

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-357-366

DEVELOPMENT OF THE PROPULSION SWITCHED RELUCTANCE DRIVE FOR THE VESSELS WITH HIGH POWER ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

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

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

Currently, a promising direction for the vessels with electric propulsion is the creation of switched-reluctance drives. The experience of successful creation of ship's switched reluctance drives samples predetermined the implementation in order to verify the calculated methods and design solutions of 500 kW switched reluctance drive sample. A 9-phase switched reluctance drive with conventional design of the magnetic system and corresponding number of inverters is selected. It has been shown that the multiphase converter control from one microcontroller becomes irrational due to the limited number of specialized discrete outputs, and effective control over the entire frequency range is performed by the time parameters and voltage amplitude. To evaluate the adjusting properties of 500 kW switched reluctance drive the load characteristics are obtained, from which it follows that the electric drive works stably in the frequency range of 200–850 min⁻¹ and load of 10–100 % both in the motor and in the generator modes. The joint operation of the switched reluctance drive both in the motor and in the generator mode, in the presence of a mechanical connection between their shafts and electrical connection through the power supply circuits is experimentally evaluated. The graphs of the motor and generator currents, as well as the inductance graphs reconstructed from them, are given. In addition, the phase portraits of the phase switching cycle in the motor and generator modes under the mutual loading of the switched reluctance drive are considered. All these tests made it possible in a short time to create the switched reluctance drive for the supply vessel "Victor Konetsky", successfully operated at the fleet, as well as to carry out a number of technical projects of the switched reluctance drive for 4–13 MW electric propulsion systems.

Keywords: electric drive, propulsion electrical motor, switched reluctance drive, inverter, energy.

For citation:

Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Development of the propulsion switched reluctance drive for the vessels with high power electric propulsion systems". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 357–366. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-357-366.

УДК 621:313:3

РАЗРАБОТКА ГРЕБНОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

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

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

Проанализирован процесс создания вентильно-индукторных двигателей, являющийся в настоящее время перспективным направлением для судов с электродвижением. Отмечается, что опыт успешного создания образцов корабельных вентильно-индукторных приводов предопределил реализацию в целях проверки расчетных методик и конструктивных решений образца вентильно-индукторного двигателя мощностью 500 кВт. Выбран вариант девятифазного вентильно-индукторного двигателя с традиционной конструкцией магнитной системы и соответствующим числом инверторов. Показано, что управление многофазным преобразователем от одного микроконтроллера становится нерациональным из-за ограниченного числа специализированных дискретных выводов, а эффективное управление во всем диапазоне

частот производится временными параметрами и амплитудой напряжения. Для оценки регулировочных свойств вентильно-индукторного двигателя мощностью 500 кВт на стенде получены нагрузочные характеристики, из которых следует, что электропривод устойчиво работает в диапазоне частот 200–850 мин⁻¹ и нагрузки 10–100 % как в двигательном, так и в генераторном режиме. Выполнена экспериментальная оценка совместной работы вентильно-индукторного двигателя как в двигательном, так и в генераторном режиме при наличии механической связи между их валами и электрической связи по цепям питания. Приведены графики токов двигателя и генератора, а также восстановленные по ним графики индуктивностей соответственно. Кроме того, рассмотрены фазовые портреты цикла коммутации фазы в двигательном и генераторном режимах при взаимном нагружении вентильно-индукторного двигателя. Все эти испытания позволили в короткие сроки создать вентильно-индукторный двигатель для судна-снабженца «Виктор Конецкий», успешно эксплуатируемого на флоте, а также выполнить ряд технических проектов вентильно-индукторного привода для систем электродвижения мощностью 4–13 МВт.

Ключевые слова: электропривод, гребной электрический двигатель, вентильно-индукторный двигатель, инвертор, энергия.

Для цитирования:

Романовский В. В. Разработка гребного вентильно-индукторного двигателя для систем электродвижения большой мощности / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 357–366. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-357-366.

