

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581

SWITCHED RELUCTANCE DRIVE SRD-1000-1100 IN THE ELECTROMOTIVE SYSTEMS

V. V. Romanovsky, B. V. Nikiforov, A. M. Makarov

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

Very high demands concerning reliability, operational characteristics and functioning in full are being put on the modern ship electric drives. More than twenty years of experience in the progressive implementation of switched reluctance electric drives of auxiliary mechanisms on submarines and more powerful drives on the supply ship Victor Konetsky has qualitatively developed technologies for designing and producing the switched reluctance drives, successfully competing with permanent-magnet electric motors. The results of the preliminary design of the switched reluctance drive SRD 1000-1100 with a power of 1000 kW, 1100 rpm are considered in the paper. The basic principle of the electric propulsion system representing sectioning the executive control of the propulsion motor into several independently working parts is proposed. The distinctive features and advantages of the switched reluctance drive in comparison with an asynchronous motor are considered, and the oscillogram of a single-phase failure of the switched drive is also shown. The results of the preliminary design of the 1000 kW switched inductor drive have been illustrated. Besides, the structure of the switched reluctance drive 1000-1100, which is shown as the concept of building a complete electric drive, is considered. This concept includes the following aspects: the complete electric drive is based on the modular equipment, the sections separate control is organized, all intellectual control modules are connected by a common CAN network, etc. The parameters for comparing an asynchronous propulsion motor of Schorch company and switched reluctance drive 1000-1100 are shown in the table. Therefore, for propulsion systems there is a tendency to create the electric drive systems based on the switched reluctance motors.

Keywords: electric drive, propulsion electric motor, switched reluctance motors, permanent magnets, asynchronous motor.

For citation:

Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Switched reluctance drive SRD-1000-1100 in the electromotive systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 573–581. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581.

УДК 621:313:3

ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ПРИВОД ВИП-1000-1100 В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров

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

Рассмотрены требования, предъявляемые к современным судовым электроприводам, касающиеся надежности, эксплуатационных характеристик и функционирования в полном объеме. Проанализированы данные, подтвержденные более чем двадцатилетним опытом работы по поступательному внедрению вентильных индукторных электроприводов вспомогательных механизмов на подводных лодках и более мощных приводов на корабле-снабженце «Виктор Конецкий», который качественно развил технологии проектирования и производства вентильно-индукторных двигателей, успешно конкурирующих с электродвигателями с постоянными магнитами. В работе рассматриваются результаты аванпроекта вентиль-



но-индукторного привода 1000-1100 мощностью 1000 кВт, 1100 об/мин. Предлагается основной принцип построения системы электродвижения — секционирование исполнительного управления гребным электродвигателем на несколько независимо работающих частей. Рассмотрены отличительные особенности и преимущества вентильно-индукторного привода в сравнении с асинхронным двигателем, а также показана осциллограмма отказа одной фазы вентильного двигателя. Проиллюстрированы результаты предварительного проектирования вентильно-индукторного привода 1000-1100, которая показана как концепция построения комплектного электропривода: комплектный электропривод строится на модульном оборудовании, организуется раздельное управление секциями, все интеллектуальные модули управления объединяются общей САN-сетью и др. Параметры для сравнения асинхронного гребного двигателя фирмы Schorch и вентильно-индукторны в таблице. Следовательно, для пропульсивных систем прослеживается тенденция создания систем электродвижения на основе вентильно-индукторных двигателей.

Ключевые слова: электропривод, гребной электрический двигатель, вентильно-индукторный двигатель, постоянные магниты, асинхронный двигатель.

Для цитирования:

Романовский В. В. Вентильно-индукторный привод ВИП-1000-1100 в системе электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 573–581. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581.

Введение (Introduction)

К современным судовым электроприводам механизмов предъявляются следующие требования: высокая надежность, расширение периодов их функционирования без обслуживания и наблюдения, обеспечение оптимальных условий резервирования и постоянной готовности к действию, возможность автоматизации технологических процессов исполнительных механизмов, улучшение эффективности использования электромеханизмов на основе совершенствования механических характеристик, повышение величин ускорений в динамических режимах работы при плавном регулировании скорости, выбор оптимальных режимов технологических операций.

