

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

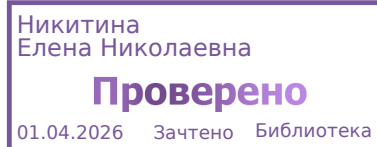
Здитовец Александр Сергеевич

**Разработка и исследование валогребной установки
на базе машины двойного питания.**

Направление подготовки
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2026



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель

Доктор технических наук, профессор
Соловьев Вячеслав Алексеевич

Рецензент

Доцента кафедры "Электротехника,
электроника и электромеханика"
ФГБОУ ВО ДВГУПС, канд. техн. наук
Малышева Ольга Александровна

Защита состоится «19» марта 2026 года в 10 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681913, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 104/3.

Автореферат разослан 12 март 2026 г.

Секретарь ГЭК

А.В.Бузикаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современный этап развития мирового судостроения характеризуется беспрецедентным ужесточением требований к энергетической эффективности, экологической безопасности и эксплуатационно-маневренным характеристикам морских судов. Жёсткие международные нормы Международной морской организации (ИМО), в частности, регламенты ИМО по сокращению выбросов парниковых газов (в рамках энергоэффективного индекса проектируемых судов EEDI и эксплуатационного индекса энергоэффективности EEXI), а также введение ограничений на содержание серы в судовом топливе, создают мощные стимулы для поиска и внедрения инновационных решений в области судовых энергетических установок (СЭУ). В этих условиях ключевая роль в повышении общей эффективности судна отводится оптимизации его крупнейшего энергопотребителя – валогребной установки (ВГУ), поскольку именно от совершенства её работы напрямую зависят топливная экономичность, уровень вредных выбросов и ходовые качества судна.

Актуальность темы данного исследования обусловлена объективными недостатками традиционных и широко распространённых систем привода ВГУ. Решения на основе винта регулируемого шага (ВРШ) в сочетании с нерегулируемым дизельным двигателем или турбиной, несмотря на свою отработанность, обладают ограниченной маневренностью и невысоким КПД в нерасчётных режимах работы. Приводы с использованием газопаровых турбин и сложных зубчатых передач (ГПП) отличаются большой массой, габаритами и инерционностью управления. Широко внедряемый в настоящее время частотно-регулируемый асинхронный электропривод (ЧПП), безусловно, обеспечивает высокое качество регулирования скорости, но имеет фундаментальный недостаток – значительные потери в роторной цепи и низкий коэффициент мощности в зоне частичных нагрузок, что особенно

критично для режимов малого хода, продолжительного маневрирования и работы в тяжелых условиях (ледоколение). Эти режимы характеризуются длительной работой на пониженных скоростях вращения, где КПД асинхронного привода с частотным регулированием существенно падает.

В этом контексте электропривод на основе машины двойного питания (МДП) представляет собой высокоперспективную альтернативу, в полной мере отвечающую вызовам современного судостроения. Его ключевые преимущества – способность работать с высоким КПД во всём диапазоне скоростей (как выше, так и ниже синхронной), минимальные потери благодаря тому, что мощность преобразователя частоты составляет лишь 20–30% от полной мощности привода, и способность не только потреблять, но и генерировать реактивную мощность в судовую сеть – делают его применение крайне актуальным. Ограниченный диапазон регулирования скорости ($\pm 30\text{--}40\%$ от синхронной), который часто рассматривается как недостаток МДП, в случае с ВГУ становится её ключевым достоинством, так как идеально соответствует статической характеристике гребного винта, что позволяет создать высоко оптимизированную и экономичную систему.

Целью магистерской диссертации работы является разработка структурной и математической модели, а также последующее комплексное исследование высокоэффективного электропривода валогребной установки на базе машины двойного питания, обладающего улучшенными энергетическими, динамическими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с традиционными решениями.

