

16+

ВЕСТНИК

Керченского Государственного
Морского Технологического Университета

СЕРИЯ

Морские Технологии

**Выпуск 1
2023**

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

Авдеев Б.А.
Васьков А.С.
Горбенко А.Н.
Доровской В.А.
Емельянов В.А.

Ермаков С.В.
Жуков В.А.
Ивановский Н.В.
Каторин Ю.Ф.
Конюков В.Л.

Нырков А.П.
Олейников А.М.
Пашков Д.П.
Субанов Э.Э.
Титов И.Л.

Серёгин С.С. – ответственный секретарь

Бобарыкин 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 22.09.2023 г.

Издательство: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»

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

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

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

Редакционная коллегия журнала

1. Авдеев Борис Александрович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства
2. Васьков Анатолий Семенович – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова», профессор кафедры судовождения.
3. Горбенко Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры судовых энергетических установок
4. Доровской Владимир Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Керченский морской технологический университет», профессор кафедры электрооборудования и автоматизации производства
5. Емельянов Виталий Александрович – д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», профессор кафедры бизнес-информатики
6. Ермаков Сергей Владимирович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», директор Морского института
7. Жуков Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания
8. Ивановский Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский морской технологический университет», декан морского факультета, заведующий кафедрой судовождения и промышленного рыболовства
9. Каторин Юрий Федорович – д-р воен. наук, профессор ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
10. Конюков Вячеслав Леонтьевич – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры судовых энергетических установок
11. Нырков Анатолий Павлович – д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
12. Олейников Александр Михайлович – д-р техн. наук, профессор, ФГУП «13 Судоремонтный завод Черноморского флота» Министерства обороны РФ, руководитель группы по развитию и новым технологиям
13. Пашков Дмитрий Павлович – д-р техн. наук, профессор, филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, старший преподаватель кафедры судовождения
14. Субанов Эркин Эргешевич – канд. техн. наук, Начальник дипломного отдела, Службы капитана морского порта Новороссийск, ФГБУ «АМП Черного моря»
15. Титов Иван Леонидович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства

СОДЕРЖАНИЕ

Научная специальность 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»	6
Авдеев Б.А. ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	6
A.S. Bordyug APPLICATION OF STATIC SOURCES OF REACTIVE POWER AND SUPERCONDUCTING INDUCTIVE STORAGE IN THE SHIP'S ELECTRICAL POWER SYSTEM	14
Келлер М.В., Савенко А.Е. ОЦЕНКА, НАБЛЮДЕНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ ДЛЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ	23
Титов И.Л. ИЗУЧЕНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА ОТ ЗУБЦОВ СТАТОРА К КОЛЬЦАМ РОТОРА В ГЕНЕРАТОРЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (AGA)	32
Научная специальность 05.08.05 «Судовые энергетические установки (главные и вспомогательные)»	40
Богатырева Е.В. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ БАЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СУДОВ	40
Ивановская А.В. ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРИВОДА СУДОВОЙ ЛЕБЕДКИ	46
Шаратов А.С. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ХОДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ, ОСНАЩЕННЫХ МАЛООБОРОТНЫМ ГЛАВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ	53
Научная специальность 2.9.7. «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография»	61
Ивановский А.Н. ДИСТАНЦИОННАЯ ПЕРЕДАЧА ПОКАЗАНИЙ МАГНИТНОГО КОМПАСА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ	61
Рязанова Т.В. АНАЛИЗ СИЛОВОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРОМЫСЛОВОГО СУДНА И РЫБОЛОВНОГО ТРАЛА	68

Святский В.В. СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА МОРСКИХ ПУТЯХ	76
Тищенко М.С. Ивановский Н.В. ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВЫПУКЛОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ «ПОИСКА И СПАСЕНИЯ ЛЮДЕЙ НА МОРЕ»	85

УДК 629.12

Авдеев Б.А.

ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения нейронных сетей для прогнозирования числа и мощности синхронных генераторов на судах. Описаны самые распространенные способы определения мощности судовой электростанции, такие как вероятностный, статического моделирования, табличный и аналитический. Показаны преимущества и недостатки каждого способа. Несмотря на то, что разработка цифрового двойника даёт наилучшие результаты, самым распространенным методом является табличный, который является относительно точным и менее трудоёмким, но сильно зависит от квалификации проектанта. Доказано с применением примеров, что использование нейронных сетей позволяет прогнозировать мощность как судовой энергетической установки, так и судовой электростанции с большой степенью точности и с наивысшим соотношением надёжности и экономичности. Приведены примеры успешного применения нейронных сетей для этих целей. Дано описание и работа программного комплекса расчета мощности электроэнергетической системы контейнеровозов. Рассмотрены дальнейшие пути развития нейронных сетей в целях определения мощности судовой электростанции.

Ключевые слова: судовая электростанция, синхронный генератор, аварийный генератор, нейронные сети, ГРЩ, АРЩ,

Avdeev B.A.

APPLICATIONS OF NEURAL NETWORKS TO DETERMINE THE POWER OF A SHIP POWER PLANT

Annotation. The article discusses the use of neural networks to predict the number and power of synchronous generators on ships. The most common methods of determining the power of a ship's power plant are described, such as probabilistic, static modeling, tabular and analytical. Their advantages and disadvantages of each method are shown. Despite the fact that the development of a digital double gives the best results, the most common method is tabular, which is relatively accurate and less time-consuming, but it strongly depends on the qualifications of the designer. It is proved with the use of examples that the use of neural networks can predict the power of both a ship's power plant and a ship's power plant with a high degree of accuracy and with the highest ratio of reliability and efficiency. Examples of successful application of neural networks for these purposes are given. The description and operation of the software package for calculating the capacity of the electric power system of container ships is given. Further ways of development of neural networks in order to determine the power of a ship's power plant are considered.

Keywords: ship power plant, synchronous generator, emergency generator, neural networks, MSB, ASB,

Введение. Для электроснабжения всех судовых потребителей предусмотрена судовая электроэнергетическая станция (СЭЭС). Конфигурация СЭЭС должна быть такой, чтобы надёжно и как можно наиболее экономичным способом обеспечить электроэнергией все потребители, работающие в различных режимах работы судна [1]. Узловым элементом всей СЭЭС являются синхронные генераторы, выбор которых сильнее всего влияет на работу всего комплекса в целом [2]. Пример типичной СЭЭС приведен на рисунке 1. Эта электростанция содержит три параллельно работающих дизель-генератора, и один аварийный дизель-генератор. С основных генераторов трехфазное напряжение поступает на главный

распределительный щит (ГРЩ), откуда оно распределяется на судовую нагрузку 380В. Для питания нагрузкой 220 В имеются трансформаторы TV1 и TV2. В случае выхода из строя ГРЩ контакт QF12 теряет питание и отключает аварийный распределительный щит (АРЩ) от ГРЩ и включается аварийный дизель-генератор с помощью автоматического выключателя QF13. Также на схеме обозначены типы электроприёмников: 1 – особоответственные электрические приемники; 2 – ответственные электрические приемники; 3 – неответственные электрические приемники.

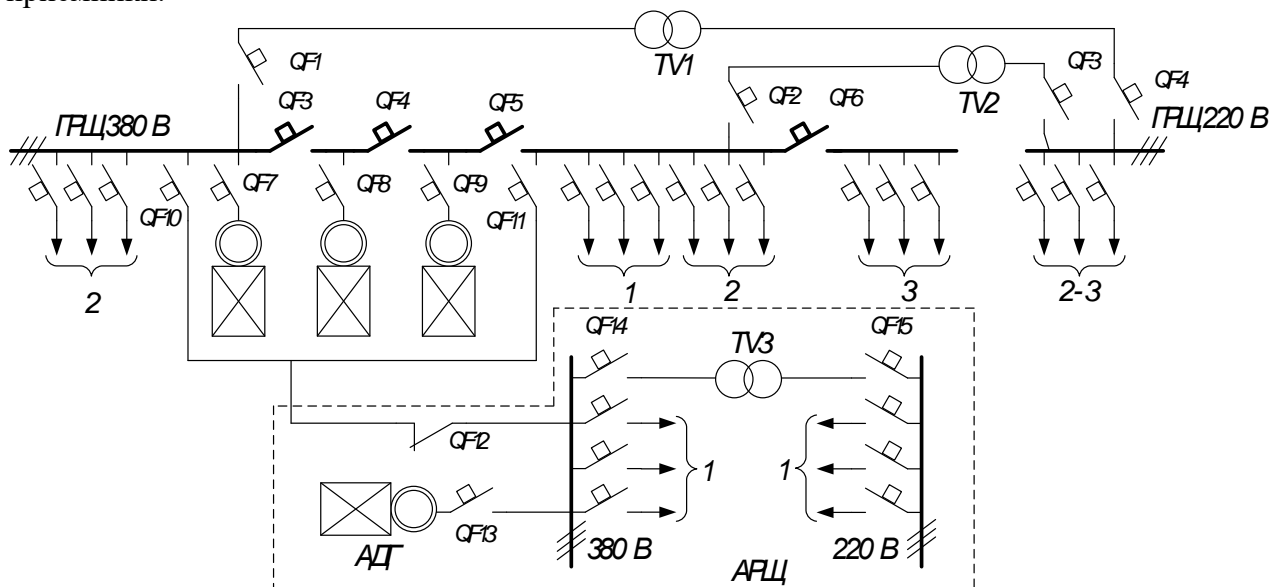


Рисунок 1 - Типовая схема генерирования и распределения электрической энергии на судне

Если мощность генераторов будет недостаточной, то возможны блэкауты и просадки напряжения, из-за чего пострадает надежность функционирования судового энергетической установки. В противоположном случае, недогруженные генераторные агрегаты будут работать с низким коэффициентом полезного действия, что снизит экономические показатели [3]. Существуют различные способы определения мощности СЭЭС. В статье будут приведены краткие характеристики этих методов и проанализированы последние достижения в области искусственных нейронных сетей для решения поставленной задачи, а также результаты, рекомендации и дальнейшее развитие.

Целью исследования является повышение качества определения мощности судовой электростанции с использованием нейронных сетей.

Литературный обзор. К основным методам определения мощности СЭЭС относят:

- вероятностный;
- статического моделирования;
- табличный;
- аналитический.

Вероятностный метод в свою очередь подразделяется на метод статистических испытаний, метод массового обслуживания и метод числовых характеристик. Первый метод позволяет получить наибольшие и вероятные промежуточные значения мощности СЭЭС. Для этого разрабатывается вероятностная модель задачи, решение которой находится использованием случайных законов распределения. При этом исходные данные повторяются на ЭВМ с возможными вариациями. Метод массового обслуживания применяется относительно несложных по структуре СЭЭС с ограниченным числом приемников, нагрузка которых задается дискретно (ступенчато). Метод числовых характеристик является более универсальным.

Экспериментальные данные являются самыми надежными для оптимального технического решения. Так, данные, используемые в статье [4] и которые состояли из 16 дней

первичных тестовых данных о плавании и около 3 месяцев фактических данных о плавании, содержат информацию об общей нагрузке в каждую минуту. На основании данных в статье анализировалась возможность обеспечения наивысшей экономичности в разных режимах работы судна с различными комбинациями генераторов различной мощностью. Несмотря на то, что публично обнародовать полученные данные не разрешается, автор сжато смог сформулировать данные об общей нагрузке судна как непредсказуемые и выбрать оптимальную конфигурацию СЭЭС.

Метод статистического моделирования основан на применении вычислительных машин для построения статистической модели, воспроизводящей схему замещения СЭЭС. Каждый элемент такой модели по своим характеристикам и параметрам соответствует отдельным элементам реальной схемы СЭЭС (электродвижущая сила источника, сопротивление элементов и т.д.). Развитием данного метода является разработка цифрового двойника СЭЭС и судна в целом [5, 6]. Причем цифровые двойники позволяют исследовать работу всего комплекса не только в статическом режиме, но и в переходных [7].

Для определения необходимой мощности генераторов СЭЭС *табличным методом* составляется таблица электрических нагрузок при различных режимах работы судна в зависимости от его типа. Согласно Правилам Регистра РФ, в таблице нагрузок должны быть предусмотрены следующие режимы работы: ходовой; стоянка в порту; снятие с якоря (шлюзование); специальный режим для судов технического флота, рыболовных и других судов; аварийный режим (при пожаре или получении судном пробоины и сохранении работоспособности основной электростанции) [8].

Для каждого режима определяются суммарные активная и реактивная мощности путем сложения мощностей отдельных потребителей. В каждом конкретном случае при выборе генераторов необходимо проверить, смогут ли генераторы обеспечить нормальную работу приемников соответствующего режима с учетом приемников, работающих кратковременно. На основании мощностей, которые потребляют судовые приёмники, выбираются один или несколько синхронных генераторов, так чтобы коэффициент загрузки в длительных режимах работы составлял 75-85%. Данный метод получил наибольшее распространение из-за наглядности, относительной простоты и высокой вариативности электрооборудования. Данный способ расчёта мощности СЭЭС в виде специальной программы приведен в статье [9] и в свидетельствах на программу на ЭВМ [10, 11]. Несмотря на простоту данного метода, проектант должен обладать существенным опытом при составлении таблицы в области загрузки, времени работы и выбора количества и мощности генераторов. Также может возникнуть проблема одновременного включения электроприёмников, что может не учитываться в табличном методе.

Аналитический метод заключается в расчёте количества и мощности генераторов исходя из энергетических потребностей судна. Анализ статистических данных позволил выявить эмпирическую формулу связи мощности СЭЭС в ходовом режиме с мощностью главной энергетической установки.

Мощность электростанции в ходовом режиме можно вычислить по следующей формуле:

$$P_X = 18 + 0,028 N \text{ (кВт)},$$

где N – мощность главной энергетической установки, кВт.

При расчете мощности электростанции используется два выражения:

$$P_{X1} = P_X + P_{Э}, \text{ при } P_{Э} > P_B;$$

$$P_{X2} = P_X + P_B, \text{ при } P_B > P_{Э};$$

где $P_{Э}$ – мощность наибольшего эпизодически включаемого в работу приемника. P_B – мощность бытовых электроприемников СЭЭС.

Вышеприведённые формулы являются приближёнными и используются тогда, когда не ясен полный перечень электрооборудования.

Несмотря на многообразие методов, данные методы определения мощности СЭЭС имеют потенциал к совершенствованию за счёт накопленные за многие десятилетия больших объёмов данных и применения нейронных сетей.

Основная часть

Эффективность использования генераторов зависит от того, какие устройства и системы на борту судна используют электроэнергию, а также от того, каким образом происходит распределение электроэнергии на борту. Для повышения эффективности использования генераторов необходимо использовать энергоэффективные устройства и системы, а также проводить оптимизацию распределения электроэнергии на борту. Например, можно использовать системы автоматического отключения ненужных устройств при их неиспользовании или снижении нагрузки на генераторы. Также для повышения эффективности использования генераторов можно применять системы регулирования нагрузки, которые позволяют более точно распределять электроэнергию на борту судна в зависимости от текущей нагрузки и потребностей систем на борту. Важно учитывать, что эффективность использования генераторов напрямую влияет на экономичность эксплуатации судна, так как более эффективное использование генераторов позволяет снизить расходы на топливо и обслуживание системы электроснабжения.

Используя основную информацию, такую как длина, ширина, осадка судна, его скорость и назначение можно разработать нейронную сеть, которая бы прогнозировала необходимую мощность для проектирования судна. Примером такой нейронной сети служит [12]. Данный программный комплекс на базе нейронной сети предназначен для определения количества и мощности дизель-генераторов, мощности аварийного дизель-генератора и мощности главного двигателя контейнеровозов. Исходная информация о проектируемом судне вводится в диалоговые окна, результат выводится также в диалоговых окнах. Программный комплекс включает в себя интегрированную нейронную сеть, обученную на данных более 100 судов, находящихся в эксплуатации. Программа имеет интерфейс, в котором вводятся такие параметры как скорость судна и основные геометрические размерения. Обязательным пунктом является не выпадении за допустимые вводимые значения. Интерфейс программы приведён на рисунке 2.

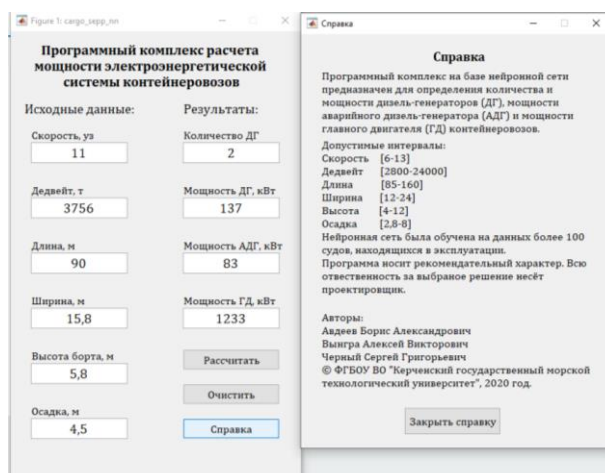


Рисунок 2 – Внешний вид программного комплекса для расчета мощности электроэнергетической системы контейнеровозов

Рассмотрим турецкий сухогруз «Ulus Wind» 2006 года постройки. Данное судно имеет 2 синхронных генератора мощностью 120 кВт и один аварийный генератор такой же мощности. Главный двигатель имеет мощность 1470 кВт. После введения размерний, программа выдала 137 кВт основного генератора и 83 кВт аварийного. Мощность главного двигателя составила 1233 кВт. Мощность основных генераторов и главного двигателя совпадают, мощность АДГ является неудовлетворительной. Для повышения качества прогнозирования мощности СЭЭС

желательно повысить количество судов в базе данных, по которой обучается нейронная сеть [13]. Преимущество использования такого комплекса заключается в том, что использовать его можно и без опыта эксплуатации судов или их проектирования.

Требуется обратить внимание на следующие моменты:

1. Для каждого типа судна необходимо своя нейронная сеть, которая бы учитывала уникальные особенности и электрооборудования для выполнения узкоспециализированных операций.

2. Наличие электрического подруливающего устройства необходимо задавать отдельным пунктом.

3. В случае электродвижения мощность синхронных генераторов должна включать в себя мощность главного двигателя.

4. Рекомендуется учитывать год постройки, т.к. новые суда имеют больше систем автоматики и соответственно им требуется больше мощность электростанции.

5. На основании экспертного мнения и данных об эксплуатации можно обеспечить оценку оптимальности выбранной электростанции, тем самым выбор числа и мощности СГ будет оцениваться не только с точки зрения ретроспективы, но и с точки зрения эффективности.

6. Следует подумать об учёте уровней автоматизации и переходу к автономным и полуавтономным судам.

Существующие методы расчета предполагает нахождение мощности генератора, при которой максимальная нагрузка составляет от 80% до 90% от общей мощности генератора. Они упускают из виду оптимизацию мощности генератора, переоценивая ее по соображениям безопасности. По мере развития технологий, оборудование СЭЭС становится все более безопасным и надёжным. Соответственно, верфям и эксплуатантам целесообразно кооперироваться для проведения исследований с использованием фактических данных об общей нагрузке, собранных с целевых судов.

Помимо того что нейронные сети могут быть применены к расчету мощности СЭЭС, используя данные о потреблении энергии на судне, они могут также учитывать и другие факторы, такие как погодные условия, сезонность, широты работы и т.д. Например, можно обучить нейронную сеть на основе исторических данных о потреблении энергии на судне и использовать ее для прогнозирования будущих потребностей в энергии. Также можно использовать нейронные сети для оптимизации работы генераторов на судне, чтобы обеспечить максимальную эффективность и надежность работы системы электроснабжения [14].

Для решения этой задачи можно использовать нейронные сети, обученные на основе данных о потреблении энергии на судне, скорости и направлении движения, погодных условиях и других факторах, которые могут влиять на работу генераторов. Нейронная сеть может анализировать эти данные и принимать решение о том, какое количество и мощность генераторов необходимо для обеспечения эффективной работы системы.

После завершения определения мощности и количества синхронных генераторов можно рассчитать индекс выбора мощности генератора (ИВМГ), который можно использовать для определения того, какая мощность генератора является наиболее оптимальной, путем сравнения конкретных примеров. ИВМГ используется для расчета среднего коэффициента резервирования $K_{рез}$, коэффициента загрузки $K_{загр}$ генераторов, обеспечивающих покрытие нагрузки в режимах и индекса опыта ИО. S - частота превышения мощности самого большого генератора.

ИВМГ рассчитывается по следующей формуле:

$$ИВМГ = K_{загр.ср.} + s \cdot k$$

Коэффициент загрузки в конкретном режиме вычисляется как:

$$K_{загр.м} = \frac{P_{нагр.м}}{n \cdot P_{ген}} 100\%,$$

где $P_{нагр.м}$ – средняя мощность нагрузки в режиме m , n и $P_{ген}$ – число и мощность синхронных генераторов, соответственно.

Средний коэффициент нагрузки определяется как среднее значение коэффициент загрузки в конкретном режиме умноженное на относительное время работы. Общее время работы составляет единицу:

$$K_{загр.ср.} = \sum_{i=1}^m K_{загр.м} \cdot \Delta t_m$$

ИО является экспертной оценкой и выбирается инженером судоверфи. ИО обычно не превышает 10% для новых или узкоспециализированных судов и составляет нескольких процентов для серийных однотипных судов.

Выводы. Применение нейронных сетей для выбора количества и мощности судовых синхронных генераторов может привести к значительному улучшению эффективности и экономичности работы системы электроснабжения на судне. Кроме того, это может помочь снизить расходы на топливо и уменьшить вредное воздействие на окружающую среду, что является важным фактором для современных судовладельцев и операторов. Приведены рекомендации по проектированию СЭЭС.

Список использованной литературы:

1. *Коршунов В.Н., Фершалов Ю.Я., Чупина К.В.* Проектирование судовой электрической станции. Учебное пособие для вузов. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2022. 67 с.
2. *Бордюг А.С.* Разработка математической модели резервирования электроэнергетических систем // Энергобезопасность и энергосбережение. 2022. № 4. С. 53-55.
3. *Савенко А.Е., Савенко П.С.* Обеспечение качественной работы электротехнических комплексов на морских судах нефтегазовой отрасли // В сборнике: Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Альметьевск, 2021. С. 234-239.
4. *Leem, J.; Park, J.-W.; Lee, H.-J.* A Study of the Method for Calculating the Optimal Generator Capacity of a Ship Based on LNG Carrier Operation Data. Electronics 2021, 10, 258.
5. *Власов Т.Д., Бабаев А.А., Герасиди В.В.* Анализ процесса внедрения цифровых двойников морских судов и их эксплуатация // Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 2 (103). С. 72-76.
6. *Палкина Е.С., Постников Р.А.* Цифровая трансформация производственной системы в судостроении: проблемы и способы их решения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. № 6. С. 107-123.
7. *Бурмакин О.А., Шилов М.П., Мальшев Ю.С., Попов С.В.* Имитационная модель судовой электростанции // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2016. № 48. С. 273-280.
8. *Яковлев Г.С.* Судовые электроэнергетические системы: учебник для судостроительных техникумов. М.: Транспорт, 1982. 382 с.
9. *Шушков Д.А., Лимонникова Е.В., Платоненков С.В.* Разработка системы для автоматизации расчета мощности судовой электростанции // Научно-технические ведомости Севмашвтуза. 2021. № 2. С. 30-34.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018611202 Программа для расчёта электрических нагрузок судовых электроэнергетических систем с формированием таблиц расчётных данных / Калинин И.М., Луговской П.С., Соловей В.С., 25.01.2018. Заявка № 2017662810 от 01.12.2017.

11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017663265 Комплексная программа аппаратно-программного обеспечения для проектирования судовых электроэнергетических систем и их элементов / Екушов А.А., Калинин И.М., Загородников М.А., Иванова М.К., Соловей В.С., Субботина Т.А., Цыбуляк А.Н., Веселов Д.И., 28.11.2017. Заявка № 2017660152 от 06.10.2017.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664772 Российская Федерация. Программный комплекс расчета мощности электроэнергетической системы контейнеровозов / Авдеев Б.А., Вынгра А.В., Черный С.Г. № 2020660740; заявл. 21.09.2020; опубл. 18.11.2020.
13. Авдеев Б.А., Вынгра А.В. Использование нейронных сетей в системах управления интеллектуальными сетями электроснабжения // Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы», Анапа, 22–23 апреля 2021 года. Т.1. С. 80-84.
14. Kuznetsov S.E., Alekseev N.A., Vinogradov A.A. System of load distribution of ship diesel generators based on neural networks // Modern Information Technologies and IT-Education. 2018. Т. 14. № 3. С. 603-608.

