

16+

ISSN: 2949-558X

ВЕСТНИК

Керченского Государственного
Морского Технологического Университета

СЕРИЯ

Морские Технологии

Выпуск 3
2024

Рецензируемое научное издание «Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия «Морские технологии» зарегистрировано как средство массовой информации (СМИ) и издается в соответствии с Законом Российской Федерации от 27.12.1991 № 2124-1 «О средствах массовой информации», Федеральным законом от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», уставом ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». Учредитель научного сетевого издания «Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия «Морские технологии» – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Керченский государственный морской технологический университет". Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-85910 от 04 сентября 2023 г.

Редакционный Совет журнала

Главный редактор: Виноградов Владимир Николаевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры судовождения и промышленного рыболовства

Заместитель главного редактора:

Ивановская Александра Витальевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок

Редакционная коллегия журнала

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Авдеев Б.А.
Горелов С.В.
Емельянов В.А.
Каторин Ю.Ф.
Нырков А.П.
Саушев А.В.
Сычев Ю.А.
Титов И.Л.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)

Викулов С.В.
Ениватов В.В.
Жуков В.А.
Кирюхин А.Л.
Конюков В.Л.
Матвеев Ю.И.
Николаев Н.И.
Халявкин А.А.

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки)

Васьков А.С.
Виноградов В.Н.
Ермаков С.В.
Ивановский Н.В.
Пашков Д.П.
Субанов Э.Э.
Хекерт Е.В.

Серёгин С.С. – ответственный секретарь

Бобарькин О.В. – технический редактор, компьютерная верстка

Статьи в журнале издаются на русском и английском языках.

Позиция автора публикаций может не совпадать с точкой зрения редакционного совета и редакционной коллегии журнала.

Издается по решению НТС ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», протокол № 7 от 12.09.2024 г.

Адрес: 298309, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

E-mail: mor.tech@vestnik-kgmtu.ru

Web: <https://mtjv.ru/>

Редакционная коллегия журнала

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

1. Авдеев Борис Александрович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства
2. Горелов Сергей Валерьевич – действительный член РАЕН, доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта, заведующий кафедрой ЭСЭ
3. Емельянов Виталий Александрович – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», профессор кафедры бизнес-информатики
4. Каторин Юрий Федорович – доктор воен. наук, профессор ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
5. Нырков Анатолий Павлович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
6. Саушев Александр Васильевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, заведующий кафедрой ЭПиЭОБУ
7. Сычев Юрий Анатольевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики
8. Титов Иван Леонидович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)

9. Викулов Станислав Викторович – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта, заведующий кафедрой «Физики, химии и инженерной графики»
10. Ениватов Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», заведующий кафедрой кафедры судовых энергетических установок
11. Жуков Владимир Анатольевич – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой судостроения и энергетических установок
12. Кирюхин Александр Львович – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатации СЭУ ЧВВМУ имени П.С. Нахимова
13. Конюков Вячеслав Леонтьевич – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры судовых энергетических установок
14. Матвеев Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» г. Нижний Новгород, зав. кафедрой «Эксплуатация судовых энергетических установок»
15. Николаев Николай Иванович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», профессор

кафедры эксплуатации судовых механических установок

16. Халывкин Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент, Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф.М. Апраксина - филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», доцент кафедры судомеханических дисциплин

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки)

17. Васьков Анатолий Семенович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова», профессор кафедры судовождения.
18. Виноградов Владимир Николаевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский морской технологический университет», профессор кафедры судовождения и промышленного рыболовства
19. Ермаков Сергей Владимирович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», директор Морского института
20. Ивановский Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский морской технологический университет», декан морского факультета, заведующий кафедрой судовождения и промышленного рыболовства
21. Пашков Дмитрий Павлович – доктор техн. наук, профессор, филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, старший преподаватель кафедры судовождения
22. Субанов Эркин Эргешевич – канд. техн. наук, Начальник дипломного отдела, Службы капитана морского порта Новороссийск, ФГБУ «АМП Черного моря»
23. Хекерт Евгений Владимирович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», проректор по учебной и научной работе

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	6
Авдеев Б.А. ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ПИТАНИЕМ ОТ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ	6
Вынгра А.В., Авдеев Б.А. АНАЛИЗ ГОДИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В НА БАЗЕ «КГМТУ»	16
СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)	27
Кривоносов Г.А. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КАВИТАЦИИ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГРЕБНОГО ВИНТА	27
Халявкин А.А., Санжапов А.Р., Матвеев Ю.И., Ениватов В.В., Ивановская А.В. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕЙДУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ ПУТЕМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ГРЕБНОГО ВАЛА	41
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ	48
Ивановский Н.В. НОВЫЙ СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАНЕВРИРОВАНИЯ МОРСКОГО СУДНА	48

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.31

Авдеев Б.А.

ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ПИТАНИЕМ ОТ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

Аннотация. Данная работа посвящена имитационному моделированию морского электроэнергетического комплекса с гребным электродвигателем на базе синхронного двигателя на постоянных магнитах с питанием от солнечных панелей и аккумуляторных батарей. Для повышения эффективности работы солнечной панели использовались два метода отслеживания точки максимальной мощности: метод возмущения и наблюдения и метод инкрементной проводимости. Приведены блок-схемы работы данных методов. В качестве среды моделирования использовался математический пакет Matlab/SIMULINK. Исследование работы гребного электропривода осуществлялось при переменной солнечной инсоляции. Полученные результаты представлены в виде графических зависимостей. Было произведено исследование крутящего момента, уровень напряжения и тока на статоре синхронного двигателя с постоянными магнитами. Исследование показало, что оба представленных метода одинаково хорошо справляются с поставленной задачей. Продемонстрировано, что система при изменяющейся солнечной фотоэлектрической инсоляции обеспечивает удовлетворительную производительность, и стабильность работы гребного электродвигателя на постоянной мощности также успешно достигается.

Ключевые слова: солнечная панель, синхронный двигатель с постоянными магнитами, автономный инвертор напряжения, преобразователь постоянного тока, инвертирующий преобразователь, аккумуляторная батарея, отслеживание точки максимальной мощности

Avdeev B.A.

A PROPELLER ELECTRIC MOTOR BASED ON A SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS POWERED BY SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Annotation. This work is devoted to the simulation of a marine electric power complex with a propeller electric motor based on a permanent magnet synchronous motor powered by solar panels and rechargeable batteries. To increase the efficiency of the solar panel, two methods of tracking the maximum power point were used: the perturbation and observation method and the incremental conduction method. The flowcharts of these methods are given. The mathematical package Matlab/SIMULINK was used as the modeling environment. The study of the operation of the rowing electric drive was carried out with variable solar insolation. The results are presented in the form of graphical dependencies. There was a study of the torque of a propeller electric motor, the voltage and current level on the stator of a synchronous motor with permanent magnets. The study showed that both presented methods cope with the task equally well. It is demonstrated that the system provides satisfactory performance under varying solar photovoltaic insolation, and the stability of the propeller motor at constant power is also successfully achieved.

Keywords: photovoltaic system, permanent magnet synchronous motor, voltage inverter, DC converter, buck–boost converter, rechargeable battery, maximum power point tracking

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Введение. Солнечная энергетика, с ее практически безграничным потенциалом и свободной доступностью, снижающимися затратами на создание и практически нулевыми эксплуатационными расходами, приобретает все большую привлекательность и представляет собой экологически чистую энергию [1]. Данное решение вводится не только в электроэнергетику, но в другие сферы: промышленность, сельское хозяйство, частное домовладения и транспорт. Возможным вариантом применения является судовые электроэнергетические установки на базе фотоэлектрических систем, более подробно описанные в [2]. Для компенсации нерегулярного характера солнечной энергии и низкой плотности энергии на площадь плавсредства необходимо применять аккумуляторные батареи (АБ). Электрификация движения позволяет ликвидировать из состава судовой энергетической установки редукторные передачи и уменьшить валопровод [3]. Суда с электродвижением экологичны, в них присутствует возможность зарядки аккумуляторов от электрической сети. Также данные средства имеют более легкое техническое обслуживание по сравнению с двигателем внутреннего сгорания. Несмотря на все преимущества, дороговизна и более низкий коэффициент полезного действия ограничивает ее использование [4].

На рисунке 1 приведена предлагаемая система работы судового гребного электродвигателя, работающего от солнечных панелей (СП) и АБ. Данная система включает в себя СП, повышающий преобразователь (ПП) постоянного тока, автономный инвертор напряжения (АИН), АБ с инвертирующим преобразователем (ИП), синхронный электродвигатель с постоянными магнитами (СДПМ) и винт. Выбор в пользу СДПМ был осуществлен благодаря более высокой точности регулирования частоты вращения по сравнению с асинхронным двигателем в режиме с большим количеством случайных возмущающих воздействий (волнение моря, ветер, течения, качка). Другими преимуществами СДПМ являются более высокая эффективность, длительный срок службы, высокая надежность, большое соотношение крутящего момента к весу, а также низкие эксплуатационные расходы [5, 6]. Электрическая энергия вырабатывается СП. ПП используется для отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ), которая используется для питания трехфазного АИН с шестью транзисторами. Работа ПП регулируется таким образом, чтобы работа солнечной фотоэлектрической батареи была на максимальной мощности. К ОТММ относят метод напряжения холостого хода, метод тока короткого замыкания, метод возмущения и наблюдения, метод приращения проводимости, а также методы нейронных сетей и нечетких методов [7]. От энкодера информация о частоте вращения подается в систему управления через аналого-цифровой преобразователь АЦП. Заданная скорость сравнивается с фактической, и эта разность подается на ПИД-регулятор, который выдает необходимое значение тока по осям d-q. После происходит преобразование координат d-q в трехфазную систему abc, которые сравниваются фактическими значениями токов статора СДПМ. Система управления СУ вырабатывает импульсы на основе широтно-импульсной модуляции для АИН.

В предлагаемой системе АБ подключается к звену постоянного тока двунаправленным потоком, чтобы устранить прерывистую природу солнечной энергии и протестировать систему на различную нагрузку, что также проверяет, эффективна ли система или нет. Когда мощность, подаваемая от СП, заканчивается для загрузки мощности, оставшаяся мощность потребляется АБ и заряжается, с другой стороны, в ситуации недоступности солнца или мощности, подаваемой СП недостаточно, тогда АБ будет обеспечивать питание и удовлетворять потребность нагрузки. Когда солнечное излучение меняется, мощность, подаваемая солнечной фотоэлектрической батареей, также меняется, и это влияет на параметры СДПМ и, конечно же, на эффективность и точность системы. Для решения этих проблем система предложена и спроектирована с использованием MATLAB/Simulink и протестирована при различных солнечных инсоляциях.

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

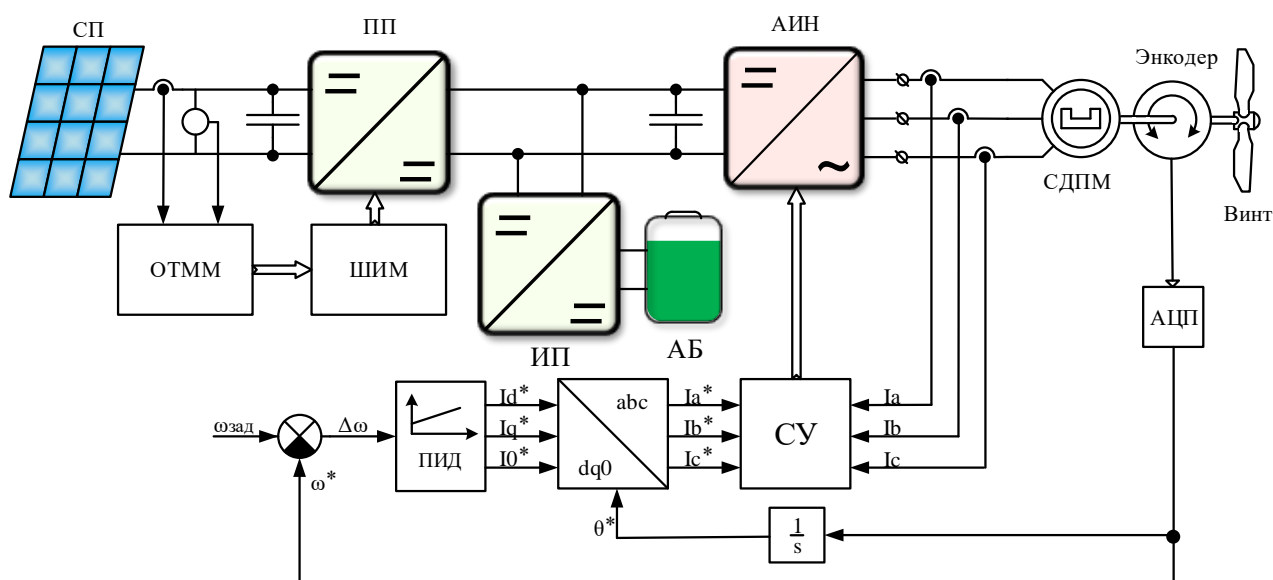


Рисунок 1 - Судовой электроэнергетический комплекс с гребным электроприводом и питанием от солнечных панелей и аккумуляторных батарей

На судах с электродвижением или на автономных подводных или надводных аппаратах с солнечными фотоэлектрическими батареями, вырабатываемая энергия заряжает АБ когда солнечный свет не может генерировать необходимую мощность для питания, в пасмурные дни или в ночные часы. Более подробно преимущества и недостатки работы с АБ описаны в [8, 9]. Системы, основанные на электродвигателях переменного тока, не могут быть напрямую связаны с фотоэлектрической установкой. Для питания двигателей переменного тока, необходимо использовать инвертор. Преимуществами этой конструкции являются простота, надежность; отрицательными являются большее количество ступеней преобразования электроэнергии и проблемы с нагревом в полупроводниковых элементах [10]. Система с двигателем постоянного тока включает СП и двигатель. К системе может быть подключен преобразователь для регулирования частоты вращения. Эта система более эффективна, чем система с двигателем переменного тока т.к. имеет меньшее количество преобразователей и более простую систему управления. Недостаток заключается в том, что двигатели постоянного тока имеет меньший КПД и он требует тщательного обслуживания [11].

Целью исследования является разработка и диагностика имитационной модели судовой электроэнергетического комплекса с гребным электродвигателем и солнечной панелью как источником электроэнергии.

Основная часть.

Для извлечения максимальной мощности из СП требуется применять ОТММ. Среди многочисленных методов отслеживания ТММ выберем использование двух разных методов. Метод возмущения и наблюдения (P&O) заключается в том, что принудительно вводят в систему небольшое возмущение в виде изменения напряжения. В результате этого изменяется выходная мощность солнечной батареи. В случае, если мощность СП возрастает, то напряжение продолжают изменять до пикового значения. В случае, если мощность начинает уменьшаться, а напряжение начинают в противоположную сторону [12, 13]. Алгоритм работы первого метода представлен на рисунке 2.

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

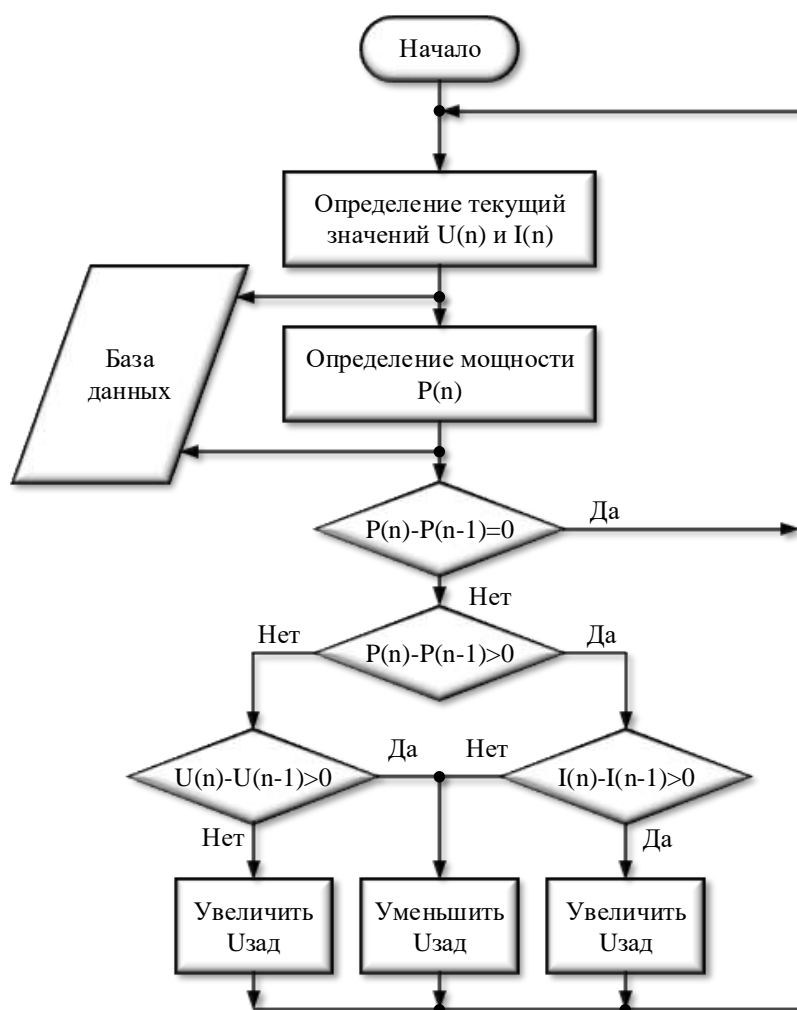


Рисунок 2 - Алгоритм ОТММ с помощью метода возмущения и наблюдения

Другим применяемым методом является метод инкрементной проводимости (IC), который использует наклон характеристик мощности СП для ОТММ. Алгоритм инкрементной проводимости зависит от прироста мощности по отношению к приросту напряжения dP/dV , что эквивалентно нулю для целей ТММ. На основе сравнения выходного сигнала регулируется управляющее напряжение [14, 15] можно установить следующую зависимость:

$$\frac{\Delta I_{СП}}{\Delta U_{СП}} = -\frac{I_{СП}}{U_{СП}},$$

где $\Delta I_{СП}$ и $\Delta U_{СП}$ - изменения тока и напряжения солнечной фотоэлектрической батареи соответственно.

Алгоритм работы метода инкрементной проводимости представлен на рисунке 3. Данный метод обеспечивает хорошую производительность в любых условиях.

Рабочий цикл преобразователя можно рассчитать как:

$$d = 1 - \frac{U_{СП}}{U_{Дв}}$$

Мощность, поступающая на инвертор, подается повышающим преобразователем и передается на двигатель с постоянными магнитами. Гребной винт механически соединен с СДПМ. Характеристика крутящего момента и скорости насоса определяется уравнением:

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

$$M_{Дв} = k\omega_{Дв}^2,$$

где k – постоянная момента сопротивления.

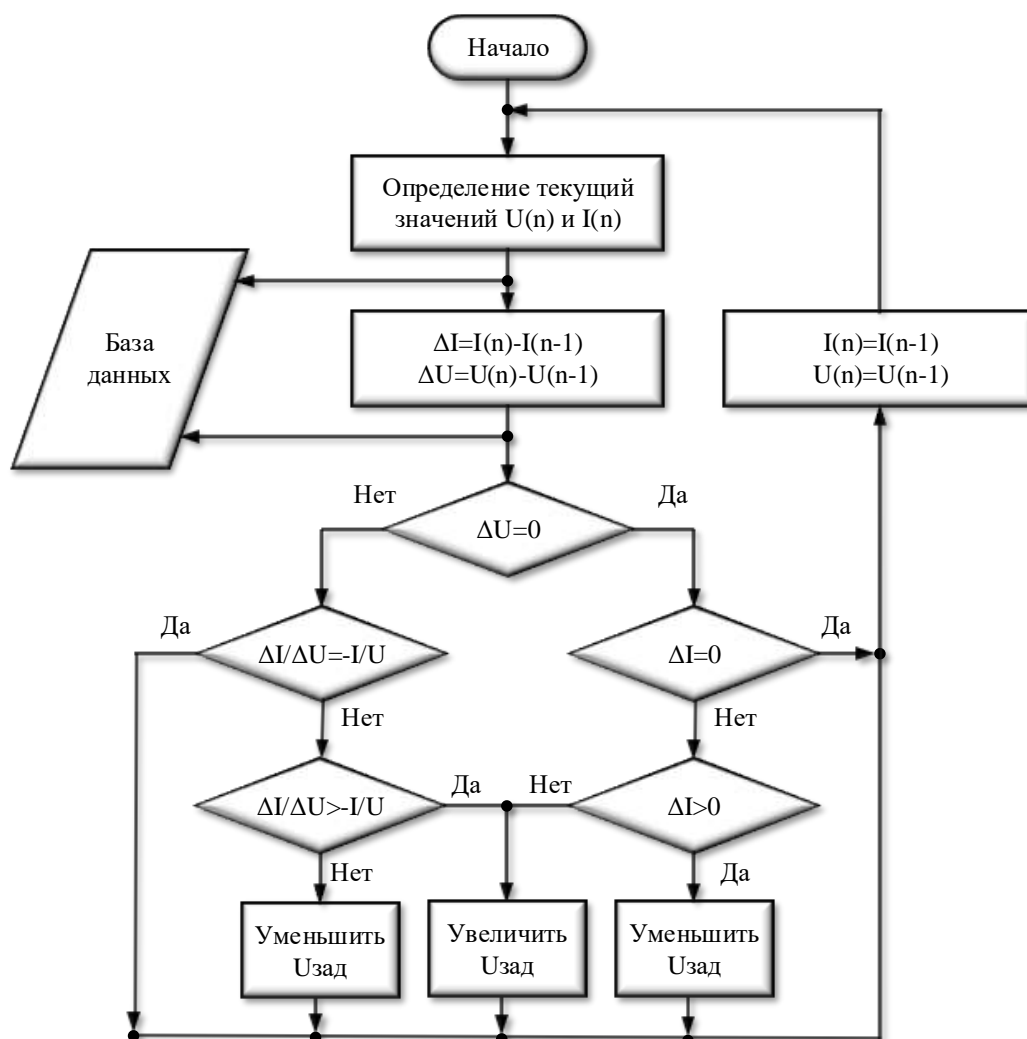


Рисунок 3 - Алгоритм ОТММ с помощью метода инкрементной проводимости

Регулирование частоты вращения СДПМ осуществляется через инвертор, который имеет векторный способ управления с постоянным потосцеплением ротора. Предложенная структура системы управления гребным электродвигателем с питанием от СП с приводом от СДПМ была проверена с помощью MATLAB/Simulink. Кроме того, работу системы было промоделировано при изменяющихся уровнях солнечной инсоляции. На рисунке 4 приведены результаты имитационного моделирования. В качестве ОТММ для СП были использованы 2 различных алгоритма, приведенных на рисунках 2 и 3, которые показали практически одинаковые результаты работы.