Введение (Introduction)

Опыт успешного создания образцов корабельных вентильно-индукторных приводов (ВИП) малой и средней мощности [1] и потребность в судовых электродвигателях (СЭД) мощностью от единиц до десятков МВт для судов нового поколения в целях проверки расчетных методик и конструктивных решений предопределили реализацию в г. Новочеркаске образца вентильно-индукторного двигателя (ВИД) мощностью 500 кВт при частоте вращения 1000 мин⁻¹ и экспериментального стенда (рис. 1). Этот же ВИД является пригодным для имитации основных режимов работы в системах резервного электродвижения при частоте вращения 750 мин⁻¹ и мощности 375 кВт.

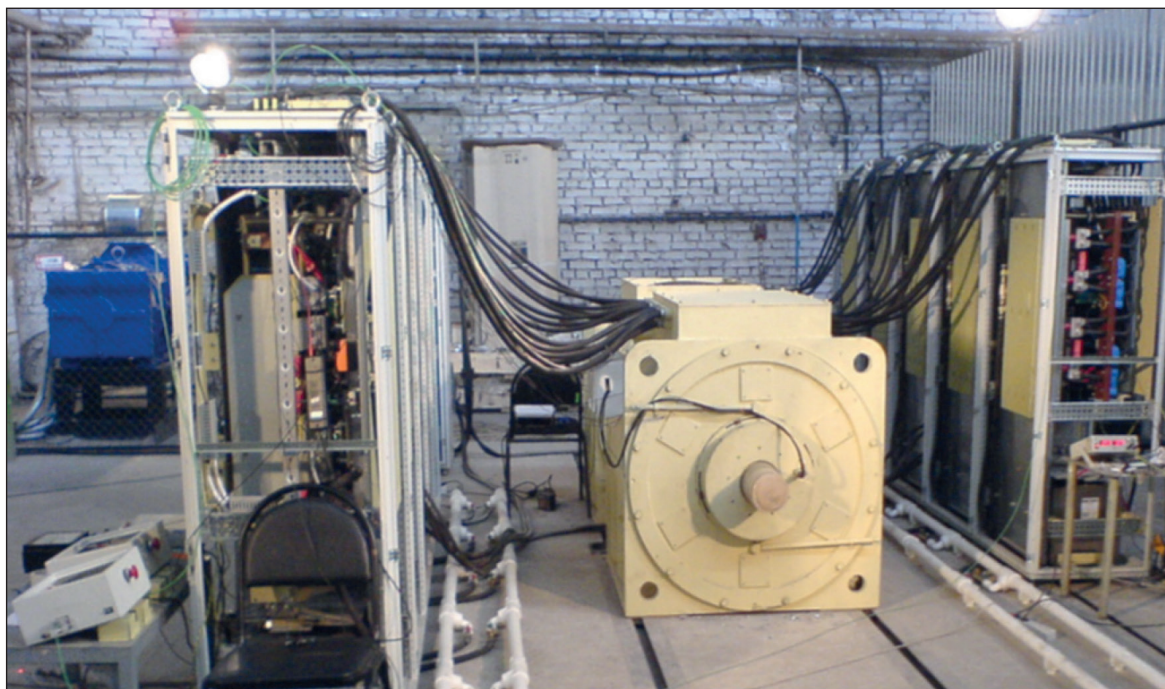


Рис. 1. Экспериментальный стенд испытания гребных ВИД мощностью 500 кВт

В основу принятой к реализации функциональной схемы (рис. 2) положен вариант системы с взаимным нагружением испытуемой и нагрузочной идентичных ВИД.

