

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-185-195

УДК 621.313

Топология тягового электропривода с входным трансформатором
и активным выпрямителем напряжения
на основе многофазного вентильно-индукторного двигателяАртур Андреевич Ледовских¹, Юлия Константиновна Каземирова², Динь Лам Фам³,
Галина Львовна Демидова⁴, Сибо Юань⁵, Алексей Сергеевич Анучин⁶^{1,2,3,4,6} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация⁵ Китайский горно-технологический университет, Суючжоу, 111250, Китай¹ ledovskikh.artur@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0349-2897>² KazemirovaYK@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6085-6703>³ Phamdinhlammta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4380-1223>⁴ demidova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2786-715X>⁵ YuanXibo@cumt.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-8249-5857>⁶ anuchin.alecksey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1019-756X>**Аннотация**

Введение. В последние десятилетия после изобретения биполярного транзистора с изолированным затвором в научных исследованиях стали популярны вентильно-индукторные двигатели. Однако недостатки вентильно-индукторных двигателей, такие как значительные пульсации момента и высокая стоимость силового электрического преобразователя, ограничивают их применение в промышленности и пропульсивных приводах. Для устранения существующих недостатков предлагается топология пропульсивного привода с входным многообмоточным трансформатором и активными выпрямителями, питающими многофазный вентильно-индукторный двигатель. **Метод.** Топология с использованием многофазного двигателя с числом фаз, кратным четырем, обеспечивает меньшие пульсации момента, чем традиционные топологии с числом фаз, кратным трем. Использование многофазной конфигурации позволяет повысить отказоустойчивость, а в случае неисправности в одном из элементов электропривода (преобразователе или обмотке) — продолжать работу с пониженной нагрузкой. Предложен профиль индуктивности и поверхность намагничивания предлагаемого двигателя с точки зрения создания постоянного суммарного момента в разомкнутой системе управления. Представлена система векторного управления активными выпрямителями с предупредлением. **Основные результаты.** Получены значения токов, и момента двигателя в двигательном и тормозном режимах, определена относительная пульсация момента. Рассмотрены режимы работы активного выпрямителя. Реализована модель пуска с гребным винтом. **Обсуждение.** Результаты моделирования разработанной системы подтверждают реализуемость и преимущества предлагаемой конфигурации для ее использования в пропульсивном приводе судов.

Ключевые слова

тяговый электропривод, вентильно-индукторный двигатель, многофазный электрический двигатель, активный выпрямитель напряжения, низковольтные ячейки

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ проект № 25-49-00072.

Ссылка для цитирования: Ледовских А.А., Каземирова Ю.К., Фам Д.Л., Демидова Г.Л., Юань С., Анучин А.С. Топология тягового электропривода с входным трансформатором и активным выпрямителем напряжения на основе многофазного вентильно-индукторного двигателя // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 1. С. 185–195. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-185-195

Traction drive topology with input transformer and active rectifier based on a multiphase switched reluctance motor

Artur A. Ledovskikh¹✉, Yulia K. Kazemirova², Dinh Lam Pham³, Galina L. Demidova⁴, Xibo Yuan⁵, Alecksey S. Anuchin⁶

^{1,2,3,4,6} Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 111250, Russian Federation

⁵ China University of Mining and Technology, Xuzhou, 111250, China

¹ ledovskikh.artur@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0000-0349-2897>

² KazemirovaYK@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6085-6703>

³ Phamdinhlamta@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4380-1223>

⁴ demidova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2786-715X>

⁵ YuanXibo@cumt.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-8249-5857>

⁶ anuchin.alecksey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1019-756X>

Abstract

Switched reluctance motors (SRMs) have been very popular in academia for the last few decades since the invention of the IGBT. However, the drawbacks of SRMs, such as high torque ripple and the cost of the power electronic converter, limit their application in industry and traction. To address these issues, a traction drive topology with an input multi-winding transformer and active rectifiers, based on a multi-phase switched reluctance motor with switched windings, is proposed. This topology which utilizes a multi-phase motor provides significantly lower torque ripple. The use of a multi-phase configuration increases fault tolerance, and in the event of a failure in one of the drive elements (converter or winding), allows for continued operation at a reduced load. The inductance and magnetization profiles of the proposed motor are analyzed from the perspective of torque production and control. A feed-forward vector control system is presented. The values of currents and torque of the motor in both motoring and braking modes were obtained, and the torque ripple was determined. Data on the operation of the active rectifier were also obtained. A start-up model with a propeller was implemented. The simulation results of the developed system confirm the feasibility and advantages of the proposed configuration and its use in industry.

Keywords

propulsion drive, switched reluctance motor, multiphase machine, active rectifier, low-voltage cell

Acknowledgements

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation: project No. 25-49-00072.

For citation: Ledovskikh A.A., Kazemirova Yu.K., Pham D.L., Demidova G.L., Yuan X., Anuchin A.S. Traction drive topology with input transformer and active rectifier based on a multiphase switched reluctance motor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 1, pp. 185–195 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-185-195

Введение

В последние десятилетия вентильно-индукторные двигатели (ВИД) стали объектом активного изучения в академической среде после изобретения IGBT-транзисторов в середине 80-х годов прошлого века и их широкого распространения в силовой электронике [1].

Ключевым преимуществом ВИД является отсутствие постоянных магнитов, что значительно снижает стоимость материалов по сравнению с синхронными двигателями с постоянными магнитами, а относительно невысокие потери в роторе дают конкурентное преимущество над асинхронным пропульсивным приводом. Он имеет простую и механическую конструкцию, отличающуюся прочной структурой ротора. Благодаря этой простоте машина демонстрирует превосходную отказоустойчивость по сравнению с традиционными решениями, сохраняя работоспособность даже при коротком замыкании или обрыве фазы. Тем не менее, двигателю свойственны сильные пульсации момента.

В отличие от асинхронных машин, ВИД имеет низкую взаимную индуктивность между фазами, что позволяет рассматривать и управлять фазами индивидуально. Кроме того, его момент зависит от величины фазного тока квадратично (в линейной зоне), т. е. момент не зависит от направления тока. Эта уникальная

особенность определяет требования к проектированию силового преобразователя.

ВИД был внедрен в различных отраслях, включая: автомобильные системы [2–4]; летательные аппараты (стартер-генераторы, системы электрогенерации) [5, 6]; бытовую технику (стиральные машины, блендеры) [7–9].

Отказоустойчивость и минимальные требования к техническому обслуживанию дополнительно подтверждают пригодность ВИД для применения в ответственных системах.

Однако вентильно-индукторные приводы по-прежнему характеризуются рядом проблем, включая большие пульсации момента, значительные радиальные нагрузки, приводящие к износу подшипников, и неэффективное использование инвертора [10]. Хотя для решения этих проблем были предложены усовершенствованные способы управления, такие как прямое управление моментом и управление с прогнозированием [11, 12], их внедрение в промышленности остается ограниченным.

Отметим, что возможность применения ВИД в мощных и низкоскоростных системах, таких как пропульсивные приводы судов, еще недостаточно изучена [2]. Убедительный аргумент в пользу их потенциального использования в этой области появился после выхода из строя изоляции 20-мегаваттного асинхронного двига-

теля на атомном ледоколе «Арктика», что потребовало дорогостоящей и сложной процедуры замены всего электродвигателя, включавшей резку и повторную сварку корпуса судна¹. В таких сценариях многофазные ВИД (например, 24- или 48-фазные конфигурации) могут служить надежной альтернативой, обеспечивая минимальные пульсации момента, подключаясь к судовым сетям средних напряжений [13].