Более чем двадцатилетний опыт работы по поступательному внедрению [1] вентильных индукторных электроприводов (ВИП) вспомогательных механизмов на подводных лодках, а также более мощных приводов (2 МВт) на корабле-снабженце «Виктор Конецкий» и предприятиях промышленности позволил качественно развить технологии проектирования и производства вентильно-индукторных двигателей (ВИД), успешно конкурирующих с электродвигателями с постоянными магнитами (ПМ) на роторе. В машине с ПМ требуется защита от металлической пыли, она боится сильных электромагнитных полей и перегрева, и, следовательно, диапазон рабочих температур таких машин ограничен. При коротком замыкании обмотки отключение машины с ПМ от сети не устраняет проблему нагрева обмотки из-за протекания токов короткого замыкания. В этом случае машина может превратиться в самовозгорающийся объект.

В работе рассматриваются результаты аванпроекта ВИП-1000-1100 мощностью 1000 кВт, 1100 об/мин. Предлагается основной принцип построения [2] системы электродвижения (СЭД) — секционирование исполнительного управления гребным электродвигателем (ГЭД) на несколько независимо работающих частей, каждая из которых имеет свой собственный микропроцессорный контроллер и пульт оперативного управления. При этом управление каждой секцией ГЭД — автономное и независимое. Функционирование синхронизируется по датчикам положения ротора, которые, распараллеливая сигналы по всем секциям системы управления, обеспечивают суммирование электромагнитных моментов секций непосредственно на валу машины с достижением высокой надежности привода.

Возможность индивидуального или группового управления секциями упрощает как процедуру настройки привода (может выполняться посекционно), так и процедуру приемо-сдаточных испытаний. В последнем случае одна из секций, расположенных в первом [3] пакете, действует в качестве двигателя, нагрузкой для нее является секция, работающая генератором во втором па-



кете. Предлагаемая структура СЭД не требует изготовления дорогостоящего специализированного стенда для испытания ГЭД.

В работе противопоставлены основные особенности ВИД и асинхронного двигателя (АД), представлены эскизы ВИП мощностью 1000 кВт, а также рассмотрена концепция построения комплектного электропривода. Данный комплекс методов и средств дает возможность гарантированного оперативного создания ВИП-1000 кВт с внедрением их в ЭЭС с СЭД на корабли-спасатели.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Отличительные особенности вентильно-индукторного привода в сравнении с АД. Предлагаемый тип двигателя отличается конструктивной простотой и надежностью. На роторе двигателя отсутствуют обмотки и постоянные магниты. Обмотка статора выполнена из сосредоточенных, концентрических катушек, и поэтому двигатель не требует ремонта и обслуживания по регламенту.

Особенность устройства ВИД и конструкции фазных обмоток предопределяют его высокую надежность и живучесть. Это одно из основных важных практических преимуществ ВИД по сравнению с традиционными типами электрических машин — при замыкании фазных обмоток или при межвитковом замыкании фазной обмотки АД выйдет из строя. Для предотвращения этого в асинхронных приводах предусматриваются специальные электронные защитные устройства, работоспособность которых в период эксплуатации подтверждается только при наступлении аварийной ситуации. Невозможность межфазного замыкания обмоток ВИД гарантируется конструкцией обмотки статора, не допускающей пересечения фазных катушек. При межвитковом замыкании [4] фазной катушки возникает режим «токового коридора», в который входит поврежденная фаза с выдачей сообщения о нештатном режиме на панель индикации. Этот режим имеет место при пусковых режимах и режимах работы при перегрузках. При необходимости блок управления с ВИД может работать в таком нештатном режиме при отключенных нескольких фазах.

Другим важным преимуществом ВИП, по сравнению с частотно-управляемым АД, является его многофазность, которая упрощает компоновку силовой части преобразователя и с учетом независимости работы фаз предопределяет беспрецедентную живучесть привода. Отказ одной или даже нескольких фаз не нарушает работу двигателя, так как при наличии некоторого резерва по току и напряжению фаз снижение выходной мощности частично или полностью компенсируется увеличением нагрузки фаз, оставшихся в работе. Указанный эффект показан на осциллограммах (рис. 1), полученных при работе пятифазного ВИП в пяти- и четырехфазном режимах.