References:

1. Korshunov V.N., Fershalov Yu.Ya., Chupina K.V. *Proyektirovaniye sudovoy elektricheskoy stantsii. Uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Design of a ship's electrical station. Textbook for universities]. Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2022. 67 p. (In Russian).
2. Bordyug A.S. Razrabotka matematicheskoy modeli rezervirovaniya elektroenergeticheskikh system [Development of a mathematical model of reservation of electric power systems] // Energy security and energy conservation. 2022. No. 4. pp. 53-55. (In Russian).
3. Savenko A.E., Savenko P.S. Obespecheniye kachestvennoy raboty elektrotekhnicheskikh kompleksov na morskikh sudakh neftegazovoy otrasli [Ensuring high-quality operation of electrical complexes on marine vessels of the oil and gas industry] // *Achievements, problems and prospects of development of the oil and gas industry. Collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. Almet'yevsk, 2021. pp. 234-239. (In Russian).
4. Lim, J.; Park, J.-U.; Lee, H.-J. Investigation of the method of calculating the optimal power of the ship's generator based on data on the operation of the carrier of liquefied natural gas. *Electronics* 2021, 10, 258. (In English).
5. Vlasov T.D., Babaev A.A., Gerasidi V.V. Analiz protsessa vnedreniya tsifrovyykh dvoynikov morskikh sudov i ikh ekspluatatsiya [Analysis of the process of introducing digital doubles of marine vessels and their operation] // *Operation of marine transport*. 2022. No. 2 (103). pp. 72-76. (In Russian).
6. Palkina E.S., Postnikov R.A. Tsifrovaya transformatsiya proizvodstvennoy sistemy v sudostroyenii: problemy i sposoby ikh resheniya [Digital transformation of the production system in shipbuilding: problems and ways to solve them] // *Bulletin of the Trans-Baikal State University*. 2021. No. 6. pp. 107-123. (In Russian).
7. Burmakin O.A., Shilov M.P., Malyshev Yu.S., Popov S.V. Imitatsionnaya model' sudovoy elektrostantsii [Simulation model of a ship power plant] // *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2016. No. 48. pp. 273-280.
8. Yakovlev G.S. *Sudovyye elektroenergeticheskiye sistemy: uchebnyk dlya sudostroitel'nykh tekhnikumov* [Ship electric power systems: textbook for shipbuilding technical schools]. M.: Transport, 1982. 382 p. (In Russian).
9. Shushkov D.A., Limonnikova E.V., Platonenkov S.V. Razrabotka sistemy dlya avtomatizatsii rascheta moshchnosti sudovoy elektrostantsii [Development of a system for automating the calculation of the power of a ship power plant] // *Scientific and technical Vedomosti Sevmashvtuz*. 2021. No. 2. pp. 30-34. (In Russian).

10. Certificate of registration of the computer program RU 2018611202 *Programma dlya raschota elektricheskikh nagruzok sudovykh elektroenergeticheskikh sistem s formirovaniyem tablits raschotnykh dannykh* [Program for calculating electrical loads of ship electric power systems with the formation of calculation data tables] / Kalinin I.M., Lugovskaya PS, In Solovey.S., 25.01.2018. Application no. 2017662810 dated 01.12.2017. (In Russian).
11. Certificate of registration of the computer program RU 2017663265 Integrated hardware and software program for the design of marine electric power systems and their elements / Ekushov A.A., And Kalinin.M., M Zagorodnikov.A., Ivanova M.K., V Solovey.S., Subbotina T.A., A Tsybulyak.N., Veselov D.I., 11/28/2017. Application no. 2017660152 dated 06.10.2017. (In Russian).
12. Certificate of state registration of the computer program No. 2020664772 RU. *Kompleksnaya programma apparatno-programmnogo obespecheniya dlya proyektirovaniya sudovykh elektroenergeticheskikh sistem i ikh elementov* [Software package for calculating the capacity of the electric power system of container ships] / Avdeev B.A., Vyngra A.V., Cherny S.G. No. 2020660740; application 21.09.2020; publ. 18.11.2020. (In Russian).
13. Avdeev B.A., Vyngra A.V. Programmnyy kompleks rascheta moshchnosti elektroenergeticheskoy sistemy konteynerovozov [The use of neural networks in control systems of intelligent power supply networks] // *Collection of articles for the III All-Russian Scientific and Technical Conference "State and prospects of development of modern science in the direction of "ACS, information and telecommunication systems"*, Anapa, April 22-23, 2021. Vol. 1. pp. 80-84. (In Russian).
14. Kuznetsov S.E., Alekseev N.A., Vinogradov A.A. Load distribution system of marine diesel generators based on neural networks // *Modern information technologies and IT education*. 2018. Vol. 14. No. 3. pp. 603-608. (In English).

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

UDC 621.43

A.S. Bordyug

APPLICATION OF STATIC SOURCES OF REACTIVE POWER AND SUPERCONDUCTING INDUCTIVE STORAGE IN THE SHIP'S ELECTRICAL POWER SYSTEM

Abstract. To improve the reliability and quality of electricity in shipboard modern power plants with synchronous generators, controlled static reactive power compensators are used, which, in addition to providing the required balance of reactive powers and maintaining the voltage level, under certain conditions, can also dampen vibrations of machines. In addition, the paper considers the possibility of using an electromagnetic storage device paired with a static reactive power compensator. Considering that an electromagnetic storage device always consumes reactive power during normal regulation, which changes along with active power, and both components, sometimes with different signs, affect the movement of generators, such regulation may not give the desired effect. The paper shows methods for solving this problem. An electromagnetic storage device is much more effective here, providing both voltage level maintenance and damping. The installation of an electromagnetic storage device with a developed reactive part on weak branches between systems can make it possible to partially eliminate irregular power fluctuations between systems and increase the transmission capacity due to short-term voltage increases for the period of the greatest power excesses. Electromagnetic accumulators are capable of increasing the limits to dynamic stability, but at the same time it is necessary to increase the power of the converters and provide the opportunity not only to consume, but also to produce reactive power.

Keywords: Electromagnetic storage, ship power plant, static reactive power compensator, load, stability.

Бордюг А.С.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ В СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Аннотация. Для повышения надежности и качества электроэнергии в корабельных современных электростанциях с синхронными генераторами применяются управляемые статические компенсаторы реактивной мощности, которые, помимо обеспечения необходимого баланса реактивных мощностей и поддержания уровня напряжения, при определенных условиях способны также гасить вибрации машин. Кроме того, в статье рассмотрена возможность использования электромагнитного накопителя в паре со статическим компенсатором реактивной мощности. Учитывая, что электромагнитный накопитель при обычном регулировании всегда потребляет реактивную мощность, которая изменяется вместе с активной мощностью, а на движение генераторов влияют обе составляющие, иногда с разными знаками, такое регулирование может не дать должного эффекта. В статье показаны методы решения этой проблемы. Электромагнитный накопитель здесь гораздо эффективнее, обеспечивая и поддержание уровня напряжения, и его демпфирование. Установка электромагнитного накопителя с развитой реактивной частью на слабых ветвях между системами может позволить частично устранить неравномерные колебания мощности между системами и увеличить пропускную способность за счет кратковременных повышений напряжения в период наибольших превышений мощности. Электромагнитные аккумуляторы способны повысить пределы динамической устойчивости, но при этом необходимо увеличить мощность преобразователей и обеспечить возможность не только потреблять, но и производить реактивную мощность.

Ключевые слова: Электромагнитный накопитель, корабельная энергетическая установка, статический компенсатор реактивной мощности, нагрузка, устойчивость.

Introduction. For a long time, almost the only means of increasing both the oscillatory and aperiodic stability of power transmission was automatic control of the excitation of synchronous generators and compensators. New opportunities appeared with the development of controlled static reactive power compensators (SVC), which, in addition to providing the required balance of reactive powers and maintaining the voltage level, under certain conditions, can also dampen vibrations of machines. SVC have high speed and allow maintaining voltage at a given point with great accuracy. Therefore, SVC data can be used in ship power plants of large ships, such as container ships or passenger ships. The aim of the work is to increase the reliability of the ship power plant through the use of a static reactive power compensator with an electromagnetic storage.

Methods and Materials. The main attention will be paid to comparing the SVC with a new means of increasing stability – an electromagnetic storage device (SMES - superconducting magnetic energy storage). A common feature of both SVC and SMES is their high speed, tens and hundreds of times greater than that of generator excitation systems with significant time constants of rotor circuits. Both devices affect stability, but they act differently and their effects must be compared. When comparing SVC and SMES, it should be borne in mind that the former ones regulate the voltage both in transient and stationary modes, while the latter ones, in terms of active power, operate only in transient modes, and the total changes in the output and consumed energy over long periods of time remain equal to zero.

Comparison of generator rotors and increasing static stability for damping vibrations will be carried out using the example of a single-machine scheme shown in figure 1. In the scheme, SVC represents an inductance connected to the network through a converter with controlled valves connected in anti-parallel. SVC always consumes reactive power, and to turn it into a reversible source, it is necessary to connect a capacitor bank in parallel. In calculations, SVC is usually represented by a controlled inductance, and the first harmonic of the current in it is shifted relative to the voltage by $\pm 90^\circ$. It is convenient to replace the SVC with a “current source”. There are reasons for this, since usually the converter is covered by a deep negative hard feedback, which brings it closer to the “current source”. SMES includes a superconducting inductive coil and a controlled transducer. SMES can both consume and deliver active power, of course, within the limits of its energy intensity.

With the usual control of SMES converters, in addition to active power pulses, there will be reactive power pulses associated with them. In this case, reactive power will be consumed both during the issuance and consumption of active power. Taking into account that SMES under normal regulation always consumes reactive power, which changes along with active power, and both components, sometimes with different signs, affect the movement of generators, such regulation often may not give the desired effect. Therefore, the use of SMES with conventional controlled converters seems to be of little promise. There are several possible ways to overcome this difficulty. Firstly, it is possible to install SVC simultaneously with the storage device. SVC must compensate for the load-changing consumption of reactive current by the storage device and, in addition, issue or consume reactive power from the network. Secondly, two independently controlled converters can be used in SMES, which makes it possible to change both reactive and active power within the given limits [3]. Thirdly, two-parameter regulation of the main converter is possible, in which both active and reactive power can be controlled [5-8]. In this case, reactive power is always consumed. Capacitors must be connected in parallel to deliver reactive power.

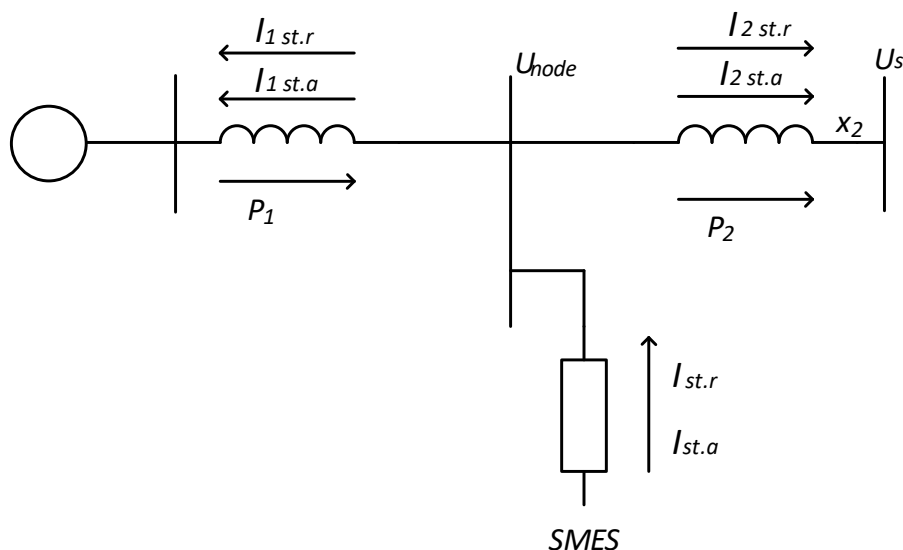


Figure 1 – Design scheme of power transmission $I_{st.r}$ and $I_{st.a}$ – reactive and active currents from SMES

Let us show the physical mechanism of the influence of SVC and SMES on the movement of the generator rotors relative to the receiving system. Under the action of SVC, the reactive current from it changes and, at the same time, the voltage at the point of its connection also changes. Its phase at the first moment remains the same. This is true as long as the transmission angles do not change.

All expressions below are written without taking into account the active resistance of the lines. When the current from the SVC changes by ΔI , the voltage increment in the node will be (Fig. 1)

$$\Delta U_{\text{node}} = \Delta I \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2}, \quad (1)$$

and the phase of the voltage in the node remains the same.

The active powers in the sections and, respectively, in the generator and the receiving system are equal to

$$P_1 = P_2 = \frac{E' U_{\text{node}}}{x_1} \sin \delta_1 = \frac{U_s U_{\text{node}}}{x_2} \sin \delta_2, \quad (2)$$

where E' and U_s – emf and voltage of the receiving system; U_{node} – voltage in the node, x_1 and x_2 – resistance to the node on both sides.

Accordingly, the increase in power with a change in voltage

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \frac{E'}{x_1} \sin \delta_1 \Delta U_{\text{node}} = \frac{U_s}{x_2} \sin \delta_2 \Delta U_{\text{node}} \quad (3)$$

Both the incoming power and the outgoing power change simultaneously and by the same amount. Damping of oscillations of the generators occurs due to the voltage ΔU_{node} controlled according to the required law and, consequently, the electromagnetic moments of the generators. The change in voltage immediately causes equal power surges to the generators and to the receiving system. The spatial position of the vectors E' and U_s at the first moment is unchanged, and E' does not change in magnitude. With the same impulse ΔI , the greatest change in power will occur if SVC is located approximately in the middle, i.e., at $x_1 = x_2$. The disadvantage of this method is also obvious: the damping of electromechanical oscillations is accompanied by voltage fluctuations in the node. Power changes here are directly proportional to voltage changes and depend on transmission load angles.

In order to more clearly identify the effect of regulation of SVC and SMES, we will not take into account the influence of regulation of the generators themselves, i.e., we will assume that damping is fully provided only by these devices. We replace the generators in the design scheme with a transient emf E' behind the resistance x'_d , which is equivalent to making the rotor circuits superconductive. Such a way, widely used in calculations of dynamic stability, can be applied here

as well, since the natural free oscillations of machines have a relatively high oscillation frequency of the order of 1-2 Hz. The equivalent time constants of the rotor circuits, both along the longitudinal and transverse axes, are relatively large. In this case, E' fluctuates by no more than 2%.

A long-term supply of reactive current in the node is usually needed to maintain a given voltage. To be able to dampen oscillations, some current reserve must be left from SVC or SMES.

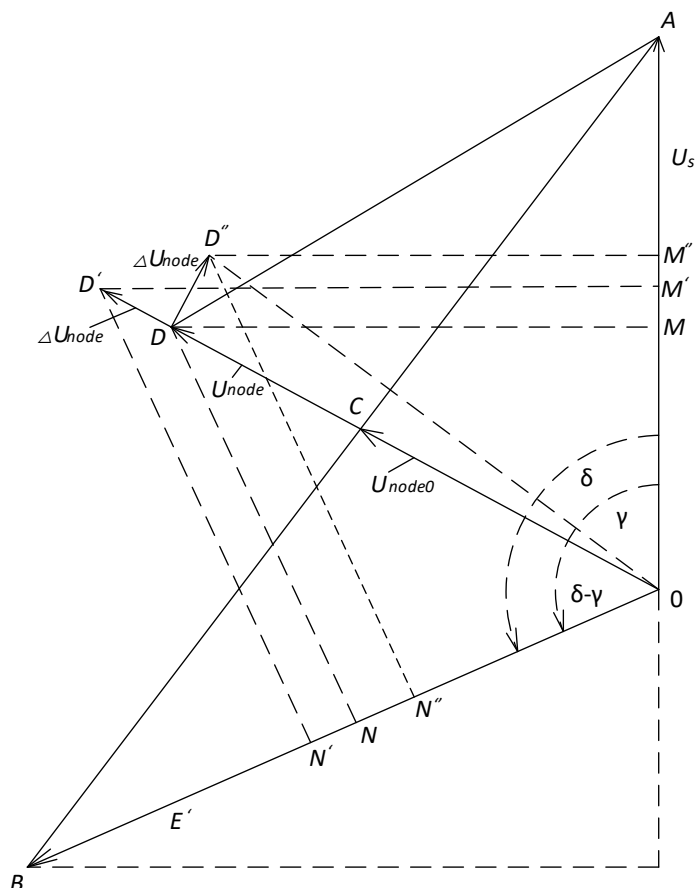


Figure 2 – Influence of the reactive and active components of the SMES current on the increment of active powers by sections

Figure 1 shows the original circuit, for which a vector diagram of the reactive and active components of the SMES current was constructed for the increment of active powers in the sections of the receiving system U_s , OB – emf of generator E' , OC – node voltage ΔU_{node0} at zero current from SMES. Given that $AC/CB=x_2/x_1$, we can find an expression for the stress in the node and its shear angle relative to the system ($\delta_2 = \gamma$). We take into account that x_1 includes the transient resistance of the generator x'_d and the resistance to the node. The voltage at the node will be

$$\Delta U_{node0} = \frac{(E'x_2 \cos \delta + U_s x_1) + jE'x_2 \sin \delta}{x_1 + x_2} = U_{node0} e^{j\gamma}, \quad (4)$$

and angle

$$\gamma = \arctg \frac{\sin \delta}{\frac{U_s}{E' \left(\frac{x_1}{x_2} \right)} + \cos \delta}, \quad (5)$$

where $\delta = \delta_1 + \delta_2$.

If a reactive current I_r enters the node for a long time, then the voltage at the node U'_{node} will become equal to

$$U'_{node} = U_{node0} + I_r \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = U_{node0} + I_r x_{\Sigma}. \quad (6)$$

Let's turn to the vector diagram in figure 2. Here: $OD = U'_{node}$; $DM = U'_{node} \sin \gamma$; $DN = U'_{node} \sin(\delta - \gamma)$.

When E' and U_s are constant, they are proportional to the active powers in sections. Proportionality coefficients: in the first case – x_2/U_s , in the second – x_1/E' . Obviously, here $P_1 = P_2$. If a reactive current enters the node, then, as already mentioned, the voltage in the node at the first moment, until the angle δ changes, will receive an increment $\Delta U_{node0} = jx_{\Sigma} \Delta I_r$, coinciding in phase with the previous voltage in the node (segment $D'D$). The power transmitted from the generator in the system will increase and will correspond to the segments $D'M'$ and $D'N'$ on the vector diagram. In this case, we assume that there is no load in the node.

A somewhat different situation will develop when a purely active current enters the node from the SMES. The voltage at the same absolute value of the current will receive the same increment ΔU_{node0} , but will be shifted by 90° relative to the previous voltage in the node. In this case, the voltage will almost not change in magnitude, but will turn through a certain angle. This means that the voltage offset angle of the node will change relative to emf in one direction, and relative to the system voltage – in the other. In this case, the active capacities in the sections for the duration of SMES will become different. On the vector diagram, the points M, N, D are shifted, occupying the positions M'', N'', D'' , respectively; if the power from the generator increases, then the power supplied to the system decreases and vice versa, as shown in figure 3. Here $P_1 \neq P_2$.

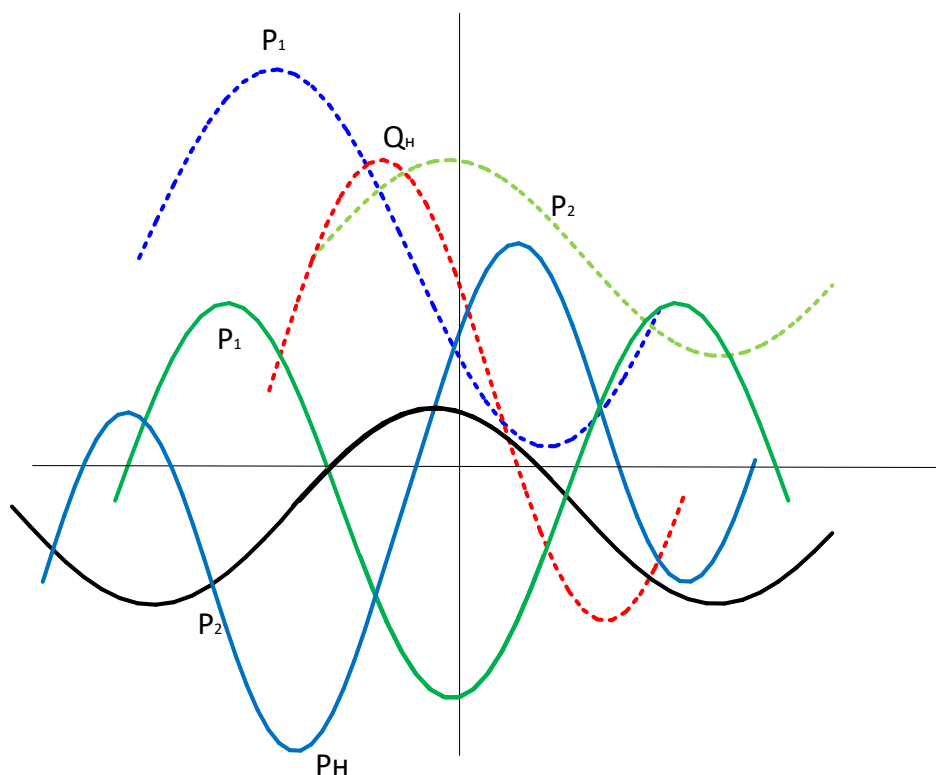


Figure 3 – Changes in power in sections from the phase of SMES current relative to the receiving end: 1 – power in the generator branch; 2 – power to the receiving system; 3 – active power from SMES; 4 – reactive power from SMES;

at $\delta=60^\circ$; _____
at $\delta=0^\circ$ — — —

Current increments from SMES will be distributed inversely proportional to the resistance of the branches and cause power increments depending on the amplitude and phase of the pulse. Since

independent regulation of the active (short-term) and reactive components of the current is possible, we will consider their influence separately. Power increments along the branches from the increment of the reactive component of the SMES current $I_{st.r}$ will be

$$\begin{aligned}\Delta P_{g,r} &= \Delta I_{st,r} \frac{x_2}{x_1 + x_2} E' \sin(\delta - \gamma); \\ \Delta P_{s,r} &= \Delta I_{st,r} \frac{x_1}{x_1 + x_2} U_s \sin \gamma;\end{aligned}\quad (7)$$

Here $\delta - \gamma$ – angle between the direction E' of the generator and the voltage at the node; $\Delta P_{g,r}$ – generator power increment from current $\Delta I_{st,r}$; $\Delta P_{s,r}$ – power increment to the system.

Then from the active component of the current:

$$\Delta P_{g,a} = \Delta I_{st,a} \frac{x_2}{x_1 + x_2} E' \cos(\delta - \gamma); \quad (8)$$

$$\Delta P_{s,a} = \Delta I_{st,a} \frac{x_1}{x_1 + x_2} U_s \cos \gamma; \quad (9)$$

The complete expressions for the powers by sections, taking into account the active and reactive components of the SMES current and the transmitted power for transmission, have the form:

$$P_g = P_1 = \frac{E' U_s}{x_1 + x_2} \sin \delta + E' \frac{x_2}{x_1 + x_2} [\Delta I_{st,r} \sin(\delta - \gamma) - \Delta I_{st,a} \cos(\delta - \gamma)]; \quad (9)$$

$$P_s = P_2 = \frac{E' U_s}{x_1 + x_2} \sin \delta + U_s \frac{x_1}{x_1 + x_2} [\Delta I_{st,r} \sin \gamma + \Delta I_{st,a} \cos \gamma]; \quad (10)$$

Expressions (7), (8) allow us to estimate the influence of the active and reactive components of the current from SMES on the increment of the generator torque (power).

The effectiveness of the influence of current from SMES on the movement of generators strongly depends on its connection point. So, from the reactive component of the current $\Delta I_{st,r}$, the additional moment when the connection point moves towards the generator falls due to a decrease in the difference $(\delta - \gamma)$, which tends to zero as $\delta \rightarrow 0$. However, the ratio $\frac{x_2}{x_1 + x_2}$ grows. In general, the maximum is shifted from the electrical transmission center.

The additional moment from the active component of the current, as the point of connection of SMES to the generator approaches, always grows due to both an increase in the ratio $\frac{x_2}{x_1 + x_2}$ and a decrease in the difference $(\delta - \gamma)$.

The previous transmission angle also matters. So, at small δ , the difference $(\delta - \gamma)$ will be insignificant, and the effect on the generator from the reactive component of SMES will be weak. Therefore, damping due to reactive current control will be weakened at low loads. On the contrary, at small transmission angles from the active component, the effect will be greatest, i.e., at low loads and when SMES is connected to the generator terminals. However, even at rated loads of generators, i.e., at an internal angle between E' and the voltage at the terminals of 30° - 45° , its influence will be quite large. Especially strong effect should be expected on generators, in which the internal angle $(\delta_2 = \delta - \gamma)$ is small.

Several other expressions for power are also useful. Imagine that SMES gives a current oriented relative to the voltage of the receiving system - I_{st} - and shifted relative to it by an angle α .