В настоящей работе предлагается решение, при котором используется трансформатор для понижения питающего напряжения до 0,66 кВ и активного выпрямителя напряжения (АВН) [14–16], что позволяет тяговому приводу переходить в режим торможения при изменении направления потока мощности. Предложена линейаризованная поверхность намагничивания, которая получена аналитически для заданной мощности и позволяет получить низкую пульсацию момента в четырехфазной конфигурации. Приближение к данному профилю возможно за счет оптимизации с применением оптимизационных алгоритмов и расчетов методом конечных элементов.

Предлагаемая топология тягового электропривода

Силовой преобразователь питается от трансформатора с трехфазными обмотками. Три вторичные обмотки трансформатора подключены к трем АВН (АВН Т1, АВН Т2, АВН Т3 на рис. 1), которые регулируют напряжение трех независимых звеньев постоянного тока (ЗПТ). Разделение на группы, каждая из которых управляет 8-ю обмотками двигателя, можно объяснить мгновенной потребляемой мощностью каждого четырех фаз, представляющих из себя элементарный двигатель, и требуемой мощностью каждого АВН. Для четырех и 8 фаз пульсации мощности практически равны нулю. 8 низковольтных ячеек (инверторных модулей) подключены к общему ЗПТ. Каждый инвертор выполнен по топологии несимметричного моста. Таким образом, силовой преобразователь состоит из 24 инверторных модулей, подключенных к трем АВН. Топология предлагаемой системы тягового электропривода показана на рис. 1.

Каждый АВН подключен к своей собственной трехфазной обмотке на понижающем трансформаторе с 10 кВ на 660 В. Подключение осуществляется через сетевые дроссели, которые формируются индуктивностью рассеяния обмотки трансформатора и дополнительным дросселем, который может быть установлен при необходимости. Нейтраль вторичных обмоток многофазного трансформатора должны быть соединены. Это делается для создания общей точки заземления на низковольтной стороне.

Использование трех вторичных обмоток трансформатора обеспечивает определенные преимущества. Мощность одного АВН в три раза меньше номинальной, что упрощает его конструкцию и позволяет повысить частоту коммутации по сравнению с АВН, рассчитанным на одну вторичную обмотку.

Возможна работа трех АВН от одной вторичной обмотки. Однако в этом случае для равномерного распределения токов сетевые дроссели будут обязательны. Надежность предлагаемого решения также выше в случае обрыва одной фазы.

Использование низкого напряжения для обмоток двигателя позволяет уменьшить габариты машины, обусловленные применением изоляционных материалов и вводных клемм, а также снижает риск пробоя изоляции от высокого напряжения.

Использование раздельных силовых цепей преобразователя повышает отказоустойчивость и ремонтнопригодность установки. В случае отказа АВН, низковольтной ячейки или обмотки трансформатора система способна продолжить работу со сниженной нагрузкой. Такая топология облегчает быстрое техническое обслуживание и замену компонентов. Модульность системы подразумевает возможность быстрого ремонта при необходимости.

Применение АВН в системах питания инверторов позволяет значительно улучшить коэффициент гармонических искажений входного тока, особенно для ВИД [17]. В отличие от других электрических машин, ВИД имеют значительные пульсации входной мощности, что влияет на работу входного выпрямителя и взаимодействие с питающей сетью [18].

Двигатель имеет 48 зубцов статора и 36 зубцов ротора (рис. 2), что фактически формирует 6 последовательно соединенных четырехфазных (8×6) элементарных машин ВИД (рис. 3), распределенных по одному механическому обороту.

Конфигурация зубцовой зоны выполнена для минимизации пульсаций момента при номинальной скорости. На рис. 4, *a* изображен желаемый профиль индуктивности, а на рис. 4, *b* показаны кривые намагничивания для согласованного и рассогласованного положений ротора. Площадь красной поверхности представляет полезную работу за период работы фазы. Для простоты модель двигателя была линейаризована. При дальнейшей оптимизации модели методом конечных элементов полученные характеристики намагничивания будут отличаться (рис. 5), однако на данном этапе этих упрощений достаточно для первоначальной проверки работоспособности подхода.

При достижении максимальной индуктивности (точка «В» на рис. 4, *b*) момент становится равным нулю, и необходимо размагнитить фазу, приложив отрицательное напряжение, которое, как правило, соответствует отрицательному напряжению звена постоянного тока. Значением сопротивления фазы в мощных двигателях можно пренебречь, следовательно, время, необходимое для размагнивания, равно времени, затраченному на намагничивание. Таким образом, длительность участка максимальной индуктивности должна быть не менее 135° (суммы длительностей участков минимальной и возрастающей индуктивности). Далее одна четверть электрического оборота выделяется для спадающей индуктивности для сохранения симметрии профиля.

В начале этапа намагничивания (промежуток от «0» до «А», рис. 4, *b*) фаза не создает момента. На участке

¹ Arktika (2016 icebreaker) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Arktika_\(2016_icebreaker\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Arktika_(2016_icebreaker)) (дата обращения: 08.08.2025).