Рис. 1. Осциллограмма работы пятифазного ВИП в пяти- и четырехфазном режимах



2019 rog. Tom 11. Nº 3

Из осциллограмм видно, что скоростной режим работы не меняется (частота импульсов в обоих случаях одинакова). Отключение одной фазы компенсируется работой регулятора скорости, который поднимает напряжение фазы с 290 до 330 В, т. е. на 14 %. Примерно на такой же процент возрастает амплитуда импульсов тока фазы. В результате средняя мощность фазы увеличивается на 30 %, а номинальная мощность на валу достигается четырьмя фазами.

Блок управления собирается из отдельных взаимозаменяемых модулей, а его конструкция обеспечивает доступность ко всем элементам схемы. При выходе из строя части каналов ВИД сохраняет свою работоспособность со снижением мощности [5], [6].

Основные преимущества ВИП, подтвержденные в результате многолетнего опыта разработок и исследований, выполненных как в нашей стране, так и за рубежом:

 перегрузочная способность двигателя в пусковом режиме порядка четырехкратной номинальной величины вращающего момента и выше при правильном выборе элементной базы преобразователя;

– высокий КПД двигателя (для машин большой мощности порядка 97–98 %) и инвертора, так как он проектируется на низкую частоту 100–200 Гц, в отличие от преобразователя АД, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при частоте порядка 2000 Гц;

– конструкция магнитопроводов статора, ротора и катушечных обмоток двигателя проста ввиду отсутствия пересекающихся лобовых частей. Это, согласно данным источников [7], [8], свидетельствует о простой технологичности, низких материалоемкости, трудозатратах и стоимости при изготовлении, об увеличенном сроком надежности, долговечности и ремонтопригодности;

 ввиду отсутствия на роторе двигателя обмоток, отвод тепла не требуется (потери в стали ротора небольшие);

 – пульсации вращающего момента двигателя сводятся к 2 % и менее посредством оптимизации контроля временными параметрами импульса напряжения и геометрии двигателя;

– живучесть ВИП увеличена из-за наличия магнитной независимости фазных обмоток в двигателе и электрической независимости фазных блоков в преобразователе питания. Повреждение одной или нескольких фаз, в отличие от АД, не приведет к частичной потере работоспособности привода, а всего лишь к частичному уменьшению мощности;

– в силовой цепи преобразователя практически исключаются сквозные короткие замыкания ввиду того, что в каждом плече стоит только один транзистор, а не два, как в преобразователе для АД. Предварительные эскизы проектирования ВИД [9] мощностью 1000 кВт приведены на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Ротор ВИД: охлаждение двигателя жидкостное; внутренний воздух циркуляции через жидкостной радиатор посредством вентилятора





Рис. 3. ВИД в сборе с системой охлаждения

Структура ВИП-1000-1100. Концепция построения комплектного электропривода:

1. Комплектный электропривод ВИП-1000-1100 строится на модульном оборудовании: один комплект оборудования используется для управления двумя главными [10], [11] секциями машины (полуфазы *A*, *B*, *C* и полуфазы *D*, *E*, *F*), второй— для контроля дополнительными двумя секциями машины (полуфазы *A'*, *B'*, *C'* и полуфазы *D'*, *E'*, *F'*). Поэтому предлагается два блока преобразователей, каждый из которых осуществляет контроль управления одной из четырех секций машины.

2. С одного блока модулей преобразователей производится контроль над секциями в различных блоках машины, что дает возможность тестировать данные секции во время пусконаладочных испытаний электропривода. Организуется поочередный контроль над секциями: секцией первого пакета в двигательном режиме, секцией второго пакета в генераторном режиме. Датчик положения ротора допустим один на обе секции. На обеих секциях допускается наличие одного датчика положения ротора.

3. Интеллектуальные блоки управления (контроллеры, пульты управления секциями и контроллеры выпрямителей) соединены посредством САN-сети. В нее включены: пара контроллеров блоков преобразователей, два пульта оперативного управления и контроллер выпрямителей.