На рисунке 4а солнечная инсоляция составляет 1000 Вт/м^2 в течение 0-1 с, затем снижается до 600 Вт/м^2 в течение 1-2 с, а затем вновь повышается до 1200 Вт/м^2 в течение 2-3 с. Система демонстрируется в таких различных условиях. Нагрузочный момент изменяется в зависимости от скорости СДПМ и достигает 60 Нм. Мощность СБ отслеживается на уровне мощности ТММ в 3,95 кВт и после этого практически не меняет своего значения. Мощность, потребляемая СДПМ составляет 3,74 кВт, что демонстрирует высокий коэффициент полезного действия работы всего электротехнического комплекса.

Как можно видеть из рисунка 4б в тот момент, когда солнечная фотоэлектрическая инсоляция изменяется, это также влияет на мощность ТММ и соответственно уменьшается. Однако на рисунке 4в и 4г видно, что параметры СДПМ остаются постоянными, что означает,

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

что на них не влияют колебания солнечной инсоляции. Таким образом, если максимальная извлекаемая мощность солнечной фотоэлектрической батареи уменьшается, СДПМ работает с постоянной скоростью, и судно будет также идти с заданной скоростью.

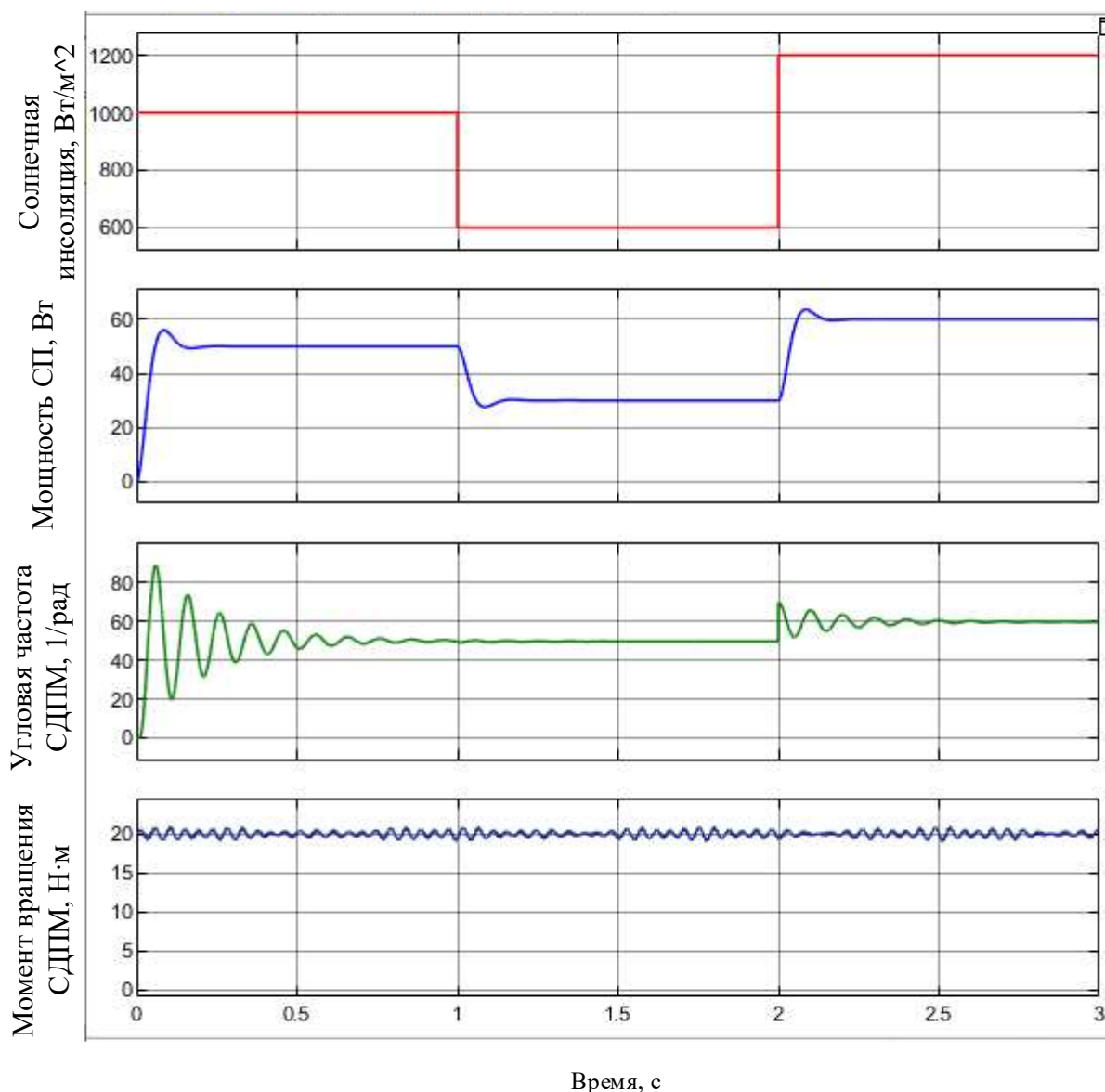


Рисунок 4 - Результаты моделирования: а) солнечная инсоляция; б) фотоэлектрическая мощность; в) угловая частота вращения СДПМ; г) момент на валу двигателя

На рисунке 5 показано напряжение и ток СДПМ. Когда подаваемая фотоэлектрическими батареями мощность низкая, питание двигателя от батареи для поддержания постоянной скорости. При мощности 1000 Вт/м^2 батарея заряжается и потребляет $0,38 \text{ кВт}$, а когда освещенность снижается до 600 Вт/м^2 , батарея питает двигатель около $1,178 \text{ кВт}$, а при освещенности до 1200 Вт/м^2 аккумулятор обеспечивает мощность двигателя $0,45 \text{ кВт}$.

Для надежной и эффективной работы вышеуказанной системы требуется АБ, когда мощность, генерируемая СП, не может удовлетворить потребность нагрузки, и в этой ситуации батарея будет работать в качестве источника питания для нагрузки. Более того, когда мощность, извлекаемая из СП, превышает потребность нагрузки, батарея будет заряжаться. Это делает систему более эффективной.

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

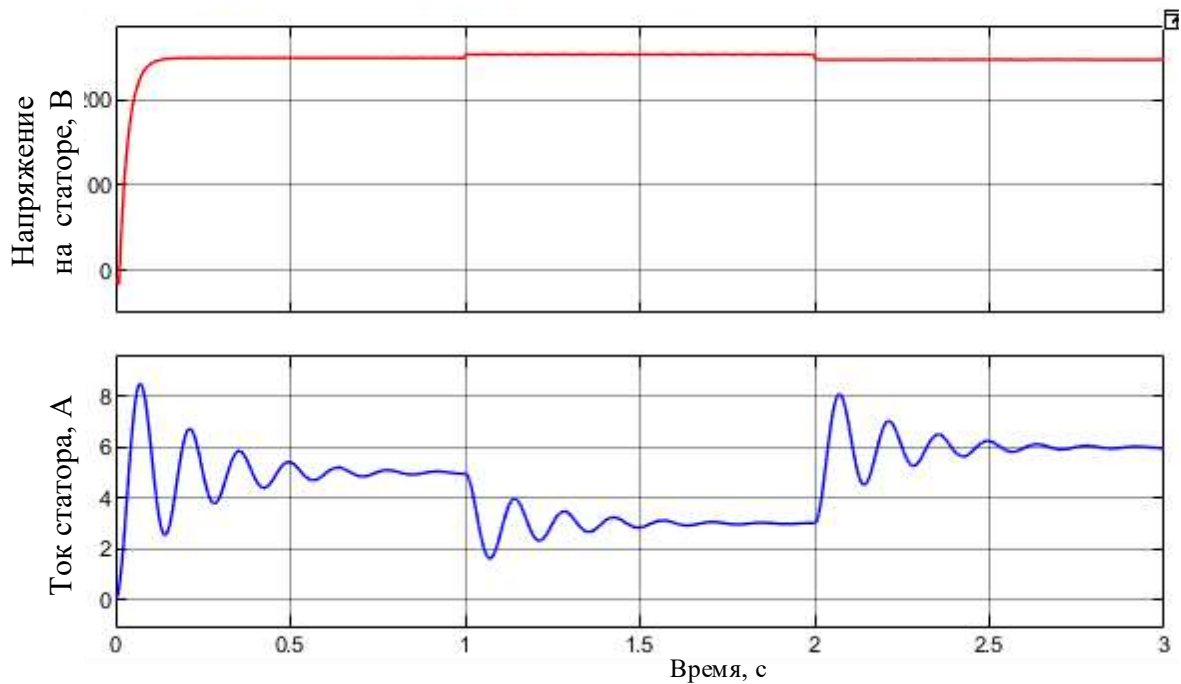


Рисунок 5 - Напряжение (а) и ток (б) на статоре СДПМ

Таким образом, добавление АБ защищает систему от изменяющейся солнечной инсоляции и может привести двигатель в движение с желаемой скоростью и мощностью. Во время высокой солнечной радиации мощность батареи отрицательна, поскольку батарея будет заряжаться за этот период до 1 с. За период от 1 до 2 с солнечное излучение снижается до 600 Вт/м^2 , и в течение этого времени двигатель получает питание от АБ. Кроме того, в моменте времени, когда освещенность увеличилась до 1200 Вт/м^2 , то даже в течение этого времени некоторая часть необходимой мощности СДПМ обеспечивается АБ для поддержания постоянной скорости. Таким образом, скорость вращения гребного винта остается постоянной во время изменения освещенности. Результаты показывают, что система при изменяющейся солнечной фотоэлектрической инсоляции обеспечивает удовлетворительную производительность, и цель работы гребного электродвигателя на постоянной частоте вращения также успешно достигается.

Выводы. На основании вышеизложенного была спланирована, отображена и смоделирована с помощью MATLAB/Simulink система плавсредства с электрическим гребным двигателем, питаемый от солнечной фотоэлектрической панели. В качестве двигателя был выбран трехфазный синхронный двигатель с постоянными магнитами. Структура электроэнергетического комплекса, представленная в данной работе, хорошо зарекомендовала себя в различных условиях. Данная система была исследована для изменяющегося диапазона солнечной инсоляции. В качестве алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности были использованы методы возмущения и наблюдения и метод инкрементной проводимости, которые позволили повысить выходную мощность солнечной фотоэлектрической батареи.

Список использованной литературы:

1. Павленко И.В., Никитенко В.А., Авдеев Б.А. Разработка электроэнергетической установки маломерного судна с электродвижением // Образование, наука и молодежь – 2018: Сборник трудов по материалам научно-практических конференций ФГБОУ ВО «КГМУ» 2018 г. Керчь: ФГБОУ ВО «КГМУ», 2018. С. 156-160.
2. Авдеев Б.А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета, 2021. №4. С. 99-113.

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

3. *Авдеев Б.А.* Применения твердотельных трансформаторов в судовых электроэнергетических системах // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия «Морские технологии». 2024. № 2. С. 6-16.
4. *Романовский В.В., Малышев В.А., Бежик А.С.* Судовые гибридные электроэнергетические системы с распределенной шиной постоянного тока // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2020. Т. 12. № 3. С. 591-605.
5. *Лысов М.С.* Структурный синтез и компьютерное моделирование синхронного электродвигателя с постоянными магнитами в роторе // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2008. № 1 (21). С. 149-152.
6. *Мартынов В.В., Голубев А.Н., Алейников А.В.* Уточненная математическая модель реального времени многофазного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // В сборнике: Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018. Материалы докладов конференции. 2018. С. 72-75.
7. *Esram T., Chapman P.L.* Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques // IEEE Transactions on energy conversion. 2007. Vol. 22. No. 2. Pp. 439-449.
8. *Белова И.А., Мартинович М.В., Сколота В.А., Канюков И.И.* Автономный преобразователь электрической энергии с интеллектуальной системой управления на основе искусственной нейронной сети для фотовольтаики // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2018. № 1 (38). С. 36-53.
9. *Sologubov A.Yu., Kirpichnikova I.M.* Multivariable control of solar battery power: electrotechnical complex as object with hessian-driven gradient flows // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. 2021. Т. 21. № 3. С. 57-65.
10. *Артамонов В.Ю., Дубов Н.В., Зубков П.С., Кулаев Н.А.* Моделирование преобразователя частоты для синхронного электродвигателя с постоянными магнитами при скачкообразном изменении нагрузки на валу привода // Инженерный вестник Дона. 2020. № 5 (65). С. 14.
11. *Сухов Д.В., Шевцов Д.А., Шишов Д.М.* Оптимальный регулятор синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе // Практическая силовая электроника. 2021. № 1 (81). С. 21-27.
12. *Karami N., Moubayed N., Outbib R.* General review and classification of different MPPT Techniques // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 68. Pp. 1-18.
13. *Пахомов П.А.* Методы отслеживания точки максимальной мощности (ТММ) // Матрица научного познания. 2021. № 6-2. С. 57-65.
14. *Bhukya M. N., & Kota, V. R.* A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2019, 22(3), pp.869-884.
15. *Михальченко С.Г., Русскин В.А., Семенов С.М., Орлянский И.П., Halasz S.* Подход к построению адаптивного алгоритма экстремального регулирования мощности в системе солнечной энергетики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 3. С. 102-112.

References:

1. *Pavlenko I.V., Nikitenko V.A., Avdeev B.A.* Development of an electric power plant of a small vessel with electric propulsion. *Obrazovaniye, nauka i molodezh' – 2018: Sbornik trudov po materialam nauchno-prakticheskikh konferentsiy FGBOU VO «KGMTU» [Education, science and youth – 2018: A collection of works based on the materials of scientific and practical conferences of the KGMTU 2018]*. Kerch: KGMTU, 2018. pp. 156-160. (In Russian).

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

2. Avdeev B.A. Intelligent energy-efficient systems of marine vessels. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University]*. 2021. No. 4. pp. 99-113. (In Russian).
3. Avdeev B.A. Applications of solid-state transformers in marine electric power systems. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Morskiye tekhnologii» [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University. The series "Marine technologies"]*. 2024. No. 2. pp. 6-16. (In Russian).
4. Romanovsky V.V., Malyshev V.A., Bezhik A.S. Marine hybrid electric power systems with a distributed DC bus. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin of the State University of Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov]*. 2020. Vol. 12. No. 3. P. 591-605. (In Russian).
5. Lysov M.S. Structural synthesis and computer modeling of a synchronous electric motor with permanent magnets in a rotor. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences]*. 2008. No. 1 (21). pp. 149-152. (In Russian).
6. Martynov V.V., Golubev A.N., Aleynikov A.V. Refined mathematical model of real-time multiphase synchronous electric motor with permanent magnets. *V sbornike: Trudy X Mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2018. Materialy dokladov konferentsii [In the collection: Proceedings of the X International Conference on Automated Electric Drive AEP 2018. Materials of the conference reports]*. 2018. pp. 72-75. (In Russian).
7. Esram T., Chapman P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on energy conversion*. 2007. Vol. 22. No. 2. Pp. 439-449.
8. Belova I.A., Martinovich M.V., Skolota V.A., Kanyukov I.I. An autonomous electric energy converter with an intelligent control system based on an artificial neural network for photovoltaics. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii [Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation]*. 2018. No. 1 (38). pp. 36-53. (In Russian).
9. Sologubov A.Yu., Kirpichnikova I.M. Multivariable control of solar battery power: electrotechnical complex as object with hessian-driven gradient flows. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2021. Vol. 21. No. 3. pp. 57-65.
10. Artamonov V.Yu., Dubov N.V., Zubkov P.S., Kulaev N.A. Modeling of a frequency converter for a synchronous electric motor with permanent magnets with an abrupt change in the load on the drive shaft. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*. 2020. No. 5 (65). p. 14. (In Russian).
11. Sukhov D.V., Shevtsov D.A., Shishov D.M. Optimal regulator of a synchronous electric motor with permanent magnets on the rotor. *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical power electronics]*. 2021. No. 1 (81). pp. 21-27. (In Russian).
12. Karami N., Moubayed N., Outbib R. General review and classification of different MPPT Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 68. Pp. 1-18.
13. Pakhomov P.A. Methods of tracking the maximum power point (TMM). *Matritsa nauchnogo poznaniya [Matrix of scientific knowledge]*. 2021. No. 6-2. pp. 57-65. (In Russian).
14. Bhukya M. N., & Kota, V. R. A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(3), pp.869-884.
15. Mikhhalchenko S.G., Russkin V.A., Semenov S.M., Orlyansky I.P., Halasz S. An approach to the construction of an adaptive algorithm for extreme power regulation in a solar energy system. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering]*. 2018. Vol. 329. No. 3. pp. 102-112. (In Russian).

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Сведения об авторах / Information about authors

**Авдеев Борис
Александрович**

канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства
Керченский государственный морской технологический университет
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
dirigeant@mail.ru

Avdeev
Boris Aleksandrovich

Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the Department of Ship's Electrical Equipment and Automatization
Kerch State Maritime Technological University
298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
dirigeant@mail.ru

УДК 621.314

Вынгра А.В., Авдеев Б.А.

АНАЛИЗ ГОДИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В НА БАЗЕ «КГМТУ»

Аннотация. Произведено исследование интеграции солнечной электростанции мощностью 2,5 кВт в сеть электроснабжения университета. Приведено описание спроектированной установки, подробно рассмотрены технические характеристики компонентов электростанции, применяемой в качестве лабораторной установки. В течение учебного года произведён сбор данных вырабатываемой мощности солнечными панелями и потребляемой мощности лаборатории. Дополнительно проведены испытания работы установки при ненормальных режимах с повышенной нагрузкой и различной архитектурой сети. Анализ полученных данных позволил выявить положительные и отрицательные стороны как установки в целом так и непосредственно солнечного инвертора. Заключено, что для более эффективного потребления солнечной энергии необходимо применение инверторов с функцией подмешивания энергии в сеть, а также, для повышения безотказности работы системы необходимо применение обратной связи и защиты по уровню потребляемого тока с аккумулятора. Авторами предложено и рекомендовано применение твердотельного трансформатора, как наиболее эффективного устройства для устранения обнаруженных проблем и интеграции солнечной электростанции в сеть университета.

Ключевые слова: солнечные панели, альтернативные источники электроэнергии, инвертор, твердотельный трансформатор

Vyngra A.V., Avdeev B.A.

ANALYSIS OF THE ANNUAL USE OF SOLAR PANELS AT THE KSMTU BASE

Annotation. A study of the integration of a 2.5 kW solar power plant into the university power grid was conducted. A description of the designed installation is given, and technical characteristics of the components of the power plant used as a laboratory installation are considered in detail. During the academic year, data was collected on the power generated by solar panels and the power consumed by the laboratory. Additionally, tests of the installation were conducted under non-nominal modes with increased load and different network architecture. Analysis of the obtained data allowed us to identify the positive and negative aspects of both the installation as a whole and the solar inverter itself. It was concluded that for more efficient consumption of solar energy, it is necessary to use inverters with the function of mixing energy into the network, and also, to improve the reliability of the system, it is necessary to use feedback and protection for the level of current consumed from the battery. The authors proposed and recommended the use of a solid-state transformer as the most effective device for eliminating the identified problems and integrating the solar power plant into the university network.

Keywords: solar panels, alternative energy sources, inverter, solid-state transformer.

Введение. Республика Крым является стратегически важным регионом Российской Федерации благодаря выгодному географическому положению и политико-культурному наследию. В тоже время полуостров связывает с остальной частью России Крымский мост (автомобильный и железнодорожный мосты) и энергомост, который не в состоянии снабдить ресурсами Республику Крым в чрезвычайных случаях [1,2]. Поэтому вопрос об обеспечения автономной работы энергетики всего полуострова стоит остро. Несмотря на введенные в работу Таврическую и Балаклавскую ТЭС, авария или преднамеренный вывод из строя оборудования может привести к проблеме электродефицита в Республике Крым [3]. Выходом является развитие альтернативной и возобновляемой энергетики в Крыму, где климат и географическое положение способствует развитию зеленой энергетики. К тому же имеется

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

немалый накопленный опыт по установке и эксплуатации подобных сооружений: Крым является уникальным регионом, в котором 5 % всех потребностей в электроэнергии покрывается за счёт солнечной энергии и ветра, тогда как в целом по России на долю альтернативной энергетики сегодня приходится менее 1% генерации. Благодаря этим факторам, Республика Крым может стать лидером России в использовании нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Развитие блокчейна, информационных технологий, автоматизации, рост нетрадиционных и возобновляемых источников электроэнергии привел к смене парадигмы на энергорынке, где на первое место ставится «интернет энергии» - киберфизическая инфраструктура для информационных систем децентрализованного интеллектуального (роботизированного) управления энергосистемами.

Современные солнечные панели и ветровые электростанции имеют высокие коэффициенты полезного действия и относительно небольшую стоимость, что обеспечивает их окупаемость за 10-15 лет [3]. Также растёт число юридических и частных лиц, которые устанавливают себе альтернативные источники электроэнергии в целях экономии. Децентрализованная энергетика привлекательна для конечных потребителей. Новые экономические отношения между субъектами распределенной энергетики приводят к росту транзакционных издержек [4]. Информационная интеграция объектов распределенной энергетики в контуры управления сложна и дорога. Решением этих проблем является новая технология - твердотельный трансформатор, который позволяет интегрировать любые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, а также системы хранения энергии в единую энергосистему Крыма.