Multiplying the conjugate current complex by the E' complexes and system voltages U_s and taking into account the previous load and the stationary reactive current given by SMES, we obtain

$$P_1 = \frac{E' U_s}{x_1 + x_2} \sin \delta - \Delta I_{st} \frac{x_2}{x_1 + x_2} E' \cos(\delta - \alpha); \quad (11)$$

$$P_2 = \frac{E' U_s}{x_1 + x_2} \sin \delta + \Delta I_{st} \frac{x_1}{x_1 + x_2} U_s \cos \alpha; \quad (12)$$

The active power from SMES is equal to the power difference in sections:

$$P_{st} = P_2 - P_1$$

The reactive powers coming to the node can be determined similarly. We restrict ourselves to the expression for reactive power from SMES

$$Q_{st} = \frac{\Delta I_{st}}{x_1 + x_2} [E' x_2 \sin(\delta - \alpha) - U_s x_1 \sin \alpha + \Delta I_{st} x_1 + x_2] \quad (13)$$

There is no proportional distribution of power among the branches. From these expressions, for example, it can be seen that when the active power from SMES is equal to zero, but reactive power is not equal to zero, the power increments P_1 and P_2 in sections will have finite values.

As can be seen from these expressions, there is another way to control the increments of active power in sections, namely, by changing the phase of the current angle from SMES relative to the voltage of the receiving system. In practice, this way of control is more difficult to implement than the one considered earlier.

Conclusions. Static sources of reactive power, in addition to their main functions of maintaining voltage and controlling reactive power flows, can create additional electromagnetic moments by changing the voltage at their terminals and thereby dampen the electromechanical oscillations of the generator rotors. Possibilities of SVC influence on damping vibration of generator rotors strongly depend on the place of SVC installation and load angle on transmission. So, at small angles along the transmission and installation of SVC near the generators, their efficiency is low. At the same time, such an arrangement of SVC can be beneficial in terms of the distribution of reactive power flows. The most effective is their location in the oscillation center. A major disadvantage of such a scheme for using SVC is the inevitable significant voltage fluctuations for vibration damping. Superconducting storage devices with conventional converters have a rigid relationship between the delivered and consumed active power and the consumed reactive power, and therefore have limited capabilities in terms of vibration damping. SMES must have independent control of both active and reactive power. At the same time, it can provide good damping of vibrations with a practically unchanged voltage at the terminals. To do this, it is advisable to perform the SMES converter according to a scheme capable of providing independent control of active and reactive power.

Список используемой литературы:

1. *Бордюг А.С.* Применение циклического тестирования аппаратного обеспечения морских систем управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. Т. 16. № 3. С. 77-82.
2. *Никитенко Я.А., Железняк А.А.* Методы повышения достоверности контроля диагностических характеристик оборудования // Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли. Материалы молодежного научного форума студентов и аспирантов транспортных вузов с международным участием. М., 2019. С. 210-214.
3. *Бордюг А.С.* Моделирование интегрированных преобразователей энергии в судовых многогенераторных системах // Сборник трудов по материалам II Национальной научно-практической конференции преподавателей и аспирантов «Морские технологии: проблемы и решения – 2020» / Под общ. ред. Е.П. Масюткина. Керчь, 2020. С. 47-51.
4. *Зарицкий С.П.* Диагностическое обслуживание оборудования КС. Обз. инф. Серия «Газовая промышленность на рубеже XXI века». М.: ИРЦ «Газпром», 2000. 156 с.
5. *Бурков А.Ф., Миханошин В.В., Нгуен В.Х.* Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2020. Т. 12. № 2. С. 381-389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.
6. *Шатровский Д.А.* Перспективные энергетические установки большой мощности для морских судов // Судостроение. 2015. № 5. С. 33-35
7. *Bouman E.A., Lindstad E., Riialand A.I., Strømman A.H.* State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review // Trans. Res. D Trans. Environ. 2017. Vol. 52. P. 408-421. DOI:10.1016/j.trd.2017.03.022.
8. *Бордюг А.С.* Идеология формирования типоразмерных рядов центробежных компрессоров судовой энергетической установки на базе автоматизированного проектирования // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2021. – № 4. – С. 126-138.
9. *Sciberras E. A. Zahawi B., Atkinson D. J.* Reducing shipboard emissions-Assessment of the role

of electrical technologies // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017. Vol. 51. P. 227-239. DOI: 10.1016/j.trd.2016.10.026.

10. Jeong B., Jeon H., Kim S., Kim J., Zhou P. Evaluation of the Lifecycle Environmental Benefits of Full Battery Powered Ships: Comparative Analysis of Marine Diesel and Electricity // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. P. 580. DOI: 10.3390/jmse8080580.

References:

1. Bordyug A.S. Primeneniye tsiklicheskogo testirovaniya apparatnogo obespecheniya morskikh sistem upravleniya [Application of cyclic testing of marine control system hardware]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems], 2020, vol. 16, no. 3, pp. 77-82. (In Russian).
2. Nikitenko Y.A., Zheleznyak A.A. Metody povysheniya dostovernosti kontrolya diagnosticheskikh kharakteristik oborudovaniya [Methods for increasing the reliability of monitoring the diagnostic characteristics of equipment]. *Materialy molodezhnogo nauchnogo foruma studentov i aspirantov transportnykh vuzov s mezhdunarodnym uchastiyem «Aktualnyye aspekty i prioritetye napravleniya razvitiya transportnoy otrasli»* [Materials of the youth scientific forum of students and graduate students of transport universities with international participation “Actual aspects and priority directions of development of the transport industry”]. Moscow, 2019, pp. 210-214. (In Russian)
3. Bordyug A.S., Masyutkin E.P. (ed.) Modelirovanie integrirovannykh preobrazovatelej energii v sudovykh mnogogeneratornykh sistemakh [Modeling of integrated energy converters in ship multi-generator systems]. *Sbornik trudov po materialam II Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej i aspirantov «Morskie tekhnologii: problemy i resheniya – 2020»* [Proceedings based on the materials of the II National Scientific and Practical Conference of Teachers and Postgraduates “Marine Technologies: Problems and Solutions – 2020”]. Kerch, 2020, pp. 47-51. (In Russian).
4. Zaritsky S.P. *Diagnosticheskoye obsluzhivaniye oborudovaniya KS. Obz. inf. Seriya «Gazovaya promyshlennost' na rubezhe XXI veka»* [Diagnostic maintenance of compressor station equipment. Review inf. Series: Gas industry at the turn of the XXI century]. Moscow, Gazprom Publ., 2000, 156 p. (In Russian).
5. Burkov A.F., Mikhanoshin V.V., Nguyen V.Kh. Povyshenie effektivnosti upravleniya kombinirovannymi energeticheskimi ustanovkami sudov [Improving the efficiency of managing the combined power plants of ships]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* [Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov], 2020, vol. 12, no. 2, pp. 381-389. (In Russian). DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.
6. Shatrovsky D.A. Perspektivnyye energeticheskie ustanovki bol'shoj moshchnosti dlya morskikh sudov [Promising power plants of high power for marine vessels]. *Sudostroenie* [Shipbuilding], 2015, no. 5, pp. 33-35. (In Russian).
7. Bouman E.A., Lindstad E., Rialland A.I., Strømman A.H. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Trans. Res. D Trans. Environ.*, 2017, vol. 52, pp. 408-421. (In English). DOI:10.1016/j.trd.2017.03.022.
8. Bordyug A.S. Ideologiya formirovaniya tiporazmernykh ryadov tsentrobezhnykh kompressorov sudovoy energeticheskoy ustanovki na baze avtomatizirovannogo proyektirovaniya [The ideology of the formation of standard-sized rows of centrifugal compressors of a marine power plant based on computer-aided design] // *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Вестник Керченского государственного морского технологического университета]. – 2021. – № 4. – S. 126-138. (In Russian).
9. Sciberras E. A. Zahawi B., Atkinson D. J. Reducing shipboard emissions-Assessment of the role of electrical technologies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, vol. 51, pp. 227-239. (In English). DOI: 10.1016/j.trd.2016.10.026.
10. Jeong B., Jeon H., Kim S., Kim J., Zhou P. Evaluation of the Lifecycle Environmental Benefits of Full Battery Powered Ships: Comparative Analysis of Marine Diesel and Electricity. *Journal*

of Marine Science and Engineering, 2020, vol. 8, p. 580. (In English). DOI:
10.3390/jmse8080580.

Сведения об авторах / Information about authors

Бордюг Александр Сергеевич	канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 alexander.bordyug@mail.ru
Bordyug Aleksandr Sergeevich	Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the Department of electrical equipment of ships and industrial automation Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 alexander.bordyug@mail.ru

УДК 621.313

Келлер М.В., Савенко А.Е.

ОЦЕНКА, НАБЛЮДЕНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ ДЛЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Аннотация. В связи с долгим сроком службы литий-ионные аккумуляторы нашли широкое применение в различных сферах жизни человека, таких как различные устройства, электромобили и морские суда. Однако, имеются проблемы безопасности с литий-ионными батареями, которые необходимо учитывать. Безопасности литий-ионных аккумуляторов уделяется все больше внимания, так как пожары и взрывы, инициированные термическим перегревом, приводят к значительным убыткам и гибели людей. Термический перегрев может произойти, если литий-ионные аккумуляторы испытывают электрические и тепловые перегрузки. Отмечено, что сепаратор имеет решающее значение для плотности энергии, удельной мощности, срока службы и безопасности батареи. Разрабатываются новые альтернативные материалы интеллектуального сепаратора, методы обнаружения отказов и другие передовые технологии для решения текущей проблемы механического и термического отказа сепаратора и повышения безопасности аккумуляторов. Ключевым направлением будущих исследований является поиск катодной батареи, которая будет более термостойкой и лучше способна предотвращать рост дендритов лития.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, тепловой перегрев, наблюдение, защита, катодная батарея.

Keller M.V., Savenko A.E.

ASSESSMENT, MONITORING AND SAFETY DURING THERMAL HEATING FOR LITHIUM-ION BATTERIES

Annotation. Due to its long service life, lithium-ion batteries have found wide application in various spheres of human life, various devices, electric vehicles and on ships. But, there are safety issues with lithium-ion batteries that need to be highlighted. More and more attention is being paid to the safety of lithium-ion batteries, because such incidents as fires and explosions initiated by thermal overheating have led to significant losses and loss of life. Thermal overheating may occur if lithium-ion batteries experience problems like electrical and thermal abuse. It is noted that the separator is critical to the energy density, power density, service life and safety of the battery. New alternative smart separator materials, failure detection methods, and other advanced technologies are being developed to address the current problem of mechanical and thermal separator failure and improve battery safety. A key direction for future research is to find a cathode battery that is more heat-resistant and better able to prevent the growth of lithium dendrites.

Keywords: lithium-ion batteries, thermal overheating, monitoring, protection, cathode battery.

Введение. В 21 веке наблюдается растущая тенденция к использованию чистой, экологически чистой, доступной и легкодоступной электроэнергии вместо сильно загрязняющих окружающую среду и дорогих традиционных источников энергии, поскольку мировое сообщество все больше озабочено экологическими и энергетическими проблемами. Благодаря своим преимуществам перед другими высокоэнергетическими вторичными батареями, таким как высокая плотность энергии, низкий саморазряд, хорошие характеристики и экологичность, литий-ионные аккумуляторы широко используются в источниках питания портативных электронных коммуникационных устройств, таких как телефоны и ноутбуки, а также в энергоснабжении новых электромобилей, на судах, а также в

промышленности [1]. Эти достижения значительно изменили большинство отраслей, включая наземный и морской транспорт, и скоро станут нормой [2]. Это сыграет значительную роль в области возобновляемых технологий и в развитии энергосистемы следующего поколения. Подавление теплового разгона стало ключевой проблемой в повышении безопасности литий-ионных аккумуляторов.

Литий-ионный аккумулятор может подвергаться механическому воздействию, если внешние факторы приводят к деформации корпуса аккумулятора или проколу некоторыми острыми предметами [3]. Кроме того, из-за перезарядки и внешнего короткого замыкания литий-ионные аккумуляторы могут не соответствовать своим основным электрическим свойствам. Это может привести к злоупотреблению литий-ионными батареями. Кроме того, литий-ионные аккумуляторы могут перегреваться в результате внутренних электрохимических побочных реакций или нагрева внешних источников тепла, что приводит к тепловому злоупотреблению литий-ионными батареями [4,5]. Все эти элементы могут вызвать последовательность экзотермических реакций в литий-ионных батареях в течение нескольких минут, что вызовет резкое повышение внутренней температуры батареи. Это, вероятно, приведет к тепловому разгону, который обычно приводит к дыму, пожару или, возможно, взрыву.

Тепловые разгоны представляют серьезную опасность для жизни и имущества людей в виде дыма, пожаров и взрывов. Тем не менее, крупномасштабные распределенные системы управления энергопотреблением по всему миру в настоящее время работают над достижением хорошей безопасности и надежности. Поэтому ряд международных организаций и комитетов, в том числе Международная организация по стандартизации (ISO) и Международная электротехническая комиссия (IEC), создали и опубликовали некоторые испытания для оценки безопасности литий-ионных аккумуляторов [6], стремясь повысить их производительность и безопасность, а также развеять опасения по поводу теплового разгона. Чтобы обеспечить качество и безопасность используемых литий-ионных аккумуляторов, эти спецификации требуют, чтобы литий-ионные аккумуляторы прошли ряд тестов на безопасность, таких как перезарядка, перегрев, механический удар и другие испытания. Они также предусматривают, что испытание не может подвергать батарею каким-либо вторичным опасностям (утечка, пожар, взрыв и т. д.).

Есть две основные области, которые можно улучшить, чтобы повысить безопасность литий-ионных аккумуляторов и снизить вероятность опасных аварий [7]. Чтобы повысить показатели безопасности батареи с точки зрения самой батареи, одним из методов является улучшение производственного процесса в самой литий-ионной батарее путем добавления добавок к электролиту, улучшения материалов электродов и улучшения процесса подготовки сепаратора. Альтернативный метод заключается в том, чтобы учитывать изменения напряжения, внутреннего сопротивления, температуры и других параметров, сопровождающих процесс теплового разгона литий-ионных аккумуляторов, с точки зрения мониторинга и предупреждения для достижения цели снижения потерь.

Цель исследования. Сравнить разные способы мониторинга, предотвращения и защиты от перегрева литий-ионных аккумуляторов, обобщить текущие способы предоставления безопасности при тепловом разгоне литий-ионных аккумуляторов и объединить знания, связанные с термическим перегревом.

Материалы и методы исследования. Для определения рабочих параметров литий-ионного аккумулятора в первую очередь контролируются следующие элементы: напряжение аккумулятора, рабочий ток, внутреннее сопротивление и температура окружающей среды. Чтобы определить, происходит ли тепловой разгон во время цикла зарядки и разрядки аккумулятора, можно использовать мониторинг напряжения, температуры и внутреннего сопротивления [8].

Наиболее популярным методом отслеживания состояния литий-ионных аккумуляторов является система управления батареями. Он использует датчики температуры и напряжения,

которые уже включены в устройство, в качестве основных измерительных приборов. Система может измерять температуру поверхности и напряжение на клеммах каждой литий-ионной батареи в режиме реального времени, если установлено достаточное количество датчиков. При обнаружении аномального сигнала может немедленно подать сигнал тревоги [9].

Также разработчики представили многовольтную систему измерения топологии напряжения с чередованием датчиков для точного измерения напряжения на клеммах каждой литий-ионной батареи. Чтобы контролировать аномалии напряжения каждой литий-ионной батареи в последовательном аккумуляторном блоке, метод сначала строит топологию датчика напряжения для резервных литий-ионных батарей, а затем использует умные алгоритмы, схемы управления и точные пороги напряжения. Значение датчика напряжения будет варьироваться если литий-ионный аккумулятор испытывает тепловой разгон в результате перезарядки или чрезмерной разрядки [10]. Если значение датчика напряжения ниже минимального порога, литий-ионный аккумулятор считается переразрядным. В противном случае он считается завышенным.

Идея, лежащая в основе датчиков температуры, заключается в том, чтобы использовать сигналы напряжения для мониторинга температурных сигналов. Термисторы, термопары, аналоговые датчики температуры и цифровые датчики температуры являются примерами распространенных датчиков температуры. Однако для всех этих типов датчиков температуры характерны одни и те же недостатки: низкая точность обнаружения и чувствительность к изменениям окружающей среды [11].

На данный момент наиболее распространенным методом контроля температуры батареи является установка термопар на поверхности батареи, при этом три или более термопары устанавливаются сверху, посередине и снизу батареи соответственно. Согласно результатам исследований на данный момент, трех термопар достаточно, чтобы отразить реальную температуру поверхности батареи. Однако внутренняя температура аккумулятора больше соответствует реальному состоянию аккумулятора [4]. Обычно считается, что температура батареи довольно равномерна, когда она работает нормально; тем не менее, в случае отказа батареи или находящегося поблизости источника тепла, который приводит к быстрому нагреву батареи, разница между поверхностной и внутренней температурой батареи может достигать 40–50 °С.

Литий-ионные аккумуляторы могут испытывать тепловой разгон, который характеризуется непосредственно значительным повышением внутренней температуры и косвенно повышением температуры поверхности. Термический разгон вызывается деградацией внутренней микроструктуры и рядом побочных реакций.

Закон тепловыделения литий-ионных аккумуляторов был исследован с помощью тестирования цикла заряда/разряда на 18650 литий-ионных аккумуляторах при различных умножителях и термопарного мониторинга температуры поверхности аккумулятора в режиме реального времени. Емкость батареи начала ухудшаться, когда температура батареи достигла 55 °С и тенденция повышения температуры была медленнее с 55 до 80 °С, особенно на стадии 70–80 °С согласно анализу результатов испытаний. Наконец, было принято решение о трехступенчатой системе предупреждения с температурой предупреждения первого уровня 55 °С, температурой предупреждения второго уровня 70 °С и температурой предупреждения третьего уровня 80 °С. Внутренняя температура батареи фактически близка к 100 °С, когда температура поверхности составляет 80 °С, после чего покрытие SEI начинает разлагаться [8]. Когда постоянно накапливается больше тепла, риск теплового разгона батареи значительно возрастает.

Однако самая большая проблема с использованием температуры в качестве параметра раннего предупреждения заключается в том, что измерение внутренней и внешней температуры батареи термопарой или датчиком температуры имеет определенную погрешность, что приведет к тепловому разгону батареи до установленной температуры предупреждения и в конечном итоге приведет к отказу раннего предупреждения.

Чтобы контролировать температуру батареи, разработчики представили резистивный датчик температуры (RTD), который был установлен на монетных батарейках CR2032, как показано на рисунке 1. Результаты показали, что температура, измеренная таким образом, была в среднем на 5,8 °C выше, чем у внешнего RTD, со скоростью обнаружения, которая была почти в десять раз выше, предотвращая тепловые разгоны, не мешая работе LIB [10]. Перспективные методы мониторинга температуры должны быть более точными, чтобы повысить вероятность успеха предупреждений о тепловом разгоне.

В своем исследовании раннего предупреждения батареи ученые обнаружили, что температура поверхности тройной литиевой батареи составляет всего 56.3 °C, когда она деформируется и загорается, что указывает на то, что температура не является подходящей основой для обнаружения возгорания в литий-ионных батареях и что требуется более эффективный метод отслеживания фактической температуры батареи [8-11].

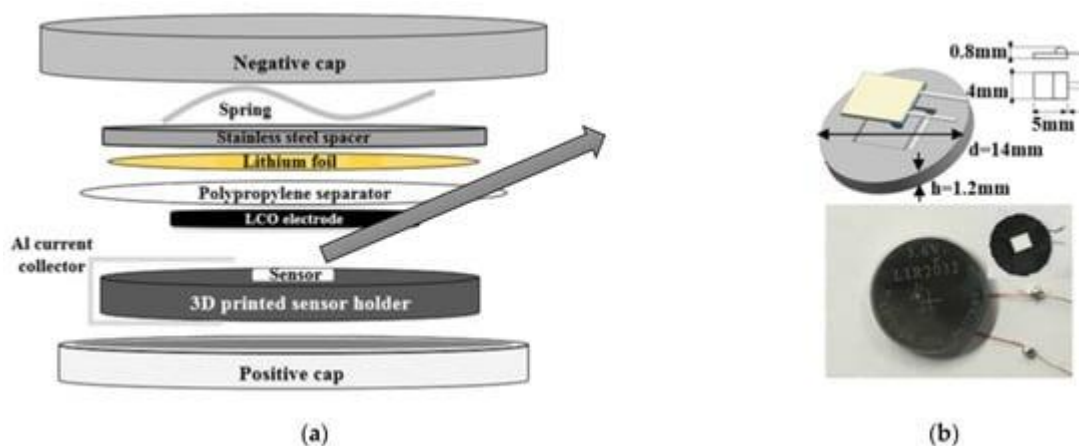


Рисунок - 1 (а) Схема настраиваемой встроенной ячейки LIB для монет RTD; (б) Прокладка из полимолочной кислоты со встроенным RTD и ячейка CR2032 с внутренним RTD

Твердые электролиты обладают такими преимуществами, как невоспламеняемость, минимальная утечка и длительный срок службы по сравнению с жидкими электролитами, что значительно повышает безопасность литий-ионных аккумуляторов. Новая трехмерная каркасная структура демонстрирует невероятно высокую литий-ионную проводимость $12 \text{ мС см}^{-1} \text{ мС см}^{-1}$ при температуре окружающей среды [11]. Ее проводимость превосходит проводимость жидких органических электролитов и является самой большой из когда-либо зарегистрированных для твердого электролита. Этот новый твердотельный аккумуляторный электролит стабилен, не летуч, не взрывоопасен и обладает отличными электрохимическими характеристиками, такими как высокая проводимость. Его также легко формовать и интегрировать во время производства.

Основным недостатком цельнотвердого полимерного электролита без жидкого компонента является его низкая ионная проводимость при температуре окружающей среды. Самым простым и практичным методом повышения проводимости полимерных электролитов является использование в качестве пластификаторов органических растворителей не водной фазы. Электролиты гелевого полимера являются конечным результатом этого перехода от традиционных жидких электролитов к промежуточным продуктам полностью твердого электролита.

Однако высокая кристаллизация приводит к низкой ионной проводимости при комнатной температуре, что ухудшает стабильность электрохимических характеристик и сокращает срок службы элемента. Гелевые полимерные электролиты, которые являются токовым переходом к полностью твердым электролитам, сохраняют двойные преимущества жидких электролитов и всех твердых электролитов, такие как высокая ионная проводимость

и хорошая термическая стабильность. Тем не менее, есть еще много факторов, которые необходимо учитывать, включая совместимость электролитов, механическую прочность полимерной матрицы и срок службы.

В дополнение к разделению катода и анода батареи для предотвращения короткого замыкания при контакте с двумя полюсами, сепаратор служит каналом для ионов лития из электролита, одного из важнейших элементов литий-ионного аккумулятора. Целостность литий-ионных аккумуляторов в процессе эксплуатации может быть обеспечена их хорошими химическими характеристиками и механической прочностью, что также помогает предотвратить самовозгорание, что оказывает существенное влияние на безопасность литий-ионных аккумуляторов [5].

В настоящее время полиолефиновый сепаратор, который можно разделить на полиэтиленовые (ПЭ) и полипропиленовые (ПП) микропористые пленки на основе основного материала, является отраслевым стандартом для сепараторов литий-ионных аккумуляторов. Он популярен благодаря невысокой стоимости, хорошим механическим свойствам и электрохимической стабильности. С разработкой новых электромобилей выдвигаются более высокие стандарты для литиевых батарей с полной мощностью, включая устойчивость к высоким температурам, высокую однородность размера пор и высокую скорость разряда. Из-за своей стойкости к высоким температурам, влажности электролита, стойкости к проколам и недостаточной стойкости к окислению существующие полиолефиновые сепараторы из полипропилена/полиэтилена представляют серьезную угрозу безопасности и не могут использоваться в силовых батареях. В настоящее время существует множество методов повышения безопасности сепараторов, которые заключаются в высокой производительности полиолефинового сепаратора, модификации поверхности полиолефинового сепаратора.

Если внести соответствующие изменения в электрод, важнейший компонент литий-ионных аккумуляторов, риск теплового разгона может быть снижен. Одной из основных причин теплового разгона в литий-ионных батареях является дополнительный кислород, образующийся во время катодной реакции. Одной из основных причин деформации сепаратора являются дендриты лития, которые образуются при скоплении частиц лития на поверхности анода.

Поэтому для повышения температуры пиролиза нужно эффективно легировать катодный материал на атомном уровне, чтобы повысить термическую стабильность катода. Нанесение защитного покрытия на поверхность катода является популярным методом, который может успешно предотвратить прямой контакт материала катода с электролитом, тем самым сводя к минимуму побочные реакции, выделяющие тепло. Кроме того, безопасность катода может быть значительно повышена путем замены материалов электрода.

Неравномерное распределение анодного тока, вызванное нестабильностью и неоднородностью, является наиболее фундаментальной причиной образования дендритов лития на поверхности анода с точки зрения свойств материала. Образование дендрита лития может быть уменьшено путем усиления катодных материалов, таких как материалы на основе кремния и графит-углеродные материалы, или путем нанесения защитного покрытия на поверхность анода. Неравномерное распределение анодного тока вблизи анода приводит к тому, что ионы лития превращаются в частицы лития и осаждаются на поверхности анода для создания литиевых дендритов при неправильном использовании литий-ионных батарей, например, из-за перезарядки или чрезмерной разрядки. Наиболее типичным средством является добавление добавок электролита для стабилизации контакта между анодом и электролитом, чтобы предотвратить рост дендритов лития, вызванный неравномерным производством SEI [8].