4. Контроллер выпрямителей осуществляет кроме основных функций также функцию контроллера верхнего уровня управления приводом. Для этого он имеет блок дискретного ввода / вывода и интерфейс, например, MODBUS RTU.

5. Дискретные входы поступают сразу в оба шкафа комплектного ВИП, второй может работать на половинном моменте. Дискретные выходы [12], [13] индивидуальны для каждого шкафа, чем достигается разделение статусной информации по шкафам.

Предварительное проектирование в очередной раз подтвердило возможность реализации отечественной ГЭД на основе ВИП на мощности до 4–5 МВт.

В настоящее время российские проекты кораблей создаются в основном на основе разработок фирмы *Schorch*. Параметры АД [14] фирмы *Schorch* и электропривода ВИП-1000-1100 приведены в таблице. Данные по ВИП — предварительные и подлежат уточнению в соответствии с предъявляемыми техническими требованиями.



		, , , , ,
Наименование параметра	Электропривод Schorch 8225623 (АД)	Электропривод ВИП-1000-1100
Номинальная мощность двигателя, кВт	1600	1000
Номинальная частота вращения, об/мин	1000	1100
Диапазон регулирования, об/мин	94–1200	100–1200
Напряжение питания, В	2×960 (переменное синусоидальное)	640, однополярное пульсирующее (выпрямленное 400 В, 50 Гц, 3 ф)
Частота питающего напряжения, Гц	5–60	5–220
Количество фаз питающего напряжения	2×3	6
Ток в фазе, А	2×705	6×864
Максимальный пусковой ток, А	3I _{HOM}	Не более I _{ном}
Пусковой момент, Н·м	1,2 <i>M</i> _{ном}	2 <i>M</i> _{ном}
Номинальный режим работы	S-продолжительный	S-продолжительный
Габаритные размеры (Д×Ш×В) с учетом длины вала, мм	2592×2022×2141	1930×1375×1710
Способ охлаждения	Жидкостное	Жидкостное
Степень защиты двигателя / коробки выводов, IP	IP55/IP55	IP55/IP55
Масса, кг	8800	6800
КПД, %	—	97,9
Номинальная мощность, кВт	-	_
Номинальное входное напряжение (род тока, амплитуда напряжения)	-	380 В, 50 Гц, 3 ф
Виды защит	_	Перегрузка по току, по превышению / снижению входного напряжения, по температуре подшипников, обмоток двигателя, силовых транзисторов и др.
Управление	_	Местное с панели блока управления, дистанционное при помощи RS-485
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	-	1600×800×2000 (два шкафа типа Ritall 2000×800×800)
Масса, кг	-	950
Климатическое исполнение IP	-	IP24
Способ охлаждения	-	Жидкостное
КПД, %	-	98

Сравнительные параметры асинхронного ГЭД и ВИД

Выводы (Conclusion)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В данной работе показана возможность создания ВИП-1000-1100 с внедрением в ЭЭС с СЭД на корабли-спасатели.

2. При создании мощных электроприводов, как правило, дополнительно изготавливают полномасштабную машину, которую затем используют [15] в качестве нагрузочной и экспериментальной, но в данном случае в этом нет необходимости, как и при разработке индукторного ГЭД до 30 МВт для судов ледокольного класса.



3. Для успешного проектирования ВИД мощностью более 4–5 МВт необходимо совершенствование существующих компьютерных моделей, основанных на статистике реальных токов и напряжений, а также создание экспериментального стенда для получения новых методик, так как современные компьютерные лаборатории не учитывают, в частности, особенности нагрева обмоток шинного типа в индукторных машинах большой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Романовский В. В.* Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

2. *Martin R*. Electromagnetic considerations for a six-phase switched reluctance motor driven by a three-phase inverter / R. Martin, J. D. Widmer, B. C. Mecrow, M. Kimiabeigi, A. Mebarki, N. L. Brown // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2016. — Vol. 52. — Is. 5. — Pp. 3783–3791. DOI: 10.1109/TIA.2016.2564344.