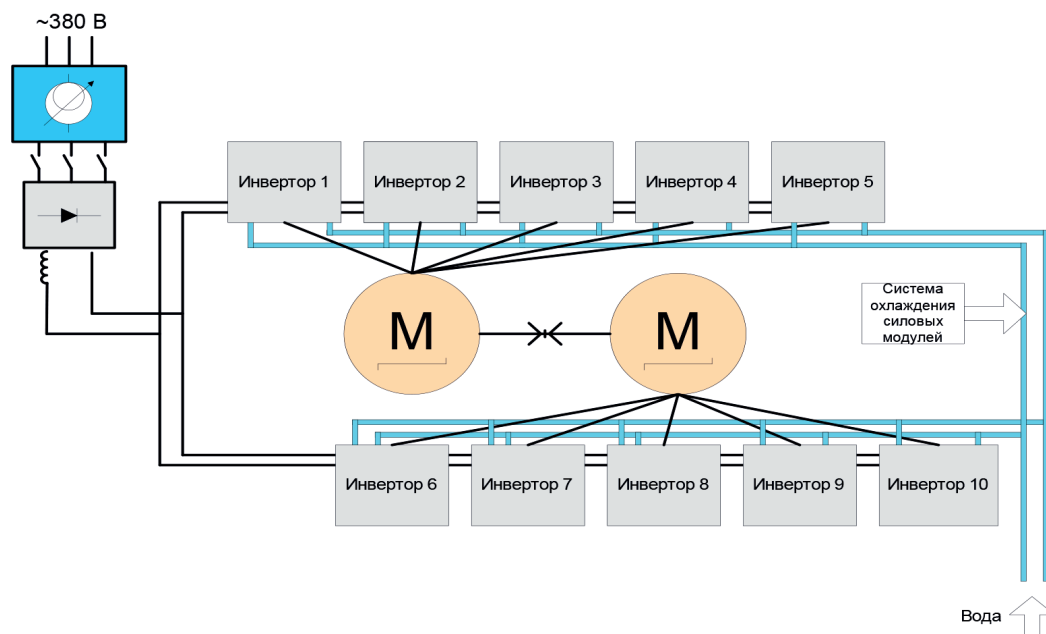


Рис. 2. Функциональная схема стенда испытаний макета СЭД

Выбран вариант с параллельным подключением источника электропитания — индукционного фазорегулятора и неуправляемого выпрямителя. Последующее уточнение схемы испытуемого стенда потребовало нахождения максимально возможной мощности первого ГЭД и перспективы наращивания мощности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для реализации схемы испытуемого стенда был выбран вариант девятифазного ВИД с традиционной конструкцией магнитной системы, с соответствующим числом инверторов и их мощностью. Конструктивно девять независимых инверторов, каждый из которых питает одну фазу ВИД, размещены в пяти шкафах с водяной системой охлаждения силовых модулей. Идентичность ВИД и преобразователей обеспечивает полную обратимость силовой схемы — каждая машина может исследоваться как в двигательном, так и в генераторном режимах. Однако конфигурация ограничивает динамические режимы вследствие того, что неуправляемый выпрямитель первичного источника питания не обеспечит обратную передачу электроэнергии. Одним из способов решения данной проблемы является рассеивание рекуперированной в цепь постоянного тока кинетической энергии в нагрузочных резисторах, включенных в цепь постоянного тока посредством дополнительного ключа [2]. Из возможных схем питания СЭД [3], [4] принята схема на основе несимметричной мостовой схемы. Анализ схем инвертора для ВИД показывает, что при больших мощностях у всех схем нет серьезных преимуществ перед базовой полумостовой схемой, но каждая из них имеет свои недостатки.

Каждая фазная обмотка питается от несимметричной мостовой схемы. В плече моста последовательно встроены ключ и обратный диод. Для предотвращения пульсаций напряжения параллельно мосту подключены два последовательно соединенных электролитических конденсатора, а для ограничения ИКП также включен высокочастотный конденсатор. Последовательно с обмоткой каждой фазы и в общей цепи источника питания всех фаз подключен датчик тока. Информацию о напряжении в звене постоянного тока предоставляет датчик напряжения. Функциональная схема системы управления СУ СЭД отличается большой мощностью, поэтому число фаз увеличивается, и преобразователь размещается в нескольких шкафах. Для испытания ВИД большой мощности изготовлен полномасштабный образец системы электропитания мощностью 13 МВт [5].

Управление многофазным преобразователем с одним микроконтроллером становится нерациональным, в первую очередь, ввиду сложности передачи управляющих сигналов на большие расстояния, а также наличия небольшого числа дискретных выводов [6]. Поэтому задачи управления ВИД при ощутимых колебаниях питающего напряжения решаются совершенствованием алгоритмов управления ключами коммутатора фаз многопроцессорной распределенной трехуровневой системой управления (СУ), элементы которой связываются на всех уровнях по CAN-интерфейсу.