Переход на новые технологии обеспечит ускорения социально-экономического развития Республики Крым. С этой целью в ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» в 2022-2023 годах проводились исследования на тему «Разработка твердотельных трансформаторов для интеграция нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в сетях электроснабжения Республике Крым» (проект РНФ № 22-29-20094), посвященные решению одной из задач Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, а именно переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике. Одним из пунктов данного проекта являлось экспериментальное применение солнечных панелей.

В основном при исследовании солнечных панелей наибольшее внимание уделяется поиску и оптимизации работы панели с использованием точки максимальной мощности [6,7] и ориентированию панелей относительно солнца [8-11]. Однако на практике поворотные системы оказываются малоэффективными и хлопотными в обслуживании, что ограничивает их применение. Особым интересом сейчас пользуются гибкие солнечные панели, которые могут быть установлены в различных устройствах [12], в том числе и на морской технике [13]. Одновременно с увеличением количества солнечных панелей стоит остро вопрос о системе обнаружения дефектов солнечных панелей [14], внедрении в интеллектуальные сети электроснабжения [15] и управлением потоками между различными источниками и потребителями для наибольшей эффективности всего электротехнического комплекса [16].

Целью исследования является анализ и перспективы использования солнечных панелей, а также выработка рекомендаций по их использованию на территории ФГБОУ ВО «КГМТУ» и в Республике Крым в целом.

Описание исследуемой установки. В качестве солнечной электростанции была выбрана и закуплена со средств гранта солнечной электростанции «гибридного типа» производительностью от 7 кВт*ч/сутки. Данное решение может быть использовано днем в качестве основного источника питания, а в вечернее время система автоматически переключается на работу от аккумуляторных батарей емкостью 200 А*ч (энергосохранение до 2,4 кВт*ч/сутки), либо подключается к энергосети. В комплект входит солнечная батарея GWS 280-60P (6 шт.), инвертор GWS-Energy S 2000-24 Plus, аккумулятор Vektor VRC 12-100 (2 шт.), кабель солнечный 4 мм² (20 шт.).

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Зависимость электрических параметров солнечной панели от интенсивности солнечного света и от температуры приведены на рисунке 1. Характеристики солнечной батареи GWS 280-60P приведены в таблице 1.

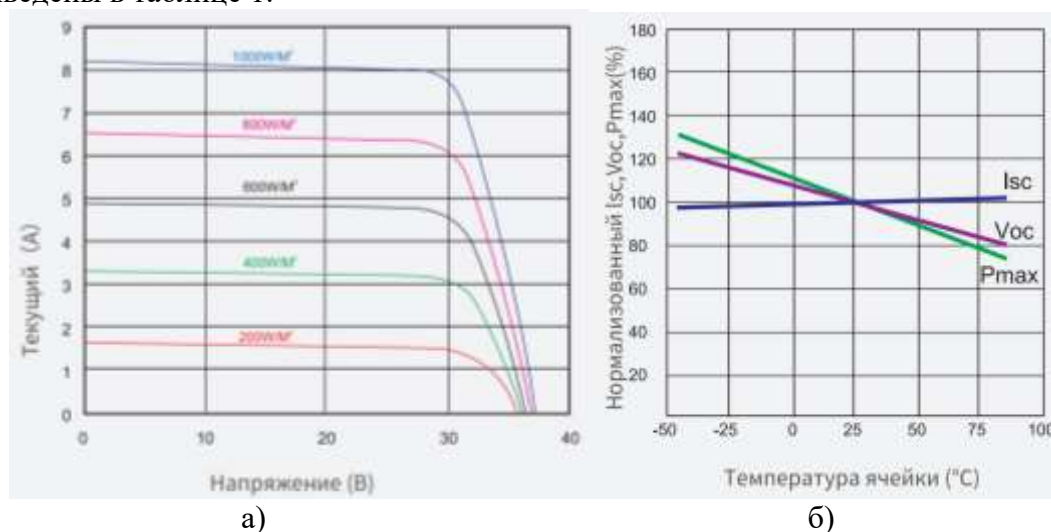


Рисунок 1 – а) зависимость электрических параметров солнечной панели от интенсивности солнечного света; б) зависимость электрических параметров от температуры

Таблица 1 - Характеристики солнечной батареи GWS 280-60P

Наименование	Характеристики
Эффективность батареи (%)	17.11
Мощность панелей, Вт	280
Максимальное напряжение (Pmax)	31,6 В
Ток при Pmax (Impp)	8,86 А
Напряжение открытого контура (Voc)	38,5 В
Ток короткого замыкания (Isc)	9.29 А
Габариты	1650 × 992 × 30 мм
Вес (кг)	18.5 кг
Гарантия	12 лет
Распределительная коробка (степень защиты)	IP68
Фотоэлектрические элементы (количество / материал / габариты)	60 (6x10)
Максимальная статическая нагрузка, передняя поверхность (например, снег)	5400 Па
Максимальный ток предохранителя	15А
Максимальное напряжение системы	1000 В
Температурный коэффициент Voc	- 0,33% °С
Температурный коэффициент Pmax	- 0,41% °С
Температурный коэффициент Isc	0,06% °С
Температура эксплуатации	- 40~+85°С
Категории	Поликристаллические

Снижение установленной мощности фотоэлектрических модулей GWS не превышает 10% за первые 12 лет и 20% за 25 лет интенсивной эксплуатации. Характеристики аккумулятора Vektor VRC12-100 приведены в таблице 2.

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Таблица 2 - Характеристики аккумулятора Vektor VRC12-100

Наименование	Характеристики
Емкость (Ач)	100
Габариты	330 × 171 × 216 мм
Вес (кг)	30.8 кг
Гарантия	2 года
Температура эксплуатации (Заряд)	-20~ +50°C
Температура эксплуатации (Разряд)	-20~ +60°C
Внутреннее сопротивление (Полностью заряженной батареи (25°C))	≈ 5.00 mΩ
Материал корпуса	ABS
Высота с клеммами	219±3 мм
Саморазряд за месяц	не более 3% в месяц при 25°C
Напряжение	12 В
Терминалы под болт	M8
Максимальный ток разряда	1200 А (5 сек.)

Другие характеристики аккумулятора Vektor VRC12-100 приведены на рисунке 2.

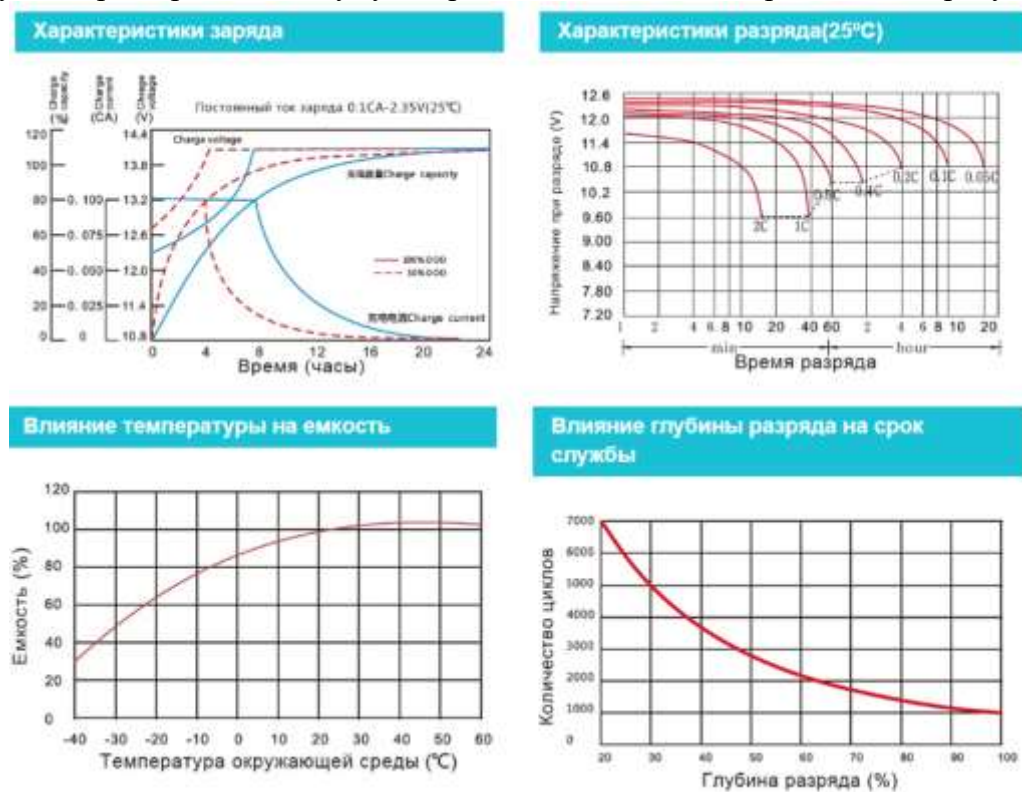


Рисунок 2 – Характеристики аккумулятора Vektor VRC12-100

Инвертор GWS-Energy S 2000-24 Plus представляет собой многофункциональный инвертор/зарядное устройство, в котором сочетаются функции инвертора, солнечного зарядного устройства и зарядного устройства аккумуляторной батареи с тем, чтобы предоставить пользователям компактный источник бесперебойной подачи питания. В зависимости от различных ситуаций инвертор предназначен для непрерывной подачи энергии от фотоэлектрических модулей, аккумулятора или централизованной сети. Устройство способно одновременно питать нагрузку и заряжать аккумуляторы, если достаточно вырабатываемой мощности от фотоэлектрических модулей. У инвертора имеется защита от перегрузки, от перезаряда и от выходного перенапряжения.

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Таблица 3 - Характеристики инвертора GWS-Energy S 2000-24 Plus

Наименование	Характеристики
Функция подмешивания	Нет
Функция продажи в сеть	Нет
Функция заряда аккумуляторов от сети	Да
Возможность работы без аккумулятора	Нет
Напряжение аккумуляторов	24 Вольт
Тип контроллера заряда	MPPT
Мощность, Вт	2000
Максимальная мощность инвертора, Вт	4000
Частота, Гц	60 Гц
Кол-во фаз	1
Максимальная мощность солнечных батарей, Вт	1500
Минимальное рабочее напряжение солнечных батарей	60
Диапазон рабочего напряжения солнечных батарей	60-115
Максимальное напряжение от солнечных батарей	145
Максимальный зарядный ток (сеть + солнечные модули)	60 А
Габариты	48 × 30 × 14 см
Вес (кг)	11.5 кг

Солнечная электростанция включает в себя 6 солнечных панелей и подводится к солнечному инвертору через автоматический выключатель. Также к нему подводится питание от сети и нагрузка переменного тока, а также через предохранитель солнечный инвертор подключен к аккумуляторной батарее. Фотография смонтированной солнечной панели приведена на рисунке 4.5. Инвертор и аккумуляторные батареи размещены рядом в техническом помещении и представлены на рисунке 4.6. Длина кабеля от панелек к аккумулятору не превышает 50 м. В качестве нагрузки выступила учебная аудитория с 6 работающими компьютерами, освещением и проектором.



а)

б)

Рисунок 3 – Солнечные панели (а), инвертор и аккумуляторные батареи (б)

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Управление солнечным инвертором осуществляется либо непосредственно через солнечный инвертор с помощью выбора необходимых команд (расшифровка команд даётся в пособии по эксплуатации), либо с помощью специального приложения *Watch Power* на PC, подключаемого через порт USB-B. Также данная программа позволяет собирать информацию о работе солнечной панели. Внешний вид приложения *Watch Power* приведен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Приложение *Watch Power*: а) внешний вид; б) графики работы

Одним из главных преимуществ приложения *Watch Power* является возможность собирать информацию о работе солнечной панели, аккумулятора и сети.

Сбор данных. Для проведения годичного анализа использования установленной электростанции учитывалось текущее использование подключенного к электростанции оборудования, а так несколько искусственно созданных неноминальных режимов работы. Ввиду непостоянного использования в течение года оборудования, подключенного к электростанции, данные усреднены. В течение учебного года оборудование аудитории, подключенное к солнечной электростанции использовалась 82 дня, потребляемая мощность, в среднем, составила 1,5 кВт, среднее время работы в сутки - 5,5 часов.

Также, одним из проведенных экспериментов являлся искусственно созданный неноминальный режим работы с превышением номинальной нагрузки инвертора и аккумулятора при работе от сети и при автономной работе. Инвертор был отключен от сети, и работал исключительно от солнечных панелей. Аккумуляторные батареи также были подключены, т.к. без них солнечный инвертор не работает. На рисунке 5 приведена линия PV input power, которая показывает мощность от солнечной панели. Output apparent power показывает полную мощность, которая потребляется нагрузкой. В момент 9:48:53 начинается подключаться нагрузка в виде компьютеров. Мощности с солнечной панели хватает для работы от неё, т.к. аккумуляторная батарея продолжает заряжаться, а не разряжается. В момент 10:29:28 включается дополнительная нагрузка мощностью 2кВт. Мощности солнечной панели не хватает, поэтому недостающая мощность берётся от аккумуляторных батарей. На рисунке 6 видно, что ток разряда аккумуляторов составляет 125 А (может больше, но программа этого не зафиксировала). Предохранитель, рассчитанный на 100 А и установленный между солнечным инвертором и аккумуляторами, через непродолжительное время перегорает и нагрузка автоматически отключается от питания.

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

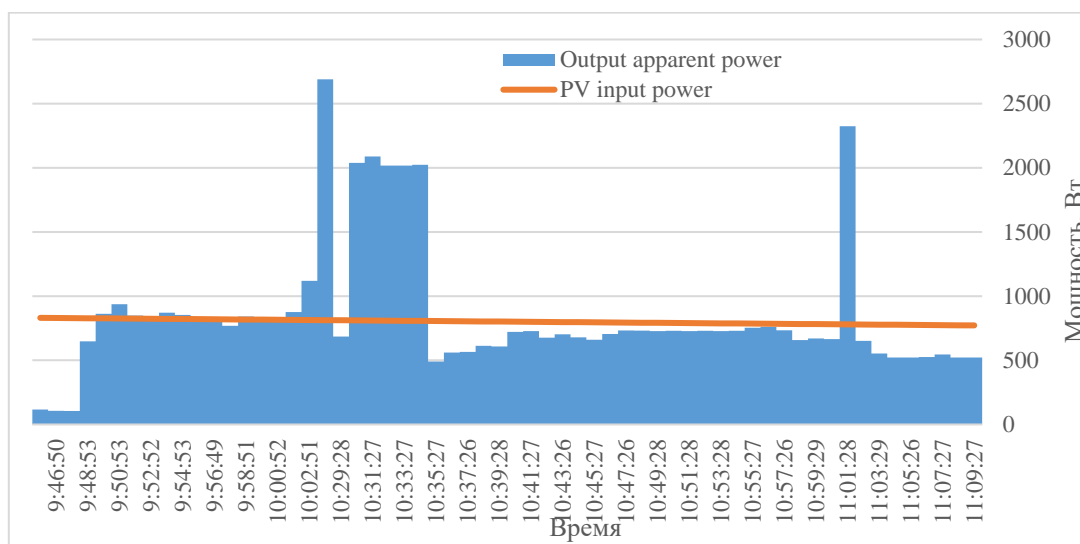


Рисунок 5 – Графики мощностей, вырабатываемой от солнечной панели, и потребляемой нагрузкой.

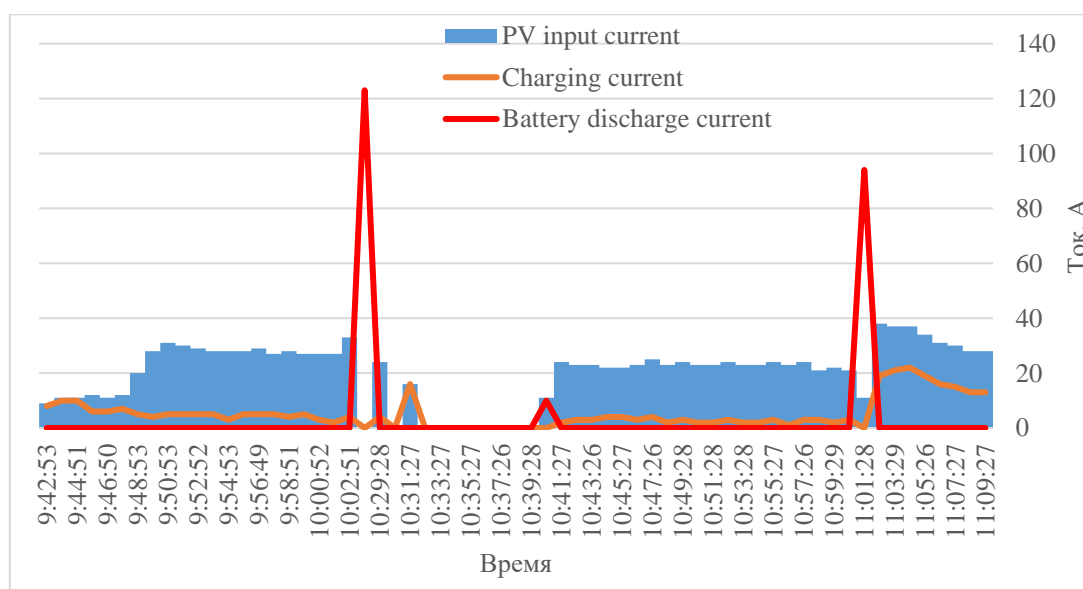


Рисунок 6 – Графики токов солнечной панели и заряда/разряда аккумулятора

После замены предохранителя солнечный инвертор был подключен к сети. Повторное подключение нагрузки в 2 кВт также вызывает большой ток от аккумуляторной батареи (порядка 95 А), но одновременно включается байпас и питание от сети подается на нагрузку. Солнечная панель подключается к аккумулятору, аккумулятор отключается от нагрузки и происходит увеличение зарядного тока. Таким образом можно говорить о том, что от для того, чтобы питать нагрузку от солнечных панелей большей мощности, необходимо установка более ёмких аккумуляторов.

Анализ данных. Данные о текущем использовании солнечной электростанции позволили определить экономичность установки для организации. Общее количество выработанной и потребленной электроэнергии от солнечных панелей составило:

$$W = T \cdot P = (5,5 \cdot 82) \cdot 1,5 = 676,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Несущественность полученных результатов объясняется тем, что установка не работает круглосуточно и, в первую очередь, не имеет возможности отдачи мощности в сеть. Таким

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

образом, наблюдается низкий процент использования возможностей солнечных панелей ввиду наличия инвертора с ограниченными возможностями.

Также, из проделанного эксперимента с неноминальной нагрузкой следует заключить, что при отсутствии подключения к сети инвертора и подключении нагрузки, превышающей максимальную нагрузку инвертора не более, чем на 20%, установка выходит из строя и требует вмешательства персонала для замены предохранителей. Следовательно, выявлена проблема отсутствия электронной защиты по току аккумуляторного звена при отключенном питании сети. Для решения выявленной проблемы необходима реализация дополнительной обратной связи по току с заданием тока уставки при подключении к инвертору аккумуляторов различной емкости и разрешенной токовой нагрузки. Также, решением данной проблемы является использование технологий твердотельного трансформатора для интеграции электростанции в сеть, так как в нем предусмотрена обратная связь по току в каждом звене постоянного тока. Эксплуатация солнечных панелей не выявила уменьшение выдаваемой мощности после года эксплуатации. Имеются некоторые колебания, которые больше характеризуются степенью освещенности панелей и наличие пыли на них. Ёмкость аккумуляторов снизилась согласно паспортным данным. Оценка эффективности использования солнечных панелей может быть определена с помощью методики, приведенной в [17].

Заключение и рекомендации. На этапе общемировой тенденции развития интеллектуальных сетей электроснабжения, имеющих в своём составе альтернативные источники электроэнергии, необходимо уделять внимание развитию данной технологии на территории Республики Крым. В результате исследования произведен анализ годовой эксплуатации солнечной электростанции на территории университета с подключением инвертора на аудиторную нагрузку компьютерного класса. Анализ долгосрочной эксплуатации показал незначительную экономию потребляемой электроэнергии ввиду наличия в системе инвертора, не обладающего встроенной функцией подмешивания энергии в сеть. Также, проанализированы неноминальные режимы работы инвертора с повышенной нагрузкой, показавшие необходимость усовершенствования инвертора электронной защитой по току для аккумуляторного звена.

Для решения выявленных проблем предложено совершенствование инвертора на этапе производства, приобретения более дорогостоящего оборудования или внедрение технологии твердотельного трансформатора, обеспечивающего и возможность интеграции солнечной электростанции в сеть электроснабжения и возможность контроля не только тока заряда аккумулятора, но и потребляемого тока.

Принцип работы, настройка, управление и анализ работы солнечной электростанции осуществляется в образовательном процессе и получении практических навыков специалистов-электромехаников в рамках дисциплины «Нетрадиционные источники электрической энергии».