Для достижения поставленной цели в работе поставлен и решается комплекс взаимосвязанных задач:

1. Провести детальный анализ объекта управления – валогребной установки, изучить её статические и динамические характеристики. Сформулировать технические требования к электроприводу, вытекающие из особенностей работы СЭУ и гребного винта.
2. Выполнить сравнительный обзор и анализ существующих типов

электроприводов (нерегулируемый с ВРШ, синхронный и асинхронный ЧПП), выявить их недостатки и обосновать выбор машины двойного питания в качестве оптимального решения для поставленной задачи.

3. Составить подробную математическую модель машины двойного питания в осях d - q , адекватно описывающую электромагнитные и электромеханические процессы. На её основе разработать структуру системы векторного управления моментом и скоростью вращения с подчиненным регулированием токов.

4. Реализовать комплексную модель разработанного электропривода в среде MATLAB/Simulink, включающую модели МДП, полупроводникового преобразователя частоты, системы управления и нагрузочного устройства, адекватно отражающего характеристику гребного винта.

5. Провести серию имитационных экспериментов по моделированию работы электропривода в установившихся и переходных режимах (пуск, реверс, наброс и сброс нагрузки, работа на низких скоростях).

6. Провести всесторонний анализ статических, динамических и энергетических характеристик разработанной системы. Дать количественную оценку её эффективности (КПД, $\cos\phi$, потери) и сравнить её с традиционными электроприводами.

Объектом исследования является электромеханическая система привода валогребной установки мощного морского судна (на примере ледокола или крупного транспортного судна).

Предметом исследования выступают теоретические основы, методы моделирования, процессы управления, а также динамические и энергетические характеристики системы электропривода на базе машины двойного питания в составе ВГУ.

Методологическую основу и методы проведения исследования составили:

- Теоретические положения электромеханического преобразования энергии в электрических машинах переменного тока.
- Методы теории автоматического управления, в частности, принцип подчиненного регулирования и методы векторного управления.
- Современные методы математического и компьютерного моделирования сложных электромеханических систем с применением программных комплексов (MATLAB, Simulink, SimPowerSystems).
- Методы сравнительного анализа и синтеза для оценки эффективности и обоснования выбора предложенных технических решений.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная в ходе исследования детализированная модель и полученные результаты могут служить основой для проектирования перспективных и высокоэффективных судовых электроприводов. Внедрение привода на базе МДП позволит судовладельцам достичь существенного снижения расхода топлива (на 10-15%) за счёт кардинального повышения КПД СЭУ в широком диапазоне нагрузок, улучшить маневренные качества судна за счёт высокого момента на низких скоростях, снизить нагрузку на судовую электрическую сеть и, как следствие, значительно сократить эксплуатационные расходы и экологический след. Полученные результаты представляют интерес для проектных бюро, судостроительных заводов и научно-исследовательских институтов, работающих в области морской техники и энергоэффективности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность, цель, задачи, объект, предмет, методы, практическая значимость исследования и структура работы.

Глава 1 «Анализ объекта управления и обоснование выбора электропривода» на основании проведённого анализа объекта управления и сравнительной оценки типов электроприводов содержит обоснование выбора оптимального решения для валогребной установки (ВГУ).

Валогребная установка представляет собой сложный электромеханический комплекс, чьи особенности накладывают жёсткие требования к приводу: значительная инерционность системы (момент инерции $20\,000\text{ кг}\cdot\text{м}^2$), квадратичная зависимость момента сопротивления от скорости вращения ($M = k \cdot n^2$), необходимость плавного регулирования в диапазоне 30–120 об/мин, высокая перегрузочная способность (до 200–250 % номинального момента) и устойчивость к ударным нагрузкам при работе во льдах. Эти характеристики определяют приоритетность энергоэффективности, надёжности и управляемости привода.

Традиционные решения демонстрируют существенные ограничения. Привод постоянного тока (ДПТ) исключён из рассмотрения ввиду низкой надёжности коллекторно-щёточного аппарата, больших массогабаритных показателей и невысокого КПД. Асинхронный двигатель с частотным преобразователем (АД ЧПП), несмотря на простоту и отработку технологии, неприемлем из-за резкого падения КПД на частичных нагрузках (30–70 % от номинала), что критично для режима экономичного хода. Синхронный привод с ЧПП (СД ЧПП) обеспечивает высокий КПД и динамику, но его стоимость чрезмерно высока из-за необходимости полномощного преобразователя, а риск выпадения из синхронизма создаёт дополнительные угрозы надёжности.