Системы контроля и управления нижнего уровня датчиков и исполнительных устройств реализованы посредством плат. В качестве ядра платы выступает PIC-контроллер с расширенной периферией и решением вспомогательных задач. Регулирующий DC/DC преобразователь в звене постоянного тока усложняет конструкцию системы, ощутимо уменьшая теоретические показатели. Недостатки «амплитудного» управления усугубляются в мощных приводах. Рассмотрим «фазовое» управление — вариацию временных параметров: $\alpha_{оп} = f(n^*)$ — угол опережения; $\alpha_{имп} = f(n^*)$ — угол импульса; $\alpha_{ок.п} = f(n^*)$ — угол окончательной паузы при стабильном напряжении (рис. 3).

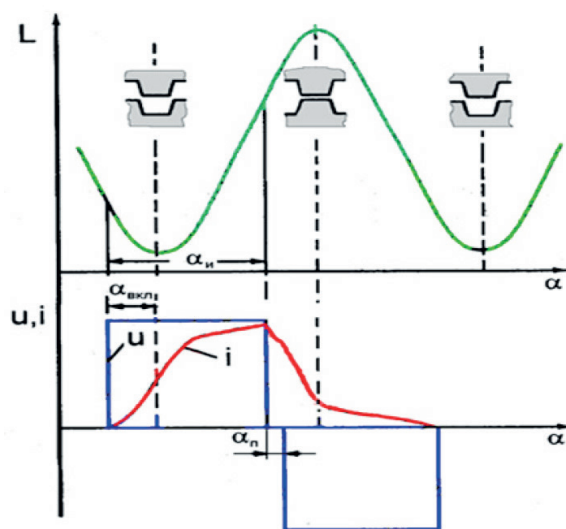


Рис. 3. Параметры фазового управления

Установлены критерии оптимизации: максимум КПД и минимум пульсаций. В целях сохранения высокого значения КПД в изменяющемся диапазоне частот и напряжения целесообразно использовать комбинированное управление. Оптимальное управление достигается временными параметрами и амплитудой напряжения. В свою очередь, при управлении временными параметрами напряжения сложно достичь заданного КПД на малых скоростях из-за малой мощности. Решением этой проблемы является *чопперный понижающий регулятор напряжения*, способный регулировать напряжение от нуля до номинала. С учетом этого КПД регулятора окажется не менее 0,95, а КПД двигателя — не менее 0,96. Поэтому суммарный КПД системы будет порядка 0,912, что является хорошим показателем.

Частоту вращения машин, как правило, регулируют пропорционально-интегральным регулятором скорости. Однако трудно достичь требуемого времени разгона или реверса при использовании двигателей с высоким моментом инерции ротора и нагрузки [7]. Для хорошей динамики разгона и регулирования требуются иные способы управления с учетом особенностей двигателя. Одним из оптимальных способов повышения КПД электропривода при малых мощностях является оптимизация временных параметров и амплитуды напряжения, которая позволит осуществить корректное управление ВИД. Для оценки регулировочных свойств ВИД-500 на стенде получены также нагрузочные характеристики при $U_{ин} = 170 \text{ В}$, $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 4).

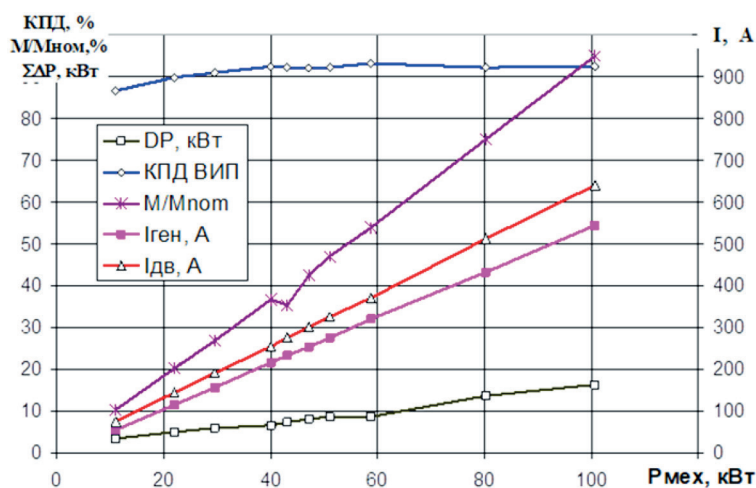


Рис. 4. Нагрузочные характеристики

Результаты (Results)

Из характеристик следует, что электропривод устойчиво работает в диапазоне частот 200–850 мин⁻¹ и нагрузки 10–100 % в двигательном, а также и в генераторном режиме. КПД электропривода с учетом потерь в преобразователе и в соединительных проводах равен приблизительно 92 % в пределах нагрузки 40–100 % и снижается до 87 % при уменьшении нагрузки до 10 %.