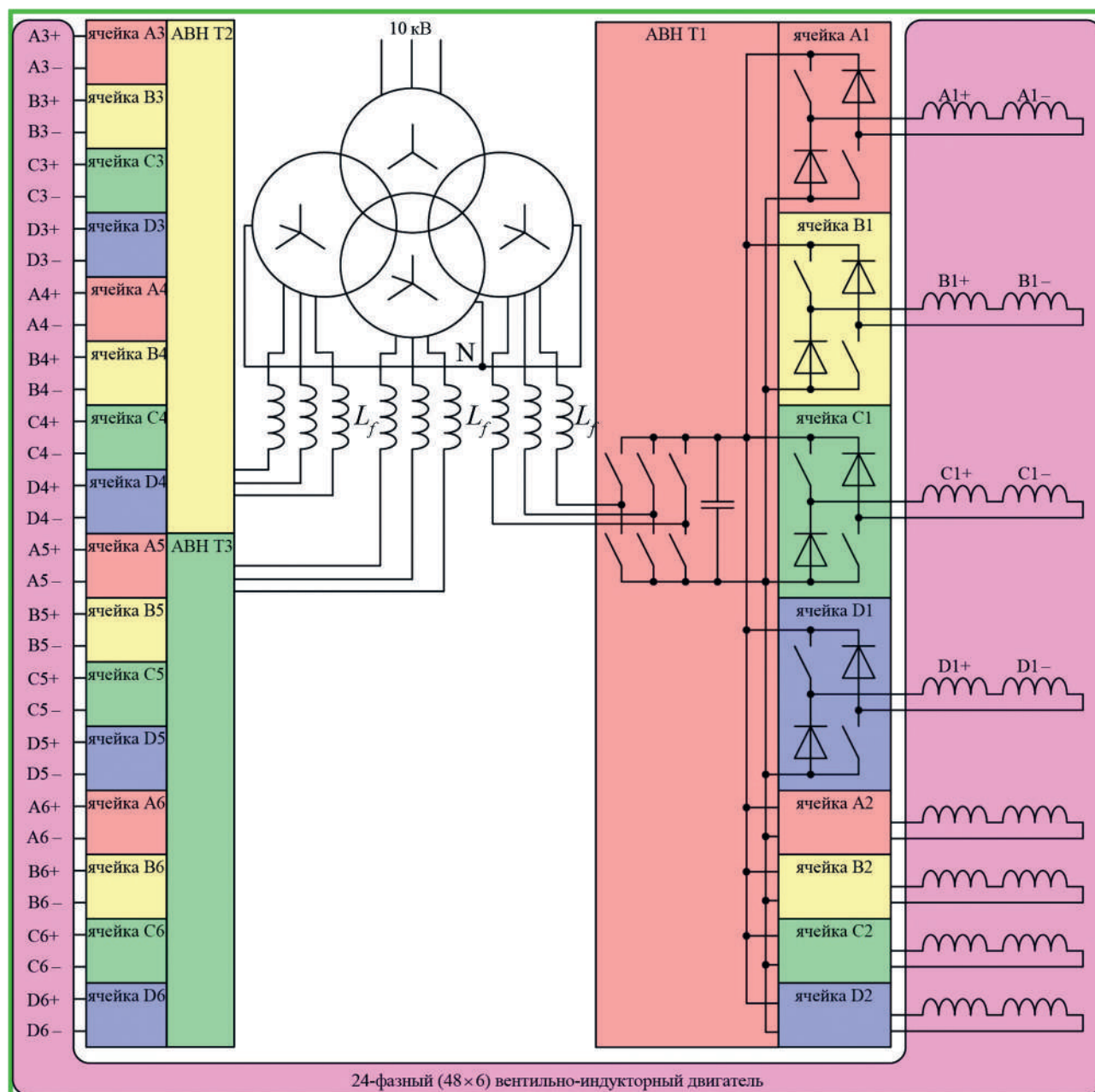


Рис. 1. Топология предлагаемого электропривода.

A1+, A1-, B1+, B1-, C1+, C1-, D1+, D1- — фазы первого вентильно-индукторного двигателя (ВИД); 1-6 — нумерация элементарных машин ВИД; N — нейтраль вторичной обмотки; L_f — сетевые дроссели; АВН Т1-АВН Т3 — активный выпрямитель напряжения, подключаемый к 1-3 вторичной обмотке трансформатора

Fig. 1. Topology of the proposed propulsion drive.

A1+, A1-, B1+, B1-, C1+, C1-, D1+, D1- — phases of the first elementary machine of the switched reluctance motor (SRM); 1-6 — numbering of elementary machines SRM; L_f — mains chokes; N — neutral of the secondary winding; АВН Т1-АВН Т3 — an active rectifier connected to the 1-3 secondary winding of the transformer

возрастания индуктивности постоянный ток создает постоянный момент. Момент становится нулевым при достижении максимальной индуктивности. Суммарный момент от всех четырех фаз должен оставаться постоянным с минимальными пульсациями.

Отметим, что такой режим работы с постоянным моментом достигим только в ВИД с четырьмя или большим числом фаз. В традиционных трехфазных конструкциях длительность участка максимальной

индуктивности очень мала, из-за чего «хвосты» тока создают тормозной момент и значительные пульсации суммарного момента. Вблизи номинальных скоростей этот тормозной момент не может быть скомпенсирован движущим моментом других фаз.

Для конструкции с механическими параметрами (рис. 2) было получено семейство кривых намагничивания ВИД в функции угла при фиксированном токе методом конечных элементов (рис. 5). Полученные

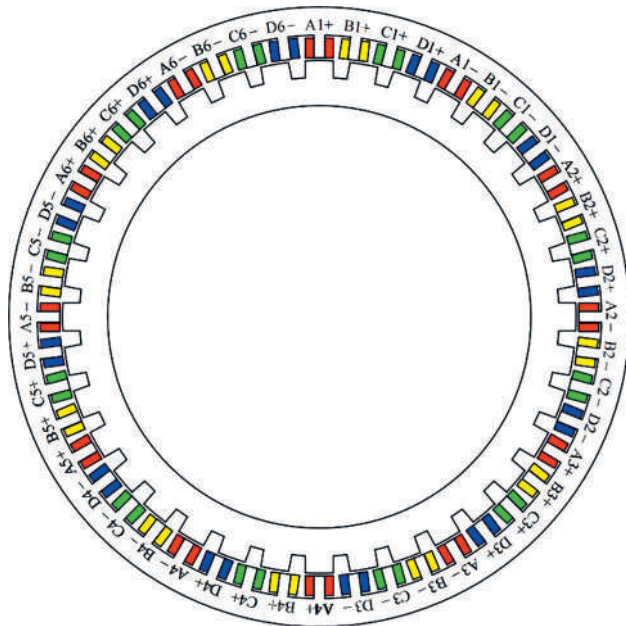


Рис. 2. Конфигурация предлагаемого вентильно-индукторного двигателя

Fig. 2. Configuration of the proposed switched reluctance machine

кривые не в полной мере соответствуют желаемым, однако оптимизация магнитной геометрии возможна и может быть выполнена в дальнейших исследованиях.

Система управления предлагаемым тяговым приводом

Система управления активного выпрямителя напряжения. Система управления АВН реализована на основе общепринятой системы векторного управления с широтно-импульсной модуляцией, аналогичной той,



Рис. 3. Элементарный четырехфазный 8 × 6 вентильно-индукторный двигатель

Fig. 3. Elementary four-phase 8 × 6 switched reluctance machine

что применяется для синхронных электродвигателей и сетевых инверторов. Данный подход является одним из наиболее распространенных методов разработки алгоритмов управления АВН [14–16].

На рис. 6 представлена структурная схема системы векторного управления, используемого в АВН. Задание на напряжение ЗПТ U_{DC} вместе с обратной связью по текущему напряжению U_{DC} подается на пропорционально-интегральный регулятор напряжения ЗПТ. Для обеспечения более быстрой реакции на скачкообразные изменения нагрузки в системе управления АВН реализовано предупредительное [15] током по оси d , пропорциональным требуемой мощности и обратно пропорциональным амплитуде сетевого напряжения U_m . Требуемая мощность рассчитывается как сумма мощностей, потребляемых обмотками элементарных машин ВИД, подключенных к данному АВН.

Система управления несимметричным мостом, питающим фазы двигателя. Система управления двигателя реализует простой цикл коммутации, который должен обеспечивать постоянный выходной момент при подаче номинального напряжения на фазу двигателя. Работа такой системы управления в двигательном режиме показана на рис. 7, а.

Напряжение подается на фазу при номинальной скорости в начале участка минимальной индуктивности.

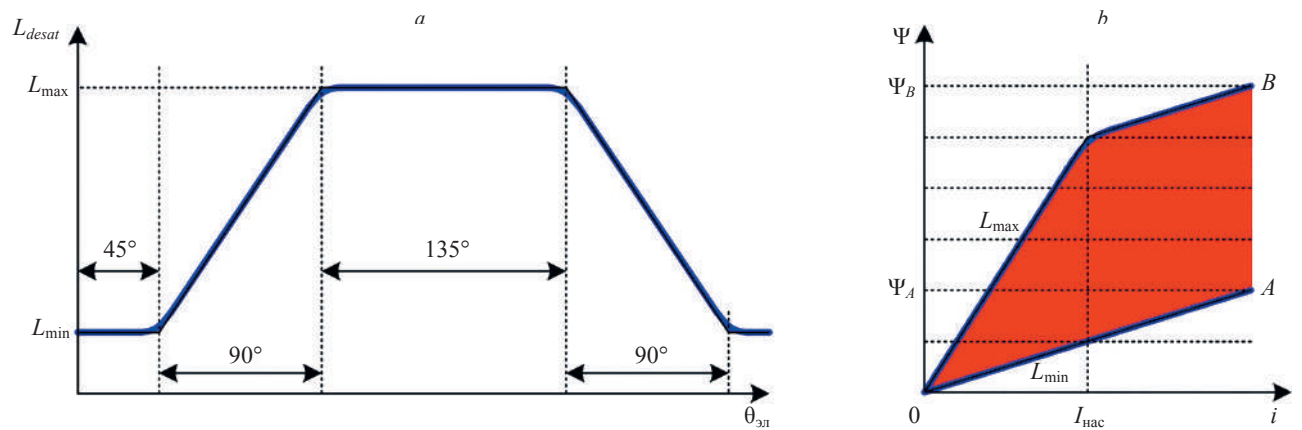


Рис. 4. Требуемые профили индуктивности (a) и намагничивания (b) предлагаемого вентильно-индукторного двигателя.

