *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 31–33.
4. Romanovskii, V. V., V. S. Ivanov, and A. I. Lebedev. "Perspektivy modernizatsii grebnykh elektricheskikh ustanovok ledokolov." *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 56–59.
5. Lazarevsky, N. A., V. A. Khomyak, F. A. Gelver, and V. F. Samoseyko. "Block diagrams of propulsion plants, analysis and prospects." *Shipbuilding* 3(802) (2012): 44–47.
6. Gecha, V. Ya., A. B. Zakharenko, and A. K. Nadkin. "Konstruktsiya kompensatsionnoi obmotki unipolyarnoi elektricheskoi mashiny." *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* 139.2 (2014): 7–10.
7. Sukhanov, L. A., R. Kh. Safiullina, and Yu. A. Bobkov. *Elektricheskie unipolyarnye mashiny*. M.: VNIIEM. Otd-nie nauch.-tekhn. informatsii, standartizatsii i normalizatsii v elektrotekhnike, 1964.
8. Gecha, V. Ya., A. B. Zakharenko, and A. K. Nadkin. "Opredelenie kontaktnogo soprotivleniya dlya tokos»ema unipolyarnoi elektricheskoi mashiny." *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* 145.2 (2015): 3–7.
9. Terrovere, Vladimir Rodrikovich. RU 2 037 942 C1, IPC H 02 K 31/02. Unipolyarnaya elektricheskaya mashina. Russian Federation, assignee. Publ. 19 June 1995.
10. Urmaev, Vladimir Alekseevich. RU 2 158 462 C1, IPC H 02K 31/00, H 02K 1/06. Unipolyarnaya elektricheskaya mashina. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Oct. 2000.
11. Styskin, A. V., and R. R. Ishmukhametov. RU 109 350 U1, IPC H 02K 31/02. Unipolyarnaya elektricheskaya mashina postoyannogo toka. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Oct. 2011.
12. Smirnov, A. Y., A. B. Dar'enkova, A. Y. Zimin, and T. N. Usnunts-Kriger. "Synthesis of 3D Models of a Unipolar Inductor Machine." *Russian Electrical Engineering* 89.3 (2018): 147–151. DOI: 10.3103/S1068371218030161.
13. Romanovsky, V. V., and A. I. Lebedev. "Electricity quality of rowing electrical installations of ice ships and icebreakers." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(28) (2014): 56–60.
14. Rumyantsev, A. Yu. "Napravlenie razvitiya grebnykh elektricheskikh ustanovok." *Sbornik tezisev dokladov natsional'noi ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava GUMRF imeni admiral S. O. Makarova*. SPb: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. 56–58.
15. Rumyantsev, A. Yu. "Puti povysheniya energoeffektivnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem." *Trudy nauchno-metodicheskoi konferentsii «Innovatsionnye tekhnologii v oblasti elektroprivoda i elektrooborudovaniya»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018. 37–38.
16. General Atomics Company. Web. 26 Apr. 2019 <<http://www.ga.com/general-atomics-to-design-and-fabricate-advanced-propulsion-motor-for-us-navy>>.
17. Gieras, Jacek F. "Superconducting electrical machines-State of the art." *Organ* 12 (2009): 09.
18. Fuger, Rene, Ante Guina, David Sercombe, John Kells, Arkadiy Matsekh, Kurt Labes, Tony Lissington, Cesimiro Fabian, and Grace Chu. "Superconducting Motor Developments at Guina Energy Technologies." *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*. IEEE, 2015. 362–363. DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453613.
19. Fuger, Rene, Arkadiy Matsekh, John Kells, D. B. T. Sercombe, and Ante Guina. "A superconducting homopolar motor and generator—new approaches." *Superconductor Science and Technology* 29.3 (2016): 034001.
20. Schaubel, K. M., A. R. Langhorn, W. P. Creedon, N. W. Johanson, S. Sheynin, and R. J. Thome. "Development of a superconducting magnet system for the ONR/General Atomics homopolar motor." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 823. No. 1. AIP, 2006. 1819–1826. DOI: 10.1063/1.2202611.
21. Issledovatel'skii portal. Web. 26 Apr. 2019 <https://revolution-green.com/homopolar-motor-liquid-metal-brushes/#disqus_thread>.
22. Thome, R. J., W. Creedon, M. Reed, E. Bowles, and K. Schaubel. "Homopolar motor technology development." *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Vol. 1. IEEE, 2002. 260–264. DOI: 10.1109/PESS.2002.1043229.
23. Maleki, Teimour, and Babak Ziaie. "Homopolar micromotor with liquid metal rotor." *TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*. IEEE, 2007. 1135–1138. DOI: 10.1109/SENSOR.2007.4300335.
24. Wang, Z. *Performance of twin-rotor DC homopolar motor* (2011). LSU Master's Theses. 1136. Web. 26 Apr. 2019 <https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/1136>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Румянцев Алексей Юрьевич —

старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *ep-gumrf@bk.ru, stehnika@mail.ru,*
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Самосейко Вениамин Францевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *ep-gumrf@bk.ru,*
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Саушев Александр Васильевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rumyantsev, Aleksey Yu. —

Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *ep-gumrf@bk.ru, stehnika@mail.ru,*
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Samosejko, Veniamin F. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *ep-gumrf@bk.ru,*
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Saushev, Alexander V. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 9 июля 2019 г.

Received: July 9, 2019.