Список использованной литературы:

1. *Авдеев Б.А., Вынгра А.В.* Анализ валового потенциала солнечной энергетики Керченского полуострова для интеграции в интеллектуальных сетях электроснабжения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 1. С. 5-12.
2. *Авдеев Б.А., Вынгра А.В.* Оценка технического потенциала солнечной энергии Керченского полуострова для применения в интеллектуальных сетях электроснабжения // В сборнике: Морские технологии: проблемы и решения – 2021. Сборник статей участников Национальной научно-практической конференции. Под общей редакцией Е.П. Масюткина. Керчь, 2021. С. 97-100.
3. *Вынгра А.Н.* Перспективы развития альтернативной энергетики в Республике Крым // В сборнике: Общество, образование, наука в современных парадигмах развития. Сборник

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

- трудов по материалам III Национальной научно-практической конференции. Редколлегия: Е.П. Масюткин [и др.], г. Керчь, 2022. С. 122-127.
4. Францева Т.П., Черняева А.А., Чернышева Н.В., Осепян Я., Стрельников В.В. Экономическое обоснование использования солнечных панелей на крыше гипермаркета в качестве альтернативного источника энергии. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 175. С. 204-211.
 5. Гришина Е.А., Корчагина П.А. Использование солнечных панелей при проектировании объектов среды. Оригинальные исследования. 2019. Т. 9. № 6. С. 34-48.
 6. Каримов Н.А. Анализ эффективности контроллера отслеживания точки максимальной мощности на выходе солнечных панелей. Наукосфера. 2023. № 3-1. С. 130-134.
 7. Ершов С.В., Алтунин М.Э. Методика определения нагрузок систем управления поворотом солнечных панелей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 197-202.
 8. Ломоносов С.Е., Половцев В.С., Ломоносова Е.С., Бутурлина А.Р. Разработка системы управления солнечной электростанции с ориентацией панелей «восток-запад». Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 184.
 9. Diaconescu D., Visa I., Burduhos B., Dinicu V. The Incidence Angles of the Trackers Used for the PV Panels' Orientation. Part I: Equatorial Trackers, International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems RECENT, 2007. Vol. X
 10. Coşoiu C.I., Damian A., Damian R.M., Degeratu M. Numerical and experimental investigation of wind induced pressures on a photovoltaic solar panel // International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, Algarve, Portugal, 2008.
 11. Горбулин В.И., Радионов Н.В., Ратушняк А.И., Стеганов Г.Б. Методика обоснования структуры системы генерирования электрической энергии в условиях неравномерной освещенности панелей солнечных батарей космического аппарата // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2020. № 672. С. 252-263.
 12. Чекалин А.П. Гибкие солнечные панели: анализ эффективности применения. Экономика строительства. 2024. № 4. С. 194-198.
 13. Ву В.М., Чернов Б.Б., Нугманов А.М. Оценка эффективности установки катодной защиты морских сооружений с использованием питания от солнечных панелей. Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 6. С. 1141-1151.
 14. Соболев А.С. Разработка системы обнаружения дефектов солнечных панелей на основе алгоритма Yolo V5 // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 480-483.
 15. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Изолированная система электроснабжения с энергетическими роутерами и возобновляемыми источниками энергии // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24. № 2. С. 124-134.
 16. Ramos-Paja, C.A., Saavedra-Montes, A.J. Adaptive Control of Photovoltaic Systems Based on Dual Active Bridge Converters. Computation 2022, vol. 10, p. 89.
 17. Вынгра А.Н., Вынгра А.В., Авдеев Б.А. Расчет эколого-экономической эффективности внедрения солнечных электростанций. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022617260, 19.04.2022. Заявка № 2022616635 от 12.04.2022.

References:

1. Avdeev B.A., Vyngra A.V. Analiz valovogo potenciala solnechnoj energetiki Kerchenskogo poluostrova dlya integracii v intellektual'nyh setyah elektrosnabzheniya [Analysis of the gross potential of solar energy of the Kerch Peninsula for integration into smart power grids] *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems]. 2021. Vol. 17. No. 1. Pp. 5-12. (In Russian)

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

2. Avdeev B.A., Vyngra A.V. Ocenka tekhnicheskogo potentsiala solnechnoj energii Kerchenskogo poluostrova dlya primeneniya v intellektual'nyh setyah elektrosnabzheniya [Assessment of the technical potential of solar energy of the Kerch Peninsula for use in smart power grids] *V sbornike: Morskie tekhnologii: problemy i resheniya – 2021. Sbornik statej uchastnikov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii.* [In the collection: Marine technologies: problems and solutions - 2021. Collection of articles by participants in the National scientific and practical conference. General editor E.P. Masyutkin.] Kerch, 2021. Pp. 97-100. (In Russian)
3. Vyngra A.N. Perspektivy razvitiya al'ternativnoj energetiki v Respublike Krym [Prospects for the development of alternative energy in the Republic of Crimea] *V sbornike: Obshchestvo, obrazovanie, nauka v sovremennyh paradigmah razvitiya. Cbornik trudov po materialam III Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* [In the collection: Society, education, science in modern development paradigms. Collection of papers based on the materials of the III National scientific and practical conference. Editorial Board: E.P. Masyutkin [et al.].] Kerch, 2022. Pp. 122-127. (In Russian)
4. Frantseva T.P., Chernyaeva A.A., Chernysheva N.V., Osepyan Ya., Strelnikov V.V. Ekonomicheskoe obosnovanie ispol'zovaniya solnechnyh panelej na kryshe gipermarketa v kachestve al'ternativnogo istochnika energii. [Economic justification for the use of solar panels on the roof of a hypermarket as an alternative energy source.] *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University.] 2022. No. 175. Pp. 204-211. (In Russian)
5. Grishina E.A., Korchagina P.A. Ispol'zovanie solnechnyh panelej pri proektirovanii ob"ektov sredey. [Use of solar panels in the design of environmental objects.] *Original'nye issledovaniya.* [Original research.] 2019. Vol. 9. No. 6. Pp. 34-48. (In Russian)
6. Karimov N.A. Analiz effektivnosti kontrollera otslezhivaniya tochki maksimal'noj moshchnosti na vyhode solnechnyh panelej. [Analysis of the efficiency of the controller for tracking the maximum power point at the output of solar panels.] *Naukosfera* [Naukosphere.] 2023. No. 3-1. P. 130-134. (In Russian)
7. Ershov S.V., Altunin M.E. Metodika opredeleniya nagruzok sistem upravleniya povorotom solnechnyh panelej [Methodology for Determining the Loads of Solar Panel Rotation Control Systems] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* [Bulletin of Tula State University. Technical Sciences.] 2018. No. 12. P. 197-202. (In Russian)
8. Lomonosov S.E., Polovtsev V.S., Lomonosova E.S., Buturlina A.R. Razrabotka sistemy upravleniya solnechnoj elektrostancii s orientaciej panelej «vostok-zapad». [Development of a Control System for a Solar Power Plant with East-West Panel Orientation.] *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikacij.* [Modern Problems of Radio Electronics and Telecommunications.] 2021. No. 4. P. 184. (In Russian)
9. Diaconescu D., Visa I., Burduhos B., Dinicu V. The Incidence Angles of the Trackers Used for the PV Panels' Orientation. Part I: Equatorial Trackers, International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems RECENT, 2007. Vol. X
10. Coşoiu C.I., Damian A., Damian R.M., Degeratu M. Numerical and experimental investigation of wind induced pressures on a photovoltaic solar panel. International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, Algarve, Portugal, 2008. (In Russian)
11. Gorbulin V.I., Radionov N.V., Ratushnyak A.I., Steganov G.B. Metodika obosnovaniya struktury sistemy generirovaniya elektricheskoy energii v usloviyah neravnomernoj osveshchennosti panelej solnechnyh batarej kosmicheskogo apparata [Methodology for substantiating the structure of an electric power generation system under conditions of uneven illumination of spacecraft solar panels.] *Trudy Voенно-kosmicheskoy akademii imeni A.F.Mozhayskogo.* [Proceedings of the A.F. Mozhaisky Military Space Academy.] 2020. No. 672. P. 252-263. (In Russian)

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

12. Chekalin A.P. Gibkie solnechnye paneli: analiz effektivnosti primeneniya. [Flexible solar panels: analysis of application efficiency.] *Ekonomika stroitel'stva*. [Construction Economics.] 2024. No. 4. P. 194-198. (In Russian)
13. Wu V.M., Chernov B.B., Nugmanov A.M. Ocenka effektivnosti ustanovki katodnoj zashchity morskikh sooruzhenij s ispol'zovaniem pitaniya ot solnechnyh panelej. [Efficiency assessment of the installation of cathodic protection of offshore structures using power from solar panels.] *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. Admirala S.O. Makarova*. [Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and River Fleet.] 2019. Vol. 11. No. 6. P. 1141-1151. (In Russian)
14. Sobolev A.S. Razrabotka sistemy obnaruzheniya defektov solnechnyh panelej na osnove algoritma Yolo V5 [Development of a solar panel defect detection system based on the Yolo V5 algorithm] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. [Bulletin of Tula State University. Technical Sciences.] 2023. No. 12. P. 480-483. (In Russian)
15. Bulatov Yu.N. Kryukov A.V., Suslov K.V. Izolirovannaya sistema elektrosnabzheniya s energeticheskimi routerami i vozobnovlyaemymi istochnikami energii [Isolated Power Supply System with Energy Routers and Renewable Energy Sources] *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. [Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov.] 2021. Vol. 24. No. 2. Pp. 124-134. (In Russian)
16. Ramos-Paja, C.A.; Saavedra-Montes, A.J. Adaptive Control of Photovoltaic Systems Based on Dual Active Bridge Converters. *Computation* 2022, vol. 10, p. 89.
17. Vyngra A.N., Vyngra A.V., Avdeev B.A. *Raschet ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti vnedreniya solnechnyh elektrostantsij*. [Calculation of the ecological and economic efficiency of the implementation of solar power plants.] Certificate of registration of the computer program RU 2022617260, 19.04.2022. Application No. 2022616635 dated 04/12/2022.

Сведения об авторах / Information about authors

Вынгра Алексей Викторович	канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 avyngra@mail.ru
Vyngra Aleksi Viktorovich	Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the Department of Ship's Electrical Equipment and Automatization Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 avyngra@mail.ru
Авдеев Борис Александрович	канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 dirigeant@mail.ru
Avdeev Boris Aleksandrovich	Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the Department of Ship's Electrical Equipment and Automatization Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 dirigeant@mail.ru

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)**

УДК 629.5.035.5

Кривоносов Г.А.

**ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КАВИТАЦИИ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГРЕБНОГО ВИНТА**

Аннотация. В работе анализируются условия возникновения и схлопывания пузырьков в водной среде. Теоретически показано, что при слиянии малых пузырьков с большими и при их коллапсе возникает мощное электромагнитное излучение. В результате разрыва поверхности пузырьков образованные осколки молекулярных соединений имеют достаточную энергию, чтобы сделать каверны в лопастях гребного винта. Поставленные эксперименты убедительно доказывают, что при слиянии пузырьков помимо электромагнитного излучения на электродах возникает разность потенциала. В поле которого, вероятно, имеются условия для ускорения осколков (H^+ и HO^-) молекул воды. Подробно рассматриваются условия возникновения кавитации на гребном винте, и даются рекомендации по ее уменьшению. Предлагаются образцы гребных винтов, на которых отсутствуют явления кавитации.

Ключевые слова: водный пузырек, образование и схлопывание пузырька, кавитация, гребной винт, устранение кавитации, гребной винт по Архимеду.

Krivososov G.A.

**MANIFESTATION OF THE CAVITATION PHENOMENON ON A
PROPELLER AND METHODS OF ELIMINATION**

Abstract. The paper analyzes the conditions for the formation and collapse of bubbles in an aqueous medium. It is theoretically shown that when small bubbles merge with large ones and when they collapse, powerful electromagnetic radiation occurs. As a result of the rupture of the bubble surface, the formed fragments of molecular compounds have sufficient energy to make cavities in the propeller blades. The experiments convincingly prove that when bubbles merge, in addition to electromagnetic radiation, a potential difference occurs on the electrodes. In the field of which, there are probably conditions for the acceleration of fragments (H^+ and HO^-) of water molecules. The conditions for the occurrence of cavitation on a propeller are considered in detail, and recommendations are given for its reduction. Samples of propellers are proposed on which the conditions for the occurrence of cavitation are absent.

Keywords: water bubble, bubble formation and collapse, cavitation, propeller, cavitation elimination, Archimedes' propeller.

Введение. Процесс испарения влаги происходит даже при небольшой разности ($T_n \geq T_c$) температур между влажным предметом (водной гладью) T_n и окружающей воздушной средой T_c . А при ($T_n \leq T_c$) наблюдаем обратный процесс - конденсацию (схлопывания, слияния мелких водяных частиц в более крупные). Кавитация (кавитация- это процесс образования разрывов сплошности) в водной среде происходит как правило при образовании разности давления в ней. Например, при резком изменении направления движения жидкости (в водопроводных трубах, на концах лопастей гребных винтов). В данных примерах явление

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

изменение размера оболочки пузырька имеет отрицательное действие на окружающие предметы. Однако, это явление играет и положительное воздействие, например, в медицине: дробление камней в почках и в мочевом пузыре, разрушение раковых опухолей в живом организме. При воздействии различного рода предметами на жидкость или локальные перепады давлений в малых объёмах в ней могут образовываться разных размеров пузырьки, содержащие внутри (насыщенный) пересыщенные пары, как результат конденсации на примесях воздушных или твёрдых вкраплений. Для создания оболочки пузырька (границы раздела между жидкостью и газовой средой) необходимо совершить работу по ее образованию, выражаемую в коэффициенте поверхностного натяжения (как потенциальной энергии). Одно из технически наносимый вред в лопастях гребного винта является кавитация.

Анализ многочисленных работ по изучению явления кавитации в жидкой среде дает возможность ее классифицировать. Различают три вида: *вихревую*, *пузырчатую* и *пленочную*. Ограничимся рассмотрением пузырьчатой кавитацией. В работе [1] из рассмотрения “на основе уравнение Бернулли для линии тока, проходящей через некоторую точку А этой поверхности”, делаются выводы об условиях для возникновения кавитации. Из этих уравнений вытекает, что они в точке А создадутся тогда, когда давление в ней снизится до давления насыщенных паров воды. В подобных работах [2, 3] также рассматриваются условия возникновения и развития кавитации на засасывающей поверхности лопасти гребного винта, и также анализируются условия проявления явления кавитации в системе очистки газовых выбросов. Однако рассмотрение динамики всего этого явления не дает ответа о механизме столь мощного разрушающего действия жидкости на сплавы твердых тел, из которых изготавливаются лопасти.

Цель исследования. Указать на возможные причины возникновения каверн в лопастях гребного винта. Показать, что явления кавитации и схлопывание пузырьков являются источниками высокоэнергичных частиц, под действием которых происходит разрушение поверхности лопастей винта и вывод их из работоспособности. Привести рекомендации по устранению условий возникновения каверн в лопастях гребного винта.

Методы исследования. Испарение может происходить как из внутреннего объёма жидкости, так и с поверхности. Определим, что представляет собой испарившаяся мельчайшая водная частица капелькой или пузырьком. С водной поверхности капелька не отрывается, так как ее вес больше подъемной силы. Испарение влаги из объёма жидкости возможно, так как в нем имеются центры конденсации, мелкие нерастворимые примеси, а больше всего растворены в малом объёме молекулы азота, кислорода. Увеличение объёма пузырька, при его подъёме в объёме жидкой среды, обусловлено разностью давления от глубины нахождения в жидкости. Подъем происходит под действием разности выталкивающей силы F_1 и веса F_2 насыщенного пара внутри пузырька ($F_1 > F_2$). У поверхности раздела на пузырёк появляются дополнительные силы вес F_3 жидкой оболочки и капиллярная сила F_4 рис. 1. При движении пузырька вверх величина капиллярной силы F_4 уменьшается из-за уменьшения общей линии касания пузырька с границей раздела жидкость-атмосфера.

Определим, при каком радиусе объёма пузырька он отделится от поверхности жидкости рис. 1. Выталкивающая сила F_1 уравнивается суммой сил F_2 - весом насыщенного пара внутри пузырька, F_3 - весом жидкости оболочки пузырька, F_4 - капиллярной силой, удерживающей пузырёк на поверхности. Пузырёк отделяется от поверхности жидкости в

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

момент $F_4 = 0$.

$$F_1 = F_2 + F_3. \quad (1)$$

Запишем выражения для каждой из этих величин:

$$F_1 = 4/3\pi R^3 d_1,$$

где R -радиус шара внешней оболочки, d_1 плотность воздуха окружающей среды.

$$F_2 = 4/3\pi r^3 d_2,$$

где r -радиус шара внутренней оболочки пузырька, d_2 -плотность насыщенного пара внутри пузырька.

$$F_3 = 4/3\pi(R^3 - r^3)d_3,$$

где d_3 -плотность воды в оболочке.

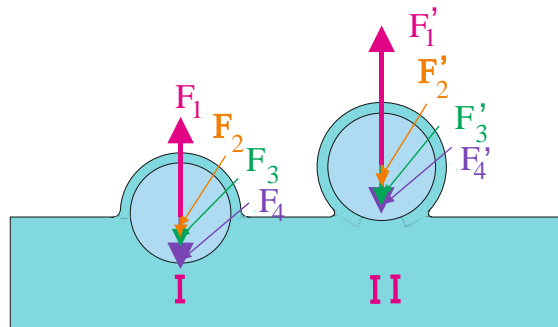


Рисунок 1 – Динамика изменения размера пузырька: I - начальная стадия зарождения пузырька, II - стадия отрыва пузырька от поверхности жидкости.

F_1 и F_1' – выталкивающая сила Архимеда, F_2 и F_2' – вес насыщенного пара внутри пузырька, F_3 и F_3' – вес жидкой оболочки пузырька, F_4 и F_4' – капиллярная сила, удерживающая пузырек на поверхности.

Решая уравнение (1) относительно R и принимая, что $\Delta = R - r = 110^{-4}$ мм, (Δ -разность радиусов оболочки пузырька с размерами по Клаузиусу) получаем промежуточное выражение:

$$R^3(d_3 - d_1) = (R - \Delta)^3(d_3 - d_2) \quad (2)$$

В выражении (2) параметры d_1 , d_2 , d_3 в опубликованных источниках приводятся с разной точностью. Поэтому в дальнейших вычислениях применяем усреднённые значения ($d_1 = 1.141$, $d_2 = 0.0173$, $d_3 = 998,2$ кг/м³) приведены при условии $t^0 C = 20^0$ и нормальном атмосферном давлении. Разброс в значениях этих величин определяет результат вычисления численного значения радиуса R , но нас в основном будет интересовать физический смысл процессов. Проведённые вычисления по выражению (2), с усреднёнными данными d_1 , d_2 , d_3 , дают значение $R = 0.25$ мм (при этом $r = 0,24999$ мм), при котором пузырёк отрывается от поверхности жидкости. Полученное значение R несколько отличается по величине относительно, приведенных в литературе. Заметим, что в данных для плотностей не учитывалась температурная зависимость, что привело бы к значениям близким к экспериментально измеренным. Но приведенный расчёт размеров пузырька подтверждает процесс испарения с поверхности жидкой фракции в виде пузырька.

В качестве подтверждения экспериментальных данных вычислим по (2) внутренний радиус r пузырька, беря внешние размеры пузырька равному усреднённому значению из опубликованных $R = 0.045$ мм, получаем $r = 0.044983$ мм, толщина слоя $\Delta = 0.0000169$ мм, что совпадает с расчётами Клаузиуса.

Рассчитаем некоторые параметры пузырьков с внешними радиусами минимальным

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

$R_{\min}=0.003$ и максимальным $R_{\max}=0.0175$ м. Тепловая запасённая энергия вычислялась при $t= 27^{\circ}\text{C}$ и удельной теплоёмкости $\lambda=4.1806$ Дж/г гр. Для вычисления тепловой запасённой энергии в оболочке пузырька предположим, что кавитация происходит как минимум с изменением температуры на один градус. Принимая коэффициент поверхностного натяжения равным $\sigma=72.86 \cdot 10^{-3}$ Н/м, определим излучаемую энергию пузырьком при коллапсе, а также приведем значения выделенной энергии при слиянии двух одинаковых пузырьков. Вычисленные данные приведены в таб. 1.

Таблицы 1 – Расчётные параметры пузырьков

Внешний радиус $R_{\text{am}} \cdot 10^{-6}$ м	Площадь внешней оболочки $S_{\text{ax}} \cdot 10^{-12}$ м ²	Излучаемая энергия при коллапсе одного пузырька $W \cdot 10^{-12}$ Дж	Излучаемая энергия при слиянии двух одинаковых пузырьков $W \cdot 10^{-12}$ Дж	Тепловая запасённая энергия в оболочке $Q \cdot 10^{-12}$ Дж
3	113,04	8.24	3.4	0.5323
17.5	3846,5	280.3	115.6	105.73

Рассмотрим процес слияния одинаковых пузырьков малого размера в один большой.

Так как масса оболочек n пузырьков при слиянии равна массе оболочки одного пузырька, то имеем:

$$nr^3(1 - r_1^3 / r^3) = R_c^3(1 - R_1^3 / R_c^3), \quad (3)$$

где r - внешний радиус малого пузыря, R_c - внешний радиус образованного пузыря, r_1 - внутренний радиус малого пузыря, R_1 -внутренний радиус большого пузыря.

Считая в первом приближении, что численные значения скобок почти равны. Такое допущение имеет кое-какую ошибку. Однако, нас интересует процесс слияние пузырьков в качественном рассмотрении. Имеем:

$$R_c = rn^{1/3}. \quad (4)$$

Решая уравнение (2) относительно размеров Δ_c оболочки получаем:

$$\Delta_c = R_c [1 - (d_3 - d_1) / (d_3 - d_2)]^{1/3} \quad (5)$$

Находим радиус внутренней оболочки большого пузырька:

$$R_c^1 = R_c \{1 - [1 - (d_3 - d_1) / (d_3 - d_2)]^{1/3}\} \quad (6)$$

По аналогии определим внутренний радиус малого пузырька:

$$r^1 = r \{1 - [1 - (d_3 - d_1) / (d_3 - d_2)]^{1/3}\} \quad (6a)$$

Зная радиусы внешней и внутренней оболочек, находим массу пузырька, затем определяем тепловую энергию таб. 1.

При отрыве одного пузырька с поверхности жидкости совершается работа на преодоление сил поверхностного натяжения равную:

$$w = 4\pi\sigma \int_0^r l dl = S\sigma, \quad (7)$$

где l -длина окружности внешней поверхности пузырька радиуса r ; S -внешняя поверхность

Суммарная работа $w_c(n)$, совершаемая на преодоление поверхностного натяжения n

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

пузырьков радиуса r , определится из (7):

$$w_c(n) = wn. \quad (8)$$

Потенциальная энергия $W_c(n)$ одного пузырька радиуса R_c (4), слившихся n -пузырьков, равна:

$$W_c(n) = wn^{2/3}. \quad (9)$$

Из отношения выражений (8) к (9) вытекает:

$$w_c(n) / W_c(n) = n^{1/3}, \quad (10)$$

что процентное отношение (10) освободившейся энергии не зависит от размера конвертируемого пузырька, а выделяется пропорционально их количеству и подчиняется закону $n^{1/3}$.