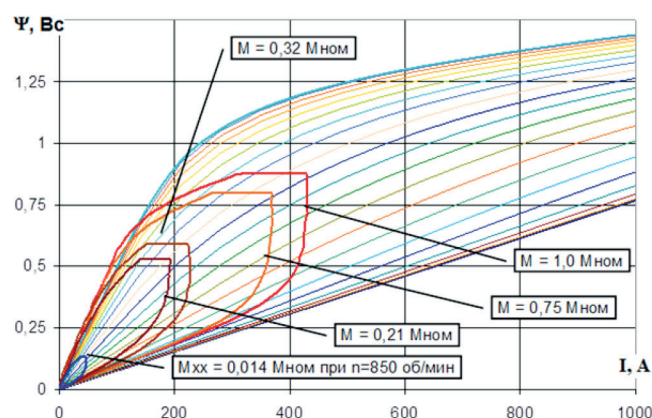


Рис. 5. Фазовые портреты цикла коммутации фазы при изменении нагрузки

В дополнение к этим характеристикам обработаны осциллограммы и на рис. 5 в координатах Ψ, i показаны траектории циклов коммутации фазы ВИД-500, а в таблице даны энергетические показатели при смене нагрузки. Так как площадь внутри траектории [8], [9] цикла коммутации равна механической энергии $W_{\text{мех}}$ и пропорциональна моменту M , наложение циклов коммутации на семейство кривых намагничивания дает визуальную оценку степени задействования магнитной системы по созданию момента.

Энергетические показатели при $n \sim 200$ мин⁻¹ и изменении нагрузки

n , мин ⁻¹	$M / M_{\text{ном}}$	КПД, %	$K_{\text{ЭМП}}$	I_{ϕ} , А	K_{ϕ}
213	0,99	96,7	0,71	218	1,53
216	0,75	96,9	0,70	162	1,41
230	0,32	96,2	0,66	100	1,74
212	0,21	94,7	0,61	95	1,71

Анализ данных таблицы показывает, что снижение момента нагрузки со 100 до 20 % практически не оказывает влияние на КПД, но уменьшает на 10 % коэффициент электромагнитного преобразования ($K_{ЭМП}$).

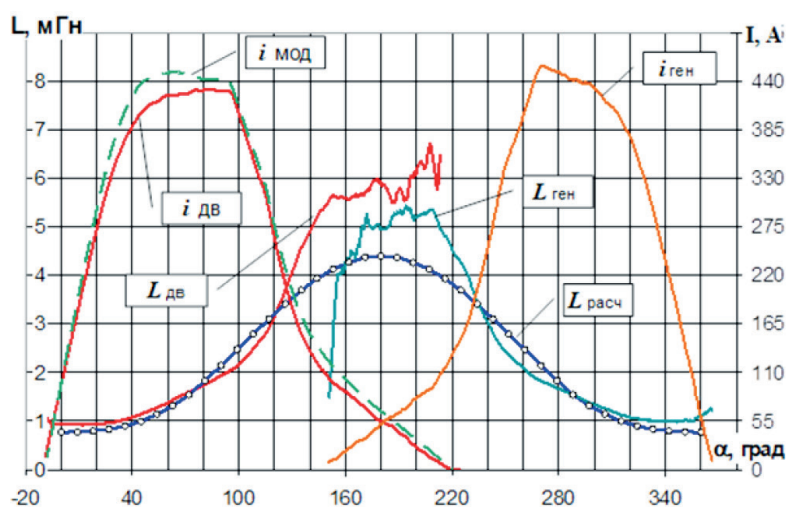


Рис. 6. Осциллограммы токов двигательного и генераторного режимов при взаимонагрузке ВИД-500

Выполним экспериментальную оценку совместной работы ВИД в двигательном и генераторном режиме при наличии механической и электрической связи. На рис. 6 приведены графики токов двигателя $i_{дв}(\alpha)$ и генератора $i_{ген}(\alpha)$, а также графики индуктивностей $L_{дв}(\alpha)$ и $L_{ген}(\alpha)$, совмещенные с графиком $L_{расч}(\alpha)$. Для двигательного режима штриховой линией показан график $i_{мод}(\alpha)$ с компьютерной модели при $\alpha_{вкл} = -10^\circ$, $T_{вкл} = 105^\circ$ и $T_{у0} = 20^\circ$. Расхождение между графиками $i_{дв}(\alpha)$ и $i_{мод}(\alpha)$ находится в пределах 7 % от амплитудного значения, что свидетельствует об адекватности компьютерной модели реальному объекту.