L_{desat} — индуктивность насыщения; L_{max} — максимальная индуктивность; L_{min} — минимальная индуктивность; $\theta_{эл}$ — электрический угол; Ψ — потокосцепление; Ψ_A — потокосцепления возбуждения точки A; Ψ_B — максимальное потокосцепление точки B; $I_{нас}$ — ток насыщения; i — ток в обмотке

Fig. 4. Desired inductance (a) and magnetization profiles (b) of the proposed switched reluctance machine.

L_{desat} — saturation inductance; L_{max} — maximum inductance; L_{min} — minimum inductance; $\theta_{эл}$ — electrical angle; Ψ — flux linkage; Ψ_A — excitation flux linkage at A; Ψ_B — maximum flux linkage at B; $I_{нас}$ — saturation current; i — current in the winding

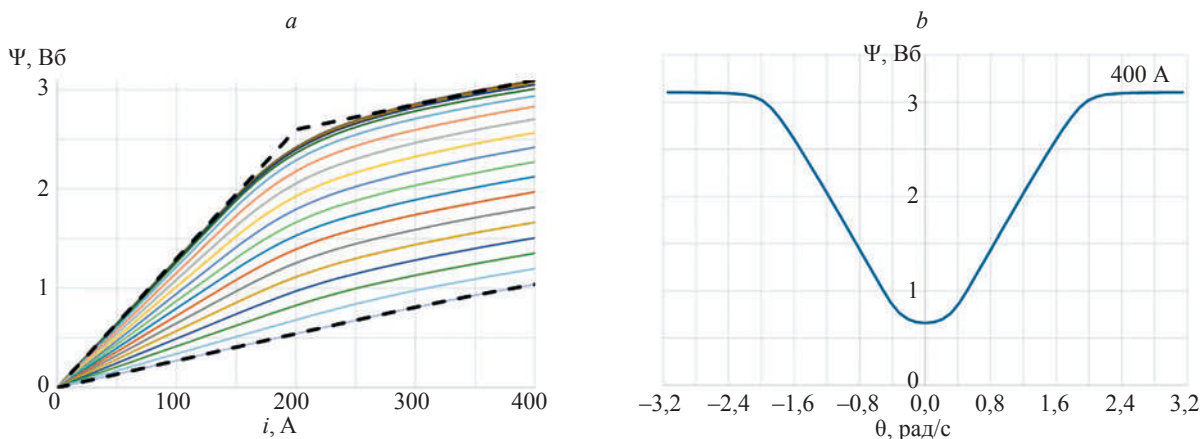


Рис. 5. Семейство кривых предлагаемого вентильно-индукторного двигателя: потокоцепления (а) и намагничивания (b) при номинальном токе 400 А.

На рис. 5, а: цветные линии — кривые намагничивания; пунктирная линия — используемый профиль

Fig. 5. The family of magnetization profiles (b) of the proposed switched reluctance machine and flow coupling at rated current (a) 400 A.

In Fig. 5, a: the colored lines — the magnetization curves; the dotted line — the profile used

Ток возрастает до своего номинального значения, а индуктивность фазы начинает увеличиваться, обеспечивая постоянный выходной момент. Потокоцепление фазы растет все это время. Когда индуктивность фазы достигает максимального значения, фаза отключается, на нее подается отрицательное напряжение, и потокоцепление с током начинают уменьшаться. Выходной мо-

мент равен нулю, так как индуктивность не изменяется. После уменьшения тока и потокоцепления до нуля фазное напряжение также становится нулевым. Система управления ожидает начала следующего цикла коммутации в начале участка минимальной индуктивности.

В тормозном режиме, в который тяговый привод может переходить при определенных условиях, ис-

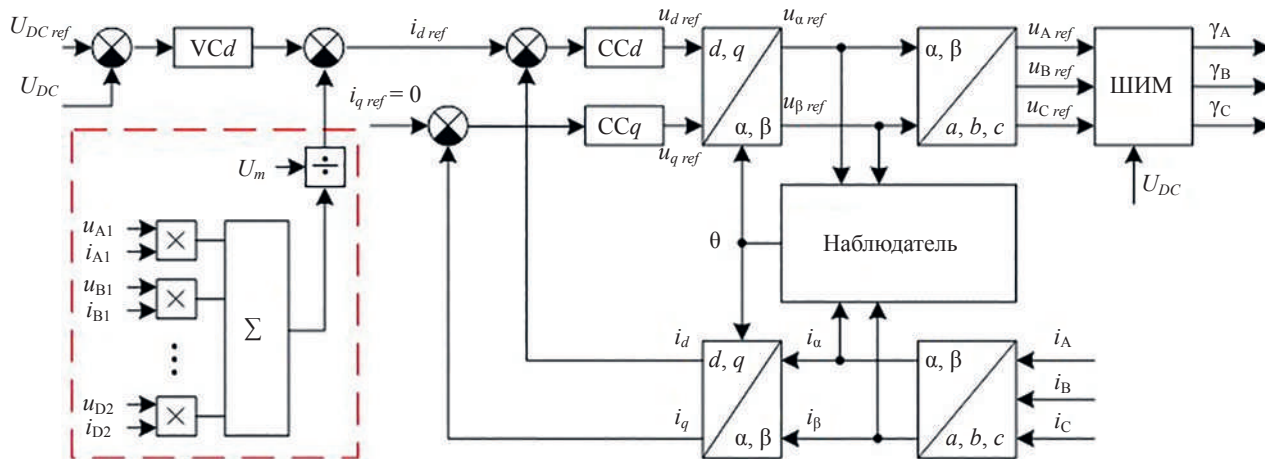


Рис. 6. Схема системы управления активного выпрямителя напряжения (АВН).

VCd — регулятор напряжения по оси d; CCd, CCq — регулятор тока по оси d и q; U_{DCref} — задание напряжения звена постоянного тока; U_{DC} — напряжение звена постоянного тока; U_m — амплитуда сетевого напряжения; d, q, α, β — оси расчета векторной системы управления; $u_{A1}-u_{D2}$ — напряжение обмоток двух элементарных машин, подключенных к АВН; $i_{A1}-i_{D2}$ — ток обмоток двух элементарных машин, подключенных к АВН; $i_{dref}, i_{qref}, i_d, i_q, i_\alpha, i_\beta$ — расчетные значения токов; i_A, i_B, i_C — фазные токи сети; θ — расчетный электрический угол; $u_{dref}, u_{qref}, u_\alpha ref, u_\beta ref, u_A ref, u_B ref, u_C ref$ — расчетные значения напряжения; $\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C$ — коэффициент заполнения широтно-импульсной модуляции (ШИМ)

Fig. 6. Control system diagram of active rectifier (AR).