Таким образом, передача энергии пузырькам происходит от внешнего источника (механическое перемешивание, течение, нагрев и др.), а при слиянии n пузырьков часть освободившейся энергии при уменьшении суммарной поверхности переходит в потенциальную энергию вновь образованной поверхности, в тепло оболочки, в излучение энергия в виде кинетической энергии осколков оболочки, звуковой и электромагнитной. Такое заключение созвучно с выводами в работах [4, 5].

Результаты исследования и их обсуждение. При энергетическом расчете происходящих процессов следует учитывать факт, что свободный пузырёк имеет две поверхности (внутреннюю и внешнюю). Производить расчёты с учётом всех перечисленных допущений довольно сложная задача [6], и только привлечение вычислительной процедуры возможно будет решить сложную задачу по предсказанию явлений образование и схлопывания пузырьков, а также образование глубоких каверн в твёрдых конструкциях.

Рассмотрим состояние пузырька при повышении температуры (относительно окружающей среды). Коэффициент поверхностного натяжения уменьшается [7], и вероятность слияние двух и более пузырьков наиболее вероятна. И если при определенных условиях вода «вскипает», происходит образование пузырьков, кавитация, у отдельных пузырьков оболочки разрываются на фрагменты или на отдельные молекулы H_2O в возбуждённом состоянии. При таких процессах выделяется излучательная энергия, под действием которой происходит разрушение окружающих твердых предметов. Такое наблюдается на концах лопастей при больших оборотах гребного винта. При длительной его эксплуатации каверны наиболее выражены (см. рис. 2 положения А, Б и В). С понижением температуры (или с повышением давления в жидкости) ниже критической оболочки пузырьков уплотняются, вероятность их слияния уменьшается, излучение отсутствует.

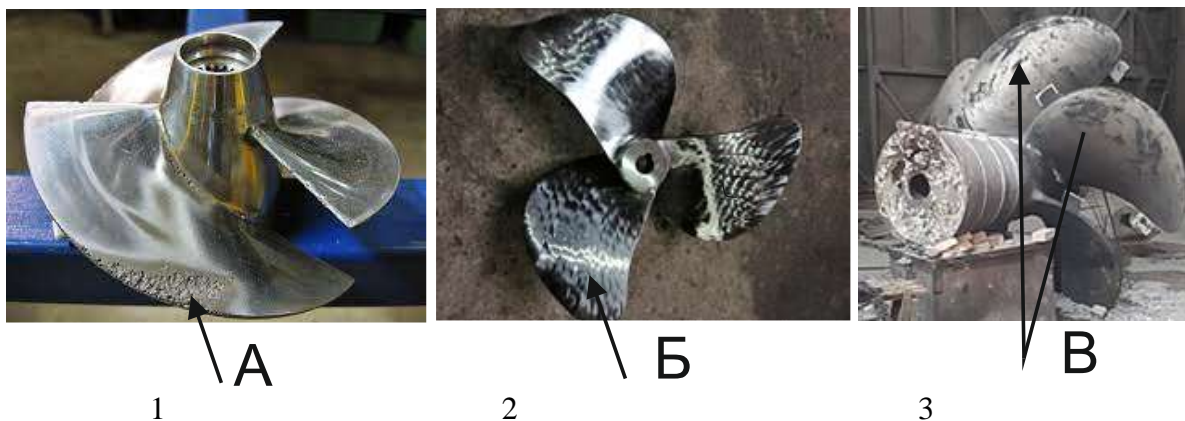


Рисунок 2 – 1 и 2- трёх лопастные винты, 3 – много лопастной винт. А, Б и В места образования дефектов на лопастях в результате воздействия кавитации.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Как пример, на бегущей волне (механическое перемешивание слоев воды) образуется пена (скопление пузырьков). За бортом по такой же причине просматривается гребень на убегающей волне, а прозрачность и количество крупных пузырьков отражается на цвете пены, и это сопровождается различным родом излучением таб. 1, [5]. При слиянии малых пузырьков, освободившаяся энергия наиболее вероятно выражается в люминесцентном излучении [8], которое обусловлено разрывом межмолекулярных связей H_2O .

Определим потенциальную энергию, выделившуюся при слиянии одинаковых, как пример, двух размеров пузырьков малого $r=3 \cdot 10^{-3}$ мм и двух больших $R=17.5 \cdot 10^{-3}$ мм. Следует заметить, что слияние пузырьков одного размера мало вероятно [7], что характерно наблюдаемое продолжительное сохранение пены (пузырьков) на гребне волны. Однако, оно осуществляется, но с достаточно малой вероятностью.

Найдём разность энергий $\Delta(r)$ между суммой энергий $w(r)$ двух свободных пузырьков радиусом $r=3 \cdot 10^{-3}$ мм и энергией $W(R)$ одного пузырька, образованного в результате их слияния:

$$\Delta(r) = 2w(r) - W(R) = w(r)0.416. \quad (11)$$

Проделаем аналогичные вычисления разности $\Delta(R)$ энергий между суммой энергий $W(R)$ двух свободных пузырьков $R=17,5 \cdot 10^{-6}$ м и энергией $W(R_1)$ образованного в результате их слияния:

$$\Delta(R) = 2w(R) - W(R_1) = w(R)0.416. \quad (12)$$

Вычисления по (11) и (12) носят теоретический оценочный характер. Результаты вычислений приведены в таб. 1

По размеру пузырьков найдем их количество в 1 г воды, а также величину освободившейся энергии. Результаты вычислений приведены в табл. 2. Следует добавить, что необходимо учитывать тепловую энергию таб. 1, хранящаяся в жидкой оболочке пузырька

Таблица 2 – Результаты вычислений по (11) и (12).

Внешний радиус пузырька 10^{-6} м	Освобожденная энергия Δ при слиянии 2х пузырьков 10^{-12} (Дж)	Количество слитых пузырьков в 1 г H_2O , $n \cdot 10^6$ шт	Освобожденная энергия при слиянии пузырьков в 1 г H_2O , $\Delta, 10^{-3}$ Дж	Тепловая энергия пузырьков в 1 г H_2O , $Q \cdot 10^{-3}$ Дж
3	3.4	443	1.57	0.841
17.5	115.6	0.223	0.025	0.35

38 длин волн возбуждения (230–550 нм) и регистрации (240–650 нм).

В некоторых работах [9] приводятся значения энергии порядка нескольких сот нм, которой обладает каждая молекула при разрыве поверхности, как результат нарушение молекулярных связей, А снятие ее выражается в виде звукового и электромагнитного излучений [4, 5]. Вычисленные значения энергий (таб. 1), для одной молекулы в случае схлопывания пузырька имеет порядок сотен 10^{-12} Дж. Это число, как выше отмечалось, значительно занижено. Из этих данных видно, что длина волны при слиянии пузырьков значительно меньше длин волн [9, 10], необходимых не только для возбуждения сон люминесценции, но и для ионизации фрагментов H_2O . Как отмечалось выше, при слиянии пузырьков рвутся межмолекулярные связи H_2O . Не исключена вероятность того, что при этих процессах происходит жёсткое электромагнитное излучение. Так в раб. [10] подчёркивается, что линия излучения возбуждённого нейтрального радикала OH^* находится в пределе 310 нм на подложке сплошного спектра. Поэтому имеется большая вероятность излучения жёсткого электромагнитного излучения, при слиянии пузырьков, что и

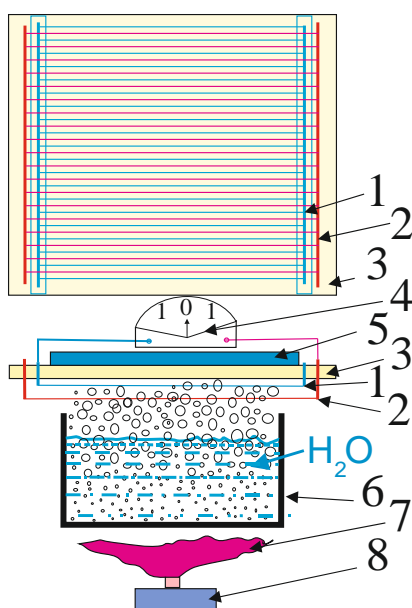
2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

наблюдается в работах [11]. Этой энергии (с учетом как минимум разрывом внутренней и внешней оболочек) оказывается достаточно, чтобы произвести ядерную реакцию [12, 13, 14]. Создать строгую математическую модель не представляется возможным из-за выше оговорённых факторов [15].

Следует заметить, что позади быстро движущегося объекта на поверхности (внутри) воды возникают мельчайшие пузырьки, заполненные паром. [16] Одним из примеров такого движения является гребной винт (рис. 2 А). Современный гребной винт состоит [17] из ступицы и лопастей, установленных на ступице радиально, на одинаковом расстоянии друг от друга, повернутых на одинаковый угол относительно плоскости вращения и представляющих собой крылья среднего или малого удлинения. Гребной винт, насаживается на гребной вал, приводится во вращение судовым двигателем. При вращении гребного винта каждая лопасть захватывает массу воды и отбрасывает её назад. Если рассматривать динамику жидкости относительно поверхности лопасти, то на конце лопасти скорость воды значительно больше, чем вблизи ступицы. Совершается работа по ее перемещению, давление внутри жидкости на конце винта падает. В результате жидкость на конце лопасти «вскипает», образуя пузырьки. Часть механической энергии гребного винта переходит в потенциальную энергию поверхностного натяжения оболочки образованного пузырька. Малые пузырьки схлопываются, объединяются с большими, в результате выделяется большая мощность (табл. 2 и уравнения 11 и 12), как следствие изменение поверхности пузырьков, при этом КПД гребного винта падает.

Дополнительные эксперименты. К выше сказанному можно рассмотреть несколько поставленных опытов.

На рис. 3 и 4 изображены устройства по определению разности потенциалов при слиянии пузырьков над кипящей водной поверхностью. Над сосудом с дистиллированной водой помещались электроды 1 и 2, расположенные вблизи диэлектрика 3 (оргстекло) холодильника (как и 5 холодильник необходимы для конденсации пара). Конструкции электродов (сеток) отличались тем, что на рис. 2 электроды располагались параллельно, а на рис. 3 - перпендикулярно. На рис. 3 электроды 1 и 2 крепились на изоляторе на уровне 3 мм и 5 мм, а между проводами расстояние 4 мм. На рис. 4 электроды 1 и 2 крепились на уровне 2 мм и 12 мм от поверхности изолятора, а между проводами 5 мм и располагались перпендикулярно. В обоих случаях в цепь включался чувствительный мкА типа М2031/2, или М4205 поз. 4. Электроды выполнены из медной проволоки диаметром 0.5 мм. Сосуд 6 с дистиллированной водой нагревался пламенем 7 горелки 8.



2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Рисунок 3 – Прибор для обнаружения разности потенциала при схлопывании водяного пузырька. 1-2 электроды, 3-изолятор-холодильник, 4-микроамперметр, 5-холодильник, 6-сосуд с дистиллированной водой, 7-пламя, 8-горелка

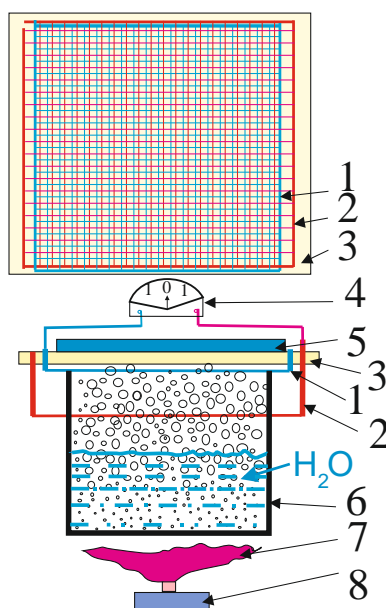


Рисунок 4 – Прибор для обнаружения разности потенциала при схлопывании водяного пузырька. 1-2 электроды, 3-изолятор-холодильник, 4-микроамперметр, 5-холодильник, 6-сосуд с дистиллированной водой, 7-пламя, 8-горелка.

По мере закипания воды прибор показывал ток порядка 1.5 мкА, в первом и втором экспериментах. При выключении пламени 7 горелки 8, кипение воды в сосуде 6 прекращалось, и вода остывала, Стрелка прибора 4 устанавливалась в нулевом положении. Эксперименты отличались тем, что в первом случае (рис. 3) наличие тока обнаруживалось в начальный момент кипения воды, а во втором эксперименте (рис. 4) ток появлялся при бурном кипении. Такое несовпадение во времени от начала кипения появления тока объясняется разностью во времени (замыканием) сконденсированного пара на электродах. Расстояние между электродами разное, и необходимо во втором случае больше сконденсированного пара для замыкания электродов. При возобновлении кипения процесс повторялся. Согласно вышеописанного следует, что при слиянии пузырьков освобождается энергия поверхностного натяжения воды, поэтому считаем эти опыты являются подтверждением вышеописанного.

Появление потенциала при схлопывании пузырька было проверено на холодной воде при проведении следующего эксперимента см. рис. 5 и 6. Две изогнутые медные пластины 2 размером 80x80x0.5 мм определённым образом закреплены на подставке, расстояние d между пластинами устанавливалось изгибом крепежей пластин. Крепёж крепился на оргстекле размером 90x90x3 мм. Расстояние d между электродами менялось согласно рис. 6. Сопротивление между пластинами определялось мегомметром типа МС -05 на 2500v и составляло минимальное значение равное 10^3 МΩ. В шприц с иглой внешним диаметром 0.75, внутреннее отверстие диаметром 0.5 мм набиралась дистиллированная вода. Впрыскиваемая вода имела форму [15]: от начала иглы - сплошная струя составляла порядка 5 мм, в дальнейшем превращалась в мелкие капельки, которые и впрыскивались на нижний электрод с меткой М. (рис. 5 поз. 3). Измеренные показания прибора наносилось на график рис. 6. Затем электроды поворачивали на 180^0 (рис. 5 поз. 4) и проводились измерения. Следует заметить, что отклонение стрелки в одну и ту же сторону при измерениях (поз. 3 и поз. 4) указывало на направление тока. При изменении количества впрыскиваемой воды

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

наблюдались достаточно разные показания вплоть до смены заряда на пластинах, но это получалось при больших дозах впрыскиваемой воды. В следующем эксперименте (рис.5 поз. 5) ни при каких дозах впрыскиваемой воды стрелка не отклонялась. При проведении подобных экспериментов со спиртом и бензином не было замечено отклонение стрелки (вероятно слабая чувствительность прибора). Подобное объясняется тем, что коэффициенты поверхностного натяжения этих жидкостей почти в два раза меньше коэффициента поверхностного натяжения воды и разностью смачивостью этими жидкостями твердые тела. Эти опыты показывают, что при слиянии пузырьков освобождается энергия поверхностного натяжения воды. Таким образом, и эти опыты также являются подтверждением вышеописанного утверждения.

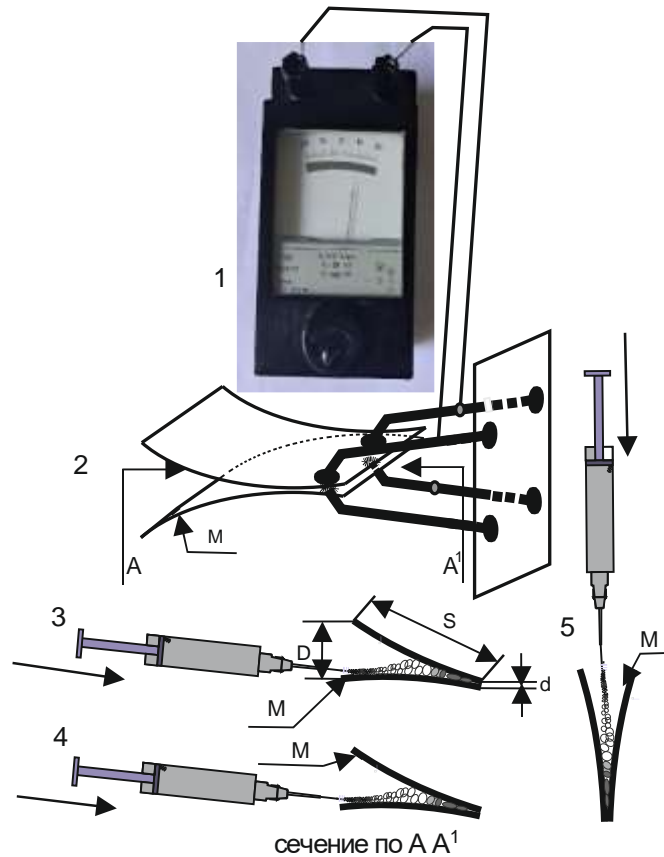


Рисунок 5 – Эксперимент по обнаружению потенциала при слиянии пузырьков.

1 - прибор тип М2031/2, 2-медные пластины с меткой М на одной из них, 3 и 4- шприц для впрыскивания воды на пластину с меткой М, 5- шприц для впрыскивания воды на пластины в вертикальном их положении

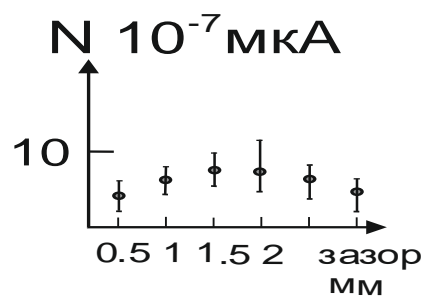


Рисунок 6 – График зависимости изменение тока, образованного между пластинами от величины зазора d.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Появление разности потенциала в обоих случаях можно объяснить также следующим предположением. При разрыве молекулярных связей H_2O образуются H^+ и OH^- [19] Ион H^+ в 17 раз весит меньше ионов OH^- , и поэтому под действием сил тяжести ионы OH^- опускаются в жидкости на нижний электрод (рис. 5, поз. 4 и 5) и там накапливаются. А в вертикальном положении электродов (рис. поз. 6) потенциал на электродах не возникает, распределение зарядов происходит равномерно на обоих электродах.

Таким образом, можно сделать некоторые выводы. Для того, чтобы уменьшить явление кавитации и схлопывание пузырьков необходимо изменить условия их возникновения: это устранить локальный разогрев и не изменять (лучше несколько повысить) давление локально в жидкости. Рассмотрим несколько примеров.

Следует отметить некоторую особенность повреждения на поверхности гребного винта для разного типа водных судов. Как описано во многих статьях кавитация и схлопывание пузырьков создают большие неприятности в эксплуатации гребных винтов на судах. Это: снижение пропульсивной эффективности, повышение уровня шума и вибрации, повреждение гребного винта (см. рис. 2). Анализ [14] повреждений на лопастях показывает, что каверны на лопастях в основном образуются в тех местах, где давление воды вокруг винта падает настолько, что вода «вскипает» и образует маленькие пузырьки. В большом количестве и в продолжительный период времени эти пузырьки схлопываются и создают ударные волны, которые повреждают лопасти и снижают их эффективность в действии на воду, также может привести к повышенному шуму и вибрации, снижению производительности и увеличению расхода топлива. Эффект кавитации и схлопывание пузырьков вызывает ультразвук с частотой достаточно широкого диапазона – от 25 до 50 кГц, что в некоторых узлах судна может вызвать резонанс, приводящий к разрушению. А также может служить как отрицательный фактор для военных судов в его обнаружении.

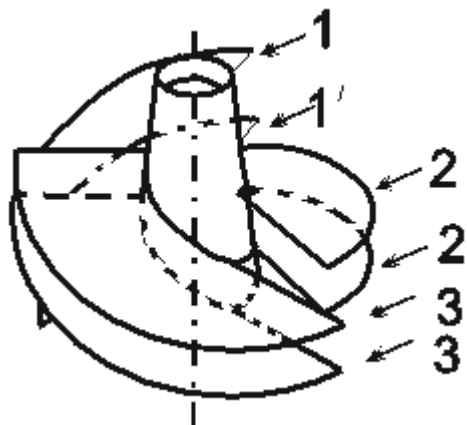


Рисунок 7 – Предлагаемый вариант гребного винта, 1, 2 и 3 схемное изображение действующего винта, вариант добавок 1^1 , 2^1 и 3^1 к действующему винту.

На рис. 1 видны повреждения на лопасти в месте скоростного движения жидкости (а значит пониженное давление) и не защищённое второй лопастью. Если защитить «слабые» места в основных лопастях 1, 2 и 3 (рис. 7) вторым рядом лопастей 1^1 , 2^1 и 3^1 (рис. 7) или «одеть» гребной винт в кожух не показанном на рисунке. В этом случае исключится разбрызгивание воды по сторонам. И при уменьшении пространства между концом одной лопасти и началом последующей лопасти для сохранения постоянства давления при увеличении скорости воды в этом месте, то явление кавитации перестанет проявляться.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

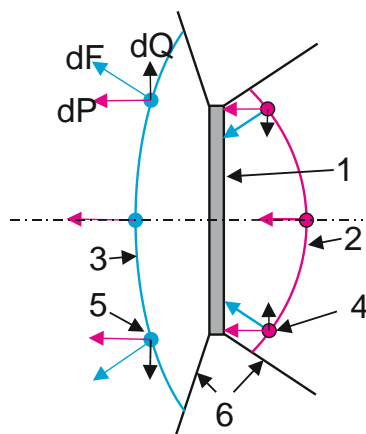


Рисунок 8 – Схемное изображение динамики потока воды при вращении одиночного гребного винта. Значение цифр приведено в тексте

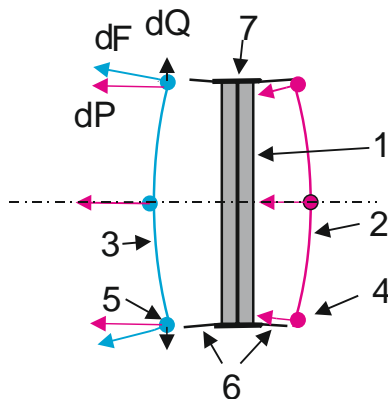


Рисунок 9 – Схемное изображение динамики потока воды при вращении двойного гребного винта. Значение цифр приведено в тексте

Гидродинамическое действие гребного винта в момент времени схематично изображено на рис. 8, 9. Сечение винта 1 (рис. 8, 1-одиночного, рис. 9, 1-двойного) представлено в виде квадратика. Слева и справа дугами изображены фронты набегающей 2 и убегающих 3 волн. Кружками (4 и 5) – обозначены отдельные объёмы жидкости, стрелками указаны направления действующих сил на эти объёмы жидкости. 6-показаны крайние границы фронтов набегающей и убегающей волн. 7- ограничивающий кожух.