3. *Никифоров Б. В.* Перспективы применения вентильных индукторных приводов в составе СЭД ДЭПЛ / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения. — 2013. — № 5. — С. 11–16.

4. *Peng F.* An asymmetric three-level neutral point diode clamped converter for switched reluctance motor drives / F. Peng, J. Ye, A. Emadi // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2016. — Vol. 32. — Is. 11. — Pp. 8618–8631. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2642339.

5. *Arbab N*. Thermal modeling and analysis of a double-stator switched reluctance motor / N. Arbab, W. Wang, C. Lin, J. Hearron, B. Fahimi // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2015. — Vol. 30. — Is. 3. — Pp. 1209–1217. DOI: 10.1109/TEC.2015.2424400.

6. *Никифоров Б. В.* Расчет и проектирование ВИП-600 кВт для компрессоров горно-обогатительных комбинатов / Б. В. Никифоров, И. А. Квятковский // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения: материалы межотраслевого семинара. — Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2014. — С. 97–105.

7. Лагода Ф. И. Вентильные двигатели / Ф. И. Лагода // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 76–80.

8. *Sun W.* Vibration effect and control of In-Wheel Switched Reluctance Motor for electric vehicle / W. Sun, Y. Li, J. Huang, N. Zhang // Journal of Sound and Vibration. — 2015. — Vol. 338. — Pp. 105–120. DOI: 10.1016/ j.jsv.2014.10.036.

9. *Rahmanian E.* Maximum Power Point Tracking in Grid Connected Wind Plant by Using Intelligent Controller and Switched Reluctance Generator / E. Rahmanian, H. Akbari, G.H. Sheisi // IEEE Transactions on Sustainable Energy. — 2017. — Vol. 8. — Is. 3. — Pp. 1313–1320. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2678679.

10. *Wang S.Y.* Adaptive TSK fuzzy sliding mode control design for switched reluctance motor DTC drive systems with torque sensorless strategy / S.Y. Wang, F.Y. Liu, J.H. Chou // Applied Soft Computing. — 2018. — Vol. 66. — Pp. 278–291. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.02.023.

11. *Saha N*. Speed control with torque ripple reduction of switched reluctance motor by Hybrid Many Optimizing Liaison Gravitational Search technique / N. Saha, S. Panda // Engineering science and technology, an international journal. — 2017. — Vol. 20. — Is. 3. — Pp. 909–921. DOI: 10.1016/j.jestch.2016.11.018.

12. *Lin C*. Analysis of Vibration in Permanent Magnet Synchronous Machines due to Variable Speed Drives / C. Lin, S. Wang, M. Moallem, B. Fahimi, C. Tschida // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2016. — Vol. 32. — Is. 2. — Pp. 582–590. DOI: 10.1109/TEC.2016.2638122.

13. *Hua W*. An inductance Fourier decomposition-based current-hysteresis control strategy for switched reluctance motors / W. Hua, J. Qi, M. Jia // AIP Advances. — 2017. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 056661. DOI: 10.1063/1.4977232.

14. *Aiso K*. Reluctance Magnetic Gear and Flux Switching Magnetic Gear for High Speed Motor System / K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). — IEEE, 2017. — C. 2445–2452. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096470.

15. *Mihic D.S.* A new nonlinear analytical model of the SRM with included multiphase coupling / D.S. Mihic, M.V. Terzic, S.N. Vukosavic // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2017. — Vol. 32. — Is. 4. — Pp. 1322–1334. DOI: 10.1109/TEC.2017.2707587.



REFERENCES

1. Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Prospects for the development of electromotive systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

2. Martin, Richard, James D. Widmer, Barrie C. Mecrow, Mohammad Kimiabeigi, Abdeslam Mebarki, and Neil L. Brown. "Electromagnetic considerations for a six-phase switched reluctance motor driven by a three-phase inverter." *IEEE Transactions on Industry Applications* 52.5 (2016): 3783–3791. DOI: 10.1109/ TIA.2016.2564344.

3. Nikiforov, B.V., and A.A. Tsvetkov. "Perspektivy primeneniya ventil'nykh induktornykh privodov v sostave SED DEPL." *Intellektual'nye elektromekhanicheskie sistemy i kompleksy spetsial'nogo naznacheniya* 5 (2013): 11–16.