Графики токов двигательного и генераторного режимов [10], [11] практически симметричны относительно вертикальной оси, которая проходит через угол $\alpha = 180^\circ$, однако на этих графиках появляются небольшие отклонения от симметрии (увеличение амплитуды тока генераторного режима приблизительно на 30 А). Наиболее заметно изменения проявляются на графиках фазовых портретов (рис. 7), где стрелками показано направление движения отображающей точки: по часовой — для генераторного, против часовой — для двигательного режимов.

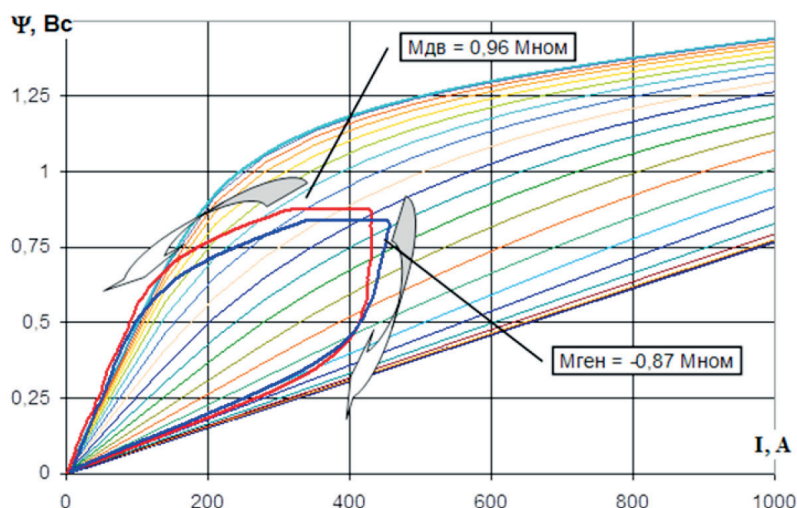


Рис. 7. Фазовые портреты цикла коммутации фазы в двигательном и генераторном режимах при взаимном нагружении ВИД-500

Начальный участок двигательного режима практически идентичен конечному генераторно-го и наоборот. Увеличение расхождений приводит к схожим изменениям в углах коммутации фаз, при которых напряжение фазы переключается между положительным, нулевым и отрицательным значениями, и становятся равны $\sim 9^\circ$ в сторону отставания для генераторного режима, вследствие чего площадь внутри [12] цикла коммутации фазы генераторного режима несколько меньше, чем двигательного режима, но это не противоречит физическому смыслу, так как энергия, являющаяся разностью площадей, тратится на компенсацию потерь в стали двигателя и генератора, механических потерь в агрегате. Оценка по среднему моменту: $M_{\text{дв}} = 0,96 M_{\text{ном}}$, а $M_{\text{ген}} = 0,87 M_{\text{ном}}$. Соответственно КПД: $\eta_{\text{дв}} = 0,96 \%$ и $\eta_{\text{ген}} = 0,97 \%$.

Вычисление $K_{\text{ЭМП}}$ с целью оценки энергетической эффективности генераторного режима имеет свои особенности. На рис. 8 показаны графики изменения электромагнитной мощности $P_{\text{ЭМ}}$ и энергии $W_{\text{ЭМ}}$, отражающие генераторный режим на рис. 6 и 7. Для графика $W_{\text{ЭМ}}$ имеется смещение вдоль вертикальной оси. В результате значения $W_{\text{ЭМ}}$ к моменту окончания импульса положительного напряжения генераторного и двигательного режимов отличаются: $W_{\text{в}} < W_{\text{ЭМ max}}$.