В расчёте действующей гидродинамической силы принимается результирующая сила dF [20]. В действительности вектор силы рассеяния жидкости от лопастей имеет составляющую- действующую силу dQ , сопротивляющаяся вращению элемента лопасти, направленную поперек оси направления движения судна. На элемент лопасти действует сила упора dP , что и принимается в последующих расчётах как интеграл для всего винта равная:

$$P = z \int_r^R dP$$

где z число лопастей, r радиус ступицы, R радиус винта.

Составляющая dQ (рис. 8 и рис. 9) как сила сопротивления вращению элементу лопасти в элементе движения судна не участвует.

Как уже отмечалось подобный недостаток можно устранить: выполнить винт двойным и поместить их в кожух см. рис. 9, поз. 7.

Согласно работе двигателя по существующей схеме происходит следующее. Скорость корпуса судна относительно гребного винта близка к нулю. Только потенциальная энергия (ее характеризует мощность двигателя), преобразование которой в кинетическую,

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

происходит в гребном винте 1 рис. 8. Гребной винт преобразует вращение вала двигателя в силу dF , толкающую судно вперёд. При вращении винта на поверхностях его лопастей 11 рис. 10, обращённых вперёд – в сторону движения судна (засасывающих рис. 8, 9 поз. 2 и рис. 10 поз. 12), создаётся разрежение, а на обращённых назад (нагнетающих рис. 8, 9 поз. 3 и рис. 10 поз. 9) – повышенное давление воды. В результате разности давлений на лопастях в силу ТРЕТЬЕГО закона Ньютона возникает сила dP' , направленная в сторону движения судна. В результате разложения силы dF , вторая перпендикулярно к ней, полученная сила dT (не показанный на рис. 8, 9, и 10), создаёт упор гребному винту, образует крутящий момент водному потоку, который преодолевается двигателем. Заметим, что силы dT и dQ (рис. 8) способствуют понижению давления в убегающей волне, образованию явления кавитации вблизи краёв лопасти. Сила dQ действует на удаление водного объёма от оси гребного винта. Сила dT не велика, тормозит вращение винта. Спаренный гребной винт рис. 9 и «одетый» в кожух поз. 7, ограничивающий граничный угол всасывания и разлёта водного потока θ в значительной степени уменьшает силу dQ .

Рекомендации по устранению вывода из строя гребного винта. Наиболее эффективным способом исключить явление кавитации в гребном винте, на наш взгляд, является применение в качестве гребного винта устройство типа насоса Архимеда рис. 10.

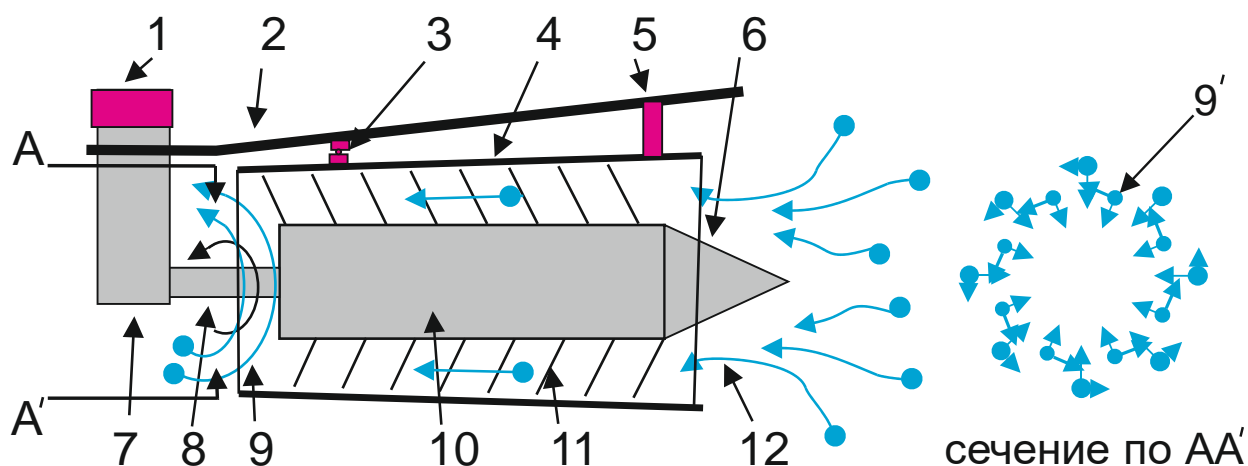


Рисунок 10 – Предлагаемая модель гребного винта типа насос Архимеда.

- 1-двигатель, 2-корпус судна, 3-шарнир, 4-кожух гребного винта, 5-регулирующий винт,
6- конус винта, 7-редуктор, 8- вал вращения, 9-поток выхода воды,
10-основание с 11-лопастями, 12-поток входной воды. 9' -сечение по AA'

На рис. 10 представлена модель гребного винта типа насоса Архимеда. Винт работает следующим образом. Двигатель 1 передаёт вращающий момент через редуктор 7 вала вращения 8, который жёстко связан с основанием 10, с лопастями 11 для перемещения воды. Разбрызгивание воды с лопастей ограничивается кожухом 4. Входной поток воды 12, сформированный конусом 6, ускоренный основанием 10 с лопастями 11 выталкивает поток воды наружу 9. На рис. 10' -показано сечение вращения выходного потока воды, который передаёт импульс движения корпусу 2. Шарнир 3 вместе с регулирующим винтом 5 изменяет угол атаки входного потока 12 воды. Так как вода почти не сжимаемая конус 6 обеспечивает ускорение входному потоку воды, обеспечивая повышенное давление, а значит исключает кавитацию. Особенностью предлагаемого гребного винта заключается в том, что поток воды за винтом ускоряется и закручивается. Кроме того, из-за увеличения угловой скорости происходит некоторое сужение выходной струи. Соответственно вызванную скорость можно представить в виде геометрической суммы осевой, окружной и радиальной скоростей. Следует заметить, что действующие гребные винты также создают окружные и радиальные скорости (рис. 10, поз. 9'). Однако они в расчётах не учитываются [21], что в

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

значительной степени отражается на КПД гребного винта. В данном случае наличие окружной скорости, возникающей в результате вращения такой конструкции винта, поток воды на выходе закрученный, уплотнённый (рис. 10, поз 9'), чем создаёт дополнительный упор движителя. Не образуются пузырьки, явление кавитации не проявляется.

Выводы.

1. Приводится теоретическое доказательство об энергетическом характере возникновения явления кавитации.
2. На приведённых экспериментах доказана природа возникновения потенциала при кавитации и схлопывании водных пузырьков.
3. Приводится оценка энергетической характеристики явления кавитации.
4. Показано, что излучательная способность при слиянии пузырьков достаточно даже для осуществления ядерных реакций.
5. Даются рекомендации по сокращению разрушительного действия явления кавитации.
6. Гребной винт типа насоса Архимеда обладает большими потенциальными конструктивными возможностями. Как пример, можно рекомендовать выполнение кожуха с переменным поперечным сечением (к выходу изготовить с сужением), а размещение лопастей с переменным шагом, уменьшенным их размером. Что позволит увеличить скорость и давление в отталкиваемой жидкости. Увеличится импульс отдачи гребного винта, понизится вероятность появления пузырьков и явления кавитации.

Замечание. Некоторые обсуждаемые в статье вопросы носят спорный характер, и их можно разрешить, проделав ряд дополнительных экспериментов. Но для этого необходимы материальные вложения, которых, к сожалению, у автора нет.

Список использованной литературы:

1. *Жигин Р. Е.* Теория и устройство корабля. Studme. Org, 2019.
2. Акустическая и гидродинамическая кавитация для смешивания URL: <https://www.hielscher.com/ru/acoustic-vs-hydrodynamic-cavitation-for-mixing-applications.htm> (дата обращения: 10.08.2024).
3. *Мороз Н.А.* Гидродинамическая кавитация воды и ее использование в абсорбционных технологиях очистки промышленных газов // Вопросы химии и химической технологии. 2013. №6. С. 107-109.
4. *Кривоносов Г.А., Онищенко И.Н.* Релаксационные колебания в тепловых трубах// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2010. № 4. С. 365-368.
5. *Кривоносов Г.А.* Кавитация и схлопывание пузырька в жидкости в тепловой трубе// ИФЖ. т. 96. № 2. С. 408.
6. *Иудин Д. И., Давыденко С. С., Готлиб В. М., Долгоносков М. С., Зелёный Л. М.* «Физика молнии: новые подходы к моделированию и перспективы спутниковых наблюдений». Архивная копия от 4 мая 2019 на «Wayback Machine» // УФН. 188. 2018. С. 850—864
7. *Хайдаров Г.Г, Хайдаров А.Г. Машек А.Ч., Майоров Е.Е.* Влияние температуры на поверхностное натяжение // Вестн. С.-Петербур. ун-та. Сер. 4. 2012. Вып. 1. С. 24–28.
8. *Маргулис М.А.* Сонолюминесценция. // Усп. физ. наук. 2000. т.170. №3. С. 263-284.
9. *Малюков А.С.* Флюоресценция нано частиц растворенного органического вещества в природной воде// Вестник Московского ун-та. Сер. Физика, астрономия, 2007, т №6, С. 34-38 10.
10. *Бирюков Д.А.* Экспериментальное исследование люминесценции в жидкости: дис. канд. тех. Наук. Москва ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова. 2014, С. 105.
11. *Кравец В.П., Письменный Е.Н.* Интенсивность теплопередачи в зоне испарения миниатюрных тепловых труб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии и оборудования. 2011. № 6. С. 26 15.
12. *Taleyarkhan R.P., Block R.C., Lahey R.T.*// Physics Review Letters, 2006, 96, P. 034301.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

13. *Taleyarkhan R.P., Nigmatulin R.I., Block R.C.* // Physical Review E, 2004, v. 69, P. 1091, March.
14. *Говердовский. А.А., Имшенник В.С., Смирнов В.П.* О перспективах термоядерной энергетики на основе кавитации пузырей // Успехи физических наук, т. 183, №4, с. 645.
15. *Малафеев Н.Т.* О взаимодействии молекул в воде // Вопросы химии и химической технологии. 2011, № 5, с. 161-172
16. Professional Boat Propeller Manufacturers URL: <https://qiclearmarine.com> (дата обращения: 10.08.2024).
17. *Бендус И. И.* Теория и устройство судна: Конспект лекций. В двух частях. Часть 1. 2-е изд., перераб. и доп. Керчь. КГМТУ, 2006. с. 179.
18. *Акимов В.С., Кулешов А. С., Марков В. М., Яковчук А.Ю., Йанхунен Т.Т.* Расчетные исследования впрыскивания и распыливания топлива в двигателе с Z-eneгneine форсункой двигатель Z-eneгi // Вестник МГТУ им. Баумана, сер. «Машиностроение». 2015. № 6. с. 82.
19. *Масимов Э.А.* Состояние и роль воды в биологических системах. Вода в природе. Баку. Лима Няшрийят Полиграфия, 2018. с. 28.
20. Stud Files URL: <https://stud file.net> > preview > page: 46 (дата обращения: 10.08.2024).

References:

1. Zhigin R. E. *Teoriya i ustrojstvo korablya* [Theory and design of the ship] Studme. Org, 2019. (In Russian). (In Russian)
2. Akusticheskaya i gidrodinamicheskaya kavitaciya dlya smeshivaniya [coustic and hydrodynamic cavitation for mixing]. (In Russian). Available at: <https://www.hielscher.com/ru/acoustic-vs-hydrodynamic-cavitation-for-mixing-applications.htm> (In Russian). Available at: (10.08.2024) (In Russian)
3. Moroz N.A. Gidrodinamicheskaya kavitaciya vody` i ee ispol`zovanie v absordcionny`x texnologiyax ochistki promy`shlenny`x gazov [Hydrodynamic cavitation of water and its use in absorption technologies of purification of industrial gases] *Voprosy` ximii i ximicheskoy texnologii*. [Issues of chemistry and chemical technology] 2013. №6. S. 107-109. (In Russian)
4. Krivonosov G.A., Onishhenko I.N. Relaksacionny`e kolebaniya v teplovy`x trubax [Onishchenko I.N. Relaxation oscillations in heat pipes] *Voprosy` atomnoj nauki i texnik. Seriya: Plazmennaya e`lektronika i novy`e metody` uskoreniya*. [ssues of atomic science and technology. Series: Plasma electronics and new acceleration methods.] 2010. № 4. S. 365-368. (In Russian)
5. Krivonosov G.A. Kavitaciya i sxlopy`vanie puzy`r`ka v zhidkosti v teplovoj trube [Cavitation and collapse of a bubble in a liquid in a heat pipe] *IFZh*. [IFZH] t. 96. № 2. S. 408. (In Russian)
6. Iudin D. I., Davy`denko S. S., Gotlib V. M., Dolgonosov M. S., Zelyony`j L. M. «Fizika molnii: novy`e podxody` k modelirovaniyu i perspektivy` sputnikovy`x nablyudenij». Arxivnaya kopiya ot 4 maya 2019 na «Wayback Machine» ["Lightning physics: new approaches to modeling and prospects for satellite observations". Archived copy dated May 4, 2019 on "Wayback Machine"] *UFN* [UFN]. 188. 2018. S. 850—864 (In Russian)
7. Xajdarov G.G, Xajdarov A.G. Mashek A.Ch., Majorov E.E. Vliyanie temperatury` na poverxnostnoe natyazhenie [The influence of temperature on surface tension] *Vestn. S.-Peterb. un-ta*. [Vestn. S.-Peterburg] Ser. 4. 2012. Vy`p. 1. C. 24–28. (In Russian)
8. Margulis M.A. Sonolyuminescenciya. [Sonoluminescence] *Usp. fiz. nauk*. [Usp. phys. sciences] 2000. t.170. №3. S. 263-284. (In Russian)
9. Malyukov A.C. Flyuorescenciya nano chasticz rastvorennogo organicheskogo veshhestva v prirodnoj vode [Fluorescence of nano particles of dissolved organic matter in natural water] *Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. Fizika, astronomiya* [Bulletin of the Moscow University. Ser. Physics, Astronomy] 2007, t №6, S. 34-38 10. (In Russian)

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

10. Biryukov D.A. *E`ksperimental`noe issledovanie lyuminescencii v zhidkosti: dis. kand. tex. Nauk* [Experimental investigation of luminescence in a liquid: dis. cand. tech. Sciences] Moskva FGUP NITI im. A.P. Aleksandrova. 2014, S. 105. (In Russian)
11. Kravec V.P., Pis`menny`j E.N. Intensivnost` teploperedachi v zone ispareniya miniatyurny`x teplovy`x trub [Heat transfer intensity in the evaporation zone of miniature heat pipes] *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovy`x tekhnologij. E`nergoberegayushhie tekhnologii i oborudovaniya*. [Eastern European Journal of Advanced Technologies. Energy-saving technologies and equipment] 2011. № 6. S. 26 15. (In Russian)
12. Taleyarkhan R.P., Block R.C., Lahey R.T. *Physics Review Letters*, 2006, 96, p. 034301. (In English)
13. Taleyarkhan R.P., Nigmatulin R.I., Block R.C. *Physical Review E*, 2004, v. 69, p. 1091, March,. (In English)
14. Goverdovskij. A.A., Imshennik V.S., Smirnov V.P. *O perspektivax termoyadernoj e`nergetiki na osnove kavitacii puzy`rej* [On the prospects of thermonuclear energy based on bubble cavitation] *Uspexi fizicheskix nauk, [Uspekhi fizicheskikh nauk]* t. 183, №4, c. 645. (In Russian)
15. Malafeev N.T. *O vzaimodejstvii molekul v vode* [On the interaction of molecules in water] *Voprosy` ximii i ximicheskoy tekhnologii*. [Questions of chemistry and chemical technology] 2011, № 5, s. 161-172 (In Russian)
16. Professional Boat Propeller Manufacturers Available at: <https://qiclearmarine.com> (accessed 10.08.2024).
17. Bendus I. I. *Teoriya i ustrojstvo sudna: Konspekt lekcij. V dvux chastyax. Chast` 1. 2-e izd., pererab. i dop.* [Theory and structure of the vessel: Lecture notes. In two parts. Part 1. 2nd ed., reprint. and add.] Kerch`. KGMTU, 2006. c. 179. (In Russian)
18. Akimov V.S., Kuleshov A. S., Markov V. M., Yakovchuk A.Yu., Janxunen T.T. *Raschetny`e issledovaniya vpry`skivaniya i raspy`livaniya topliva v dvigatele s Z-enejneine forsunkoj dvigatel` Z-eneji* [Computational studies of fuel injection and atomization in an engine with a Z-enejneine nozzle Z-eneji engine] *Vestnik MGTU im. Baumana, ser. «Mashinostroenie»*. [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University, ser. "Mechanical engineering"] 2015. № 6. s. 82. (In Russian)
19. Masimov E`.A. *Sostoyanie i rol` vody` v biologicheskix sistemax. Voda v prirode*. [The state and role of water in biological systems. Water in nature.] Baku. Lima Nyashriyat Poligrafiya, 2018. s. 28. (In Russian)
20. Stud Files Available at: <https://stud file.net> › preview › page: 46 (accessed 10.08.2024). (In Russian)

Сведения об авторах / Information about authors

Кривонос	канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
Геннадий	Таджикский госуниверситет им. В.И. Ленина, Физико-
Александрович	математический факультет, отделения физика. г. Душанбе (Сталинабад). 296400, Республика Крым, ПГТ Черноморское, ул. Агафонова. д. 11, ООО фирма ГАК, ст. научный сотрудник. 1krivonosov39@gmail.com
Krivonosov	Ph.D. physics and mathematics Sciences, senior researcher Tajik State
Gennady	University named after. V.I. Lenin, Faculty of Physics and Mathematics,
Alexandrovich	Department of Physics. Dushanbe (Stalinabad). 296400, Republic of Crimea, PGT Chernomorskoe, st. Agafonova. 11, GAK LLC, st. Researcher 1krivonosov39@gmail.com

УДК 629.5.035.8

Халявкин А.А., Санжапов А.Р., Матвеев Ю.И., Ениватов В.В., Ивановская А.В.
**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕЙДВУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ ПУТЕМ
ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ГРЕБНОГО ВАЛА**

Аннотация. В работе исследуется дейдвудное устройство гребного вала судового валопровода. Отмечается сложность работы валопровода при действии постоянных и переменных нагрузок. Указаны основные антифрикционные материалы для дейдвудных подшипников. Представлены условия работы гребного вала в зоне контакта с дейдвудным подшипником с учётом облицовочного покрытия. Указывается, что облицовочное покрытие представляет собой цилиндрическую втулку, которая изготавливается из материала бронза или из антикоррозионной стали. Исследуется применение лазерной наплавки в изготовлении облицовочного покрытия гребного вала. Применение лазерной наплавки (сварки) позволит повысить качество ремонтных работ гребного вала и его элементов, которое заключается в получении наплавленного слоя с повышенными прочностными параметрами, гибкостью процесса и меньшему вредному воздействию на окружающую среду и человека.

Ключевые слова: валопровод, гребной вал, облицовочное покрытие, износ, лазерная наплавка, надежность.

Khalyavkin A.A., Sanzhapov A.R., Mateev Y.I., Enivatov V.V., Ivanovskaya A.V.
**IMPROVING THE RELIABILITY OF DEADWOOD BEARINGS BY LASER
SURFACING OF THE PROPELLER SHAFT**

Annotation. The paper investigates the deadwood arrangement of the propeller shaft of the ship's shaft line. The complexity of the work of the shaft pipeline under the action of constant and variable loads is noted. The main antifriction materials for deadwood bearings are indicated. The working conditions of the propeller shaft in the contact zone with the deadwood bearing, taking into account the lining coating, are presented. It is indicated that the cladding coating is a cylindrical sleeve, which is made of bronze material or anti-corrosion steel. The application of laser surfacing in the manufacture of a propeller shaft cladding is being investigated. The use of laser surfacing (welding) will improve the quality of repair work of the propeller shaft and its elements, which consists in obtaining a deposited layer with increased strength parameters, process flexibility and less harmful effects on the environment and humans.

Keywords: shaft line, propeller shaft, cladding, wear, laser surfacing, reliability.

Введение

Валопровод представляет собой устройство энергетической установки судна, которое соединяет главный двигатель с движителем (гребным винтом). Он обеспечивает передачу вращающего момента от двигателя к движителю и упора от движителя через упорный подшипник к корпусу судна. Общая длина валопровода зависит от места расположения гребного винта за кормой судна, машинного помещения, конструкции главного двигателя и передачи.

Как отмечается в работах [8,9] срок эксплуатации судового валопровода зависит от рабочего состояния его дейдвудных подшипников, которые служат опорой гребного вала. Помимо гребного вала, судовой валопровод состоит из промежуточного и упорного валов, расположенных на одной оси. Дейдвудные подшипники, которые расположены в дейдвудной трубе корпуса судна и представляют собой подшипники скольжения, состоящие из металлического корпуса и расположенного внутри него антифрикционного материала в виде цельной втулки и вкладышей. Количество и геометрические размеры дейдвудных подшипников зависят от длины и диаметра гребного вала с учетом облицовочного покрытия. В качестве антифрикционного материала используют капролон, капрон, текстолит, бакаут,

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

баббит, резину и т.д. В настоящее время для речных и морских судов широкое применение нашли именно капролон и резина.