VCd — voltage regulator along the d axis; CCd, CCq — current regulator along the d and q axes; U_{DCref} — setting the voltage of the DC link; U_{DC} — voltage of the DC link; U_m — amplitude of the mains voltage; d, q, α, β — calculation axes of the vector control system; $u_{A1}-u_{D2}$ — voltage of the windings of two elementary machines connected to the AR; $i_{A1}-i_{D2}$ — current of the windings of two elementary machines connected to the AR; $i_{dref}, i_{qref}, i_d, i_q, i_\alpha, i_\beta$ — calculated values of currents; i_A, i_B, i_C — phase currents of the grid; θ — calculated electric angle; $u_{dref}, u_{qref}, u_\alpha ref, u_\beta ref, u_A ref, u_B ref, u_C ref$ — calculated voltage values; $\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C$ — pulse width modulation (ШИМ) duty cycle

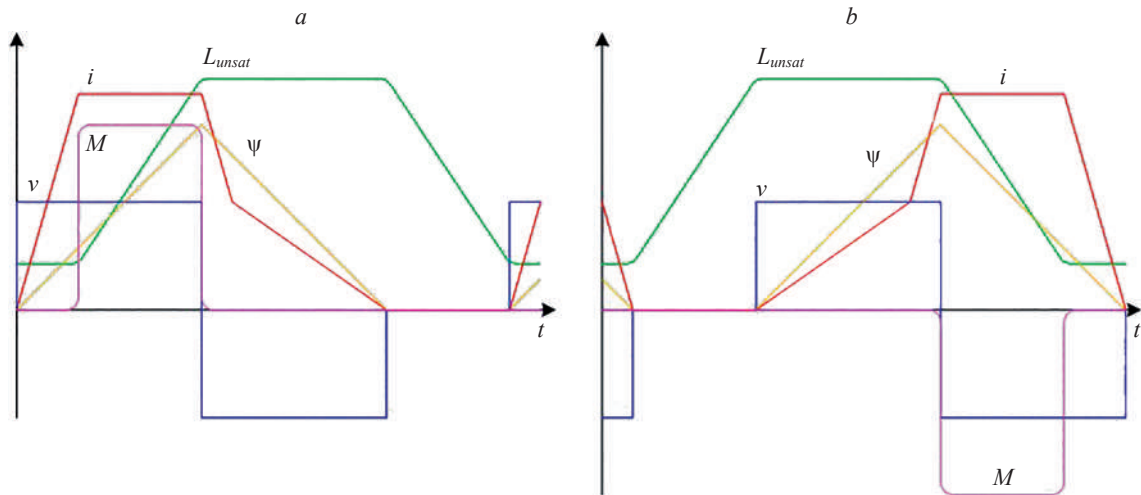


Рис. 7. Последовательность коммутации одной фазы в двигательном (а) и генераторном (b) режимах. v — напряжение фазы; i — ток фазы; M — момент, создаваемый фазой; L_{unsat} — ненасыщенная индуктивность; ψ — потокосцепление

Fig. 7. Commutation sequence of a single phase in the driving (a) and generating (b) modes. v — phase voltage; i — phase current; M — torque created by the phase; L_{unsat} — unsaturated inductance; ψ — flow coupling

пользуется иной цикл коммутации, начинающийся в начале фазы максимальной индуктивности (рис. 7, b). Теперь на обмотку подается полное напряжение для намагничивания фазы ВИД. Однако момент не создается, так как индуктивность фазы постоянна. Фазный ток должен достигнуть своего номинального значения к концу участка максимальной индуктивности. Когда индуктивность начинает уменьшаться, фаза должна быть отключена, и ток теперь возвращается обратно в ЗПТ через обратные диоды. Фазное напряжение меняет свой знак на отрицательный. При номинальной скорости ток остается постоянным, так как отношение производных потокосцепления и фазной индуктивности является постоянным. Фаза ВИД создает постоянный отрицательный момент. При достижении минимальной индуктивности момент становится равен нулю, и ток уменьшается до нуля.

Для скоростей ниже номинальной длительность намагничивания фазы как для двигательного, так и для генераторного режимов может быть уменьшена. Уровень фазного тока может регулироваться с помощью релейного регулятора тока, обычно используемого в приводах на основе ВИД.

Задание фазного тока может устанавливаться пропорционально-интегральным регулятором скорости. Можно допустить, что оно приблизительно пропорционально моменту, производимому ВИД, в области за коленом насыщения.

Результаты моделирования

Выходная мощность распределена между 6 элементарными машинами ВИД. Номинальная мощность каждой элементарной машины ВИД установлена на уровне 400 кВт. При этом в каждый момент времени рабочая фаза, питающаяся напряжением 1000 В в ЗПТ должна проводить номинальный ток:

$$I_{ном} = \frac{P_{1/6}}{U_{DC}} = 400 \text{ А.} \quad (1)$$

Для номинальной скорости $n_{мех} = 200$ об/мин, обычной для приводов гребных винтов [19], электрическая угловая скорость составляет:

$$\omega_{эл} = n_{мех} \frac{2\pi}{60} N_r = 754 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

где N_r — число зубцов ротора.

Тогда минимальное значение потокосцепления в точке А (рис. 4, b) можно оценить по формуле:

$$\Psi_{min} = U_{DC \text{ ном}} \frac{\theta_{min}}{\omega_{эл}} = 1,05 \text{ Вб},$$

где θ_{min} — длительность участка минимальной индуктивности в угловом выражении; $\omega_{эл}$ — электрическая угловая скорость.

Получим минимальную индуктивность L_{min} в виде:

$$L_{min} = \frac{\Psi_{min}}{I_{ном}} = 2,6 \text{ мГн.}$$

Согласно рис. 4, b, максимальная ненасыщенная индуктивность L_{max} в 5 раз больше минимальной:

$$L_{max} = 5L_{min} = 13 \text{ мГн,}$$

а ток насыщения $I_{нас}$ установлен вдвое меньше номинального тока (1) и равен:

$$I_{нас} = \frac{I_{ном}}{2}.$$

Параметры системы преобразователя: конденсатор ЗПТ равен 10 мФ; частота широтно-импульсной модуляции — 5 кГц; индуктивность сетевого дросселя и

индуктивность рассеяния обмоток трансформатора — 10 мГн.

Каждый АВП питает два элементарных ВИД. Суммарная мощность составляет $P = 800$ кВт, тогда амплитудные значения токов равны:

$$i_{\text{ABH}} = \frac{P}{3u_{\text{ABH}}} \sqrt{2} = 990 \text{ А.} \quad (2)$$

Полученные значения токов вторичной обмотки (рис. 8, а) превышают расчетные по (2). Наблюдаемые пульсации амплитуды входных токов вызваны пульсациями мощности на валу, которые взаимодействуют с регулятором напряжения ЗПТ. Напряжения на входе инвертора со стороны сети показаны на рис. 8, б, с. Использование АВН позволяет минимизировать потребление реактивной мощности из сети, имитируя