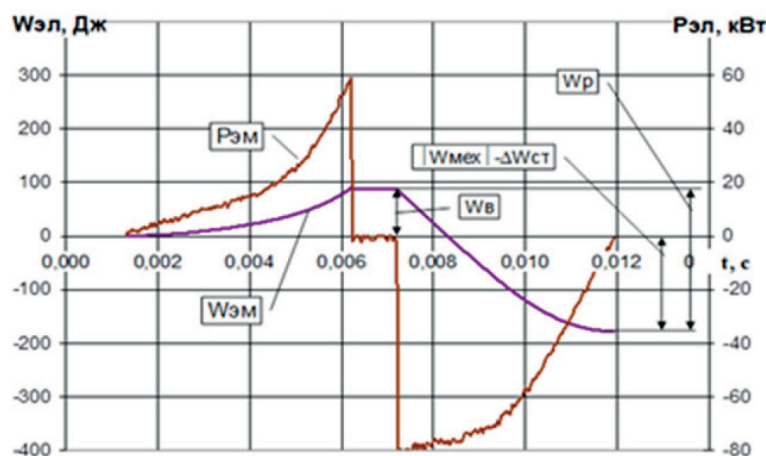


Рис. 8. Графики изменения электромагнитной мощности и энергии для одной фазы за цикл коммутации в генераторном режиме

Для двигательного режима часть $W_{\text{ЭМ max}}$ — накопленная магнитная энергия $W_{\text{р}}$, возбуждающая магнитную систему ВИД, которая рекупируется источнику электроэнергии. Оставшаяся часть $W_{\text{ЭМ max}}$ преобразуется в $W_{\text{мех}}$. Для генераторного режима $W_{\text{в}}$ — часть магнитной энергии [13], полученная от источника электроэнергии. Другая часть магнитной энергии получается из преобразования механической энергии в возбужденной магнитной системе ВИД. Рекупируемая энергия $W_{\text{р}}$ источника электроэнергии является алгебраической суммой: $W_{\text{р}} = W_{\text{мех}} - W_{\text{в}}$ или с учетом знаков — $|W_{\text{р}}| = |W_{\text{мех}}| + W_{\text{в}}$. Вновь сгенерированной электрической энергией без учета потерь является $W_{\text{мех}}$. С учетом ранее изложенного, $K_{\text{ЭМП}}$ генераторного режима определяется как отношение преобразованной механической энергии к рекупируемой электроэнергии:

$$K_{\text{ЭМП}} = \frac{|W_{\text{мех}}|}{|W_{\text{р}}|} = \frac{|W_{\text{мех}}|}{|W_{\text{мех}}| + W_{\text{в}}}.$$

В результате для генераторного режима $K_{\text{ЭМП}} = 0,67$.

Выводы (Conclusion)

1. В настоящее время системы электродвижения судов с применением ВИП находят все большее применение на судах-снабженцах и буксирах, однако данный привод в будущем требует доработки. В частности, необходимо выполнить оценку виброшумовых характеристик ввиду, в первую очередь, слабого «звена» — подшипников [14].



Рис. 9. Сборка вентильно-индукторного двигателя мощностью 2 МВт судна «Виктор Конецкий»

2. Эти испытания позволят в короткие сроки создать ВИД для судна-снабженца «Виктор Конецкий» (рис. 9), успешно эксплуатируемого на флоте, и выполнить ряд технических проектов ВИП для СЭД мощностью 4–13 МВт, а также подготовить техническое предложение по реализации ВИП-1000-1100, который может быть высокоэффективно и легко встроено в электроэнергетическую систему с СЭД, например, судов-спасателей или судов снабженцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Б. В. Корабельный электропривод / Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Лик, 2014. — 270 с.
2. Птах Г. К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г. К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 23–33.
3. 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.
4. 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.
5. Liang Y. New circuits for emulating switched reluctance motor windings / Y. Liang, H. Chen, J. Shi, H. Liu // IET Electric Power Applications. — 2016. — Vol. 10. — Is. 6. — Pp. 458–466. DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0627.
6. Bostanci E. Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study / E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, B. Fahimi // IEEE transactions on transportation electrification. — 2017. — Vol. 3. — Is. 1. — Pp. 58–75. DOI: 10.1109/TTE.2017.2649883.
7. 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.
8. Kuai S.Y. Position sensorless technology of switched reluctance motor drives including mutual inductance / S.Y. Kuai, S. Zhao, F.P. Heng, X. Cui // IET Electric Power Applications. — 2017. — Vol. 11. — Is. 6. — Pp. 1085–1094. DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0490.
9. Azer P. Advanced Fault-Tolerant Control Strategy for Switched Reluctance Motor Drives / P. Azer, J. Ye, A. Emadi // 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). — IEEE, 2018. — Pp. 20–25. DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450151.