При проектировании валопровода производят проверку нагруженности дейдвудных подшипников по среднему удельному давлению. Среднее удельное давление определяют по величинам опорных реакций на валы от весовой нагрузки, как для неразрезной балки в расчетных схемах, H/m^2 :

$$q = \frac{R}{DL}, \quad ((1))$$

где: R – реакция шарнирной опоры, моделирующая в расчетной схеме дейдвудный подшипник; D - диаметр дейдвудного подшипника; L - длина дейдвудного подшипника

Длина дейдвудных подшипников, лежит в диапазоне, м:

$$L = (1 \dots 4)D \quad ((2))$$

Из-за ограничения допускаемой удельной нагрузки (1) для многих вышеуказанных материалов (не превышает $q=0,3 \text{ МПа}$) длина дейдвудных подшипников получается значительных размеров.

При вращении внутри подшипники скольжения на рабочей поверхности гребного вала используется облицовочное покрытие, которое представляет собой цилиндрическую втулку толщиной s . Как правило, минимальное значение толщины облицовки s гребного вала регламентировано и определяют по следующему выражению [4], мм:

$$s = 0,3d_{гр} + 7,5, \quad (3)$$

Как отмечается в работе [4] толщина облицовки между подшипниками может быть уменьшена до $0,75s$. Толщину облицовки, которая определена по формуле, принимается по ближайшему большему нормализованному размеру дейдвудного подшипника. Диаметр шеек под облицовку или подшипники увеличивают на $5 - 10 \text{ мм}$. При наличии шпоночного паза на цилиндрической части вала его диаметр увеличивают на 5% по сравнению с расчетным.

В качестве облицовки (облицовочного покрытия) гребного вала используют бронзовую тонкостенную цилиндрическую втулку, которые устанавливаются на шейки гребных валов в месте расположения дейдвудных подшипников. Длина бронзовой втулки на больших судах может составлять до 3-х метров. Облицовка может иметь толщину, приблизительно равную $1/20$ диаметра гребного вала [4], которая может быть сплошной или состоять из двух или из трех частей. Она применяется для защиты самого вала и антифрикционного материала от ускоренного износа и коррозионного действия воды в случае применения неметаллических дейдвудных подшипников. В качестве материала облицовок используют бронзу марок Бр010Ц2, Бр08Ц4, Бр05Ц5С5 [4], которые характеризуются высокими антифрикционными качествами, коррозионной стойкостью и имеющие достаточно хорошие литейные и механические свойства. Следует отметить, что для гребных валов малого диаметра (до 150 мм) применяются так же латуни марки ЛМцЖ55-3-1 и ЛЦ40МцЗЖ [4]. Между облицовками поверхность гребного вала защищают покрытием из стеклопластика. Гарантированная защита гребного вала от воздействия речной или морской воды способствует предотвращению снижения предела выносливости. Как отмечается в работах [4,10] именно морская вода понижает вышеуказанный параметр в два раза и приводит к коррозионно-усталостным разрушениям.

Помимо бронзы и латуни для изготовления облицовочной втулки используют также сталь аустенитного класса, которая особенно хорошо работает в паре с антифрикционным материалом дейдвудного подшипника из резины [4,5,10]. Так на рисунке 1 представлена облицовочное покрытие гребного вала диаметром свыше $d_{gp}=500 \text{ мм}$ речного судна из стали 12Х18Н10Т, который опирается на вкладыши дейдвудного подшипника из резины. Длина кормового дейдвудного подшипника составляет 1500 мм . Помимо прямого контакта с

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

речной или морской водой сама резина вследствие присутствия в ней серы оказывает коррозирующее действие на гребной вал в зоне контакта.



Рисунок 1 – Общий вид облицовочной втулки гребного вала ледокола

Дейдвудные подшипники с антифрикционным материалом из резины изготавливаются двух видов:

1) цельно-прессовые для гребных валов диаметров до 240 мм на основании ГОСТ 7199-77 «Подшипники резино-металлические судовые» [1].

2) набор из резинометаллических планок для гребных валов диаметром более 250 мм на основании ОСТ 5.5154-74 «Подшипники скольжения и сальники гребных валов» [6].

Дейдвудные подшипники из резины не боятся истирающего действия взвешенных в воде твердых частиц (песок, ил). Если эти частицы попадают между гребным валом или резиной, то гребной вал вдавливают их в эластичную резину, а затем перемещает в направлении своего вращения до ближайшей смазочной канавки, откуда они вымываются водой. Они бесшумны в работе, поглощение вибраций вала, малая чувствительность к неточностям установки и ударным нагрузкам [4,8-10].

Гребной вал и облицовочная втулка имеют хорошую отполированную поверхность, что способствует длительной работе всего подшипникового узла. Консольное расположение гребного винта и действие постоянных и динамических нагрузок, и условие эксплуатации приводят к образованию внешних и внутренних дефектов на рабочей поверхности гребного вала и его облицовочной втулки. Облицовки большой длины изготавливают из отдельных частей. Их насаживают на вал с нагревом и затем сваривают между собой [2].

Поверхностные повреждения, образующиеся в результате фреттинга [5], могут иметь различный вид в зависимости от материала облицовки, величины натяга в соединении, качества пригонки соприкасающихся поверхностей. Фреттинг-коррозия проявляется в виде язвенных пятен, каверн, окисленных порошкообразных продуктов износа, могут образовываться трещины из-за наличия концентрации напряжений [5]. При фреттинге могут наблюдаться также процессы локального сваривания, схватывания и последующего разрыва контактирующих материалов облицовки и вала, микроперемещения контактируемых поверхностей деталей [5].

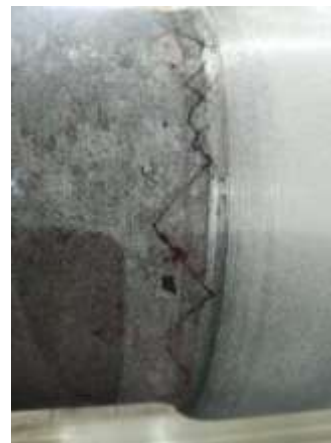
Следует отметить, провести анализ и диагностику в процессе ремонта судна на рабочее состояние и наличие дефектов на поверхности гребного вала в зоне установки облицовочного покрытия без снятия самой облицовки не предоставляется возможным.

Как отмечается в работе [4] наплавку на поверхность вала защитного слоя из коррозионностойкого материала вместо напрессованных облицовочных втулок применяют реже, поскольку процесс наплавки создает в поверхностном слое остаточные растягивающие напряжения, снижающие предел выносливости гребного вала. То есть сопротивляемость напряженно-деформированному состоянию и возникновению поперечных, продольных и поперечных колебаний у гребного вала уменьшается. На рисунке 2 представлены трещины на поверхностях гребных валов коррозионностойкой стали и углеродистой стали глубиной более 10 мм.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)



а) продольная трещина в районе шейки гребного вала



б) поперечная трещина на конце шейки гребного вала

Рисунок 2 – Общий вид трещин на поверхности гребного вала

Безусловно, выбор способа наплавки (сварки) при ремонте гребного вала и изготовлении влияет на его рабочее состояние, так как каждый способ характеризуется своими параметрами, режимами наплавки и их численными значениями. Полученный наплавленный слой не должен содержать дефектов (пор, раковин, трещин и пр.) и иметь хорошую прочность сцепления наплавленного слоя с основой. Одним из способов наплавки на поверхности гребного вала является: ручная дуговая сварка покрытыми электродами, автоматическая сварка в среде углекислого газа, автоматическая сварка под слоем флюса.

Результаты исследования и их обсуждение.

В данной работе предлагается использовать лазерную наплавку при ремонте шейки гребного вала (рис. 2) или облицовочной втулки (рис. 1). Луч лазера высокой мощности фокусируется на поверхности создавая ванну расплава. В эту область подается металлический порошок или проволока, которые расплавляясь, создают новый слой. Этот сложный обмен между лазером и подложкой создает металлургическое соединение металлов. Лазерная сварка (наплавка) имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими способами сварки, а это:

- минимальные тепловые вложения в наплавляемую деталь;
- сохранение геометрических размеров наплавленной детали в заданных параметрах;
- минимальное значение коэффициента перемешивания наплавляемого металла с основой;
- возможность наплавки поверхностных слоев минимальной толщиной;
- возможность формирования поверхностного слоя с повышенной износостойкостью, жаропрочностью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью;
- минимальное значение припусков на последующую механическую обработку наплавляемого слоя;
- в большинстве случаев термическая обработка полученного наплавленного слоя не требуется.

Заключение.

Применение лазерной наплавки (сварки) позволит повысить качество ремонтных работ гребного вала и его элементов, которое заключается в получении наплавленного слоя с повышенными прочностными параметрами, гибкостью процесса и меньшему вредному воздействию на окружающую среду и человека. Предотвращает напряженное состояние в зоне проведения наплавочных работ и возникновения дефектов в виде трещин. Использование лазерной сварки повышает ремонтпригодность гребного вала и его элементов.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Список использованной литературы:

1. ГОСТ 7199-77. Подшипники резинометаллические судовые. Технические условия. – Введ. с 01.01.78. М.: Изд-во стандартов. 1977. 15 с.
2. ГОСТ 24725-81. Валы судовых валопроводов. Общие технические требования: описание стандарта и тендеры. Введ. с 01.07.1981. М.: Изд-во стандартов, 1981. 4 с.
3. Давыдов А.П. Резиновые подшипники в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1976. 200 с.
4. Дорошенко П.А., Рохлин А.Г., Булатов В.П. и др. Технология производства судовых энергетических установок: Учебник. Л.: Судостроение, 1988. 440 с.
5. Матвеев Ю.А., Орехво В.А., Храмов М.Ю., Орехво А.В. Особенности напрессовки облицовок гребных валов // Вестн. Волж. гос. акад. вод. трансп. 2019. № (60). С. 232-237.
6. ОСТ 5.5154-74. Подшипники скольжения и сальники гребных валов. Типы, основные размеры и технические требования. Введ. 1989-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1974. 43 с.
7. ОСТ 5.4097-85. Валы судовых валопроводов. Общие технические условия Текст. Введ. 1987- 01- 01. М.: Изд-во стандартов, 1985. 106 с.
8. Халявкин А.А., Лошадкин Д.В., Старкова М.В., Безруков Н.П., Яковлев Ю.Ю. Разработка дейдвудного подшипника с эллиптическими вкладышами // Морской вестник. 2024. № 1 (89). С. 38- 40.
9. Халявкин А.А., Шамаев А.В., Медведев И.Н. Применение прессованной древесины березы для изготовления вкладышей дейдвудных подшипников судов // Морской вестник. 2024. № 2 (90). С. 70-71.
10. Яценко В.С. Эксплуатация судовых валопроводов. М.: Транспорт, 1968. 171 с.

References:

1. *GOST 7199-77. Podshipniki rezinometallicheskie sudovy`e. Texnicheskie usloviya. Vved. s 01.01.78.* [GOST 7199-77. Rubber-metal marine bearings. Technical conditions. – Introduced on 01.01.78.] М.: Izd-vo standartov. 1977. 15 s. (In Russian)
2. *GOST 24725-81. Valy` sudovy`x valoprovodov. Obshhie texnicheskie trebovaniya: opisaniye standartov i tendery`. Vved. s 01.07.1981.* [GOST 24725-81. Shafts of ship's shaft lines. General technical requirements: description of the standard and tenders. Introduced from 07/01/1981.] М.: Izd-vo standartov, 1981. 4 s. (In Russian)
3. *Davy`dov A.P. Rezinovy`e podshipniki v mashinostroenii.* [Rubber bearings in mechanical engineering] L.: Mashinostroenie, 1976. 200 s. (In Russian)
4. *Doroshenko P.A., Roxlin A.G., Bulatov V.P. i dr. Tekhnologiya proizvodstva sudovy`x e`nergeticheskix ustanovok: Uchebnik.* [Production technology of marine power plants: Textbook.] L.: Sudostroenie, 1988. 440 s. (In Russian)
5. *Matveev Yu.A., Orexvo V.A., Xramov M.Yu., Orexvo A.V. Osobennosti nappressovki obliczovok grebny`x valov* [Features of pressing of propeller shaft linings] *Vestn. Volzh. gos. akad. vod. transp.* [Vestn. Volga State Academy of Waters. transp.] 2019. № (60). S. 232-237. (In Russian)
6. *OST 5.5154-74. Podshipniki skol`zheniya i sal`niki grebny`x valov. Tipy`, osnovny`e razmery` i texnicheskie trebovaniya. Vved. 1989-01-01.* [Plain bearings and propeller shaft seals. Types, basic dimensions and technical requirements. Introduction 1989-01-01.] М.: Izd-vo standartov, 1974. 43 s. (In Russian)
7. *OST 5.4097-85. Valy` sudovy`x valoprovodov. Obshhie texnicheski usloviya Tekst. Vved. 1987- 01- 01.* [OST 5.4097-85. Shafts of ship's shaft lines. General technical conditions Text. Introduction. 1987- 01- 01] М.: Izd-vo standartov, 1985. 106 s. (In Russian)
8. *Xalyavkin A.A., Loshadkin D.V., Starkova M.V., Bezrukov N.P., Yakovlev Yu.Yu. Razrabotka dejdvudnogo podshipnika s e`llipticheskimi vklady`shami* [velopment of a

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

deadwood bearing with elliptical inserts] *Morskoy vestnik*. [Marine Bulletin] 2024. № 1 (89). S. 38- 40. (In Russian)

9. Xalyavkin A.A., Shamaev A.V., Medvedev I.N. Primenenie pressovannoj drevesiny` berezy` dlya izgotovleniya vklady`shej dejdvudny`x podshipnikov sudov [The use of pressed birch wood for the manufacture of inserts for deadwood bearings of ships] *Morskoy vestnik*. [Marine Bulletin] 2024. № 2 (90). S. 70-71. (In Russian)
10. Yacenko V.S. *E`kspluataciya sudovy`x valoprovodov*. [Operation of ship shaft pipelines.] M.: Transport, 1968. 171 s. (In Russian)

Сведения об авторах / Information about authors

Халявкин Алексей Александрович	кандидат технических наук, доцент кафедры «Судомеханические дисциплины» Каспийского института морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина - филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 414000, г. Астрахань, ул. Никольская, д.6; sopromat112@mail.ru .
Khalyavkin Alexey Alexandrovich	candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Ship-mechanical disciplines» Caspian Institute of Sea and River Transport named after General Admiral F.M. Apraksina - the affiliation of Volga State University of Water Transport, 414000, Astrakhan, Nikolskaya St., 6; sopromat112@mail.ru .
Санжапов Ахмед Раилевич	ассистент кафедры «Судомеханические дисциплины» Каспийского института морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина - филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 414000, г. Астрахань, ул. Никольская, д.6; sopromat112@mail.ru .
Sanzharov Akhmed Railevich	candidate of the Department «Ship-mechanical disciplines» Caspian Institute of Sea and River Transport named after General Admiral F.M. Apraksina - the affiliation of Volga State University of Water Transport, 414000, Astrakhan, Nikolskaya St., 6; sopromat112@mail.ru .
Матеев Юрий Иванович	Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация судовых энергетических установок» ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603005, Нижегородская область, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5, matveeveseu@mail.ru .
Mateev Yuri Ivanovich	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of “Operation of Ship Power Plants” Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volga State University of Water Transport”, 603005, Nizhny Novgorod Region, Nizhny Novgorod, st. Nesterova, 5, matveeveseu@mail .
Ениватов Валерий Владимирович	канд. техн. наук, заведующий кафедрой судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Enivatov
Valery
Vladimirovich

298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
valeriy.enivatov@gmail.com
Ph. D (Engin.) Head of the Department of marine power plants
Kerch State Maritime Technological University
28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
valeriy.enivatov@gmail.com

**Ивановская
Александра
Витальевна**

канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок
Керченский государственный морской технологический университет
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
invkerh@yandex.ru
Ph. D (Engin.) Associate Professor at the Department of marine power plants
Kerch State Maritime Technological University
28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
invkerh@yandex.ru

Ivanovskaya
Aleksandra
Vital'evna

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 656.6

Ивановский Н.В.

НОВЫЙ СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАНЕВРИРОВАНИЯ МОРСКОГО СУДНА

Аннотация. Определение маневренных характеристик морского судна и траектории его движения на плоскости требует решения системы нелинейных дифференциальных уравнений. В настоящее время существует множество математических моделей динамики движения судна, представляющих собой систему нелинейных дифференциальных. Принятые допущения, структура и состав моделей судов определяют адекватность параметров реального процесса и его формализованного образа. Однако на динамику движения влияет множество факторов, оценить и корректно учесть которые достаточно сложно, что приводит к неоднозначности подхода при формализации динамики движения морского судна. Это, в свою очередь, приводит к появлению значительных погрешностей, которые создают предпосылки к возникновению аварийных происшествий. Особенно влияние погрешностей проявляется при создании навигационных тренажеров, когда корректность используемой модели влияет на уровень формируемого навыка. Задача построения наиболее адекватной модели судна до сих пор полностью не решена, поэтому проблема создания корректных математических моделей является актуальной задачей для повышения безопасности судоходства. Подход к построению математической модели судна, полученный в результате исследований, позволяет корректно описывать нелинейные свойства процесса маневрирования, а также производить идентификацию параметров метаматематической модели судна. Результаты исследования могут быть использованы при разработке навигационных систем управления маневрированием, а также навигационных тренажеров для судоводителей.

Ключевые слова: математическая модель судна, судовые автоматизированные системы, математическая модель плоскопараллельного движения судна, нелинейные модели морского судна, линеаризация математической модели судна.

Ivanovskii N.V.

A NEW WAY TO BUILD A MATHEMATICAL MODEL MANEUVERING OF A MARINE VESSEL

Abstract. Determining the maneuverability characteristics and trajectory of a ship on a plane requires solving a system of equations. Currently, there are a significant number of mathematical models representing systems of nonlinear differential equations of motion. The accepted assumptions, the structure and composition of models, determine the adequacy of the parameters of the real process and its formalized image. However, the dynamics of movement is influenced by a large number of factors, the weight of which is quite difficult to estimate and correctly take into account, which leads to an ambiguous approach to formalizing the dynamics of movement of a marine vessel. This leads to the appearance of significant errors that create prerequisites for the occurrence of accidents. The influence of errors is especially evident when creating navigation simulators, when the correctness of the model used affects the level of the formed skill. The problem of constructing the most adequate model of a ship has not yet been completely solved, so the problem of creating correct mathematical models is a very urgent task for improving the safety of navigation. The approach to the construction of a mathematical model of a ship obtained as a result of the research makes it possible to correctly

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

describe the nonlinear properties of the maneuvering process, as well as to identify the parameters of the differential equation of its motion. The results of the study can be used in the development of navigation maneuvering control devices and simulators for navigators.

Keywords: mathematical model of the ship, ship automated systems, mathematical model of lane-parallel movement of the ship, nonlinear models of the sea vessel, linearization of the mathematical model of the ship.

Введение. Результаты познания обладают свойством системности, которое в технических науках реализуется построением содержательных и формализованных моделей, адекватно описывающих поведение материальных объектов.

Первым этапом на пути построения системы управления процессом маневрирования является создание соответствующей модели.

Попытка уменьшить влияние человека на процесс управления за счёт автоматизации выполнения отдельных функций не исключает его из сферы управления, а приводит к ещё более тесной связи с устройствами и системами. Решающее влияние на его функции в процессе управления оказало отделение человека — оператора (ЧО) от объектов управления, и он стал взаимодействовать с информационными моделями.

Определение маневренных характеристик, траектории движения судна на плоскости требует решения системы уравнений. В настоящее время существует значительное количество математических моделей, представляющих систему нелинейных дифференциальных уравнений движения.

Принятые допущения, структура и состав моделей определяют адекватность параметров реального процесса и его формализованного образа. Однако на динамику движения влияет большое количество факторов, значение которых оценить и корректно учесть достаточно сложно, что приводит к неоднозначному подходу при формализации динамики движения морского судна. Это приводит к появлению значительных погрешностей, которые создают предпосылки к возникновению аварийных происшествий. Особенно влияние погрешностей проявляется при создании навигационных тренажёров, когда корректность используемой модели влияет на уровень формируемого навыка обучающегося.

Задача построения наиболее адекватной модели судна до сих пор полностью не решена, поэтому проблема создания корректных математических моделей и методов их описания является весьма актуальной задачей для повышения безопасности судоходства.

В настоящее время существует множество математических моделей, описывающих движение судна. Эти модели представлены в различных источниках [1-9], таких как труды Войткунского и других авторов, опубликованные в 1973 году, работы Гофмана, Павленко и Соболева, вышедшие в 1988, 1979 и 1976 годах соответственно, а также в справочнике, опубликованном в 1985 году, и работах Тумашика, Федяевского и Соболева в 1978 и 1963 годах. Все эти модели имеют общие характеристики:

- 1) Непрерывные системы с конечным числом параметров состояния.

Наиболее подходящим способом представления такой математической модели является система обыкновенных дифференциальных уравнений.

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = F \left(t, C, \frac{dS}{dt}, S(t), U(t), L(t), E(t) \right);$$

где $S(t)$ – совокупность переменных параметров, описывающих состояние системы в момент времени t . Если рассматривать плоскопараллельное движение судна, можно ограничиться тремя параметрами – координатами x_0 и y_0 и курсовым углом q ; $U(t)$ – управляющие воздействия на систему в разные моменты времени: угол перекладки руля $\delta_R(t)$, частота вращения $n_m(t)$ и шаговое отношение $H/D(t)$ гребного винта, положение регулятора подруливающего устройства $N_{ПВотн}(t)$, который задает его относительную мощность в

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

процентах от максимально возможной; $L(t)$ – функция нагрузки на систему, в данном случае распределение всех грузов на судне; $E(t)$ – функция внешних возмущающих воздействий на систему: глубины во всех точках акватории, скорости и направления ветра и течения, амплитудный и фазовый спектр волнения, а также спектр направлений распространения волн по всем частотам для всех точек акватории во все моменты времени.