Улучшенная конструкция охлаждения для эффективного рассеивания тепла и изоляции всех окружающих ячеек от распространения тепла является лишь одним из примеров решения для защиты на системном уровне. Ускоряя охлаждение литий-ионного аккумулятора воздухом, жидкостями и материалами с фазовым переходом, эффективное рассеивание тепла

может снизить тяжесть теплового разгона. Препятствуя пути передачи тепла окружающим здоровым клеткам, изоляция теплового распространения может остановить процесс теплового разгона и предотвратить эффект домино или цепную реакцию.

Технология мониторинга литий-ионных аккумуляторов в настоящее время развивается и набирает популярность. Настройка системы мониторинга и сигнализации является одним из наиболее популярных способов получения предупреждения о тепловом разгоне. Система мониторинга и предупреждения о тепловом разгоне на основе ПЛК в основном используется в электромобилях. Данная технология может отслеживать изменение внутренней температуры одной ячейки и устанавливать $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ в качестве сигнала тревоги для теплового разгона. Система может оценить ситуацию и подать сигнал тревоги, если заметит, что внутренняя температура аккумуляторной батареи достигла $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]. Кроме того, технология может предсказать, когда произойдет тепловой разгон, в зависимости от того, как быстро нагревается аккумуляторная батарея.

Технологии охлаждения аккумуляторов включают технологию воздушного охлаждения, технологию жидкостного охлаждения и технологию охлаждения материала с фазовым переходом. Исследования в области управления тепловым режимом с использованием газовых сред в настоящее время в основном сосредоточены на организации ячеек, канале потока газа, направлении потока газа, скорости газа и различных методах оптимизации.

Система управления тепловым режимом батареи Z-типа получена с использованием конической конструкции впускного и выпускного каналов и аналитического дизайна метода экспериментов. Это привело к разработке модулей проточных аккумуляторных батарей Z-типа с улучшенными тепловыми характеристиками. Регулируемая гибкость управления тепловым режимом батареи существенно повышается за счет установки регулирующего клапана на выходе, который можно использовать для изменения степени открытия двух выпускных отверстий при различных условиях эксплуатации.

В опубликованном документе «Литий-ионные аккумуляторы для хранения энергии» GB/T 124 [2018] четко изложены требования и методики испытаний для теплового разгона литий-ионных аккумуляторов в ответ на риск этого возникновения. Поскольку технология блокировки может предотвратить диффузию тепла и высокотемпературных материалов во время теплового разгона, жизненно важно создать технологию подавления распространения теплового разгона для литий-ионных аккумуляторов, что уменьшит развитие событий теплового разгона. Распространение теплового разгона в аккумуляторном модуле в основном вызвано процессом теплопередачи в аккумуляторной батарее. Существует *недостаток* исследований по использованию барьеров для предотвращения распространения теплового разгона и не разработан надежный метод для выбора барьеров.

Результаты исследования и их обсуждение. Используемые в настоящее время системы контроля и предупреждения о тепловом разгоне литий-ионных аккумуляторов основаны на отслеживании конкретных характерных сигналов дефектов, таких как напряжение на клеммах, температура, внутреннее сопротивление и т. д. Повышение точности датчиков напряжения и датчиков температуры может повысить точность обнаружения теплового разгона для внешних методов мониторинга, таких как контроль напряжения на клеммах и температуры поверхности. Кроме того, архитектура матрицы датчиков может быть улучшена как с аппаратной, так и с программной точки зрения, чтобы получить наилучший интеллектуальный мониторинг с наименьшим количеством датчиков, что также экономит расходы. Методы предупреждения о внутреннем состоянии могут быть объединены для создания более точной модели предупреждения о тепловом разгоне для литий-ионных аккумуляторов, а разрешение обнаружения и устойчивость встроенных датчиков к высоким температурам могут быть улучшены одновременно.

Чтобы предотвратить жертвы и материальный ущерб, литий-ионные аккумуляторы должны контролироваться на предмет теплового разгона и получать раннее предупреждение. Чтобы остановить или замедлить распространение теплового разгона после того, как он

произошел, требуются некоторые действия. Изучение эволюции и механизма теплового разгона в последнее время стало более глубоким, но все еще существует множество проблем с системами мониторинга и предупреждения для литий-ионных аккумуляторов. Чтобы эффективно избежать развития пожара, три метода технологии внешней защиты могут быть объединены и использованы при тепловом разгоне. Во-первых, используя технологию управления батареями для обнаружения сигнала раннего предупреждения системы, можно определить точное место, где происходит аномалия. Во-вторых, может быть полезным использование технологии блокировки для удержания количества модулей теплового разгона в определенном диапазоне. Затем эти модули охлаждаются с помощью воздушного охлаждения, жидкостного охлаждения или технологии охлаждения материала с фазовым переходом, которая может успешно предотвратить пожары и обеспечить безопасную реакцию теплового разгона. Наконец, можно потушить пожар и свести к минимуму ущерб, комбинируя различные методы пожаротушения с различными сценариями применения, если все другие меры по предотвращению и контролю в последней мере не увенчались успехом, а батарея все еще испытывает тепловой разгон.

Наиболее важным вопросом является повышение безопасности самой батареи в дополнение к вышеупомянутым методам мониторинга, предупреждения и защиты. Высокая ионная проводимость, пригодность для большинства анодных и катодных материалов, высокая растворимость в солях лития, стабильные электрохимические характеристики, низкая токсичность и защита окружающей среды — все это характеристики высококачественного электролита для литий-ионных аккумуляторов. Современные методы модификации электролита все еще имеют ряд недостатков, и большинство из них не может одновременно удовлетворять перечисленным выше требованиям. Хотя все еще есть некоторые проблемы, гелевый полимерный электролит, усиленный твердыми электролитами, сохраняет преимущества как жидких, так и твердых электролитов и имеет многообещающее будущее. Существующие коммерческие сепараторы недостаточно прочны с механической точки зрения, чтобы выдерживать жесткие столкновения. Поэтому следует активно разрабатывать новые высокопрочные сепараторы, устойчивые к высоким температурам, с целью удовлетворения основных требований к производительности батареи. Нынешняя производительность сепаратора, а также технологии модификации для получения желаемых высоких механических качеств и термической стабильности дают такую возможность. Оптимальный сепаратор имеет решающее значение для плотности энергии, удельной мощности, срока службы и безопасности батареи. Для обеспечения безопасности аккумулятора необходимо глубокое понимание основных свойств сепаратора, механизмов отказа и других факторов. В то же время активно разрабатываются новые альтернативные материалы интеллектуального сепаратора, методы обнаружения отказов и другие передовые технологии для решения текущей проблемы механического и термического отказа сепаратора и повышения безопасности аккумуляторов. Что касается электрода, ключевым направлением будущих исследований является поиск катодной батареи, которая будет более термостойкой и лучше способна предотвращать рост дендритов лития.

Выводы. Повышение температуры в литий-ионных аккумуляторах всегда было основной проблемой для разработчиков. Для большинства литий-ионных аккумуляторов предельная температура в режиме заряда установлена – 45 °С, а в режиме разряда – 60 °С. Эти границы можно сдвинуть немного вверх, но ценой будет уменьшение срока службы аккумуляторов. А в худшем случае это может привести к повреждению, или даже воспламенению элементов аккумулятора. Для уменьшения разогрева самих аккумуляторов, разработчики соединяют в батарею несколько элементов параллельно, снижая, таким образом, ток через каждый элемент. Но это порождает и проблему, связанную с разбросом параметров элементов, из-за чего ток может течь из одного элемента в другой. Проблема решается установкой в батарею дополнительных РТС термисторов, что усложняет и удорожает аккумулятор. Литий-ионные аккумуляторы становятся все мощнее и занимают ниши, в

которых раньше доминировали свинцовые и никелевые аккумуляторы. Это требует все более серьезного отношения разработчиков аккумуляторов к вопросам выделения тепла. Следствием игнорирования этих вопросов будет, как минимум, плохая батарея, а в худшем случае, небезопасное и ненадежное аккумуляторное устройство.

Список использованной литературы:

1. *Борисевич А.В.* Моделирование литийионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния. Современная техника и технологии, 2014. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542>.
2. *Кедринский И.А., Яковлев В.Г.* Li-ионные аккумуляторы. Красноярск: Платина, 2002. 268 с.
3. *Авдеев, Б. А.* Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов / Б. А. Авдеев // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2021. – № 4. – С. 99-113.
4. *Larsson, F.; Anderson, J.; Andersson,.; Mellander B.E.* Thermal modeling of fire propagation from cell to cell and cascade effects of thermal acceleration for lithium-ion battery cells and modules using fire walls. J. Electrochem. Soc. 2016, 163.
5. *Lyubov K.T., Virgi M.B., Rochelot R.E., Svider-Lyons, K.E.* Monitoring of the status of 18650 4S packages with single-point impedance diagnostics. J. Energy Sources 2014, 266.
6. IEC 62133.2-2017; Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acidic electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells and for batteries made from them for use in portable applications - Part 2, Lithium systems. IEC: Geneva, Switzerland, 2017.
7. *Скундин А.М., Ефимов О.Н., Ярмоленко О.В.* Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов. Успехи химии. – 2002 - №71 (4). 378 с.
8. *Spotnitz, R. and Franklin, J.* (2003) Abuse Behavior of High-Power, Lithium-Ion Cells. Journal of Power Sources, 113, 81-100.
9. *Zhang, Y.H.* Investigation of thermal acceleration and chain reaction for lithium-ion batteries. Ship electrum. Technol. 2018, 175.
10. *Schweitzer, B.; Wilke, S.; Khatib, S.; Al-Hallaj, S.* Experimental verification of a 0-D numerical model for thermal transition control systems of phase transition in lithium-ion batteries. J. Energy Sources 2015, 287.
11. *Yamanaka T., Takagishi Yu., Tozuka Yu., Yamaue T.* Modeling lithium ion battery nail penetration tests and quantitative evaluation of the degree of combustion risk. Journal of Power Sources, Volume 416, 15 March 2019, Pages 132-140.

References:

1. *Borisevich A.V.* Modeling of lithium-ion batteries for battery management systems: overview of the current state. Modern equipment and technologies. 2014. No. 5 [Electronic resource]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542>
2. *Kedrinsky I.A., Yakovlev V.G.* Li-ion batteries. Krasnoyarsk, Platinum, 2002. - 268 p.
3. *Avdeyev B. A.* Intellectuāl'nyye energoeffektivnyye sistemy morskikh sudov [Intelligent energy-efficient systems of marine vessels]. Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kerch State Maritime Technological University]. – 2021. – № 4. – P. 99-113.
4. *Larsson, F.; Anderson, J.; Andersson,.; Mellander, B.E.* Thermal modeling of fire propagation from cell to cell and cascade effects of thermal acceleration for lithium-ion battery cells and modules using fire walls. J. Electrochem. Soc. 2016, 163.
5. *Lyubov, K.T.; Virgi, M.B.; Rochelot, R.E.; Svider-Lyons, K.E.* Monitoring of the status of 18650 4S packages with single-point impedance diagnostics. J. Energy Sources 2014, 266.

6. IEC 62133.2-2017; Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acidic electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells and for batteries made from them for use in portable applications - Part 2, Lithium systems. IEC: Geneva, Switzerland, 2017.
7. Skundin A.M., The current state and prospects for the development of lithium battery research / A.M. Skundin, O.N. Efimov, O.V. Yarmolenko // Advances in chemistry. - 2002 - No.71 (4) p.378.
8. Spotnitz, R. and Franklin, J. (2003) Abuse Behavior of High-Power, Lithium-Ion Cells. Journal of Power Sources, 113, 81-100.
9. Zhang, Y.H. Investigation of thermal acceleration and chain reaction for lithium-ion batteries. Ship electrum. Technol. 2018, 175.
10. Schweitzer, B.; Wilke, S.; Khatib, S.; Al-Hallaj, S. Experimental verification of a 0-D numerical model for thermal transition control systems of phase transition in lithium-ion batteries. J. Energy Sources 2015, 287.
11. Yamanaka T., Takagishi Yu., Tozuka Yu., Yamaue T. Modeling lithium ion battery nail penetration tests and quantitative evaluation of the degree of combustion risk. Journal of Power Sources, Volume 416, 15 March 2019, Pages 132-140.

Сведения об авторах / Information about authors

Келлер Максим Владимирович	курсант 5-го курса направления подготовки «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 maksim.keller.02@mail.ru
Keller Maksim Vladimirovich	cadet of the 5nd year of the training direction “Operation of ship electrical equipment and automation equipment” Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 maksim.keller.02@mail.ru
Савенко Александр Евгеньевич	кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики», Керченский государственный морской технологический университет, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 Savenko-70@mail.ru
Savenko Alexandr Evgenyevich	candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department “Operation of ship electrical equipment and automation equipment”, Kerch State Maritime Technological University, 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 Savenko-70@mail.ru

УДК 621.317.35-111

И.Л. Титов

ИЗУЧЕНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА ОТ ЗУБЦОВ СТАТОРА К КОЛЬЦАМ РОТОРА В ГЕНЕРАТОРЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (АГА)

Аннотация. В данной статье мы рассматриваем прохождение магнитного потока, следующего от зубцов статора к кольцам ротора, где данный магнитный постепенно распространяется по всей ширине колец. Нами будет изучено данное явление с помощью формального исчисления. Будет определено, что кольцо расширяется относительно его среднего радиуса, чтобы иметь декартову геометрию для анализа. Также в данной статье нами будет произведен анализ развития магнитной индукции. Цель данного анализа состоит в том, чтобы оценить влияние длины области на величину. Будет произведено моделирование, при помощи которого мы сможем определить в модели четыре зоны: первые три из них будут представлять различные изменения сечения кольца, а четвертая будет представлять вспомогательный воздушный зазор.

Ключевые слова: магнитный поток, формальное исчисление, кольцо ротора, сечение кольца.

I.L. Titov

STUDY OF THE PASSAGE OF THE MAGNETIC FLUX FROM THE STATOR TEETH TO THE ROTOR RINGS IN AN ALTERNATING CURRENT GENERATOR (AGA)

Annotation. In this article, we consider the passage of a magnetic flux following from the teeth of the stator to the rotor rings, where this magnetic flux gradually spreads over the entire width of the rings. We will study this phenomenon using formal calculus. It will be determined that the ring expands relative to its mean radius to have Cartesian geometry for analysis. Also in this article we will analyze the development of magnetic induction. The purpose of this analysis is to evaluate the effect of the length of the region on the magnitude. A simulation will be performed, with the help of which we will be able to determine four zones in the model: the first three of them will represent various changes in the cross-section of the ring, and the fourth will represent an auxiliary air gap.

Keywords: magnetic flux, formal calculus, rotor ring, ring cross section.

Введение. Когда магнитный поток проходит от зубца к кольцам ротора, он постепенно распространяется по всей их ширине. Мы изучаем это явление с помощью формального исчисления. Кольцо расширяется относительно его среднего радиуса, чтобы иметь декартову геометрию для анализа.

Целью исследования является изучение влияния магнитного потока в зависимости от ширины кольца генераторного агрегата и воздушного зазора.

Материалами и методами исследования является моделирования индукционных процессов, проведение формульных расчетов, а также построения графиков зависимости.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 1 показан перспективный вид кольца и его модель, эквивалентная среднему радиусу.

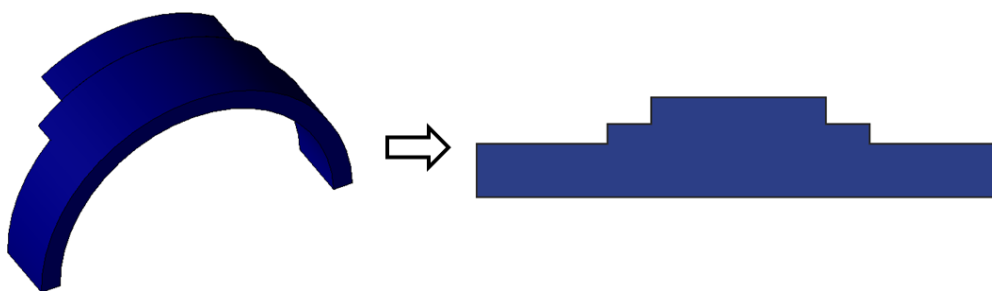


Рисунок 1 – Расширение кольца на уровне его среднего радиуса

Мы определили в модели четыре зоны: первые три представляют различные изменения сечения кольца, а четвертая представляет вспомогательный воздушный зазор. Эти области с соответствующими величинами показаны на рисунке 2.

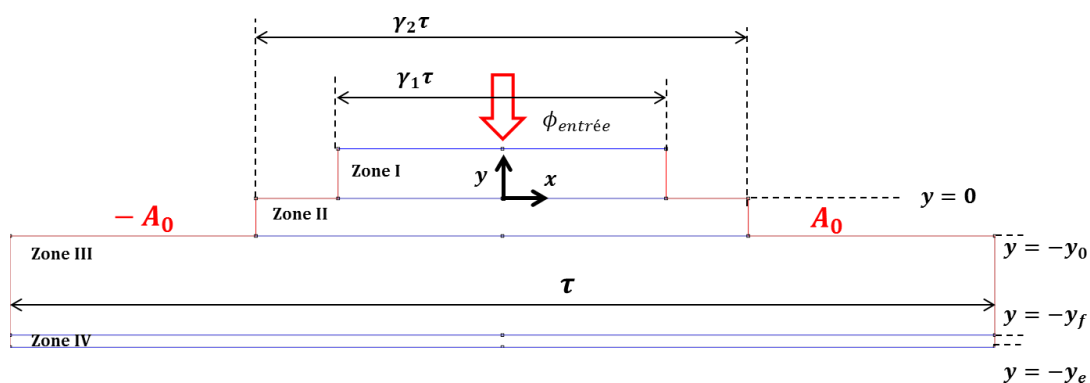


Рисунок 2 – Схема расчета кольца с его геометрическими величинами

Предположим, что для каждой из трех областей кольца постоянную магнитную проницаемость. Это средняя проницаемость, определяемая на основе связанных с индукцией проницаемостей входной и выходной секций каждой зоны [1-3].

На рисунке 2 определена метка, используемая в шаблоне колец. Координата x соответствует окружному направлению в кольцах, а координата y соответствует осевому направлению. В каждой из областей составляющая потенциала магнитного вектора в направлении, перпендикулярном этой точке ΔA_z , следует следующему уравнению Лапласа:

$$\Delta A_z = 0 \quad (1)$$

Потенциал на каждой области обозначается индексами I, II, III, IV в соответствии с рисунком 2. Векторный потенциал определяется от координаты $x = 0$ до конечной координаты x кольца, поскольку существует симметрия относительно оси y . Уравнение Лапласа допускает решения следующего вида для каждой из областей.

Зона I: Для $y > 0$

$$A_I(x, y) = \frac{2A_0}{\gamma_1 \tau} x + \sum_1^H \left(B_h e^{\frac{2\pi}{\gamma_1 \tau} h y} \right) * \sin \left(\frac{2\pi}{\gamma_1 \tau} h x \right) \quad (2)$$

Зона II: Для $y \in [-y_0, 0]$

$$A_{II}(x, y) = \frac{2A_0}{\gamma_1 \tau} x + \sum_1^I \left(C_i e^{\frac{2\pi}{\gamma_2 \tau} i y} + D_i e^{-\frac{2\pi}{\gamma_2 \tau} i y} \right) * \sin \left(\frac{2\pi}{\gamma_2 \tau} i x \right) \quad (3)$$

Зона III: Для $y \in [-y_f, -y_0]$

$$A_{III}(x, y) = \frac{2A_0}{\tau} x + \sum_1^J \left(E_j e^{\frac{2\pi}{\tau} j y} + F_j e^{-\frac{2\pi}{\tau} j y} \right) * \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} j x \right) \quad (4)$$

Зона IV: для $y \in [-y_e, -y_f]$

$$A_{IV}(x, y) = \frac{2A_0}{\tau} x + \sum_1^K \left(G_k e^{\frac{2\pi}{\tau} k y} + H_k e^{-\frac{2\pi}{\tau} k y} \right) * \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} k x \right) \quad (5)$$

где: A_0 : значение векторного потенциала, используемое для наложения потока ϕ_{ent} в кольце

$$A_0 = \frac{\phi_{ent}}{2*(R_{ext}^{ann} - R_{int}^{ann})}, \quad (6)$$

где R_{ext}^{ann} - внешний радиус кольца, R_{int}^{ann} - внутренний радиус.

$\gamma_1 r$: длина окружности зоны I, $\gamma_2 r$ длина окружности зоны II и r длина окружности зон III и IV.

Bh: Коэффициенты Фурье порядка h определить, для зоны I, **Ci** и

Di коэффициентов для зоны II, **Ej** и **Fj** коэффициентов для зоны III, и **k G** и

k H коэффициентов для зоны IV.

Выражение (2) требует определения на одну константу меньше, чем другие выражения. Мы выбрали другое определение для этого векторного потенциала, чтобы гармонический член был равен нулю при увеличении хордовой y .

Все (7) гармонических коэффициентов могут быть определены с помощью условий, установленных на границах раздела каждой зоны [4 – 6]. Этими условиями являются непрерывность векторного потенциала и непрерывность тангенциальной составляющей (в направлении x) магнитного поля Hx . Непрерывность Hx на границах раздела зависит от относительной магнитной проницаемости каждой области.

Применяются условия на интерфейсах:

- Зоны сопряжения I-II: $y=0$

непрерывность векторного потенциала A :

$$A_{II}(x, 0) = \begin{cases} A_I(x, 0) & \text{для } x \in [0, \gamma_1 \tau] \\ A_0 & \text{для } x \in [\gamma_1 \tau, \gamma_2 \tau] \end{cases} \quad (7)$$

Непрерывность тангенциальной составляющей магнитного поля Hx :

$$\frac{1}{\mu_{rI}} \frac{\partial A_I(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{1}{\mu_{rII}} \frac{\partial A_{II}(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad \text{для } x \in [0, \gamma_1 \tau] \quad (8)$$

- Зоны сопряжения II-III: $y=-y_0$

непрерывность векторного потенциала A :

$$A_{III}(x, -y_0) = \begin{cases} A_{II}(x, -y_0) & \text{для } x \in [0, \gamma_2 \tau] \\ A_0 & \text{для } x \in [\gamma_2 \tau, \tau] \end{cases} \quad (9)$$

непрерывность тангенциальной составляющей магнитного поля Hx :

$$\frac{1}{\mu_{rII}} \frac{\partial A_{II}(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=-y_0} = \frac{1}{\mu_{rIII}} \frac{\partial A_{III}(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=-y_0} \quad \text{для } x \in [0, \gamma_2 \tau] \quad (10)$$

- Интерфейсы зон III-IV: $y=-y_f$

непрерывность векторного потенциала A :

$$A_{III}(x, -y_f) = A_{IV}(x, -y_f) \quad \text{для } x \in [0, \tau] \quad (11)$$

непрерывность тангенциальной составляющей магнитного поля Hx :

$$\frac{1}{\mu_{rIII}} \frac{\partial A_{III}(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=-y_f} = \frac{1}{\mu_{rIV}} \frac{\partial A_{IV}(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=-y_f} \quad \text{для } x \in [0, \tau] \quad (12)$$

Последнее уравнение для завершения системы получается путем наложения условия Неймана $Hx = 0$ на границе раздела $y = -y_e$ домена:

$$\frac{\partial A_{IV}(x, y)}{\partial y} \Big|_{y=-y_e} \quad \text{для } x \in [0, \tau] \quad (13)$$

В конце концов мы приходим к линейной системе уравнений, чтобы получить значение коэффициентов рядов Фурье. Чтобы проверить эти выражения, граничные условия представлены на интерфейсах аналитической модели и Кольцевой модели конечных элементов (которая имеет одинаковые вычислительные допущения) [7-8].

Мы можем наблюдать, что результаты на границах раздела между двумя зонами, соответствуют установленным условиям (рис.3). Эти результаты согласуются с моделью конечных элементов. Мы можем заметить, что существуют отклонения в Hx при приближении к изменениям сечения колец, связанным с границами раздела I-II и II-III. Эти изменения можно различить в поле Hx , а не в векторном потенциале, потому что эта величина более

чувствительна к изменениям, поскольку зависит от производной векторного потенциала. В конце концов, условие Неймана для зоны IV выполняется хорошо.