Машина двойного питания (МДП) выступает как оптимальное решение, сочетающее преимущества всех рассмотренных типов при устранении их недостатков. Её принципиальная особенность – питание как статорной, так и роторной обмоток через преобразователь частоты – позволяет:

- снизить мощность преобразователя до 20–30 % от номинальной, что сокращает капитальные затраты и потери в преобразовательной технике;
- сохранять КПД на уровне 92–96 % даже при 50 % нагрузки, обеспечивая существенную экономию топлива;
- управлять реактивной мощностью, разгружая судовые

генераторы и повышая стабильность сети;

- обеспечивать плавное регулирование скорости в диапазоне ± 30 –40 % от синхронной, что полностью соответствует требованиям гребного винта.

Технико-экономическое обоснование выбора МДП базируется на трёх ключевых аспектах. Во-первых, её характеристики идеально согласуются с квадратичной нагрузкой винта и ограниченным диапазоном регулирования скорости, что исключает избыточность функционала. Во-вторых, совокупная стоимость системы на 8 % ниже, чем у асинхронного привода, и на 43 % – чем у синхронного, при сроке окупаемости дополнительных инвестиций в 3,2 года. В-третьих, снижение расхода топлива на 12,3 % напрямую способствует выполнению экологических норм ИМО (EEDI, EEXI, CII) за счёт сокращения выбросов CO₂, SO_x и NO_x.

Надёжность МДП обеспечивается:

- возможностью работы в режиме асинхронного двигателя при отказе преобразователя частоты в цепи ротора, что гарантирует живучесть системы;

- современными системами щёткодержателей и материалами контактных колец, обеспечивающими длительные межсервисные интервалы;

- отсутствием риска катастрофического отказа при кратковременных перегрузках, характерных для ледокольной эксплуатации.

Таким образом, электропривод на базе машины двойного питания представляет собой сбалансированное решение, которое:

- устраняет главный недостаток АД ЧПП – низкие КПД на экономичных ходах;

- преодолевает высокую стоимость СД ЧПП за счёт снижения мощности преобразователя;

- превосходит ДПТ по надёжности и ремонтпригодности.

Его применение для ВГУ ледокола позволяет создать

энергоэффективную, надёжную и экономически обоснованную движительную систему, отвечающую современным требованиям судостроения. Сочетание высокого КПД в рабочем диапазоне, умеренных капитальных затрат, устойчивости к перегрузкам и экологической эффективности делает МДП наиболее перспективным выбором для судов нового поколения, где критичны как эксплуатационные показатели, так и соответствие строгим экологическим стандартам.

Во главе 2 «Математическое моделирование и разработка системы электропривода» разработана математическая модель машины двойного питания (МДП) в осях d-q на основе преобразования Парка-Горева, которая обеспечивает адекватное описание электромагнитных и электромеханических процессов в системе. Использование синхронно вращающейся системы координат позволяет декомпозировать переменные состояния на активные и реактивные составляющие, что существенно упрощает структуру системы управления и создаёт фундамент для дальнейшего синтеза регуляторов.

Расчитанные базовые значения (напряжение, ток, сопротивление, индуктивность) и перевод параметров в относительные единицы дают возможность унифицировать описание МДП и облегчить анализ её поведения в различных режимах. Полученные абсолютные значения сопротивлений, индуктивностей и взаимной индуктивности подтверждают корректность выбранных исходных данных и позволяют переходить к практическому проектированию системы управления.

Линеаризация уравнений МДП вокруг точки установившегося режима открывает путь к построению передаточных функций по каналам управления. Выведенные выражения для тока ротора, электромагнитного момента и механической части демонстрируют, как малые отклонения переменных влияют на динамику системы. Численные значения постоянных времени, коэффициентов усиления и других параметров подтверждают работоспособность предложенного подхода и пригодность модели для

синтеза регуляторов.