2) различают математические модели двух видов:

– Эмпирические модели движения судна. Эти модели обычно включают фиксированные значения коэффициентов, которые были получены путём сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными. Однако такие математические модели не подходят для решения ряда задач, таких как проектирование нового типа судна. Их адекватность во многом зависит от количества и качества натуральных экспериментов, проведённых именно с этим конкретным судном. В данной работе такие модели не рассматриваются;

– Полуэмпирические математические модели, предназначенные для некоторых классов судов, строятся на основе значительно более глубокой систематизации экспериментальных данных по целому ряду судов. Вопросам построения таких математических моделей посвящены труды ряда исследователей, таких как Басин, Мелкозерова, Першиц, Соболев, Гофман и другие. Большинство подобных публикаций относятся к 1950–1970-м годам. Такие модели позволяют определить не только то, как будет вести себя данное судно в конкретных условиях плавания, но и то, как очевидные и легко измеримые параметры этого судна влияют на его поведение. Основным отличительным элементом каждой из существующих математических моделей данного типа является способ определения коэффициентов дифференциальных уравнений, отражающих гидродинамические силы судна, в зависимости от геометрических параметров корпуса судна;

3) Построение моделей с помощью уменьшенных физических копий судов. Вместо дорогостоящих натуральных экспериментов с различными типами судов, они использовали модельные эксперименты с физическими моделями, представляющими собой уменьшенные копии корпусов этих судов. Эти эксперименты проводились в гидролотке, опытовом бассейне, ротативной установке или аэродинамической трубе (более подробно см. Гофман, 1988). Таким образом, мы имеем дело с физическим моделированием реального объекта с использованием макетов, и только на основе этого физического моделирования осуществляется математическое моделирование. При этом эффект масштаба может стать дополнительным источником погрешностей модели.

Отдельно стоит выделить модель, разработанную японскими инженерами. В этой модели используется полиномиальная аппроксимация боковых сил, воздействующих на корпус судна при циркуляции, более высокой степени, что отличает её от других моделей. Благодаря этому она способна более точно отражать ситуации, когда вращательное движение судна становится соизмеримым с поступательным.

Также часто применяется модель Номото. Она отличается небольшим количеством параметров для идентификации, что обусловлено рядом упрощений. Поэтому её вариации часто используются в системах автоматического управления движением судна.

Среди существующих исследований хочется выделить работу профессора Мальцева А.С. [10], в которой он предложил новый подход к созданию модели морского судна. Этот подход позволяет отказаться от необходимости расчета присоединенных масс воды, однако оценка других физических факторов, влияющих на параметры движения, остаётся неизменной.

Таким образом, традиционный подход к созданию модели судна подразумевает либо значительное упрощение (линеаризацию), либо необходимость проведения обширных вычислений, основанных преимущественно на эмпирических данных.

Однако с развитием вычислительной техники и прикладной математики появилась возможность отойти от упрощений и сохранить возможность описания нелинейных свойств

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

судна. Однако при этом всё ещё сохраняется необходимость в идентификации большого количества параметров модели.

Это требует преобразования модели к универсальной форме, разрешённой относительно производных, с безразмерными коэффициентами и переменными, а также перегруппировки слагаемых и выделения управляющих функций. Поэтому исследования направленные на поиск решения наиболее оптимального подхода к формализации процесса движения морского судна являются весьма актуальными.

Целью настоящей статьи является разработка метода построения формализованных моделей процесса маневрирования морского судна, без линеаризации и упрощений и обеспечения идентификации ее параметров для конкретного судна.

Материалы и методы исследования. В качестве исходной выбрана математическая модель управления судном на тихой, глубокой воде вида [2]

$$m_{11} \frac{dv_x}{dt} = m_{22} v_y \omega - \left(\frac{C_{x3} + C_{x0}}{2} v^2 - \frac{C_{x3} - C_{x0}}{2} v v_x + b_1 v_y^2 + 2b_2 \frac{v_x v_y^4}{v^3} \right) \frac{\rho A_L}{2} - C_{xR}(\alpha) \left(\frac{\rho v_2}{2} A_R + cT \right) + T \quad (1)$$

$$m_{22} \frac{dv_y}{dt} = -m_{11} v_x \omega - \left(2C_{y\beta} \frac{v_x^2 v_y}{v} + c_2 |v_y| v_y - 16c_3 \frac{v_x^4 v_y^3 |v_y|}{v^6} \right) \frac{\rho A_L}{2} - C_{yR} \left(\frac{\rho v_2}{2} A_R + cT \right) \sin \alpha + Y_p \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = - \left[2m_1 v_x v_y + m_2 v v_y + m_3 \frac{v_x^3 v_y^3}{v^4} - 16m_4 \frac{v_x^4 |v_y^3| v_y}{v^6} + C_{M0} L^2 |\omega| \omega + \frac{C_{M\omega}}{\pi} (v^2 + L^2 \omega^2) \sin \pi \Omega \right] \frac{\rho A_L L}{2} + C_{yR}^\alpha l_R \left(\frac{\rho v_2}{2} A_R + cT \right) \sin \alpha + M_p \quad (3)$$

где для лаконичности символами m_{11} , m_{22} , J обозначены масса судна и момент его инерции с соответствующими присоединенными массами воды.

Традиционно на этапе приложений математической модели ее упрощают путем линеаризации, исключения отдельных слагаемых для различных режимов движения и т.д. Обычно это делается для получения аналитического решения или для идентификации ее параметров. В данной работе предполагается численное интегрирование математической модели, поэтому ставились следующие задачи:

- 1) сохранить все детали модели, не прибегая к упрощающим приближениям, чтобы она имела большую степень достоверности;
- 2) преобразовать модель к наиболее универсальной форме, разрешенной относительно производных, с безразмерными коэффициентами и переменными;
- 3) перегруппировать слагаемые, путем приведения подобных слагаемых и выделения управляющих функций: угла перекладки руля $\alpha(t)$, $P_e(t)$ - силы упора винта, которые в общем случае являются функциями времени.

После таких преобразований математическая модель (1-3) принимает вид

$$\frac{d\bar{v}_x}{dt} = c_{11} \bar{v}_y \bar{\omega} + c_{12} \bar{v} \bar{v}_x + c_{13} \bar{v}_y^2 + c_{14} \frac{\bar{v}_x \bar{v}_y^4}{\bar{v}^3} + c_{15}(\alpha) \bar{v}^2 + c_{16}(\alpha) \bar{T} \quad (4)$$

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

$$\frac{d\bar{v}_y}{dt} = c_{21}\bar{v}_x\bar{\omega} + c_{22}\frac{\bar{v}_x^2\bar{v}_y}{\bar{v}} + c_{23}|\bar{v}_y|\bar{v}_y + c_{24}\frac{\bar{v}_x^4\bar{v}_y^3|\bar{v}_y|}{\bar{v}^6} + c_{25}(\alpha)\bar{v}^2 + c_{26}(\alpha)\bar{T} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\omega}}{dt} = & c_{31}\bar{v}_x\bar{v}_y + c_{32}\bar{v}_y\bar{v} + c_{33}\frac{\bar{v}_x^3\bar{v}_y^3}{\bar{v}^4} + c_{34}\frac{\bar{v}_x^4\bar{v}_y^3|\bar{v}_y|}{\bar{v}^6} + c_{35}|\bar{\omega}|\bar{\omega} + c_{36}(\alpha)\bar{v}^2 + \\ & + c_{37}(\alpha)\bar{\omega}^2 + c_{38}(\alpha)\bar{T} + c_{39} \end{aligned}, \quad (6)$$

где черта над символами обозначает их приведение к безразмерной форме. Для скоростей, времени и силы упора винта это сделано следующим образом

$$\bar{v}_x = \frac{v_x}{v_0}, \quad \bar{v}_y = \frac{v_y}{v_0}, \quad \bar{v} = \frac{v}{v_0}, \quad \bar{\omega} = \frac{\omega L}{v_0}, \quad \bar{P}_e = \frac{P_e}{P_0}. \quad (7)$$

Один из параметров скорость v_0 или упор P_0 может быть выбран произвольно, а второй определяется из их функциональной зависимости этих параметров для какого-нибудь простого типа движения. В этом случае исключается произвол в выборе этих параметров, а числовые значения нормированных величин приобретут более отчетливый смысл. Наиболее естественным для связи этих параметров, кажется, выбор режима прямолинейного движения, для которого уравнение (1) принимает вид

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{\rho A_L C_{x0}}{2m_{11}}v^2 + \frac{P_e}{m_{11}}. \quad (8)$$

Его решение дает для максимальной скорости значение

$$v_0 = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho A_L C_{x0}}}. \quad (9)$$

Именно это соотношение удобно использовать для связи v_0 и P_0 .

Связь коэффициентов c_{ij} системы уравнений (4-6) с параметрами уравнений (1-3) будет более лаконичной при введении обозначения

$$\rho A_L L = m.$$

Необходимо также воспользоваться формулой Федяевского для коэффициента сопротивления руля

$$C_{xR}(\alpha) = C_{xR0} + K_D \sin^2 \alpha + 2 \sin^3 \alpha. \quad (10)$$

Тогда для коэффициентов уравнения (4) получаем соотношения

$$\begin{aligned} c_{11} = \frac{m_{22}}{m_{11}}, \quad c_{12} = \frac{m_0(C_{x3} - C_{x0})}{4m_{11}}, \quad c_{13} = -\frac{m_0 b_1}{2m_{11}}, \quad c_{14} = -\frac{m_0 b_2}{m_{11}}, \\ c_{15}(\alpha) = -\left(\frac{(C_{x3} + C_{x0})A_L}{2A_R} + C_{x0} + K_D \sin^2 \alpha + 2 \sin^3 \alpha\right) \frac{m_0}{2m_{11}}, \\ c_{16}(\alpha) = \left(1 - cC_{x0} - cK_D \sin^2 \alpha - 2c \sin^3 \alpha\right) \frac{LP_0}{m_{11}v_0^2} \sin^3 \alpha \end{aligned} \quad (11)$$

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

Аналогично для коэффициентов уравнения (5)

$$c_{21} = -\frac{m_{11}}{m_{22}}, c_{22} = -\frac{m_0 C_{y\beta}^\beta}{m_{22}}, c_{23} = -\frac{m_0 c_2}{2m_{22}}, c_{24} = -\frac{8m_0 c_3}{m_{22}},$$

$$c_{25} = -\frac{m_0 C_{yR}^\alpha}{2m_{22}} \sin \alpha, c_{26} = -\frac{c C_{yR}^\alpha L P_0}{m_{22} v_0^2} \sin \alpha, c_{27} = \frac{Y_p L}{m_{22} v_0^2}. \quad (12)$$

Последнее уравнение модели (6) имеет коэффициенты

$$c_{31} = -\frac{m_0 m_1 L^2}{J}, c_{32} = -\frac{m_0 m_2 L^2}{2J}, c_{33} = -\frac{m_0 m_3 L^2}{2J}, c_{34} = \frac{8m_0 m_4 L^2}{J},$$

$$c_{35} = -\frac{m_0 C_{M\omega} L^2}{2\pi J}, c_{36} = -\left(C_{M\omega} \sin \pi \Omega - \frac{\pi C_{yR}^\alpha l_R A_R}{L A_L} \sin \alpha\right) \frac{m_0 L^2}{2\pi J}, \quad (13)$$

$$c_{37} = -\frac{C_{M\omega} m_0 L^2}{2\pi J} \sin \pi \Omega, c_{38} = \frac{c C_{yR}^\alpha l_R T_0 L^2}{J v_0^2} \sin \alpha, c_{39} = \frac{M_p L^2}{J v_0^2}$$

Результаты исследования и их обсуждение. Программа численного решения математической модели имеет следующую структуру

- 1) задание числовых значений основных параметров модели;
- 2) задание управляющих величин как функций времени;
- 3) задание начальных условий для переменных модели;
- 4) блок решения системы дифференциальных уравнений;
- 5) вывод решения.

Разработанная модель, а точнее, «переформатирование» базовой модели (1-3), имеет 21 параметр, что существенно меньше, чем в исходной модели. Процесс идентификации этих параметров должен основываться только с использованием натуральных испытаний.

Внешний вид модели может быть представлен в виде

$$\frac{d\bar{v}_x}{dt} = f(c_{11}, \dots, c_{16}, \bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{\omega}) \quad (14)$$

$$\frac{d\bar{v}_y}{dt} = f(c_{21}, \dots, c_{26}, \bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{\omega}) \quad (15)$$

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = f(c_{31}, \dots, c_{39}, \bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{\omega}) \quad (16)$$

Данное представление очень удобно для проведения идентификации матрицы неизвестных констант C .

На рисунках 1-4 приведены тестовые кривые, полученные с помощью разработанной модели.

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

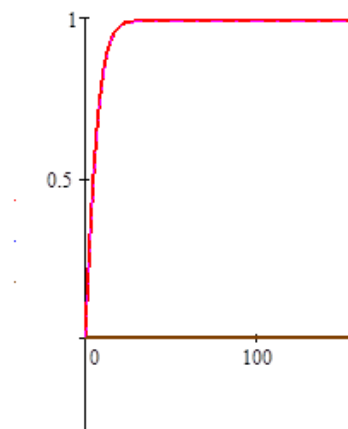


Рисунок 1 – Разгон при нулевом угле перекладки и нулевой начальной скорости, упор P_0 : зависимость от времени скорости v_x

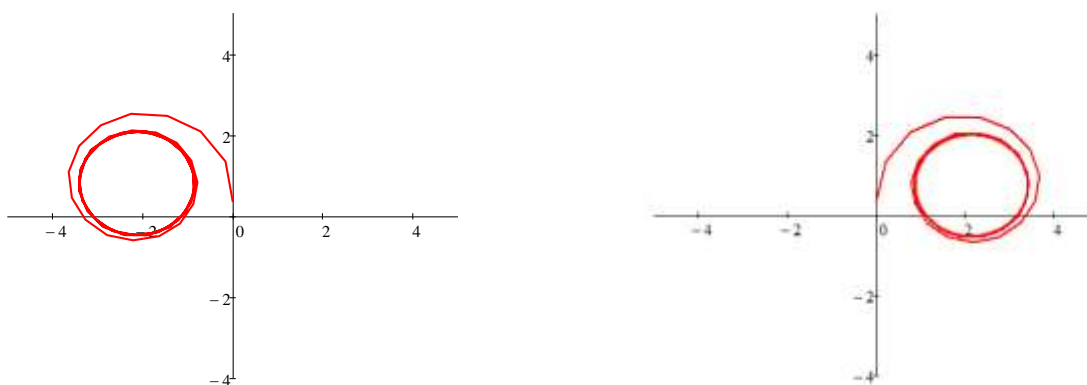


Рисунок 2 – Левая и правая циркуляции (угол перекладки $\pm 30^\circ$, начальная скорость $0,7v_0$, упор $0,5P_0$).

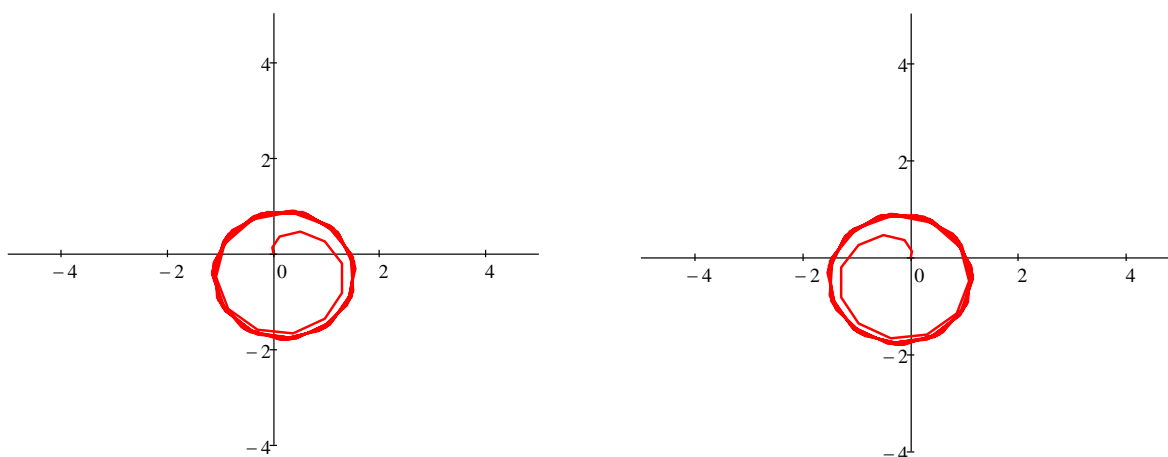


Рисунок 3 – Левая и правая циркуляции (угол перекладки $\pm 30^\circ$, начальная скорость = 0, упор P_0)

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

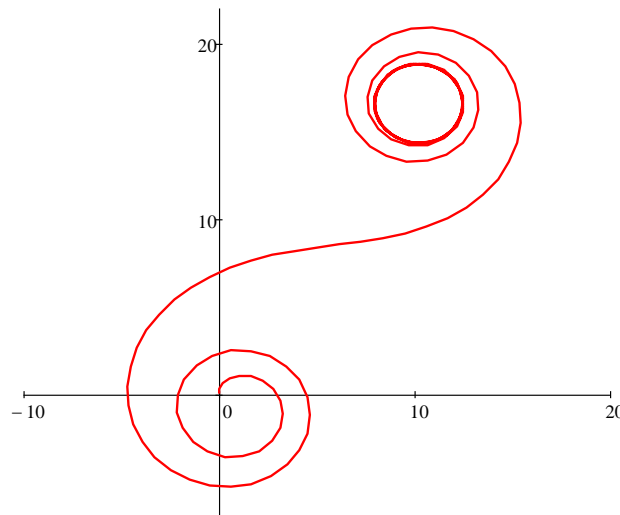


Рисунок 4 – Спиральная траектория для определения поворотливости судна и устойчивости на курсе

Выводы. Описанный выше подход к созданию математической модели судна предоставляет возможность корректно интерпретировать нелинейные характеристики процесса маневрирования, а также осуществлять идентификацию параметров дифференциального уравнения, описывающего движение морского судна. Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть применены при разработке навигационных систем управления судном и навигационных тренажеров для судоводителей.

Список использованной литературы:

1. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов: Монография. М.: Транспорт, 1977. 305 с.
2. Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля: Справочник / под. ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1973. 534 с.
3. Васильев А.В. Управляемость судов: Монография. Л.: Судостроение, 1989. 328 с.
4. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. Л.: Судостроение, 1988. 360 с.
5. Мальцев А.С. Моделирование процесса маневрирования судна векторными дифференциальными уравнениями // Судовождение. Сб. научн. трудов ОНМА. Вып. 9. 2005. С. 62-68.
6. Мастушкин Ю.М. Управляемость промысловых судов: Монография. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 232 с.
7. Павленко В.Г. Маневренные качества речных судов: Монография. М.: Транспорт, 1979. 229 с.
8. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения: Учебник для вузов. – Л.: Судостроение, 1976. 438 с.
9. Тумашик А.П. Расчет гидродинамических характеристик судна при маневрировании // Судостроение. 1978. Вып. 5. С. 13-15.
10. Федяевский К.К., Соболев Г.В. Управляемость корабля: Учебное пособие. Л.: Судпромгиз, 1963. 376 с.

References:

1. Basin A.M. Hodkost` i upravlyaemost` sudov [Seaworthiness and controllability of vessels]. Moscow, Transport, 1977, 305 p. (In Russian).
2. Pershicz R.Ya., Titov I.A., Ya.I. Vojtkunskii Ya.I.(ed.) Spravochnik po teorii korablya [Handbook of Ship Theory]. St. Petersburg, Sudostroenie, 1973, 534 p. (In Russian).

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

3. Vasil'ev A.V. Upravlyaemost' sudov [Ship handling]. St. Petersburg, Sudostroenie, 1989, 328 p. (In Russian).
4. Gofman A.D. Dvizhitel'no-rulevoj kompleks i manevrirovaniye sudna [Propulsion and steering complex and maneuvering of the vessel]. St. Petersburg, Sudostroenie, 1988, 360 p. (In Russian).
5. Mal'cev A.S. Modelirovaniye processa manevrirovaniya sudna vektornymi differentsial'nymi uravneniyami [Modeling of the ship maneuvering process using vector differential equations]. Sudovozhdeniye. Sb. nauchn. trudov ONMA [Collection of scientific works of ONMA], no. 9, 2005, pp. 62-68. (In Russian).
6. Mastushkin Yu.M. Upravlyaemost' promyslovykh sudov [Controllability of fishing vessels]. Moscow, Legkaya i pishhevaya promyshlennost', 1981, 232 p. (In Russian).
7. Pavlenko V.G. Manevrennyye kachestva rechnykh sudov [Maneuverability of river vessels]. Moscow, Transport, 1979, 229 p. (In Russian).
8. Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizatsiya sudovozhdeniya [Ship handling and navigation automation]. St. Petersburg, Sudostroenie, 1976, 438 p. (In Russian).
9. Tumashik A.P. Raschet gidrodinamicheskikh kharakteristik sudna pri manevrirovanii [Calculation of the hydrodynamic characteristics of the vessel during maneuvering]. Sudostroenie [Shipbuilding], 1978, no. 5, pp. 13-15. (In Russian).
10. Fedyayevskiy K.K., Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya: Uchebnoye posobie [Ship handling]. St. Petersburg, Sudostroenie, 1963, 376 p. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

Ивановский Николай Владимирович	канд. техн. наук, доцент кафедры судовождения и промышленного рыболовства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 inv8@mail.ru
Ivanovskii Nikolai Vladimirovich	Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the Department of Navigation and Industrial Fisheries Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 inv8@mail.ru