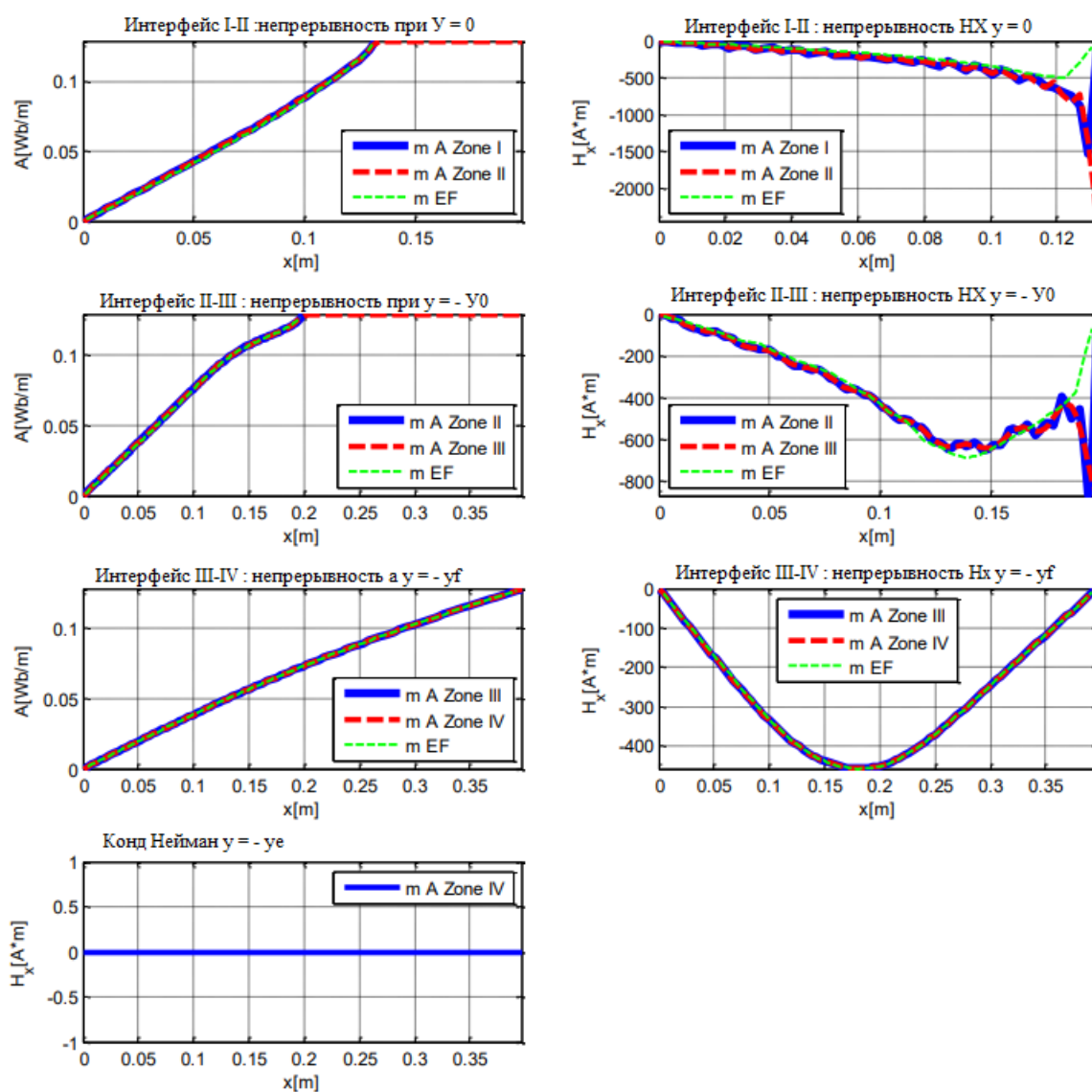


Рисунок 3 – Граничные условия на границах раздела для кольцевой аналитической модели и сравнение с методом конечных элементов

На следующем рисунке показаны полевые линии для модели конечных элементов (а) и аналитической модели кольца (б) (рис.4).

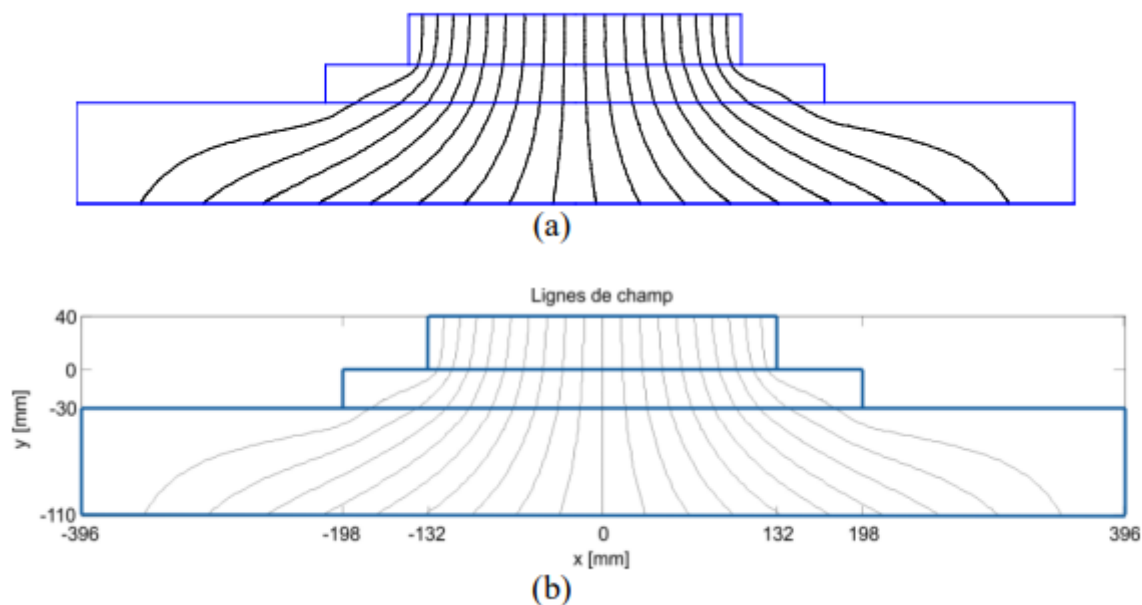


Рисунок 4 – Полевые линии в кольце для модели конечных элементов (а) и для аналитической модели (б)

На рисунке видна хорошая согласованность аналитической модели и 2-D модели конечных элементов (рис.4). Потребление ампер-оборотов в аналитической модели рассчитывается по индукции в соответствии с направлением y в зонах II и III. Зона I не включена, поскольку ее потребляемая мощность в ампер-оборотах определяется в модели соединительной детали. Даже для зоны IV, который представляет собой воздушный вспомогательный, она учитывается в модели зазоры вспомогательные. В расчете методом конечных элементов с точки зрения эволюции составляющей магнитной индукции $B_y(0, y)$ в зависимости от координаты y в середину кольца $x = 0$. Этот компонент $B_y(0, y)$ показана для зон II и III районах, где потребление ампер-оборотов исчисляется.

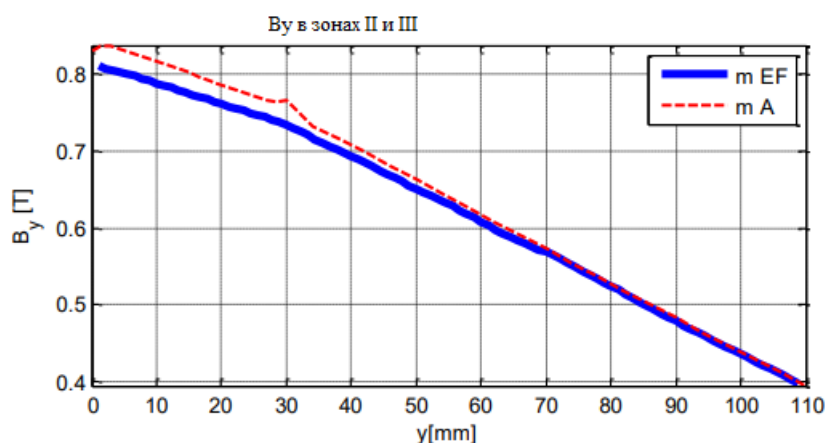


Рисунок 5 – Развитие индукции $B_y(x,0)$ во II и III кольцевых областях

Мы можем заметить, что индукция $B_y(0, y)$ в обеих моделях близка, несмотря на начальное отклонение (рис.5). Неравномерность, которая проявляется в индукции, полученной в результате аналитической модели при $y=30\text{mm}$, возникает из-за прохождения границы раздела между зонами.

Потребляемая мощность может быть получена путем интегрирования компонента в соответствии с направлением y магнитного поля H_y во II и III областях для координаты $x=0$:

Зона II: Для $y \in [-y_0, 0]$

$$At_{II} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{rII}} \int_0^{-y_0} - \left. \frac{\partial A_{II}(x,y)}{\partial x} \right|_{x=0} dy = \frac{1}{\mu_0 \mu_{rII}} \left[\frac{2A_0}{\gamma_2 \tau} y_0 + \sum_l^1 (C_l \left(1 - e^{\frac{2\pi}{\gamma_2 \tau} i y_0} \right) + D_l \left(e^{\frac{2\pi}{\gamma_2 \tau} i y_0} 01 \right)) \right] \quad (14)$$

Зона III: Для $y \in [-y_f, -y_0]$

$$At_{III} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{rIII}} \left[\frac{2A_0}{\tau} (y_f - y_0) + \sum_l^1 \left(E_j \left(e^{\frac{2\pi}{\tau} i y_0} - e^{\frac{2\pi}{\tau} i y_f} \right) + F_j \left(e^{\frac{2\pi}{\tau} j y_f} - e^{\frac{2\pi}{\tau} j y_0} \right) \right) \right] \quad (15)$$

Таким образом, общее потребление ампер-оборотов в кольце представляет собой сумму выражений областей II и III (уравнения 14 и 15). Поскольку два кольца в машине имеют разную геометрию, необходимо применить эту модель для каждого кольца, чтобы найти члены A_{text} и A_{int} уравнения.

Анализ эволюции индукции B_y в кольце

Рассмотрим анализом развития магнитной индукции в направлении y , компонента $B_y(x,y)$ в зоне III [9 – 11]. Цель состоит в том, чтобы оценить влияние длины этой области на величину $B_y(x,y)$. Напомним, что это направление соответствует осевому направлению 3D-модели. Для этой цели создается случай, когда общая длина зоны III равна 400mm . На рисунке 6 показана индукция $B_y(x,y^*)$ для нескольких значений y^* : $y^* = 100\text{mm}$, $y^* = 200\text{mm}$, $y^* = 300\text{mm}$, $y^* = 400\text{mm}$ в зависимости от координаты x (Окружная координата)(рис.6).

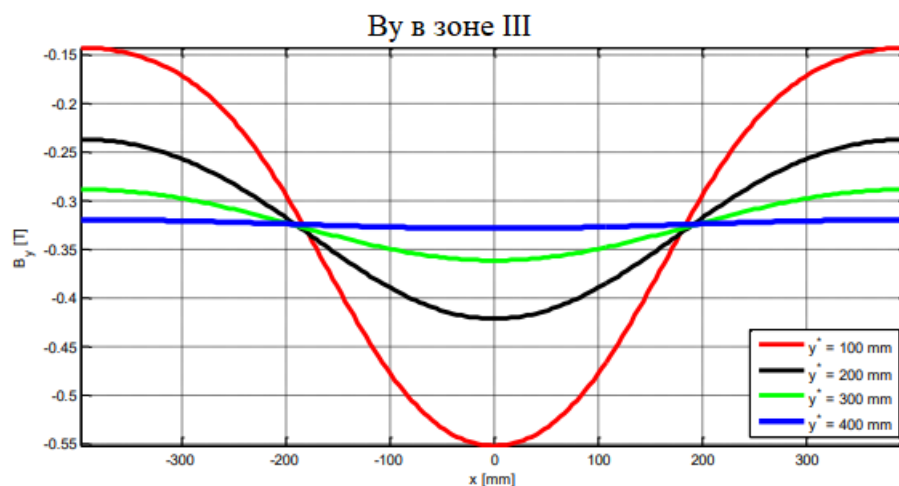


Рисунок 6 – Развитие индукции $B_y(x,y^*)$ в области III как функция x

Когда $y^* = 400\text{mm}$, магнитная индукция почти постоянна относительно координат, потому что гармонические члены уравнения 4 ослаблены для значений в y -координате, близких к длине окружности r , как и в случае с этим значением y^* . Для других значений y^* индукция не является постоянной в соответствии с x . Например, для $y^* = 100\text{mm}$ минимальное значение индукции на 70% ниже ее среднего значения.

Вывод. в данной статье мы рассмотрели прохождение магнитного потока, следующего от зубцов статора к кольцам ротора, где данный магнитный постепенно распространяется по всей ширине колец. Было изучено данное явление с помощью формального исчисления. Мы определили, что кольцо расширяется относительно его среднего радиуса, чтобы иметь декартову геометрию для анализа. Также в данной статье мы произвели анализ развития магнитной индукции. Цель данного анализа состоит в том, чтобы оценить влияние длины области на величину. Произведено моделирование, при помощи которого мы определили в модели четыре зоны: первые три из представляют различные изменения сечения кольца, а четвертая представляет вспомогательный воздушный зазор.

Также мы выяснили, чтобы ограничить зазор в осевом направлении машины, длина кольца должна быть меньше длины, при которой поток является однородным. Это имеет два последствия:

- магнитный поток неоднороден в кольцах, вспомогательных воздушных зазорах и опорной части. Это может привести к потерям в опорной детали, поскольку она будет подвергаться переменному магнитному потоку.

- с точки зрения моделирования мы предполагаем в аналитической модели вспомогательных воздушных зазоров, что магнитная индукция в этих воздушных зазорах постоянна в окружном направлении. Это неверно из-за изменений сечения колец. Кроме того, утечки между кольцами больше не будут постоянными в окружном направлении. Следовательно, это явление будет иметь тенденцию увеличивать расхождения между аналитической моделью и моделью 3D-цифровых вычислений.

Список использованной литературы:

1. *Ю. Ван И З. Дэн*, Гибридные топологии возбуждения и стратегии управления статорными машинами с постоянными магнитами для систем питания постоянного тока. Труды IEEE по промышленной электронике том 59, № 12, стр. 4601-4616, декабрь 2012.
2. *А. Тессароло*, Моделирование и анализ синхронных реактивных машин с круговыми барьерами потока посредством конформного отображения. IEEE Transactions on Magnetics, том 51, № 4, стр. 1-11, апрель 2015.
3. *Г. Нейдхофер*, Эволюция синхронной машины. Журнал инженерных наук и образования, том 1, № 5, стр. 239-248, октябрь 1992.
4. *О. Малоберти и др.*, 3-D–2-D динамическое магнитное моделирование двигателя с постоянным магнитом с осевым потоком с мягкими магнитными композитами для гибридных электромобилей. IEEE Transactions on Magnetics, том 50, № 6, стр. 1-11, июнь 2014.
5. *Сахаров В.В., Чертков А.А., Сабуров С.В.* Предиктивное апериодическое управление динамическими объектами на водном транспорте с использованием математического программирования. // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2016. № 5 (39). С. 206-214.
6. *Д. К. Людуа, Дж. К. Рид и К. Хансон*, Емкостная передача мощности для тока возбуждения ротора в синхронных машинах. IEEE Transactions on Power Electronics, том 27, № 11, стр. 4638-4645, ноябрь 2012.
7. *Й. Колемайнен*, Синхронный реактивный двигатель с ротором, заблокированным формой. IEEE Transactions on Energy Conversion, том 25, № 2, стр. 450-456, июнь 2010.
8. *А. М. Найт, Р. Э. Бетц и Д. Г. Доррелл*, Проектирование и анализ бесщеточных реактивных машин с двойным питанием. IEEE Transactions on Industry Applications, том 49, № 1, стр. 50-58, январь- февраль 2013.
9. *А. Г. Джек и др.*, Машины с постоянными магнитами с сердечниками из порошкового железа и предварительно спрессованными обмотками. IEEE Transactions on Industry Applications, том 36, № 4, стр. 1077-1084, июль/август 2000.
10. *П. Чжан, Г. Ю. Сизов, Д. М. Ионель и Н. А. О. Демердаш*, Установление относительных достоинств машин с постоянными магнитами внутреннего и спицевого типа с ферритом или NdFeB путем систематической оптимизации конструкции. IEEE Transactions on Industry Applications, том 51, № 4, стр. 2940-2948, июль-август 2015.
11. *К. Лю, Дж. Чжу, Ю. Ван, Г. Лэй, Ю. Го И Х. Лю*, Недорогой синхронный двигатель на постоянных магнитах с SMC и ферритовым PM. Электрические машины и системы (ICEMS), 17-я международная конференция 2014 года, Ханчжоу, 2014, стр. 397-400.

References:

1. Y. Wang and Z. Deng, Hybrid Excitation Topologies and Control Strategies of Stator Permanent Magnet Machines for DC Power System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 12, pp. 4601-4616, Dec. 2012.
2. A. Tessarolo, Modeling and Analysis of Synchronous Reluctance Machines With Circular Flux Barriers Through Conformal Mapping. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 4, pp. 1-11, April 2015.
3. G. Neidhofer, The evolution of a synchronous machine. *Journal of Engineering Sciences and Education*, Volume 1, No. 5, pp. 239-248, October 1992.
4. O. Maloberti et al., 3-D-2-D dynamic magnetic simulation of a permanent magnet axial flow engine with soft magnetic composites for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 50, No. 6, pp. 1-11, June 2014.
5. Sakharov V.V., Chertkov A.A., Saburov S.V. Prediktivnoe aperiodicheskoe upravlenie dinamicheskimi objektami na vodnom transporte s ispolzovaniem matematicheskogo programirovaniy [Predictive aperiodic control of dynamic objects on water transport using mathematical programming.] // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta moskogo i rechnogo flota im. Admirala S.O. Makarova*. 2016. № 5 (39). S. 206-214. [Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet. 2016.No. 5 (39). pp. 206-214.]
6. D. K. Ludua, J. K. Reed and K. Hanson, Capacitive power transmission for rotor excitation current in synchronous machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume 27, No. 11, pp. 4638-4645, November 2012.
7. J. Kolehmainen, Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 450-456, June 2010.
8. A. M. Knight, R. E. Betz and D. G. Dorrell, Design and Analysis of Brushless Doubly Fed Reluctance Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 1, pp. 50-58, Jan.- Feb. 2013.
9. A. G. Jack et al., Permanent-magnet machines with powdered iron cores and prepressed windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 4, pp. 1077-1084, Jul/Aug 2000.
10. P. Zhang, G. Y. Sizov, D. M. Ionel and N. A. O. Demerdash, Establishing the relative merits of machines with permanent magnets of internal and spoke type with ferrite or NdFeB by systematic design optimization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 51, No. 4, pp. 2940-2948, July-August 2015.
11. K. Liu, J. Zhu, Yu Wang, G. Lei, Yu Guo And X. Liu, Inexpensive permanent magnet synchronous motor with SMC and ferrite PM. *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 17th International Conference 2014*, Hangzhou, 2014, pp. 397-400.

Сведения об авторах / Information about authors

Титов	канд. техн. наук, доцент, заместитель декана по организационно-
Иван Леонидович	воспитательной работе
	Керченский государственный морской технологический
	университет
	298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
	vanya-titov-1993@mail.ru
Titov	Ph.D. (Engin.), Associate Professor, Associate dean for organizational
Ivan Leonidovich	and educational work
	Kerch State Maritime Technological University
	298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
	vanya-titov-1993@mail.ru

УДК 629.5.083.4

Богатырева Е.В.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ БАЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СУДОВ

Аннотация. Состояние баз технического обслуживания независимо от назначения, структуры и производственной мощности характеризуется количеством находящихся на них технических средств (обслуживаемых и ожидающих обслуживания) и степенью готовности работ по их восстановлению. Поступление на базы новых и выход полностью обслуженных технических средств, последовательное их перемещение по технологической линии от одного обслуживающего участка к другому приводит к изменению состояния баз. Следовательно, в теоретическом отношении базы обслуживания представляют собой многомерные системы с конечным или неограниченным множеством состояний. Для их математического моделирования можно использовать теорию марковских процессов дискретных и непрерывных во времени. В статье рассмотрены исходные положения этой теории, дана оценка возможности ее использования для баз технического обслуживания судов.

Ключевые слова: база технического обслуживания, восстановление технических средств, математическое моделирование, марковские процессы, вероятность.

Bogatyрева E. V.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING MARKOV PROCESSES IN MATHEMATICAL MODELING OF SHIP MAINTENANCE BASES

Annotation. The condition of the maintenance bases, regardless of the purpose, structure and production capacity, is characterized by the number of technical means located on them (serviced and awaiting maintenance) and the degree of readiness of work to restore them. The arrival of new and leaving of fully serviced technical means from bases, their sequential movement along the technological line from one maintenance site to another leads to a change in the state of the bases. Therefore, theoretically, service bases are multidimensional systems with a finite or unlimited set of states. For their mathematical modeling, one can use the theory of Markov processes discrete and continuous in time. The article considers the initial provisions of this theory, assesses the possibility of its use for ship maintenance bases.

Keywords: maintenance base, restoration of technical means, mathematical modeling, Markov processes, probability.

Введение. В процессе работы базы технического обслуживания судов постоянно принимают, последовательно перемещают по технологической линии и выпускают полностью обслуженные технические средства. Таким образом, состояние баз технического обслуживания постоянно изменяется в процессе их работы независимо от назначения, структуры и производственной мощности и характеризуется количеством находящихся на них технических средств (обслуживаемых и ожидающих обслуживания) и степенью готовности работ по их восстановлению. Следовательно, в теоретическом отношении базы обслуживания представляют собой многомерные системы с множеством состояний. Для их математического моделирования можно использовать теорию марковских процессов дискретных и непрерывных во времени [1-4].

Целью исследования является обзор, анализ и оценка возможности применения марковских процессов при математическом моделировании баз технического обслуживания судов.

Материалы и методы исследования. Теория дискретных и непрерывных во времени марковских процессов с достаточной полнотой и точностью описывает действия основных баз технического обслуживания флота. Аналитические решения получаются удобными для практического применения. Однако есть группа баз технического обслуживания, последовательные переходы которых не обладает марковскими свойствами. Так, марковские свойства не выполняются, если распределение продолжительности восстановительных работ отличается от экспоненциального. Процессы перехода таких баз при достаточно общих предположениях часто все же удается свести специальными методами к марковским процессам. Разработка таких методов составляет одно из важнейших направлений развития теорий массового обслуживания. Широкое распространение получил метод вложенных цепей Маркова, основы которого заложены Кендаллом [5]. Его сущность сводится к выделению, где это возможно, таких моментов времени, по отношению к которым изменения состояний системы могут рассматриваться как марковский процесс. Метод вложенных марковских цепей в сочетании с методом представления неэкспоненциальных распределений суммой последовательных экспоненциальных распределений, превращает теорию марковских процессов в мощный универсальный аппарат аналитического исследования систем массового обслуживания, в том числе баз технического обслуживания флота [6].

Хотя этот метод универсален, его использование для немарковских процессов сопряжено со сложными и трудоемкими вычислениями. Для таких процессов следует искать менее трудоемкие методы и более удобные для практики. Например, в интегральном методе Такича [3] поступающие требования индивидуализируются; прослеживается их путь в системе и вычисляется продолжительность ожидания начала обслуживания.

Результаты исследования и их обсуждение. Процесс перехода системы из одного состояния в другое называется марковским, если предыдущие состояния системы не отражаются на будущем ее поведении. Математическая формулировка марковского процесса может быть описана следующим выражением:

$$p_{ij} = P\{x_{n+1} = j | x_n = i\}.$$

Это означает, что с вероятностью p_{ij} система будет находиться в момент времени $n+1$ в состоянии j , если в момент времени n она находилась в состоянии i . Условная вероятность p_{ij} представляет собой одношаговую вероятность перехода системы из i в j . Процесс перехода будет неоднородным, если условные вероятности зависят от времени, и однородным, – если они не изменяются во времени. В дальнейшем рассмотрим только однородные процессы.

Возможные пошаговые переходы системы из одного состояния в другое полностью определяются заданием условных вероятностей p_{ij} для всех $i, j = 0, 1, 2 \dots$. Совокупность этих вероятностей представляется в виде марковской матрицы $\mathbf{P} = \{p_{ij}\}$, называемой также матрицей вероятностей перехода. Элементы марковской матрицы удовлетворяют условиям $0 \leq p_{ij} \leq 1$ и

$$\sum_{j=0}^{\infty} p_{ij} = 1.$$

Матрица $\mathbf{D} = \mathbf{P} - \mathbf{E}$, где \mathbf{E} – единичная матрица такого же порядка, что и матрица \mathbf{P} , называется динамической.

Рассмотрим многошаговые переходы системы.

Пусть $p_{ij}^{(k)}$ – условная вероятность перехода системы из i в j за k последовательных переходов, а $\mathbf{P}^{(k)}$ – соответствующая матрица вероятностей k -шагового перехода. По определению $p_{ij}^{(1)} = p_{ij}$. По формуле полной вероятности:

$$p_{ij}^{(2)} = \sum_{v=0}^{\infty} p_{iv} p_{vj}.$$

Элемент i -й строки и j -го столбца двухшаговой матрицы получается умножением элементов i -й строки одношаговой матрицы \mathbf{P} на элементы j -го столбца той же матрицы. Следовательно, $\mathbf{P}^{(2)} = \mathbf{P}^2$. По методу математической индукции $\mathbf{P}^{(k)} = \mathbf{P}^k$. Это математическое равенство является частным случаем более общего функционального уравнения Колмогорова-Чэпмена [6, 7] для дискретного времени марковского процесса (формула 1):

$$\mathbf{P}^{(m+k)} = \mathbf{P}^m \cdot \mathbf{P}^k. \quad (1)$$

Дополняем это равенство одностроковой матрицей

$$\mathbf{Q}(0) = \{q_i(0)\},$$

определяющей состояние системы в начальный момент времени, где $q_i(0)$ – вероятность того, что в начальный момент времени система находилась в состоянии $i=0, 1 \dots$. Тогда выражение для абсолютной вероятности нахождения системы в каждом из возможных ее состояний в произвольный момент времени запишется в виде (формула 2):

$$\mathbf{Q}^{(k)} = \mathbf{Q}(0) \cdot \mathbf{P}^k. \quad (2)$$

Возвратное состояние системы называется эргодическим, если оно ненулевое и непериодическое.