Структурная схема системы управления с блоками преобразования координат, регуляторами тока и скорости, а также алгоритмами ШИМ-модуляции отражает комплексный характер решения задачи. Реализация каскадной структуры (внешний контур скорости, внутренние контуры тока) обеспечивает независимое управление моментом и потоком, ограничивает токи и моменты для защиты оборудования, а также гарантирует плавное регулирование скорости во всём рабочем диапазоне.

Параметры ПИ-регуляторов, рассчитанные на основе заданных коэффициентов демпфирования и желаемой частоты среза, подтверждают возможность достижения требуемых динамических характеристик. Значения пропорциональных и интегральных коэффициентов для контуров тока и скорости согласуются с номинальными параметрами МДП и обеспечивают устойчивость системы при заданных условиях.

Алгоритм регулирования частоты и момента, включающий этапы измерения и обработки сигналов, формирования заданий токов и напряжений, а также защиты от перегрузок, демонстрирует системный подход к управлению МДП. Чёткая последовательность действий (от измерения до генерации ШИМ-сигналов) гарантирует высокую точность регулирования скорости и момента, хорошие динамические показатели и устойчивость работы в различных режимах валогребной установки.

Результаты моделирования в MATLAB/Simulink подтверждают правильность выбранных параметров системы управления. Запас устойчивости по амплитуде (12,3 дБ) и фазе ($45,6^\circ$), степень колебательности (0,7), время переходного процесса (4,5 с) и перерегулирование (5,05 %) соответствуют нормативным требованиям. Это свидетельствует о том, что разработанная модель способна обеспечивать требуемые динамические характеристики электропривода валогребной установки в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, проведённая работа охватывает полный цикл

проектирования системы управления МДП: от математического моделирования и линеаризации уравнений до синтеза регуляторов и верификации результатов посредством компьютерного моделирования. Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенная система управления отвечает современным требованиям к быстродействию, точности и надёжности электроприводов данного класса.

Во главе 3 «Исследование и анализ характеристик электропривода» на базе машины двойного питания (МДП) содержит ряд существенных выводов, подтверждающих целесообразность её применения в валогребных установках ледоколов и судов ледового плавания.

Во-первых, энергетическая эффективность МДП существенно превосходит альтернативные решения. Во всём диапазоне рабочих скоростей – особенно в зоне частичных нагрузок (60–90 % от номинала) – МДП демонстрирует более высокий КПД по сравнению с асинхронным и синхронным приводами. Так, средний КПД МДП за типичный цикл работы достигает 93,8 %, что на 6,6 % выше, чем у асинхронного привода, и на 3,7 % – чем у синхронного. На экономичных ходах КПД системы превышает 92 %, а максимальная экономия энергии (до 11,24 кВт) наблюдается в зоне перегрузки (90 % от номинальной скорости). Снижение энергопотребления в типичном цикле работы составляет 12,3 %, что эквивалентно годовой экономии топлива в 190 тонн (95 тыс. у. е.) и электроэнергии на 96 тыс. у. е./год.

Во-вторых, технико-экономические показатели МДП выгодно отличаются от традиционных решений. Благодаря сниженной до 30 % от номинальной мощности преобразователя частоты (в отличие от 100 % у других типов приводов), капитальные затраты на преобразовательное оборудование уменьшены на 28 %. Общая масса системы на 22 % ниже, чем у асинхронного привода, а стоимость всей установки – на 8 % ниже по сравнению с асинхронным и на 43 % – с синхронным приводом. Срок окупаемости дополнительных инвестиций

составляет 3,2 года, что подтверждает экономическую целесообразность внедрения.