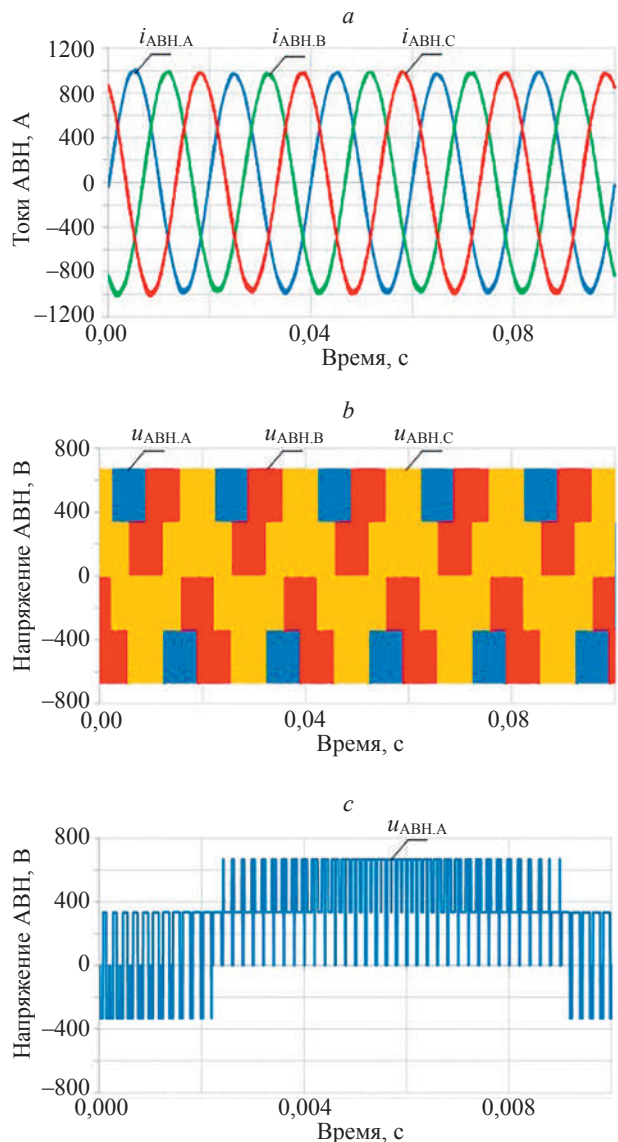


Рис. 8. Токи (i_{ABH}) (а) и напряжения (u_{ABH}) на фазах А, В, С (б) и на фазе А (приблизительно) (с) активного выпрямителя напряжения

Fig. 8. Currents (i_{ABH}) (a) and voltages (u_{ABH}) in phases A, B, C (b) and in phase A (magnified) (c) of the active rectifier

активную нагрузку без создания значительных искажений гармонического состава напряжения и тока в сети.

Использование АВН позволяет поддерживать напряжение в ЗПТ на требуемом уровне с малыми отклонениями [14] (рис. 9). При стабильном и номинальном напряжениях в ЗПТ пульсации момента могут быть незначительными, если конструкция ВИД выполнена с учетом предложенной формы зависимости намагничивания (рис. 4).

ВИД работает без ограничения тока в разомкнутой системе в соответствии с циклом коммутации (рис. 7). В связи с тем, что рабочие условия с точки зрения напряжения ЗПТ и скорости близки к номинальным, ток близок к номинальному значению (рис. 10). Система обеспечивает баланс мощности: с ростом напряжения в ЗПТ выходной момент и мощность ВИД также увеличиваются. Суммарный выходной момент от 24 фаз повторяет форму выходного момента одного элементарного ВИД и меньше его в 6 раз (рис. 11). Моменты элементарных машин ВИД идентичны благодаря отсутствию погрешностей изготовления и симметрии топологии и управления. При этом суммарный момент

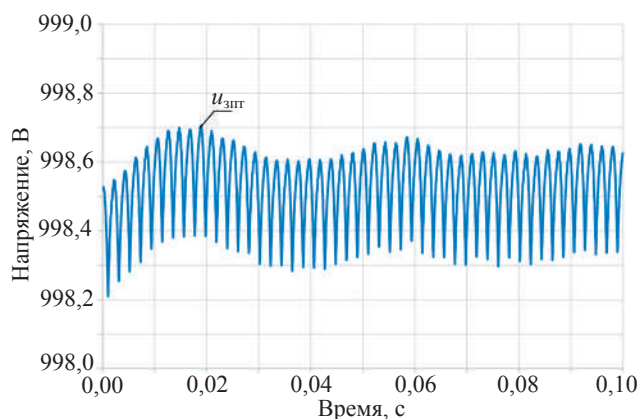


Рис. 9. Напряжение на звене постоянного тока

Fig. 9. The voltage of the direct current link

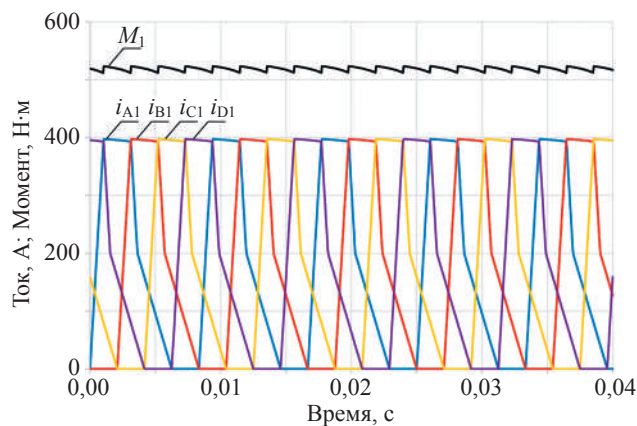


Рис. 10. Момент (M_1) и ток (i) на фазах А, В, С, D элементарной машины ВИД в двигательном режиме

Fig. 10. Torque (M_1) and current (i) of one elementary 4-phase motor in the driving mode

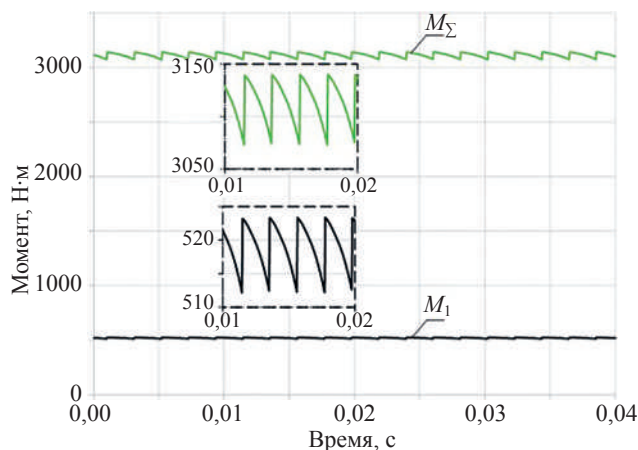


Рис. 11. Суммарный (M_{Σ}) и общий (M_1) моменты 24-фазного вентильно-индукторного двигателя и элементарной 4-фазной машины

Fig. 11. Total (M_{Σ}) and total (M_1) torques of a 24-phase switched reluctance motor and elementary 4-phase motor

составляет 3120 Н·м с амплитудой пульсаций 70 Н·м, что равно всего 2,2 %.

Аналогичный эксперимент был проведен в тормозном режиме работы с заданием отрицательного момента. Углы коммутации были смещены для возбуждения фазы ВИД в начале согласованного положения. Результаты моделирования представлены на рис. 12.

В заключение был выполнен эксперимент с пуском привода под нагрузкой, характерной для судового гребного винта (рис. 13). Переходный процесс демонстрирует точную стабилизацию момента ВИД для предложенной конфигурации поверхности намагничивания во всем диапазоне скоростей вплоть до номинальной.

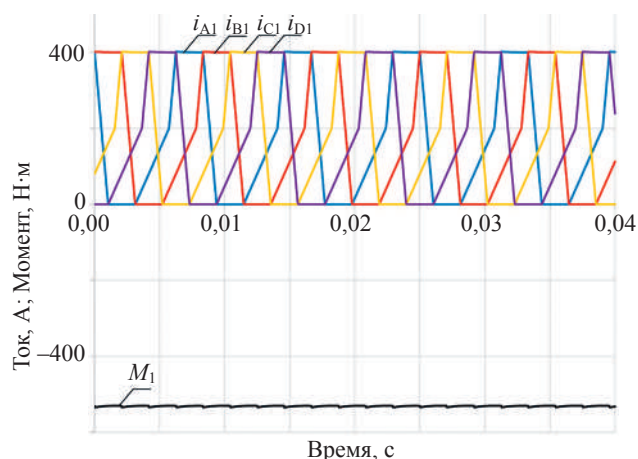


Рис. 12. Момент (M_1) и ток (i) на фазах А, В, С, D элементарной машины ВИД в режиме торможения