Матрица вероятностей перехода, элементы которой обладают эргодическими свойствами, называется эргодической. Согласно теории марковских процессов, если матрица \mathbf{P} эргодическая, то существует предельная матрица $\mathbf{P} = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{P}^{(k)}$, которая является единственной и не зависит от распределения вероятностей в начальный момент времени. Ее элементы определяются выражением (формула 3):

$$\lim_{k \rightarrow \infty} p_{ij}^{(k)} = p_j. \quad (3)$$

При выполнении этого соотношения

$$\lim_{k \rightarrow \infty} q_i^k = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_i q_i(0) p_{ij}^{(k)} = p_j.$$

И предельная одностроковая матрица, определяемая равенством (2), принимает вид (формула 4):

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{Q}^{(k)} = \{p_j\}. \quad (4)$$

Приведенные определения и выражения относятся к дискретным во времени марковским процессам, называемым в отличие от непрерывных во времени марковскими цепями [8-10].

Система со счетным множеством состояний m , переходы которых из одного состояния в другое представляют собой непрерывные во времени марковские процессы, математически описываются уравнениями Колмогорова-Чэпмена. Для однородных процессов перехода они имеют вид (формула 5):

$$P_{ij}(t+h) = \sum_{k=0}^m P_{ik}(t) P_{kj}(h) \quad (5)$$

Эти уравнения определяют вероятность перехода $P_{ij}(t+h)$ системы из i в j в промежутке $t+h$ через вероятности $P_{ik}(t)$ и $P_{kj}(h)$ последовательного ее перехода из i в k и из k в j соответственно на смежных вложенных промежутках t и h .

При составлении математических моделей баз технического обслуживания обычно используются уравнения Колмогорова-Чэпмена, предварительно продифференцированные.

Для этого из обеих частей равенства (5) вычтем $P_{ij}(t)$ и разделим их на h . Перейдя к пределу $h \rightarrow 0$, получим систему прямых дифференциальных уравнений (формула 6):

$$\frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \sum_{k=0}^m P_{ik}(t) \cdot Pa_{kj}, \quad (6)$$

$$a_{kk} = -\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1 - P_{kk}(h)}{h};$$

$$a_{kj} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P_{kj}(h)}{h} \quad (k \neq j).$$

Предельные переходы возможны при относительно слабых ограничениях, т.е. равномерной сходимости во времени выражений, стоящих под знаком предела. Физический смысл пределов состоит в том, что за бесконечно малый промежуток времени h система не претерпит изменений с вероятностью $a_{kkh} + 0(h)$ и перейдет из состояния k в j с вероятностью $a_{kjh} + 0(h)$. Решение системы дифференциальных уравнений должно удовлетворять начальным условиям (формула 7):

$$P_{ij}(0) = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } j = i \\ 0 & \text{при } \neq j, \end{cases} \quad (7)$$

а также условию нормирования (формула 8):

$$\sum_{j=0}^m P_{ij}(t) = 1. \quad (8)$$

Расходящиеся процессы не рассматриваются.

Одновременно с системой прямых уравнений в теории марковских процессов рассматривается сопряженная с ней система обратных дифференциальных уравнений (формула 9):

$$\frac{dP_{ij}(t)}{dt} = \sum_{k=0}^m a_{ik} \cdot P_{kj}(t). \quad (9)$$

Различие систем состоит в направлениях предельных переходов; прямые уравнения получаются при правостороннем, обратные – при левостороннем предельном переходе. Система обратных уравнений также выводится из равенства (5) и решение ее должно удовлетворять условиям (7) и (8). Для удобства системы прямых и обратных уравнений можно записать в матричной форме (формулы 10, 11):

$$\mathbf{P}'(t) = \mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{A} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}'(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}(t), \quad (11)$$

где $\mathbf{P}'(t) = \{P'_{ij}(t)\}$; $\mathbf{P}(t) = \{P_{ij}(t)\}$; $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$.

Начальные условия задаются единичной матрицей. Матрица \mathbf{A} – динамическая матрица перехода.

При исследовании баз технического обслуживания первостепенное значение имеют предельные вероятности (при $t \rightarrow \infty$). Для эргодических марковских процессов такие предельные вероятности существуют, причем они единственны и не зависят от начального состояния процессов: $\lim_{t \rightarrow \infty} P_{ij}(t) = p_j$. Формально они находятся из алгебраической системы, получаемой из системы прямых дифференциальных уравнений (10) после перехода в них к пределу при $t \rightarrow \infty$ и приравнивания производных к нулю. Матричная форма этой системы имеет вид (формула 12):

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{A} = 0. \quad (12)$$

Переход системы из одного состояния в другое может осуществляться различными путями. Процесс называется ординарным, если за бесконечно малое время система может перейти только в одно из смежных возможных состояний. Для таких процессов динамическая матрица заметно упрощается: первая и последняя ее строки содержат по два, а остальные – по три отличных от нуля элемента.

Потоки работ по восстановлению технических средств с определенной степенью приближения можно считать ординарными.

Выводы. На морском флоте ординарности потоков способствует непрерывная эксплуатация технических средств. Определенные затруднения могут возникнуть при рассмотрении сложных агрегатов, состоящих из однотипных узлов (двигатели внутреннего сгорания, дизель-генераторы и др.). Принципиально они могут порождать неординарные

потоки, если восстановительные работы в целом по агрегатам перемежаются с работами по отдельным составляющим узлам. Однако эти затруднения преодолеваются разложением неординарного потока на взаимосвязанные ординарные неоднородные потоки с разными значениями параметров.

Можно провести определенную аналогию, полагая, что дифференциальный и интегральный методы соотносятся между собой, как методы Эйлера и Лагранжа в гидромеханике.

Список использованной литературы:

1. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: RUGRAM, 2013. 511с.
2. Гнеденко В.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. Л.: ЛКИ, 2021. 398 с.
3. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения. М.: Наука, 1969. 512 с.
4. В.С. Королюк и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 640 с.
5. Ремницкая А. Я., Суслина И. А. Марковские процессы и простейшие модели теории массового обслуживания. Компьютерное моделирование простейших моделей массового обслуживания // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 38. С. 239-248. EDN JVJXVL.
6. Morse P.M. Queues Inventories and Maintenance. Wiley, New York, 1958
7. Богатырева Е.В., Ивановская А.В. Математическая формулировка задачи оптимизации судовых энергетических установок // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2020. № 4. С. 32-41.
8. Вентцель Е. С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения М.: Наука, 1991.
9. Horn R.A. Johnson C.R. Matrix analysis // Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 562 р.
10. Collette Y., Siarry P. Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies (Decision Engineering) // Berlin: Springer, 2011.

References:

1. Feller V. (2013) *Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i ee prilozheniya* [Introduction to probability theory and its applications]. Moscow: RUGRAM Publ.
2. Gnedenko V.V., Kovalenko I.N. (2021) *Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* Введение в теорию массового обслуживания [Introduction to Queuing Theory]. Leningrad: LKI Publ.
3. Barucha-Rid A.T. (1969) *Elementy teorii markovskih processov i ih prilozheniya* [Elements of the theory of Markov processes and their applications] Moscow.: Nauka Publ.
4. Korolyuk V.S. et al. (1985) *Spravochnik po teorii veroyatnostej i matematicheskoy statistike* [Handbook of Probability Theory and Mathematical Statistics] Moscow.: Nauka Publ.
5. Remickaya A. Ya., Suslina I. A. *Markovskie processy i prostejshie modeli teorii massovogo obsluzhivaniya. Komp'yuternoe modelirovanie prostejshih modelej massovogo obsluzhivaniya* [Markov processes and the simplest models of queuing theory. Computer modeling of the simplest queuing models]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki.* – 2007. – № 38. – pp. 239-248.
6. Morse P.M. (1958) *Queues Inventories and Maintenance.* New York.

7. Bogatyreva E.V., Ivanovskaya A.V. *Matematicheskaya formulirovka zadachi optimizacii sudovyh energeticheskikh ustanovok* [Mathematical statement of the problem of marine power plant optimization]. – 2020. – №4. – pp. 32-41.
8. Ventcel' E. S., Ovcharov L.A. (1991) *Teoriya sluchajnyh processov i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow.: Nauka Publ.
9. Horn R.A., Johnson C.R. (1985) *Matrix analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
10. Collette Y., Siarry P. (2011) *Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies (Decision Engineering)*.

Сведения об авторах / Information about authors

Богатырева

Елена Владимировна

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры
судовых энергетических установок
Керченский государственный морской
технологический университет
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
arev_66@mail.ru

Bogatyreva

Elena Vladimirovna

PhD in Engineering Science, Associate
Professor of the Department of marine power
plants, Kerch State Maritime Technological
University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch,
298309, Russian Federation,
e-mail: arev_66@mail.ru

УДК 629.1

Ивановская А.В.

ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРИВОДА СУДОВОЙ ЛЕБЕДКИ

Аннотация. В работе рассмотрен еще один принцип моделирования привода судового грузоподъемного устройства. Особенность работы такого привода является движение в разных средах: воздушной, водной и на границе их раздела. Также на возникающие в системе динамические процессы значительное влияние оказывают внешние гидрометеорологические факторы и нестационарность нагружения. Все это приводит к затруднениям при прогнозировании поведения элементов системы. Поэтому предлагается рассматривать привод как многотельную систему, состоящую из взаимосвязанных твердых и деформируемых тел, испытывающих различные поступательные и вращательные смещения. В работе рассматривается принцип выполнения кинематического анализа. Полученные кинематические ограничения могут быть введены в динамическую формулировку с использованием набора нелинейных алгебраических уравнений, которые зависят от системы обобщенных координат и времени. Представленная векторная форма кинематических ограничений может быть использована при формализации динамики элементов привода, что является актуальным при разработке автоматизированной системы управления приводом судовых грузоподъемных устройств.

Ключевые слова: привод грузоподъемного устройства, многотельная система, кинематический анализ, подвижная система координат

Ivanovskaya A.

FEATURES OF KINEMATIC ANALYSIS IN MODELING THE MECHANICAL PART OF THE SHIP'S WINCH DRIVE

Annotation. The paper considers another principle of modeling the drive of a ship's lifting device. The peculiarity of the operation of such a drive is movement in different environments: air, water and at their interface. Also, the dynamic processes arising in the system are significantly influenced by external hydrometeorological factors and unsteadiness of loading. All this leads to difficulties in predicting the behavior of system elements. Therefore, it is proposed to consider the drive as a multibody system consisting of interconnected solid and deformable bodies experiencing various translational and rotational displacements. The paper considers the principle of performing kinematic analysis. The resulting kinematic constraints can be introduced into a dynamic formulation using a set of nonlinear algebraic equations that depend on a system of generalized coordinates and time. The presented vector form of kinematic constraints can be used to formalize the dynamics of drive elements, which is relevant in the development of an automated drive control system for ship lifting devices.

Keywords: lifting device drive, multibody system, kinematic analysis, movable coordinate system

Введение. Основы проектирования судовых грузоподъемных устройств как сложных многотельных и многоуровневых иерархических систем могут быть разработаны на основе системного подхода. Такой подход подразумевает решение комплексной задачи, позволяющей выявлять существенные взаимосвязи между отдельными элементами. При системном подходе к проектированию важным является анализ требований, предъявляемых к оборудованию и его отдельным компонентам, исследованы условия его работы и определены все взаимодействия, возникающие в процессе эксплуатации [1-3]. Немаловажным является

учет влияния, оказываемого внешней средой, которое учитывается внешними параметрами, воздействующих на внутренние параметры математической модели объекта.

Целью исследований является совершенствование методов расчета и проектирования судового грузоподъемного устройства на этапе кинематического анализа.

Материалы и методы исследования.

Для судовых грузоподъемных устройств параметрами внешней среды являются вид и параметры буксируемого объекта, в случае рыбопромыслового судна вид лова гидробионтов и соответственно орудия лова; гидрометеорологические условия, подразумевающие ветровую нагрузку, волнение моря, вид качки (бортовая или килевая). Такие параметры, как натяжение троса, усилие на гаке, а также крутящие моменты и усилия в передачах являются внутренними параметрами. Все эти факторы по-разному воздействуют на судовые грузоподъемные устройства в зависимости от эксплуатационных нагрузок (регулярные, нерегулярные, исключительные, особые). Следовательно, математические модели такого рода оборудования рассматриваются в пространстве состояний, обусловленном техническими условиями на проектирование. Немаловажным является выявление всех существенных взаимосвязей между подсистемами грузоподъемного устройства, определяющих его функциональную схему. С учетом этого разрабатываются методы расчета и проектирования всех основных конструкций, узлов и составляющих их элементов. Для этого необходима разработка математических моделей, представленных в виде совокупности различного рода уравнений, неравенств, операторов между характеристиками систем и их параметрами. Данную совокупность можно выразить векторным равенством

$$\Phi = f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}),$$

где $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k)^T$ – вектор характеристик конструкции; $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – вектор управляемых параметров; $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ – вектор неуправляемых параметров.

Математические модели судовых грузоподъемных устройств должны быть универсальными, позволяющими по одной программе рассчитывать класс однотипных конструкций. Так, программа кинематического и силового расчета позволит рассчитывать любые трансмиссии, как с постоянными, так и с переменными параметрами, и имеющие несколько приводных двигателей, работающих в любых сочетаниях.

Порядок расчета и проектирования судового грузоподъемного устройства может быть представлен в виде схемы (рис. 1).

При формулировании технического задания определяют назначение грузоподъемного устройства, учитывая при этом условия эксплуатации как технические, так и гидрометеорологические в соответствующем районе плавания, сезоне, длительности. На этапе формулирования требований к грузоподъемному устройству следует выделить: параметры троса, такие как материал, необходимая длина, диаметр сечения, плавучесть, сопротивление, жесткость по длине, прочность на разрыв, максимальная воспринимаемая нагрузка; параметры груза, такие как масса, размеры, сопротивление. При формулировании ограничений, налагаемых на грузоподъемное устройство особенностями эксплуатации следует учесть: состояние моря (волнение в баллах), сила ветра, температура воды и воздуха, соленость воды, гидростатическое давление, максимальная глубина погружения, неровности рельефа дна, подводное или поверхностное течение, переменность нагружения буксируемого объекта, переход из одной среды в другую.

Содержательное описание технологического процесса включает в себя этапы травления троса, буксировки объекта, выборку троса, подъем буксируемого объекта на борт судна. При построении формализованной схемы привода грузоподъемного устройства создаются схемы взаимного расположения элементов системы «лебедка – трос – буксируемый объект» применительно к различным режимам эксплуатации. Задание или определение параметров привода грузоподъемного устройства осуществляется на основании требований, обозначенных ранее и с учетом выделенных ограничений.

Создание комплексной математической модели привода грузоподъемного устройства предусматривает кинематический и динамический анализ [4-6]. Кинематический анализ предполагает исследование механического движения материальных тел системы независимо от действующих на них сил. Проведенный кинематический анализ позволит определить конструктивные параметры грузоподъемного устройства. Целью же динамического анализа является исследование взаимодействия между составными элементами привода, позволяющее прогнозировать их поведение.

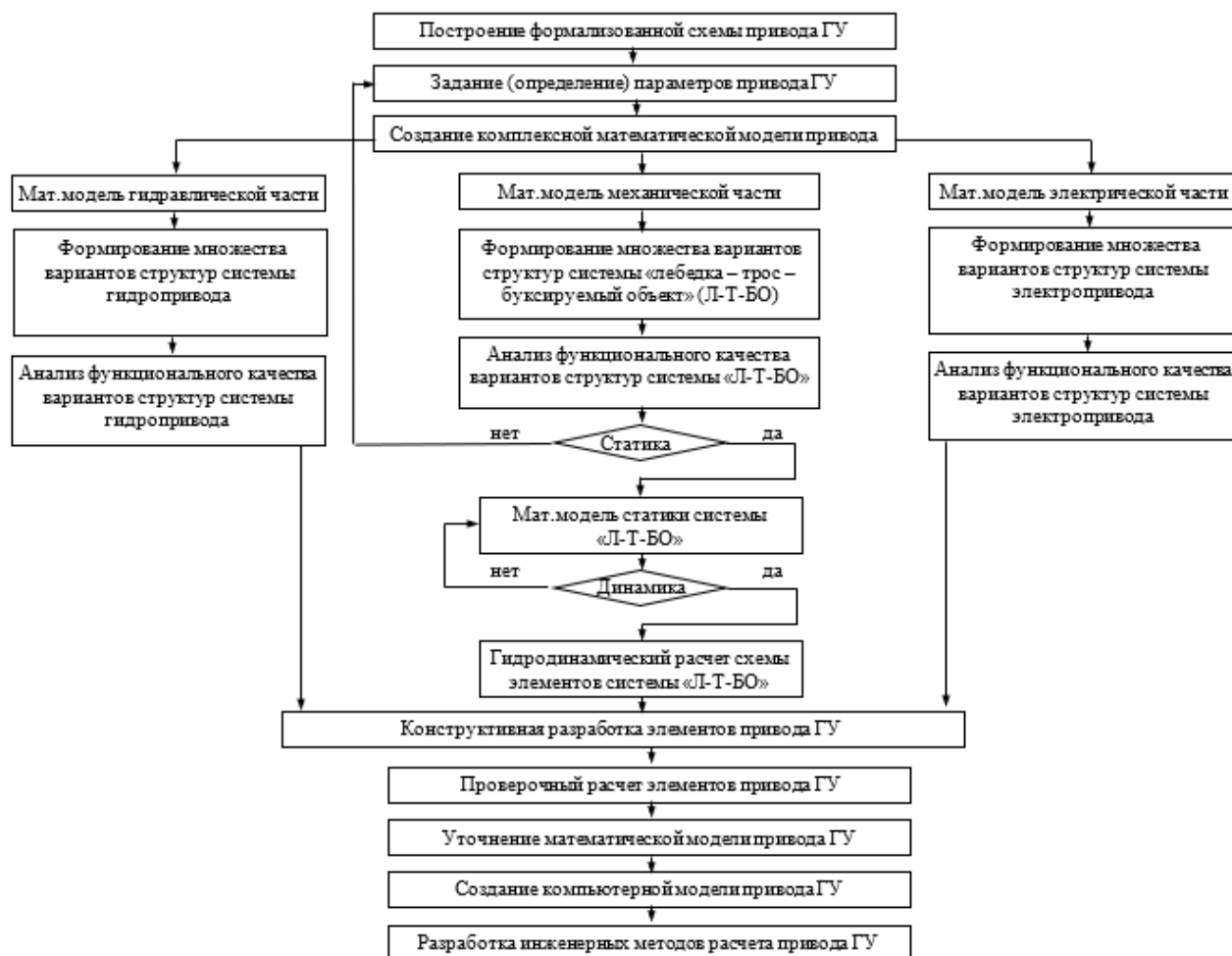


Рисунок 1 – Схема расчета и проектирования судового грузоподъемного устройства

Результаты исследования. В качестве примера рассмотрим кинематический анализ судового грузоподъемного устройства, который целесообразно представить в виде многотельной системы (рис. 2).

Основной задачей кинематики точки является изучение законов ее движения, который задается с помощью зависимости от времени ее положения в пространстве [7-8]. Движение точки можно определить тремя способами: векторным, координатным и естественным. Векторное представление, записанное в матричной форме, является предпочтительным, так как позволяет использовать ее в алгоритмах и программах. В многотельных системах координаты системы не являются независимыми из-за заданной траектории движения, а также влияния механических соединений. Эти кинематические ограничения могут быть введены в динамическую формулировку с использованием набора нелинейных алгебраических уравнений, которые зависят от системы обобщенных координат и времени. Запишем их в следующем виде

$$C(q, t) = 0 \quad (1)$$

где $\mathbf{q} = [\mathbf{q}^{(1)T} \quad \mathbf{q}^{(2)T} \quad \mathbf{q}^{(3)T} \quad \dots \quad \mathbf{q}^{(n)T}]^T$ — суммарный вектор обобщенных координат системы,

t — время,

$\mathbf{C} = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad \dots \quad C_{nc}]^T$ — вектор линейно независимых функций ограничений,
 nc — количество уравнений связи.

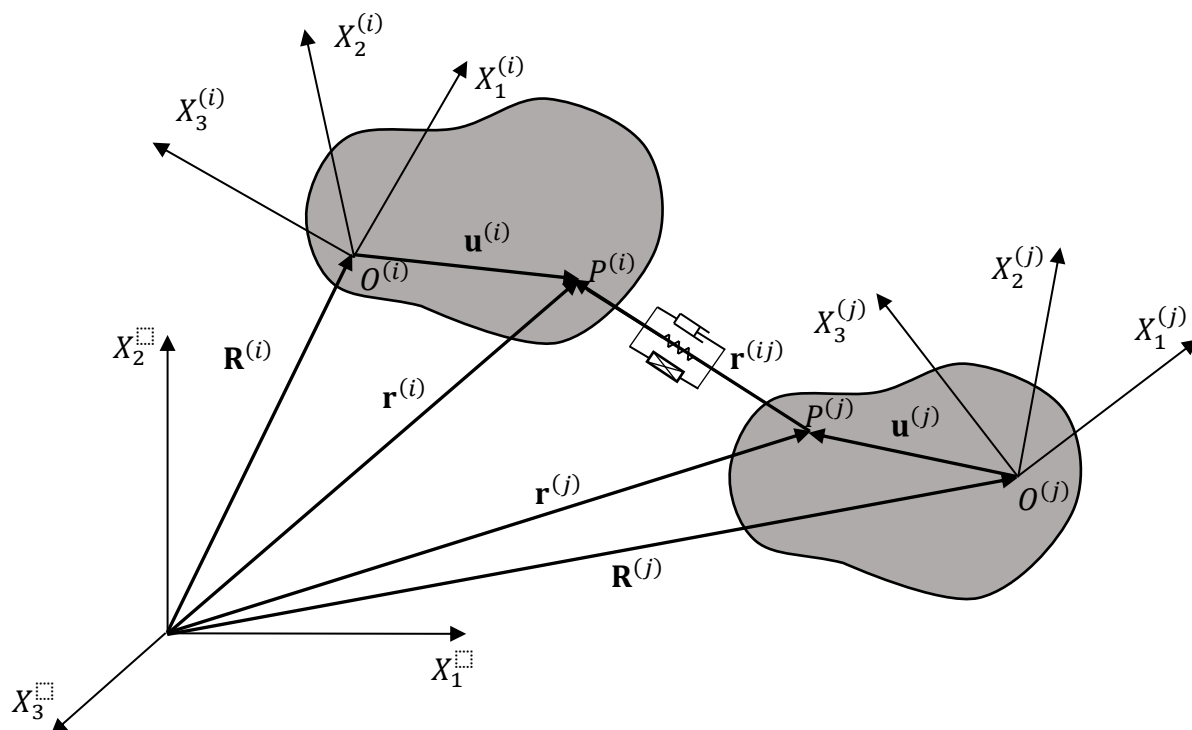


Рисунок 2 – Многотельное представление системы «лебедка – трос – груз»

В случае, когда система состоит из двух тел, движение точки $P^{(i)}$ по телу i относительно точки $P^{(j)}$ на теле j можно записать в виде вектора положения

$$\mathbf{r}^{(i,j)} = \mathbf{R}^{(i)} + \mathbf{A}^{(i)}\bar{\mathbf{u}}^{(i)} - \mathbf{R}^{(j)} - \mathbf{A}^{(j)}\bar{\mathbf{u}}^{(j)} \quad (2)$$

где $\mathbf{R}^{(i)}$ и $\mathbf{R}^{(j)}$ — позиция начала подвижной системы координат, определяющей положение i -того тела $X_1^{(i)} X_2^{(i)} X_3^{(i)}$ и j -того тела $X_1^{(j)} X_2^{(j)} X_3^{(j)}$;

$\mathbf{A}^{(i)}$ и $\mathbf{A}^{(j)}$ - матрицы преобразования из подвижных систем координат тел $X_1^{(i)} X_2^{(i)} X_3^{(i)}$ ($X_1^{(j)} X_2^{(j)} X_3^{(j)}$) к неподвижной $X_1 X_2 X_3$;

$\bar{\mathbf{u}}^{(i)}$ и $\bar{\mathbf{u}}^{(j)}$ — локальное положение точек $P^{(i)}$ и $P^{(j)}$, измеренное в системе координат $X_1^{(i)} X_2^{(i)} X_3^{(i)}$ ($X_1^{(j)} X_2^{(j)} X_3^{(j)}$).