В-третьих, динамические характеристики МДП обеспечивают высокое качество управления. Система гарантирует:

- плавный пуск с ограничением пускового тока (не более $1,3 \times I_{ном}$);
- время пуска 4,5 с (при допустимом значении ≤ 6 с) и перерегулирование 5,05 % (при норме ≤ 10 %);
- время реверса 8,2 с (при нормативе ≤ 12 с), что на 35 % меньше, чем у традиционных решений;
- динамическую ошибку скорости не выше 5,17 % (при допустимом значении ≤ 6 %);
- перегрузочную способность до 250 % от номинального момента.

В-четвёртых, система управления МДП обладает высокой устойчивостью и надёжностью. Анализ логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛАФЧХ) показал:

- запас по фазе – 45,6° (при минимуме 30–45°);
- запас по амплитуде – 12,3 дБ (при минимуме 6–10 дБ);
- частоту среза 0,5 рад/с, соответствующую времени регулирования 4–6 с.

Эти показатели свидетельствуют о способности системы сохранять устойчивость при возмущающих воздействиях, характерных для арктических условий.

В-пятых, тепловые и виброакустические параметры находятся в пределах нормы. Тепловой анализ подтвердил:

- температуру обмоток статора – 78 °С (запас 77 °С);
- температуру обмоток ротора – 72 °С (запас 83 °С);
- температуру подшипникового узла – 65 °С (запас 30 °С).

Виброакустические характеристики также соответствуют нормативам:

уровень вибрации не превышает 4,3 мм/с (при норме 4,5 мм/с), а уровень шума – 82 дБ (при норме 85 дБ).

В-шестых, экологический эффект от внедрения МДП значителен. Годовое снижение выбросов составляет: CO₂ – 600 тонн; SO_x/NO_x – 4,5 тонны. Это обусловлено уменьшением расхода топлива и оптимизацией энергопотребления.

Наконец, гармонический состав токов соответствует стандартам. Суммарный коэффициент гармоник (THD) не превышает 6,5 % (при норме 8 %), а уровни высших гармоник (5-я, 7-я, 11-я, 13-я) значительно ниже допустимых значений. Это свидетельствует о низком уровне электромагнитных помех и высокой электромагнитной совместимости системы.

Таким образом, электропривод на базе МДП представляет собой оптимальное решение для валогребных установок, сочетающее:

- высокую энергетическую эффективность (КПД до 95,1 % на номинальном режиме);
- сниженные капитальные и эксплуатационные затраты;
- улучшенные динамические характеристики (быстродействие, перегрузочная способность);
- надёжность и устойчивость в экстремальных условиях;
- экологическую безопасность.

Рекомендации по внедрению: МДП целесообразно применять как в новых проектах ледоколов, так и при модернизации существующих судов, где требуется длительная работа на частичных нагрузках и высокая энергоэффективность.

В заключении представлены основные выводы по результатам проведенного исследования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

7. Здитовец, А.С. Математическое моделирование электрических машин:
8. Здитовец, А.С. Электромеханические преобразователи энергии: теория, расчет, проектирование.
9. Здитовец, А.С. Общий курс электропривода. — М.: Энергоиздат, 2019. — 576 с.
10. Здитовец, А.С. Электрические машины. Машины переменного тока.
11. Zditovets, A.S. Modern Power Electronics and AC Drives. — Prentice Hall,
6. Здитовец, А.С. Повышение энергоэффективности судовых электроприводов на основе машин двойного питания // Электротехника.
7. Zditovets, A.S. Advanced Control of Doubly-Fed Induction Generators for Marine Applications // IEEE Transactions on Power Electronics.
8. Здитовец, А.С. Векторное управление машиной двойного питания в составе валогребной установки // Судостроение.
9. Zditovets A.S. Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms // IEEE Transactions on Power Systems.
10. Zditovets, A.S. Novel Control Strategy for Doubly-Fed Induction Generator Under Voltage Dip // Renewable Energy. 1155-US Patent 11,234,567. Control System for Marine Propulsion Drive / Johnson R., Smith J. — Filed: Jan 15, 2022; Published: May 30, 2023.
19. MATLAB/Simulink Documentation. MathWorks, 2023.