10. Silva W. A. Adaptive Feedforward Control Applied in Switched Reluctance Machines Drive Speed Control in Fault Situations / W. A. Silva, B. C. Torrico, W. B. Correia, L. L. dos Reis // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. — 2018. — Vol. 140. — Is. 5. — Pp. 051002. DOI: 10.1115/1.4037836.
11. 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.
12. Garcia-Amoros J. Linear Hybrid Reluctance Motor with High Density Force / J. Garcia-Amoros // *Energies*. — 2018. — Vol. 11. — Is. 10. — Pp. 2805. DOI: 10.3390/en1102805.
13. Ye J. An Extended-Speed Low-Ripple Torque Control of Switched Reluctance Motor Drives / J. Ye, B. Bilgin, A. Emadi // *IEEE Transactions on Power Electronics*. — 2015. — Vol. 30. — Is. 3. — Pp. 1457–1470. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2316272.
14. Dos Santos F.L.M. Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle / F.L.M. dos Santos, J. Anthonis, F. Naclerio, J. J. Gyselinck, H. Van der Auweraer, L. C. S. Góes // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2014. — Vol. 61. — Is. 1. — Pp. 469–476. DOI: 10.1109/TIE.2013.2247012.

REFERENCES

1. Nikiforov, B.V. *Korabel'nyi elektroprivod*. Novocherkassk: Lik, 2014.
2. Ptakh, G.K. "Switched Reluctance Drive Medium and High Power: Foreign and Domestic Experience." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.3 (2015): 23–33.
3. 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.
4. 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.
5. Liang, Yan, Hao Chen, Jiaotong Shi, and Huajian Liu. "New circuits for emulating switched reluctance motor windings." *IET Electric Power Applications* 10.6 (2016): 458–466. DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0627.
6. Bostanci, Emine, Mehdi Moallem, Amir Parsapour, and Babak Fahimi. "Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: A comparative study." *IEEE transactions on transportation electrification* 3.1 (2017): 58–75. DOI: 10.1109/TTE.2017.2649883.
7. 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.
8. Kuai, Song-yan, Shuai Zhao, Feng-ping Heng, and Xin Cui. "Position sensorless technology of switched reluctance motor drives including mutual inductance." *IET Electric Power Applications* 11.6 (2017): 1085–1094. DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0490.
9. Azer, Peter, Jin Ye, and Ali Emadi. "Advanced Fault-Tolerant Control Strategy for Switched Reluctance Motor Drives." *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, 2018. 20–25. DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450151.
10. Silva, Wellington A., Bismark C. Torrico, Wilkley B. Correia and Laurinda L. N. dos Reis. "Adaptive Feedforward Control Applied in Switched Reluctance Machines Drive Speed Control in Fault Situations." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 140.5 (2018): 051002. DOI: 10.1115/1.4037836.
11. 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.
12. Garcia-Amorós, Jordi. "Linear Hybrid Reluctance Motor with High Density Force." *Energies* 11.10 (2018): 2805. DOI: 10.3390/en1102805.
13. Ye, Jin, Berker Bilgin, and Ali Emadi. "An extended-speed low-ripple torque control of switched reluctance motor drives." *IEEE Transactions on Power Electronics* 30.3 (2015): 1457–1470. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2316272.
14. Dos Santos, Fabio L.M., Jan Anthonis, Francesco Naclerio, Johan J. C. Gyselinck, Herman Van der Auweraer, and Luiz C. S. Góes. "Multiphysics NVH modeling: Simulation of a switched reluctance motor for an electric vehicle." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.1 (2014): 469–476. DOI: 10.1109/TIE.2013.2247012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романовский Виктор Викторович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»

198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovsky, Viktor 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: 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 24 декабря 2018 г.

Received: December 24, 2018.