Т.е., задав векторы положения $\mathbf{R}^{(i)}$ и $\mathbf{R}^{(j)}$ матрицы преобразования $\mathbf{A}^{(i)}$ и $\mathbf{A}^{(j)}$, можем определить положение произвольной точки $P^{(i)}$ i -того и $P^{(j)}$ j -того тел.

Используя уравнение 2 и, записывая $\bar{\mathbf{u}}^{(i)}$ и $\bar{\mathbf{u}}^{(j)}$ в более явном виде, получаем

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{R}^{(i)} + \mathbf{A}^{(i)}(\bar{\mathbf{u}}_0^{(i)} + \mathbf{S}^{(i)}\mathbf{q}_f^{(i)}) - \mathbf{R}^{(j)} - \mathbf{A}^{(j)}(\bar{\mathbf{u}}_0^{(j)} + \mathbf{S}^{(j)}\mathbf{q}_f^{(j)}) \quad (3)$$

где $\mathbf{f}(t)$ — зависящая от времени векторная функция,

$\bar{\mathbf{u}}_0^{(i)}$ и $\bar{\mathbf{u}}_0^{(j)}$ — соответственно положения точек $P^{(i)}$ i -того и $P^{(j)}$ j -того тел в недеформированном состоянии,

$\mathbf{S}^{(i)}$ и $\mathbf{S}^{(j)}$ — функции формы двух тел, оцененные в точках $P^{(i)}$ и $P^{(j)}$ соответственно.

Если точки $P^{(i)}$ и $P^{(j)}$ совпадают, уравнение 3 определяет алгебраические уравнения ограничений, которые описывают сферический шарнир в пространственном анализе и вращательный шарнир в плоском анализе.

Формулировка кинематических ограничений некоторых соединений, таких как вращательные и цилиндрические соединения в трехмерном анализе может потребовать введения неподвижной системы координаты промежуточного соединения тела в дополнение к системам координат деформируемого тела. На рисунке 3 изображены два деформируемых тела i и j – в исследуемой системе это лебедка и груз, соединенных тросом, представленным вращательным шарниром. Координата система тела i обозначается как $X_1^{(i)} X_2^{(i)} X_3^{(i)}$, а система координат тела j обозначается как $X_1^{(j)} X_2^{(j)} X_3^{(j)}$.

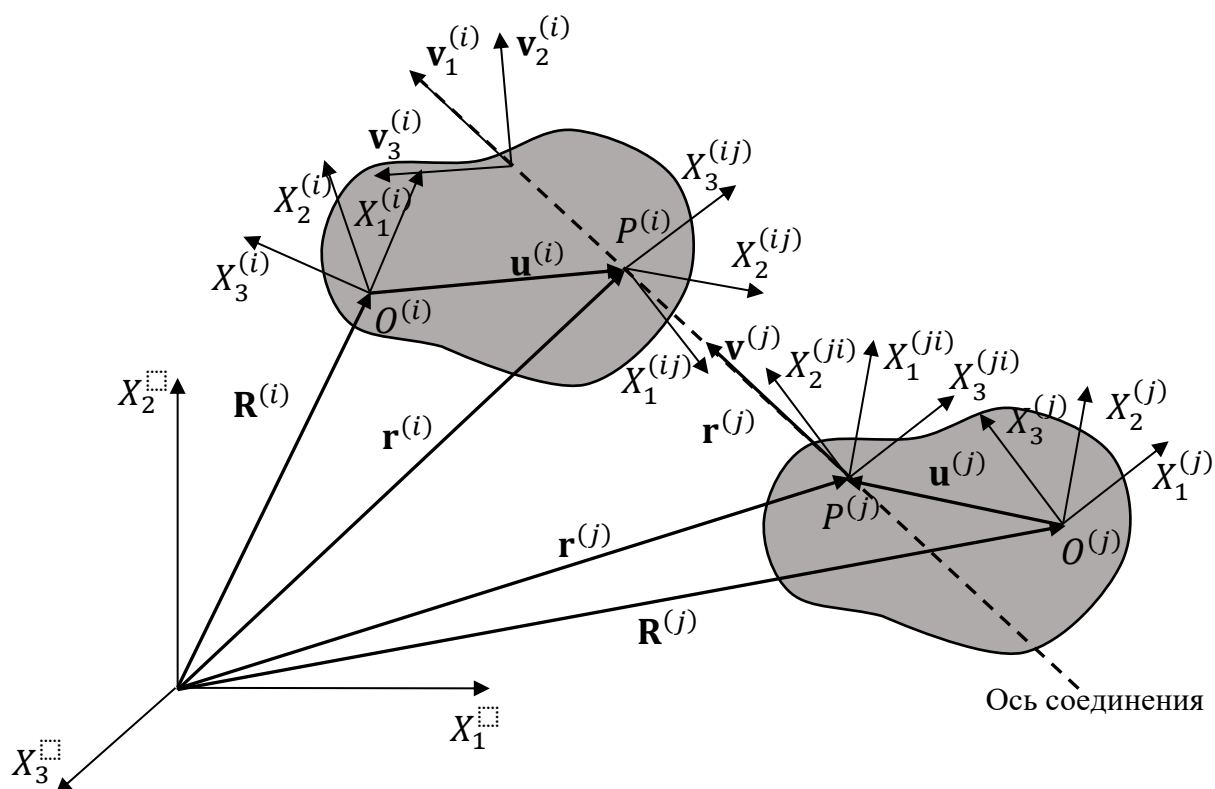


Рисунок 3 – Системы координат промежуточных соединений

Для описания соединения двух деформируемых тел (лебедки и груза) введем две системы координат промежуточных соединений с неподвижным телом. Первая - $X_1^{(i)} X_2^{(i)} X_3^{(i)}$, которая жестко связана с точкой определения шарнира $P^{(i)}$ на теле i . Вторая система координат $X_1^{(j)} X_2^{(j)} X_3^{(j)}$ жестко привязана к точке определения шарнира $P^{(j)}$ на теле j , как показано на рисунке 3. В случае анализа малых деформаций ориентация промежуточной совместной системы координат по отношению к системам координат тел может быть описана с помощью бесконечно малых матриц вращения $A_s^{(i)}$ и $A_s^{(j)}$.

Пусть $v_1^{(i)j}$ и $v^{(i)j}$ два постоянных вектора, определенных вдоль оси соединения в промежуточной системе координат соединения тел i и j соответственно. Используя постоянный вектор $v_1^{(i)j}$, аналогично процедуру можно использовать для определения на теле i двух постоянных векторов $v_2^{(i)j}$ и $v_3^{(i)j}$, которые перпендикулярны $v_1^{(i)j}$. Векторы $v_1^{(i)j}$, $v_2^{(i)j}$, и $v_3^{(i)j}$ и вектор $v^{(i)j}$ можно определить в неподвижной системе координат как

$$\mathbf{v}_k^{(i)} = \mathbf{A}^{(i)} \mathbf{A}_s^{(i)} \mathbf{v}_k^{(i)J}, k = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$\mathbf{v}^{(j)} = \mathbf{A}^{(j)} \mathbf{A}_s^{(j)} \mathbf{v}^{(j)J} \quad (5)$$

Следует обратить внимание, что эти векторы зависят от конечных поворотов системы координат тела и бесконечно малых поворотов промежуточных совместных систем координат.

Используя эти векторы и векторы положения точек соединения $P^{(i)}$ и $P^{(j)}$, уравнения кинематической связи шарнирного соединения в трехмерном анализе можно записать в виде

$$\mathbf{r}_p^{(i)} - \mathbf{r}_p^{(j)} = Const \quad (6)$$

$$\mathbf{v}^{(j)T} \mathbf{v}_2^{(i)} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{v}^{(j)T} \mathbf{v}_3^{(i)} = 0 \quad (8)$$

Это пять скалярных нелинейных алгебраических уравнений (4-8) определяют кинематические ограничения вращательного соединения в трехмерном анализе. Вводя промежуточные совместные системы координат, те же уравнения связи, используемые в динамике твердого тела, также могут быть использованы для определения гибкой связи между телами [9-10].

Выводы. Полученные кинематические ограничения могут быть введены в динамическую формулировку с использованием набора нелинейных алгебраических уравнений, которые зависят от системы обобщенных координат и времени. Представленная векторная форма кинематических ограничений может быть использована при формализации динамики элементов привода, что является актуальным при разработке автоматизированной системы управления приводом судовых грузоподъемных устройств.

Список использованной литературы:

1. Тё А.М. Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств: учебное пособие. Владивосток, 2014. 86 с.
2. Башуров Б.П., Скиба А.Н., Чебанов В.С. Функциональная надежность и контроль технического состояния судовых вспомогательных механизмов: учебное пособие. Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2009. 192 с.
3. Bi C. W. Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net / C.W. Bi, Y.P. Zhao, G. H. Dong, T. J. Xu, F. K. Gui // Aquacultural engineering. — 2013. — Vol. 57. — Pp. 71–81.
4. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1976. 592 с.
5. Ананьев И.В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. М.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1946. 223 с.
6. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
7. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
8. Болотина В.В. Вибрации в технике. Справочник в 6 т. М.: Машиностроение, 1979. Т.1. 352 с.
9. Ivanovskaya A., Zhukov V. Basic principles of mathematical modeling of operating modes of deck equipment for fish-ing vessels // Transportation Research Procedia, Volume 54, 2021, Pp 104-110.
10. Ивановская А. В. Принципы моделирования привода судового грузоподъемного оборудования // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2023. – № 1. – С. 65-72. – DOI 10.26296/2619-0605.2023.1.1.005.

References:

1. Tyo A.M. *Ekspluatatsiya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov, sistem i ustroystv* [Operation of ship auxiliary mechanisms, systems and devices]. Vladivostok, 2014, 86 p. (In Russian).

2. Bashurov B.P., Skiba A.N., Chebanov V.S. *Funktsional'naya nadezhnost' i kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov* [Functional reliability and control of the technical condition of ship supporting mechanisms]. Novorossiysk, MGA Admiral F.F. Ushakov Publ., 2009, 192 p. (In Russian).
3. Bi, Chun-Wei, Yun-Peng Zhao, Guo-Hai Dong, Tiao-Jian Xu, and Fu-Kun Gui. Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net. *Aquacultural engineering* 57 (2013): 71–81. (In English).
4. Babakov I. M. *Teoriya kolebaniy* [Theory of Oscillations]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 592 p. (In Russian).
5. Anan'yev I.V. *Spravochnik po raschetu sobstvennykh kolebaniy uprugikh system* [Handbook on the calculation of natural oscillations of elastic systems]. Moscow, OGIZ, Gostekhizdat Publ., 1946, 223 p. (In Russian).
6. Biderman V.L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Theory of Mechanical Oscillations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980, 408 p. (In Russian).
7. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Fluctuations in engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985, 472 p. (In Russian).
8. Bolotina V.V. *Vibratsii v tekhnike* [Vibrations in technology]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1979, vol. 1, 352 p. (In Russian).
9. Ivanovskaya A., Zhukov V. Basic principles of mathematical modeling of operating modes of deck equipment for fishing vessels. *Transportation Research Procedia*, Volume 54, 2021, Pp 104-110. (In English).
10. Ivanovskaya A.V. Principi modelirovaniya privoda sudovogo gruzopod'emnogo oborudovaniya [Principles of modeling the drive of marine lifting equipment]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University], 2023, № 1, pp. 65-72. (In Russian). DOI 10.26296/2619-0605.2023.1.1.005.

Сведения об авторе / Information about author

**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

Ivanovskaya
Aleksandra
Vital'evna 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

УДК 629.017

Шаратов А.С.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ХОДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ ОСНАЩЕННЫХ МАЛОБОРОТНЫМ ГЛАВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Аннотация. Обеспечение рентабельности морских перевозок потребует повышения грузоместимости транспортных судов. Проектирование судов со значительными коэффициентами общей полноты корпуса существенно влияет на величину затрачиваемой мощности для обеспечения проектной скорости. В работе определены показатели степени и величины достоверности аппроксимации винтовых характеристик главного двигателя и ходовых характеристик судна, полученных на основании анализа результатов приемосдаточных испытаний типовых крупнотоннажных судов. На основании полученных данных обосновано нарушение автомодельности между скоростью судна и частотой вращения главного двигателя. На основе полученных аппроксимирующих зависимостей предложена корректировка математического описания режимов работы главного малооборотного двигателя на гребной винт фиксированного шага. Полученные результаты позволяют повысить достоверность математического моделирования и расчетного исследования режимов работы пропульсивного комплекса судна в изменяющихся условиях эксплуатации.

Ключевые слова: главный малооборотный двигатель, частота вращения, скорость судна, ходовая характеристика, винтовая характеристика.

Sharatov A.S.

COMPARISON OF RESULTS OF SEA TRIALS OF TANKERS EQUIPPED WITH MAN B&W LOW-SPEED MAIN ENGINE

Abstract. Ensuring the profitability of sea transportation will require increasing the cargo capacity of transport ships. The design of ships with significant coefficients of the overall completeness of the hull significantly affects the amount of power consumed to ensure the design speed. The paper defines the indicators of the propeller power curve and the resistance of the ship, obtained on the basis of the results of trial tests of typical large-tonnage ships. Based on the data obtained, the violation of the self-similarity between the speed of the ship and the rotation frequency of the main engine is justified. Based on the obtained approximating dependencies, an adjustment of the mathematical description of the operating points of the main low-speed engine to the fixed-pitch propeller is proposed. The results obtained make it possible to increase the reliability of mathematical modeling and computational study of the modes of operation of the vessel's propulsion system in changing operating conditions.

Keywords: main low-speed engine, rotation frequency, speed, running characteristic, propeller power curve.

Введение. Реализация эффективного использования мощности главного двигателя при относительно высоких значениях общей полноты корпуса и относительно малых скоростях движения судна способствует повышению рентабельности морских перевозок и положительно повлияет на ограничение загрязнения окружающей среды. Прогнозируемые внешние факторы эксплуатации, такие как: ветровое и волновое сопротивление корпуса, сопротивление формы, характеристики гребного винта и покрытия корпуса, задаются на этапе проектирования корпуса судна и проверяются при проведении приемосдаточных испытаний судна. Внешние факторы эксплуатации определяют режим работы главного двигателя для достижения проектной скорости судна.

На завершающем этапе строительства судна проводится серия приемосдаточных испытаний ГЭУ, направленных на проверку соответствия судна проектному заданию. Результаты оценки ходовых качеств судна могут быть дополнительно использованы для моделирования и расчетного исследования возможных режимов работы главного двигателя.

На рисунке 1 показана графическая зависимость сопротивления корпуса судна (R) от его скорости (v), в зависимости от внешних факторов эксплуатации.

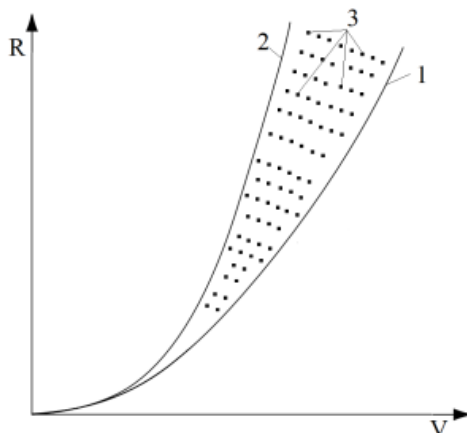


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления корпуса судна от скорости и внешних факторов эксплуатации: 1 – благоприятные погодные условия в условиях «чистого» корпуса в балласте; 2 – неблагоприятные погодные условия в условиях значительного обрастания корпуса судна «в грузу»; 3 – возможные режимы работы пропульсивного комплекса

В условиях возрастания сопротивления корпуса судна, как отмечается в работах [1 – 5], наблюдается нарушение автомодельности между частотой вращения главного двигателя и скоростью движения судна. На основании анализа результатов ходовых испытаний транспортных судов, характеризующихся значительными показателями коэффициента объемной полноты корпуса, представляется возможным корректировать математического описания режимов работы пропульсивного комплекса для совершенствования стендовых испытаний и повышения точности расчетных исследований.

Целью исследования является сопоставление теоретических и эксплуатационных ходовых характеристик судов и винтовых характеристик главных двигателей с целью совершенствования математического описания режимов работы пропульсивного комплекса.

Практическая значимость работы заключается в совершенствовании методики испытания главного малооборотного двигателя, работающего на винт фиксированного шага.

Материалы и методы исследования. В работе рассматривается пропульсивный комплекс морского судна, состоящий из главного малооборотного двигателя, работающего на гребной винт фиксированного шага. Если пренебречь потерями в прямой передаче, режим работы малооборотного главного двигателя в установившемся режиме определяется характеристиками гребного винта, частотой вращения (n) и мощностью (N_e). Особенности работы малооборотного двигателя на винт фиксированного шага формируют характерные режимы, графически обобщенные в винтовые характеристики, характеризующиеся функциональной зависимостью [6]:

$$N_e = c_1 \cdot n^m, \quad (1)$$

где c_1 – коэффициент нагрузки винтовой характеристики; m – показатель степени винтовой характеристики.

Для оценки режима работы судна и его пропульсивного комплекса используется семейство ходовых характеристик. Зависимость мощности, вырабатываемой главным двигателем (N_e) и потребляемой гребным винтом (N_B) для достижения заданной скорости судна (v), при полностью погруженном винте, описывается уравнением вида [7]:

$$N_e \cong N_B \cong c_2 \cdot v^a, \quad (2)$$

где c_2 – коэффициент ходовой характеристики; a – показатель степени ходовой характеристики.

При стационарности факторов эксплуатации, считается что скорость судна прямо пропорциональна частоте вращения гребного винта, а характеристики сопротивления корпуса (R) и гребного винта выражается автомодельными зависимостями [9]:

$$R = k \cdot v^{a-1}; \quad M_B = c_3 \cdot n^{a-1}; \quad (3)$$

где k – коэффициент сопротивления; c_3 – коэффициент винтовой характеристики; M_B – момент сопротивления гребного винта; n – частота вращения главного двигателя.

В качестве критериев режима работы конкретного судна, согласно рекомендациям [10] выбраны коэффициенты винтовой характеристики (c_1) и ходовой характеристики (c_2). В качестве метода анализа ходовых характеристик судна принята оценка достоверности результатов по максимальной величине относительного отклонения коэффициента ходовой характеристики, в соответствии с рекомендациями [11].

Методы и средства приемо-сдаточных испытаний приведены в работах [12, 13].

Результаты исследования и их обсуждение. Предварительная оценка механической напряженности двигателя выполняется по стендовой характеристике, которая соответствует типовому судну с водоизмещающим корпусом. Для испытаний двигателя на стенде принята кубическая зависимость между мощностью и частотой вращения:

$$N_e = c_1 \cdot n^3, \quad (4)$$

На основании уравнения (1 – 4) формируется взаимосвязь между относительным изменением скорости судна и частоты вращения главного двигателя. Функциональные зависимости между элементами пропульсивного комплекса характеризуется соотношениями:

$$\frac{n_i}{n_n} = \frac{v_i}{v_n}; \quad \frac{R_i}{R_n} = \frac{M_i}{M_n} \quad (5)$$

где n_i , v_i , R_i , M_{Bi} – частота вращения главного двигателя, скорость судна, сопротивление корпуса судна и момент сопротивления гребного винта на долевом режиме;

n_n , v_n , R_n , M_{Bn} – номинальные значения частоты вращения главного двигателя, скорости судна, сопротивления корпуса судна и момент сопротивления гребного винта.

В таблице 1 приведены данные полученные по результатам анализа протоколов приемо-сдаточных испытаний серийных судов и проектируемых корпусов, характеризующихся повышенным коэффициентом общей полноты и оснащенных малооборотным двигателем, работающим при переменной частоте вращения.

Таблица 1 – Показатели винтовых характеристик двигателей, полученные в результате анализа приемо-сдаточных испытаний транспортных судов

Тип судна	Номер корпуса/модели	Марка главного двигателя	Коэффициент винтовой характеристики (c_1)	Показатель степени винтовой характеристики (m)
Танкер 65000 тонн	S3003 S3015	6S60MC	0,001	3,5
контейнеровоз 13100 TEU	S435	12K98MC	0,0063	3,45
контейнеровоз 2000 TEU	S1311	8S60MC	0,0023	3,45
Танкер BW broker 53293 тонн	M131	7S60MC	0,0159	3

Танкер дедвейтом 160000тонн	m/v «Nell Jacob»	6S70MC	0,0074	3,238
контейнеровоз 5000 TEU	S590	6S80ME	0,009	3,4
Контейнеровоз 6300 TEU	S1208	10K98MC	0,0053	3,5
Контейнеровоз 1700 TEU	B170	6RTA62	0,0194	2,8

Приведенные в таблице 1 показатели подтверждают отклонение степени (m) винтовой характеристики рассматриваемых судов от типового стендового значения. Установлено что для контейнеровозов, не зависимо от их контейнеровместимости, характерно значительное отклонение винтовой характеристики главного двигателя от стендового значения.

В таблице 2 приведены результаты анализа скоростных характеристик судов, оснащенных малооборотным главным двигателем, работающим при переменной частоте вращения.

Таблица 2 – Показатели ходовых характеристик транспортных судов, полученные в результате анализа приемосдаточных испытаний

Тип судна	Номер корпуса/модели	Марка главного двигателя / режим работы	Коэффициент ходовой характеристики (с ₂)	Показатель степени ходовой характеристики (a)	Относительная погрешность, δ
3	1	2	5	4	6
Танкер Selini 65000 тонн	S3003 S3015	6S60MC проект	0,2222	4	0,033
Танкер Selini 65000 тонн	S3003 S3015	6S60MC балласт	0,08	4,2	0,00587
контейнеровоз 13100 TEU	S433	12K98 MC	0.59051	3,45	0.03
контейнеровоз 2000 TEU	S1311	8S60MC балласт	0,0664	4,1	0,0182
Танкер BW broker 53293 тонн	S1583	7S60MC балласт	0.6859	3,34	0.00155
Танкер дедвейтом 160000тонн	m/v «Nell Jacob»	6S70MC балласт	1.751	3,25	0,0065
Танкер дедвейтом 160000тонн	m/v «Nell Jacob»	6S70MC в грузу	2,41	3,12	0,0068
контейнеровоз 5000 TEU	S590	6S80E	1,027	3,2	0,00253
контейнеровоз 6300TEU	S1208	10K98 MC	0,12727	3,95	0,0218
контейнеровоз 1700 TEU Cala portofino	B170	RTA62 балласт	0.0255	4,3	0.027
контейнеровоз 1700 TEU Cala portofino	B170	RTA62 в грузу	0.11098	3,85	0,00504

Приведенные в таблице 2 показатели подтверждают отклонение степени (а) ходовой характеристики рассматриваемых судов от типового значения.

На основании анализа показателей, входящим в уравнения (1) – (3), результатов расчетов, анализа результатов тестирования двигателей [14] – [15], отчетной документации машинных команд подтверждено нарушение характерная взаимосвязь между относительным изменением скорости судна и частоты вращения главного двигателя (5). За счет отклонения функциональных взаимосвязей от типовых (стендовых) значений создаются условия для перегрузки главного двигателя.

На рисунке 2 в графической форме представлены полученные в результате проведенного анализа функциональные зависимости между частотой вращения главного двигателя и скоростью движения судна, построенные в относительных величинах. Аппроксимирующая кривая функциональной зависимости (см. рис. 2, кривая 1) отклоняется от прямолинейной зависимости (см. рис. 2, кривая 2) что свидетельствует о возможном нарушении автомодельности характеристик танкера «Selini».

Использование аппроксимирующих кривых позволяет спрогнозировать изменение функциональных зависимостей частоты вращения и скорости судна (см. табл. 3) [8].