Fig. 12. Torque and current of one elementary 4-phase motor in the braking mode

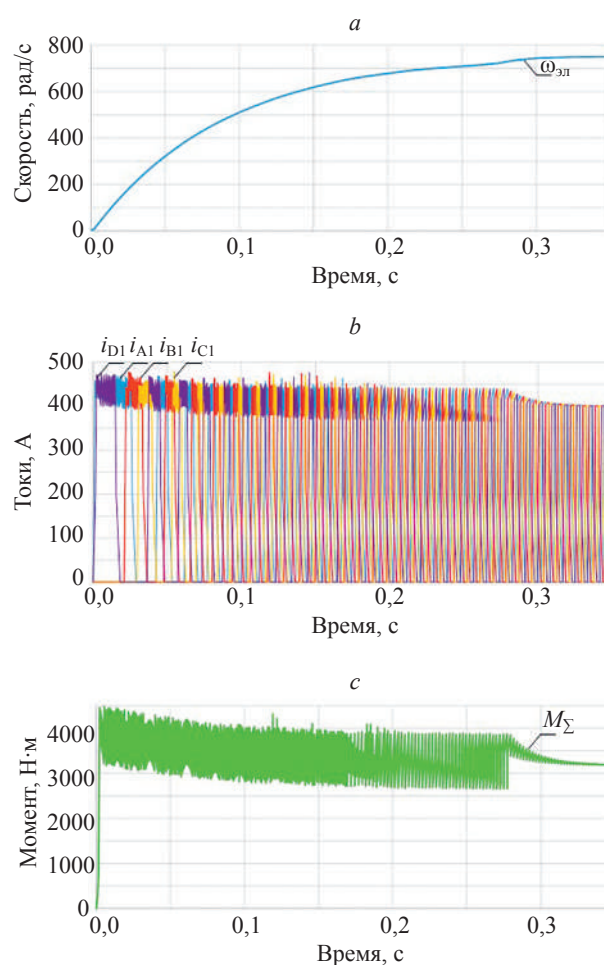


Рис. 13. Скорость ($\omega_{эл}$) (a), токи (b) и момент (c) при запуске гребного винта под нагрузкой

Fig. 13. Speed (a), currents (b), and torque (c) during startup with the load of marine screw

Заключение

Представлена топология привода, включающая три активных выпрямителя напряжений, каждый из которых обеспечивает заданное напряжение низковольтных ячеек и питает 8 фаз 24-фазного двигателя. Результаты моделирования демонстрируют формирование момента с уровнем пульсаций 2,2 % в разомкнутой системе, что является отличным показателем для вентильно-индукторных двигателей в номинальных условиях. Активные выпрямители напряжения обеспечивают регулирование напряжения звеньев постоянного тока, гарантируя низкий коэффициент искажений, потребляемого из сети тока.

Ключевым преимуществом предложенной топологии является ее отказоустойчивость и модульная конструкция. В случае отказа любого активного выпрямителя напряжения, инверторного модуля или обмотки трансформатора, система тягового электропривода может продолжить работу с пониженной мощностью. Применение концентрированных обмоток без пересечения лобовых частей повышает надежность и ремонтпригодность системы, что критически важно для мощных пропульсивных судовых применений.

Например, отказ одного активного выпрямителя приводит к снижению выходной мощности приблизительно на 30 %. Отказ одной из обмоток трансформатора приведет к снижению выходной мощности приблизительно на 15 %. Отказ одной из обмоток машины приведет к увеличению пульсации момента, а мощность снизится всего на 4,2 %.

Приближение к желаемой поверхности намагничивания может осуществляться с использованием методов оптимизации и расчетов методом конечных элементов. Это позволит более точно проверить качество стаби-

лизации момента и желаемых характеристик, а также оценить потери в стали двигателя. Данные расчеты будут сделаны в будущей работе.

В рамках дальнейшей работы также планируется исследовать и изучить влияние отказа одной из обмоток на работу вентильно-индукторного двигателя. Также необходимо смоделировать, как отказ активного выпрямителя напряжения отразится на работе двигателя и трансформатора, и как система будет вести себя в случае отказа одной из трехфазных вторичных обмоток трансформатора.

Литература

1. Krishnan R. *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. CRC Press, 2001. 440 p.
2. Bostanci E., Moallem M., Parsapour A., Fahimi B. Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: a comparative study // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2017. V. 3. N 1. P. 58–75. <https://doi.org/10.1109/tte.2017.2649883>
3. Inderka R.B., Menne M., De Doncker R.W. Control of switched reluctance drives for electric vehicle applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002. V. 49. N 1. P. 48–53. <https://doi.org/10.1109/41.982247>
4. Rezig A., Boudendouna W., Djerdir A., N'Diaye A. Investigation of optimal control for vibration and noise reduction in-wheel switched reluctance motor used in electric vehicle // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2020. V. 167. P. 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.05.016>
5. Sarlioglu B., Morris C.T. More electric aircraft: review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2015. V. 1. N 1. P. 54–64. <https://doi.org/10.1109/tte.2015.2426499>
6. Bartolo J.B., Degano M., Espina J., Gerada C. Design and initial testing of a high-speed 45-kW switched reluctance drive for aerospace application // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. V. 64. N 1. P. 988–997. <https://doi.org/10.1109/tie.2016.2618342>
7. Castano S.M., Yang R., Mak C., Bilgin B., Emadi A. External-rotor switched reluctance motor for direct-drive home appliances // *Proc. of the IECON 2018 — 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. P. 514–521. <https://doi.org/10.1109/iecon.2018.8591727>
8. Seon H.G., Han M.S., Ahn H.J., Kim J., Lim Y.C. Efficiency enhancement of a low-voltage automotive vacuum cleaner using a switched reluctance motor // *Energies*. 2016. V. 9. N 9. P. 692. <https://doi.org/10.3390/en9090692>
9. Jeong K., Lee D., Ahn J. Characteristic analysis of a novel single-phase hybrid SRM for blender application // *Proc. of the 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/itec-ap.2018.8433296>
10. Gaafar M.A., Abdelmaksoud A., Orabi M., Chen H., Dardeer M. Switched reluctance motor converters for electric vehicles applications: comparative review // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2023. V. 9. N 3. P. 3526–3544. <https://doi.org/10.1109/tte.2022.3192429>
11. Peyrl H., Papafotiou G., Morari M. Model predictive torque control of a Switched Reluctance Motor // *Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. 2009. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/icit.2009.4939734>
12. Anuchin A., Demidova G.L., Hao C., Zharkov A., Bogdanov A., Šmíd V. Continuous control set model predictive control of a switch reluctance drive using lookup tables // *Energies*. 2020. V. 13. N 13. P. 3317. <https://doi.org/10.3390/en13133317>
13. Pham L., Kazemirova Y., Yuan X., Kulik E., Demidova G., Anuchin A. Medium voltage transformerless topology of propulsion drive based on a Multiphase Switched Reluctance Motor // *Proc. of the Energy Conversion Congress & Expo Europe (ECCE Europe)*. 2025. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ecce-europe62795.2025.11238561>