4. Peng, Fei, Jin Ye, and Ali Emadi. "An asymmetric three-level neutral point diode clamped converter for switched reluctance motor drives." *IEEE Transactions on Power Electronics* 32.11 (2016): 8618–8631. DOI: 10.1109/ TPEL.2016.2642339.

5. Arbab, Nasim, Wei Wang, Chenjie Lin, Joseph Hearron, and Babak Fahimi. "Thermal modeling and analysis of a double-stator switched reluctance motor." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 30.3 (2015): 1209–1217. DOI: 10.1109/TEC.2015.2424400.

6. Nikiforov, B.V., and I.A. Kvyatkovskii. "Raschet i proektirovanie VIP-600 kVt dlya kompressorov gorno-obogatitel'nykh kombinatov." *Intellektual'nye elektromekhanicheskie sistemy i kompleksy spetsial'nogo naznacheniya: materialy mezhotraslevogo seminara*. Novocherkassk: YuRGPU (NPI), 2014. 97–105.

7. Lagoda, F.I. "Ventil'nye dvigateli." *Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vserossiiskoi nauch. konf. studentov, magistrantov, aspirantov.* Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 76–80.

8. Sun, Wei, Yinong Li, Jingying Huang, and Nong Zhang. "Vibration effect and control of In-Wheel Switched Reluctance Motor for electric vehicle." *Journal of Sound and Vibration* 338 (2015): 105–120. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.10.036

9. Rahmanian, Ehsan, Hasan Akbari, and G. Hossein Sheisi. "Maximum power point tracking in grid connected wind plant by using intelligent controller and switched reluctance generator." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 8.3 (2017): 1313–1320. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2678679.

10. Wang, Shun-Yuan, Foun-Yuan Liu, and Jen-Hsiang Chou. "Adaptive TSK fuzzy sliding mode control design for switched reluctance motor DTC drive systems with torque sensorless strategy." *Applied Soft Computing* 66 (2018): 278–291. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.02.023.

11. Saha, Nutan, and Sidhartha Panda. "Speed control with torque ripple reduction of switched reluctance motor by Hybrid Many Optimizing Liaison Gravitational Search technique." *Engineering science and technology, an international journal* 20.3 (2017): 909–921. DOI: 10.1016/j.jestch.2016.11.018.

12. Lin, Chenjie, Shiliang Wang, Mehdi Moallem, Babak Fahimi, and Colin Tschida. "Analysis of vibration in permanent magnet synchronous machines due to variable speed drives." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 32.2 (2016): 582–590. DOI: 10.1109/TEC.2016.2638122.

13. Hua, Wei, Ji Qi, and Meng Jia. "An inductance Fourier decomposition-based current-hysteresis control strategy for switched reluctance motors." *AIP Advances* 7.5 (2017): 056661. DOI: 10.1063/1.4977232.

14. Aiso, Kohei, Kan Akatsu, and Yasuaki Aoyama. "Reluctance magnetic gear and flux switching magnetic gear for high speed motor system." *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, 2017. 2445–2452. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096470.

15. Mihic, Dragan S., Mladen V. Terzic, and Slobodan N. Vukosavic. "A new nonlinear analytical model of the SRM with included multiphase coupling." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 32.4 (2017): 1322–1334.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	
Романовский Виктор Викторович —	Romanovsky, Viktor V. —	
доктор технических наук, профессор	Dr. of Technical Sciences, professor	
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала	Admiral Makarov State University of Maritime	
С. О. Макарова»	and Inland Shipping	
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,	
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation	
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru	e-mail: kaf edas@gumrf.ru	



Никифоров Борис Владимирович доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru Макаров Арсений Михайлович аспирант Научный руководитель: Романовский Виктор Викторович ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: makar tnt@mail.ru, kaf edas@gumrf.ru

Nikiforov, Boris 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: *boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru* **Makarov, Arsenii M.**— Postgraduate *Supervisor*: Romanovsky, Viktor V. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 30 апреля 2019 г. Received: April 30, 2019.