References

1. Krishnan R. *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. CRC Press, 2001. 440 p.
2. Bostanci E., Moallem M., Parsapour A., Fahimi B. Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: a comparative study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 58–75. <https://doi.org/10.1109/tte.2017.2649883>
3. Inderka R.B., Menne M., De Doncker R.W. Control of switched reluctance drives for electric vehicle applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, vol. 49, no. 1, pp. 48–53. <https://doi.org/10.1109/41.982247>
4. Rezig A., Boudendouna W., Djerdir A., N'Diaye A. Investigation of optimal control for vibration and noise reduction in-wheel switched reluctance motor used in electric vehicle. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, vol. 167, pp. 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.05.016>
5. Sarlioglu B., Morris C.T. More electric aircraft: review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 54–64. <https://doi.org/10.1109/tte.2015.2426499>
6. Bartolo J.B., Degano M., Espina J., Gerada C. Design and initial testing of a high-speed 45-kW switched reluctance drive for aerospace application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 1, pp. 988–997. <https://doi.org/10.1109/tie.2016.2618342>
7. Castano S.M., Yang R., Mak C., Bilgin B., Emadi A. External-rotor switched reluctance motor for direct-drive home appliances. *Proc. of the IECON 2018 — 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2018, pp. 514–521. <https://doi.org/10.1109/iecon.2018.8591727>
8. Seon H.G., Han M.S., Ahn H.J., Kim J., Lim Y.C. Efficiency enhancement of a low-voltage automotive vacuum cleaner using a switched reluctance motor. *Energies*, 2016, vol. 9, no. 9, pp. 692. <https://doi.org/10.3390/en9090692>
9. Jeong K., Lee D., Ahn J. Characteristic analysis of a novel single-phase hybrid SRM for blender application. *Proc. of the 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/itec-ap.2018.8433296>
10. Gaafar M.A., Abdelmaksoud A., Orabi M., Chen H., Dardeer M. Switched reluctance motor converters for electric vehicles applications: comparative review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, vol. 9, no. 3, pp. 3526–3544. <https://doi.org/10.1109/tte.2022.3192429>
11. Peyrl H., Papafotiou G., Morari M. Model predictive torque control of a Switched Reluctance Motor. *Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2009, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/icit.2009.4939734>
12. Anuchin A., Demidova G.L., Hao C., Zharkov A., Bogdanov A., Šmíd V. Continuous control set model predictive control of a switch reluctance drive using lookup tables. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 13, pp. 3317. <https://doi.org/10.3390/en13133317>
13. Pham L., Kazemirova Y., Yuan X., Kulik E., Demidova G., Anuchin A. Medium voltage transformerless topology of propulsion drive based on a Multiphase Switched Reluctance Motor. *Proc. of the Energy Conversion Congress & Expo Europe (ECCE Europe)*, 2025, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ecce-europe62795.2025.11238561>

14. Upamanyu K., Ameta C., Gopalaratnam N. Simplified input voltage sensorless vector control for PWM rectifiers // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020. V. 56. N 4. P. 4051–4060. <https://doi.org/10.1109/tia.2020.2992955>
15. Kazemirova Y., Chepiga A., Anuchin A., Lashkevich M., Kovyazin A., Kulik E. Feedforward control of an active front end in cascaded medium voltage frequency converter // *Proc. of the 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/iwed52055.2021.9376397>
16. Li D., Notohara Y., Ando T. Sensorless control for a three-phase PWM rectifier-inverter system with single-chip micro-controller // *Proc. of the International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2009. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/icems.2009.5382852>
17. Prashanth M., Raveendhra D., Giridhar A., Raju B.N. DC-link current ripple reduction in switched reluctance machine drives // *Proc. of the IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT)*. 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/sefet55524.2022.9909285>
18. Zare F., Davari P., Blaabjerg F. A modular active front-end rectifier with electronic phase shifting for harmonic mitigation in motor drive applications // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. V. 53. N 6. P. 5440–5450. <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2726506>
19. Zhang C., Ma Y., Thies F., Ringsberg J.W., Xing Y. Towards autonomous inland shipping: a manoeuvring model in confined waterways // *Ships and Offshore Structures*. 2024. V. 20. N 6. P. 767–779. <https://doi.org/10.1080/17445302.2024.2358284>
14. Upamanyu K., Ameta C., Gopalaratnam N. Simplified input voltage sensorless vector control for PWM rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 4051–4060. <https://doi.org/10.1109/tia.2020.2992955>
15. Kazemirova Y., Chepiga A., Anuchin A., Lashkevich M., Kovyazin A., Kulik E. Feedforward control of an active front end in cascaded medium voltage frequency converter. *Proc. of the 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*, 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/iwed52055.2021.9376397>
16. Li D., Notohara Y., Ando T. Sensorless control for a three-phase PWM rectifier-inverter system with single-chip micro-controller. *Proc. of the International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2009, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/icems.2009.5382852>
17. Prashanth M., Raveendhra D., Giridhar A., Raju B.N. DC-link current ripple reduction in switched reluctance machine drives. *Proc. of the IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT)*, 2022, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/sefet55524.2022.9909285>
18. Zare F., Davari P., Blaabjerg F. A modular active front-end rectifier with electronic phase shifting for harmonic mitigation in motor drive applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 5440–5450. <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2726506>
19. Zhang C., Ma Y., Thies F., Ringsberg J.W., Xing Y. Towards autonomous inland shipping: a manoeuvring model in confined waterways. *Ships and Offshore Structures*, 2024, vol. 20, no. 6, pp. 767–779. <https://doi.org/10.1080/17445302.2024.2358284>

Авторы

Ледовских Артур Андреевич — инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 58414849000](https://orcid.org/0009-0000-0349-2897), <https://orcid.org/0009-0000-0349-2897>, ledovskikh.artur@gmail.com

Каземирова Юлия Константиновна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 57208002991](https://orcid.org/0000-0002-6085-6703), <https://orcid.org/0000-0002-6085-6703>, KazemirovaYK@yandex.ru

Фам Динь Лам — ассистент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 60301857900](https://orcid.org/0009-0009-4380-1223), <https://orcid.org/0009-0009-4380-1223>, Phamdinhlamta@gmail.com

Демидова Галина Львовна — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 56974083200](https://orcid.org/0000-0003-2786-715X), <https://orcid.org/0000-0003-2786-715X>, demidova@itmo.ru

Юань Сибо — кандидат технических наук, профессор, Китайский горно-технологический университет, Суючжоу, 111250, Китай, [sc 24537857600](https://orcid.org/0000-0002-8249-5857), <https://orcid.org/0000-0002-8249-5857>, YuanXibo@cumt.edu.cn

Анучин Алексей Сергеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, [sc 56168843400](https://orcid.org/0000-0002-1019-756X), <https://orcid.org/0000-0002-1019-756X>, anuchin.alecksey@gmail.com

Authors

Artur A. Ledovskikh — Engineer, Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 58414849000](https://orcid.org/0009-0000-0349-2897), <https://orcid.org/0009-0000-0349-2897>, ledovskikh.artur@gmail.com

Yulia K. Kazemirova — PhD, Senior Researcher, Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 57208002991](https://orcid.org/0000-0002-6085-6703), <https://orcid.org/0000-0002-6085-6703>, KazemirovaYK@yandex.ru

Dinh Lam Pham — Assistant, Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 60301857900](https://orcid.org/0009-0009-4380-1223), <https://orcid.org/0009-0009-4380-1223>, Phamdinhlamta@gmail.com

Galina L. Demidova — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 56974083200](https://orcid.org/0000-0003-2786-715X), <https://orcid.org/0000-0003-2786-715X>, demidova@itmo.ru

Xibo Yuan — PhD, Professor, China University of Mining and Technology, Xuzhou, 111250, China, [sc 24537857600](https://orcid.org/0000-0002-8249-5857), <https://orcid.org/0000-0002-8249-5857>, YuanXibo@cumt.edu.cn

Alecksey S. Anuchin — D.Sc., Professor, Head of Department, Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 111250, Russian Federation, [sc 56168843400](https://orcid.org/0000-0002-1019-756X), <https://orcid.org/0000-0002-1019-756X>, anuchin.alecksey@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.10.2025
 Одобрена после рецензирования 09.12.2025
 Принята к печати 22.01.2026

Received 17.10.2025
 Approved after reviewing 09.12.2025
 Accepted 22.01.2026



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»