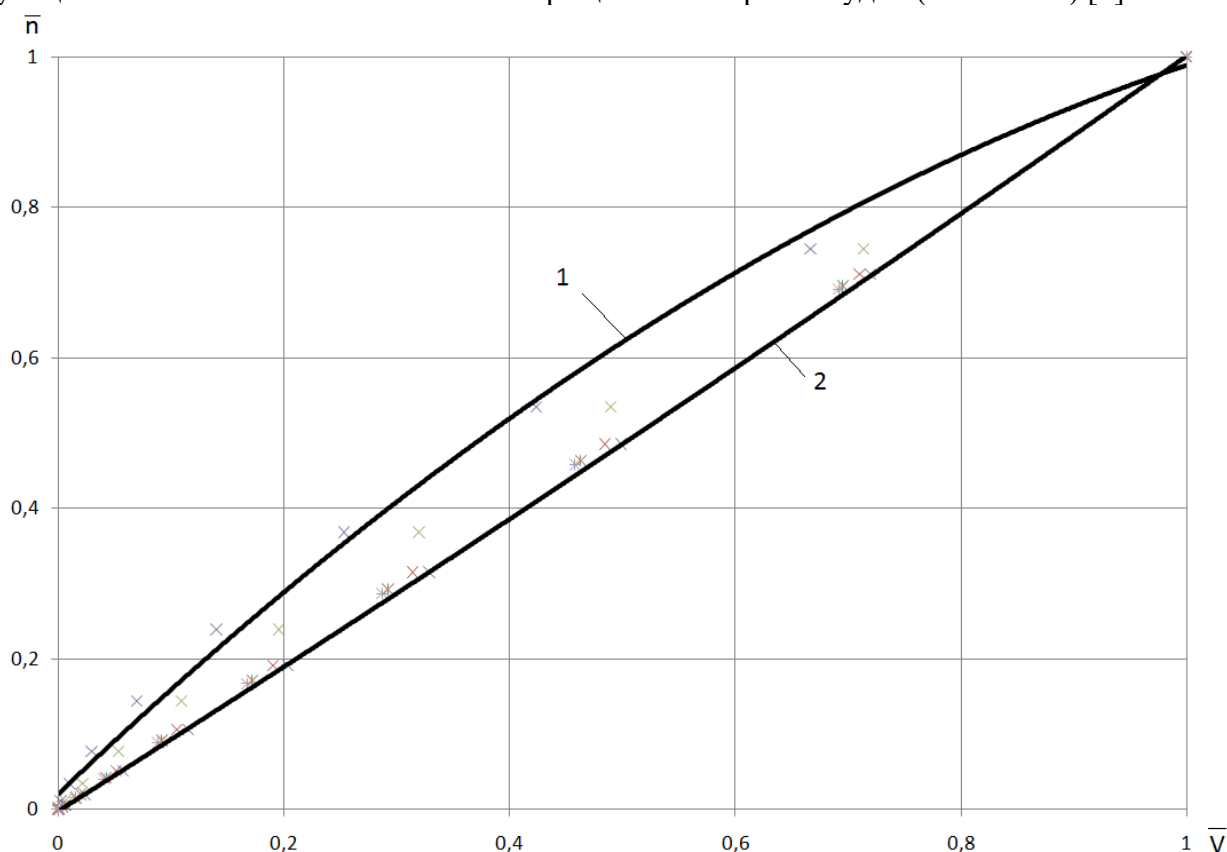


Рисунок 2 – Относительное изменение функциональной зависимости между частотой вращения главного двигателя и скоростью судна: 1 – Танкер «Selini»; 2 – Танкер «Nell Jacob»

Таблица 3 – Показатели функциональных зависимостей энергетических установок анализируемых морских судов

Название судна	Аппроксимирующая кривая взаимовлияния частоты вращения главного двигателя и скорости судна
m/v «Nell Jacob»	$n = 0,0556 \cdot v^2 + 0,9472 \cdot v - 0,0016; R^2 = 1$
Танкер Selini;	$n = -0,4643 \cdot v^2 + 1,4316 \cdot v + 0,0215; R^2 = 0,9969$

Выводы. На основании анализа результатов тестирования двигателей и выполненного расчетного исследования установлено, что фактические показатели степени ходовых характеристик судов, обладающих значительный коэффициент объемной полноты и винтовые характеристики их главных двигателей отличаются от типовых. Для отдельных судов подтверждено нарушение характерной взаимосвязь между относительным изменением скорости судна и частоты вращения главного двигателя. За счет отклонения функциональных взаимосвязей от типовых (стендовых) значений создаются условия для перегрузки главного двигателя.

Полученные в работе данные подтверждают нарушение автомодельности между относительным изменением частоты вращения главного двигателя и скоростью движения судна. Наблюдаемый при этом рост погрешности в определении механической напряженности двигателя свидетельствует о необходимости дополнения математического описания винтовой характеристики при проведении стендовых испытаний двигателей, а также с целью совершенствования методики контроля их напряженности. Необходимо обосновать диапазоны возможного отклонения показателей тепловой и механической напряженности двигателя от стендовых (проектных) значений при изменении внешних факторов эксплуатации судов, характеризующихся значительным коэффициентом объемной полноты корпуса.

Список использованной литературы:

1. *Дитятев С.Г.* Исследование изменений винтовой характеристики судового малооборотного дизеля в эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05 / Дитятев Сергей Германович. — Л.: ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова, 1984. 295с.
2. *Овчинников К.Д.* Анализ полного сопротивления корпуса судна на различных скоростях хода. Труды ИСП РАН, том 31, вып. 6, 2019 г., с. 195-202. DOI: 10.15514/ISPRAS–2019–31(6)–12
3. *Завьялов А. А., Небеснов В. В.* Режимы работы пропульсивной установки судна в условиях ограниченного фарватера // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 30. Одесса: ОНМА, 2012. С. 70-74.
4. *Мясников Ю. Н., Никитин А. М.* Характеристики пропульсивного комплекса в проблеме обеспечения энергоэффективной и экологически безопасной эксплуатации морского судна // Судостроение, 2017. №. 5. С. 33-39.
5. *Шаратов А. С., Гарафутдинов А. Р.* Сопоставление винтовых характеристик главных малооборотных двигателей, полученных по результатам моделирования и эксплуатационных испытаний // Труды Крыловского государственного научного центра, 2021. №. S1. С. 147-149.
6. *Конюков В.Л.* Оценка диапазона допустимых нагрузок судового четырехтактного дизеля на основе тепловых расчетов // Вестник керченского государственного морского технологического университета. Керчь, 2023. Вып. 1. С.73-81.
7. *Мясников Ю. Н., Савченко О. В., Цыбуляк А. Н.* Расчетно-графический метод построения винтовых характеристик комбинированной энергетической установки корабля // Труды Крыловского государственного научного центра, 2023. №. 1 (403). С. 134-141.
8. *Антоненко С. В., Китаев М. В.* Выбор пропульсивного комплекса для судов с несколькими режимами движения // Морской сборник, 2012. №. 1. С. 57-62.
9. *Орлов О. П.* Масштабные эффекты гидродинамических и кинематических характеристик корпуса и гребного винта одновального танкера полных обводов // Труды Крыловского государственного научного центра, 2019. №. 4 (390). С. 33-46.
10. *Кисарова А. И.* Моделирование функционирования мод в рамках ограничительных характеристик // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 30. Одесса: ОНМА, 2012. 214с.
11. *Можяев О. С., Попов Е. С.* Топливная эффективность судового машинно-двигательного

комплекса // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2014. №. 2. С. 95-98.

12. Данилов А.Т., Гончаров А.Д. Методы испытаний судовых механизмов и устройств на акватории завода // Судостроение. 1971. №6. С.43-46.
13. Мясников Ю. Н. Прогрессивные испытания кораблей флота // Труды Крыловского государственного научного центра, 2019. №. 3 (389). С. 157-164.
14. Test result of shop trial, mitsui-m.a.n. B&W 6S70MC. Mitsui engineering & shipbuilding Co ltd, 1998. 24p.
15. Расчетная программа CEAS Engine Calculations. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas> (дата обращения: 12.01.2023).

References:

1. Dityatev S.G. *Issledovanie izmenenij vintovoj harakteristiki sudovogo malooborot-nogo dizelya v ekspluatcii: dis. kand. tekhn. Nauk* [Investigation of changes in the screw characteristics of a ship's low-speed diesel engine in operation. Dr. tech. nauk diss]. Leningrad, LVIMU im. adm. S. O. Makarova, 1984. 295p. (In Russian).
2. Ovchinnikov K.D. Analiz polnogo soprotivleniya korpusa sudna na razlichnyh skorostyah hoda. [Analysis of total resistance for different ship speeds]. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 31, issue 6, 2019. pp. 195-202 (in Russian).
3. Zavyalov A. A., Nebesnov V. V. Rezhimy raboty propul'sivnoj ustanovki sudna v uslovi-yah ogranichenogo farvatera [Modes of operation of the propulsive installation of the vessel in conditions of limited fairway]. *Sudovye energeticheskie ustanovki: nauchno-tekhnicheskij sbornik*. Vyp. 30. Odessa: ONMA, 2012. pp. 70-74. (In Russian).
4. Myasnikov Y. N., Nikitin A. M. Harakteristiki propul'sivnogo kompleksa v probleme obespecheniya energoeffektivnoj i ekologicheski bezopasnoj ekspluatcii morskogo sudna [Specifications of propulsion systems as a factor to ensure energy-saving exploitation and environmental safety of sea-going ship]. *Sudostroenie*, 2017. №. 5. pp. 33-39. (In Russian).
5. Sharatov A. S., Garafutdinov A. R. Sopostavlenie vintovyh harakteristik glavnyh malooborotnyh dvigatelej, poluchennyh po rezul'tatam modelirovaniya i ekspluatci-onnyh ispytaniy. [Comparison of propeller load curve of the main low-speed engines based on the results of modeling and trial tests]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra*, 2021. №. S1. pp. 147-149. (In Russian).
6. Konyukov V.L. Ocenka diapazona dopustimyh nagruzok sudovogo chetyrekhtaktnogo dizelya na osnove teplovyh raschetov. [Estimation of the range of permissible loads of a marine four-stroke diesel engine based on thermal calculations]. // *Vestnik kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*. [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University. Kerch], Kerch. 2023. Vyp. 1. pp.73-81. (In Russian)
7. Myasnikov Yu. N., Savchenko O. V., Cybulyak A. N. Raschetno-graficheskij metod postroeniya vintovyh harakteristik kombinirovannoj energeticheskoj ustanovki korablya [Graphical analytic method of obtaining torque-vs-rpm curves for a combined marine power plant]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra*, 2023. №. 1 (403). pp. 134-141. (In Russian).
8. Antonenko S. V., Kitaev M. V. Vybora propul'sivnogo kompleksa dlya sudov s neskol'-kimi rezhimami dvizheniya [Selection of a propulsive complex for vessels with multiple modes of movement] *Morskoj sbornik*, 2012. №. 1. pp. 57-62. (In Russian).
9. Orlov O. P. Masshtabnye efekty gidrodinamicheskikh i kinematicheskikh harakteristik korpusa i grebnogo vinta odnoval'nogo tankera polnyh obvodov [Hull and propeller hydromechanics of tanker with ample lines: scale effects]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra*, 2019. №. 4 (390). pp. 33-46. (In Russian).
10. Kisarova A. I. Modelirovanie funkcionirovaniya mod v ramkah ogranichitel'nyh ha-rakteristik [Modeling the functioning of modes within the framework of restrictive characteristics].

Sudovye energeticheskie ustanovki: nauchno-tekhnicheskij sbor-nik. Vyp. 30. Odessa: ONMA, 2012. 214p. (In Russian).

11. Mozhaev O. S., Popov E. S. Toplivnaya effektivnost' sudovogo mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa [Fuel efficiency of ship propulsion plant]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2014. №. 2. pp. 95-98. (In Russian).
12. Danilov A.T., Goncharov A.D. Metody ispytaniy sudovyh mekhanizmov i ustrojstv na akvatorii zavoda [Methods of testing ship mechanisms and devices in the water area of the plant]. *Sudostroenie*. 1971. №6. pp.43-46. (In Russian).
13. Myasnikov YU. N. Progressivnye ispytaniya korablej flota [Progressive testing of fleet ships]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra*, 2019. №. 3 (389). pp. 157-164. (In Russian).
14. Test result of shop trial, mitsui-m.a.n. B&W 6S70MC. Mitsui engineering & shipbuilding Co ltd, 1998. 24p.
15. Calculation program CEAS Engine Calculations. Available at: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas> (accessed: 12.01.2023). (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

**Шаратов Алексей
Сергеевич**

канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок
Керченский государственный морской технологический университет
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
relicts@yandex.ru

Sharatov Aleksei
Sergeevich

candidate of engineering sciences, associate professor at the department
of ship power plants
Kerch State Maritime Technological University
298309, Republic of Crime, Kerch, Ordzhonikidze str., 82

УДК 629.5.054

Ивановский А.Н.

ДИСТАНЦИОННАЯ ПЕРЕДАЧА ПОКАЗАНИЙ МАГНИТНОГО КОМПАСА С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация. Ввиду повсеместного распространения гирокомпасов, на практике магнитный компас используется исключительно в качестве резервного курсоуказателя. Несмотря на требования СОЛАС проводить регулярный контроль девиации, зачастую таблицы девиации фальсифицируются, что в случае возникновения аварийной ситуации может оставить судно без прибора курсоуказания. Для обеспечения непрерывного контроля состояния магнитного компаса в работе предложен способ дистанционной передачи показаний магнитного компаса в судовую навигационно-информационную систему на базе алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения. Предложенный способ может быть в значительной степени стандартизирован и использован на судах различных типов. Установка цифровой камеры на оптическую систему магнитного компаса позволяет избежать возникновения дополнительной девиации. В отличие от электронной системы передачи предлагаемое устройство может быть портативным, не требует прокладки проводов и вмешательства в конструкцию судна. Способ позволяет автоматически учитывать магнитное склонение и девиацию судна в реальном режиме времени.

Ключевые слова: магнитный компас, передача данных, репитер, компьютерное зрение, навигация, безопасность судовождения.

Aleksei N. Ivanovskii

REMOTE TRANSMISSION OF MAGNETIC COMPASS READINGS USING COMPUTER VISION ALGORITHMS

Abstract. Due to the widespread use of gyrocompasses, in practice the magnetic compass is used solely as a reserve instrument. Also, despite the requirements of SOLAS to carry out regular monitoring of deviation, often measurements are falsified, which in the event of an emergency may leave the ship without course indicator. In order to ensure continuous monitoring of the magnetic compass state, it is proposed a method for the remote transmission of magnetic compass readings into the ship's navigation and information system based on computer vision and machine learning algorithms. The proposed method can be largely standardized and used on different types of vessels. The installation of a digital camera on the optical compass system avoids the occurrence of additional deviation. Unlike the electronic transmission system, the proposed device can be portable and does not require wiring or interference with the vessel's structure. The method makes it possible to automatically account for the magnetic declination and deviation of the vessel in real time.

Keywords: magnetic compass, data transmission, repeater, computer vision, navigation, safety of navigation.

Введение. В соответствии с правилом 12 главы V конвенции СОЛАС-74 каждое судно валовой вместимостью 150 рег. т. и более обязано, как минимум, иметь главный магнитный компас (МК). Также, СОЛАС обязывает уничтожать девиацию магнитного компаса и иметь актуальные таблицы и кривые остаточной девиации. Несмотря на эти и другие требования [6][9][10], на практике магнитный компас зачастую не используется вовсе, сверка таблиц девиации проводится крайне редко, а фактические значения девиации нередко искусственно искажают, чтобы добиться соответствия с имеющейся документацией.

Пренебрежение требованиями СОЛАС вызвано несколькими причинами. Так, каждое

современное судно валовой вместимостью 500 рег. т. и более оборудовано гирокомпасом, показания которого автоматически передаются в судовую навигационно-информационную систему (НИС). Гирокомпас удобен в использовании, обладает очень высокой точностью и обычно используется в качестве основного курсоуказателя.

В то же время сами магнитные компасы обладают рядом существенных недостатков:

- отсутствует возможность сопряжения МК с НИС;
- определение курса по МК – крайне неудобный процесс, который проводится визуально, обычно с использованием оптической системы с плохой видимостью картушки;
- для определения курса по МК необходимо вручную вводить поправку на магнитное склонение и девиацию, что требует дополнительного времени со стороны судоводителя и недопустима в сложной навигационной обстановке.

Редкое использование и отслеживание состояния магнитного компаса может привести к тому, что в аварийной ситуации на судне может не оказаться актуальных таблиц девиации. Тогда, единственный доступный курсоуказатель окажется непригодным к использованию за счет возможно больших ошибок курсоказания. Все это приводит к накоплению ошибок счисления и потенциально может привести к посадке судна на мель.

Отметим, что ситуация, при которой навигация осуществляется по магнитному компасу не обязательно означает блэкаут судна, а может быть вызвана поломкой гирокомпаса и отказом спутниковых систем, например в районах боевых действий.

Для интеграции магнитного компаса в НИС разработан ряд устройств, принцип работы которых основан на использовании систем электромеханических передач [3][8]. Основным недостатком таких устройств является высокая стоимость и сложность их изготовления. Зачастую их внедрение требует проведения масштабных работ, включая прокладку проводов от магнитного компаса к навигационному мостику и устранения дополнительной девиации, возникающей при установке такого устройства.

В качестве альтернативы для дистанционной передачи данных предлагается использовать цифровую камеру, установленную на оптическую систему магнитного компаса. На большинстве судов такая система выводится на мостик и состоит из системы зеркал (рисунок 1), а потому установка камеры на мостике никак не повлияет на работу самого компаса. Камера устанавливается непосредственно на перископ оптической системы напротив зеркала. Для улучшения качества получаемого изображения и снижения количества бликов рекомендуется ограничить попадание дневного света на объектив камеры, используя чехол из плотной ткани или другого светонепроницаемого материала.

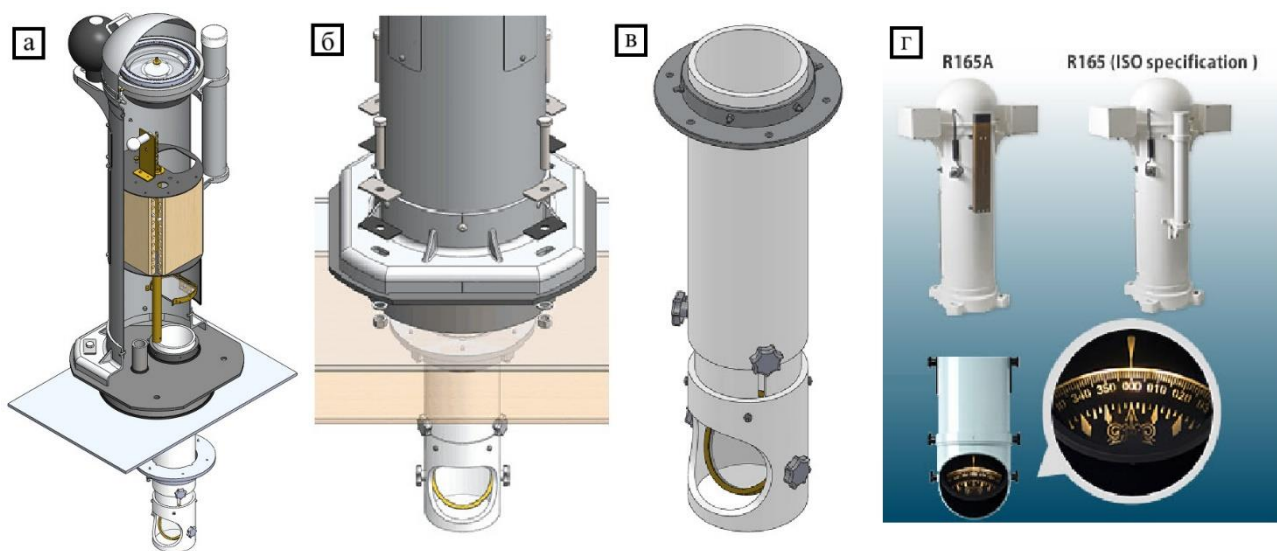


Рисунок 1 – Устройство типового магнитного компаса: а – общий вид МК; б – крепление МК к палубе; в – перископ с системой отражателей; г – фото реального компаса

Благодаря высокому уровню стандартизации картушек магнитного компаса решение задачи снятия показаний с помощью алгоритмов обработки изображений представляется возможным. Равно как и аналоги, такая система позволит получать цифровой сигнал о значении магнитного курса. Использование протокола NMEA0183 позволит передавать этот сигнал в НИС судна. Также, возможно настроить автоматическое получение магнитного склонения и курса гирокомпы для вычисления девиации МК в реальном режиме времени.

Проблема девиации стоит особенно остро на судах-контейнеровозах и судах, перевозящих груз, обладающий магнитными свойствами. Такой груз значительно влияет на собственное магнитное поле судна и может привести к отклонению стрелки МК на десятки градусов. Так как магнитное поле судна меняется от рейса к рейсу, спрогнозировать его, а тем более устранить девиацию практически невозможно. Внедрение системы на базе компьютерного зрения позволит решить эту проблему и корректировать данные о девиации судна непосредственно в море. Накопление статических данных позволит более точно прогнозировать изменение девиации в дальнейшем.

Целью исследования является разработка способа дистанционной передачи показаний магнитного компаса с помощью алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения.

Практическая значимость работы состоит в том, что предлагаемый способ позволит вести непрерывный контроль и запись показаний магнитного компаса, а также проводить оценку поправки компаса в реальном режиме времени.

Алгоритм снятия курса судна состоит из нескольких этапов:

1. подготовка изображения;
2. разбиение области обработки на секции;
3. определение положения стрелки МК;
4. обнаружение делений шкалы МК;
5. обнаружение и распознавание цифровых значений на картушке;
6. определение масштаба изображения;
7. построение координатной шкалы;
8. определение курса судна;
9. запись значений в соответствующем формате.

Конкретная реализация алгоритма может несколько отличаться от судна к судну, но общая процедура будет той же. Рассмотрим каждый из этапов по отдельности.

Подготовка изображения состоит из его бинаризации и детекции границ (рисунок 2). Бинаризация необходима для перехода от трехцветного изображения к бинарному, что существенно экономит вычислительные ресурсы и упрощает алгоритмы обработки. За счет ограничения доступа дневного света изображение будет иметь меньшее количество бликов и становится более предсказуемым. Считая, что подсветка картушки работает без значительных миганий, порог бинаризации не будет меняться со временем.

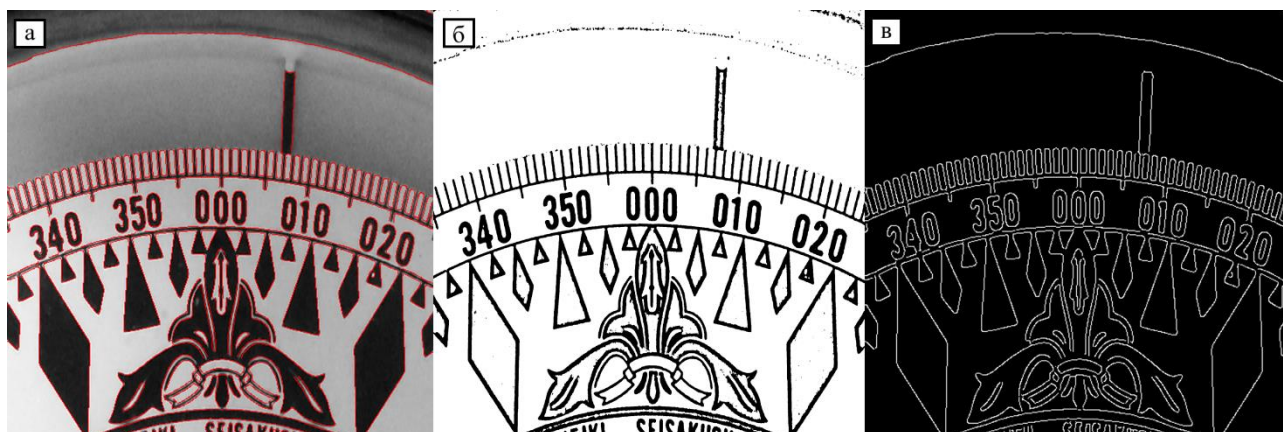


Рисунок 2 – Подготовка изображения: а – детекция границ на оригинальном изображении;

б – бинарное изображение; полученное путем порогового разделения; в – границы контрастных элементов, полученные с помощью детектора границ Кенни

Детекция границ необходима для сегментации изображения картушки на области и обеспечения раздельной работы по каждой из областей. На рисунке 2б видно, что алгоритм бинаризации не позволил определить границу котелка МК, в то время как детектор границ Кенни (на рисунке 2в) справился с этой задачей.

Для разбиения картушки на области интереса построим четыре окружности (рисунок 3а), разделяющие изображения на три секции: со стрелкой МК, с делениями шкалы и область с численными подписями шкалы. Детектор границ позволяет получить 4 множества точек, которые нужно аппроксимировать дугами окружностей. Для примера рассмотрим одну из окружностей, например самую верхнюю. Изначально у нас имеется множество из n точек с координатами $p_i=(x_i, y_i)$. Нам необходимо найти координаты центра $O=(x,y)$ и радиус окружности R . Найдем их как аргументы, при которых:

$$\sum_{i=1}^n \left(R^2 - (x - x_i)^2 - (y - y_i)^2 \right)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

Эту задачу можно свести к задаче наименьших квадратов. Для этого необходимо продифференцировать (1) по R и приравнять производную нулю. Получим:

$$R^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right) \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) после приведения подобных членов получится задача наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n \left(2(x_i - \bar{x})x + 2(y_i - \bar{y})y + \bar{x}x - x_i^2 + \bar{y}y - y_i^2 \right)^2, \quad (3)$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad \bar{x}x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad \bar{y}y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2. \quad (4)$$

Программная реализация решения данной задачи не представляет особой сложности. Зная расположение областей картушки, становится возможным исключить из нашего внимания лишние детали, такие как часть стенки котелка МК вверху изображения, или обозначения румбов и узоры, расположенные внизу (рисунок 2б).

Положение стрелки магнитного компаса можно определить с помощью преобразования Хафа. Оно даст нам уравнения двух прямых, параллельных друг другу (рисунок 3б), по которым несложно найти среднюю линию стрелки и соответствующую ей прямую.

Аналогично можно получить уравнения прямых, содержащих отрезки делений шкалы магнитного компаса (рисунок 3в). Зная, что цена деления шкалы соответствует одному градусу, можно определить масштаб изображения в соотношении пиксель/градус.

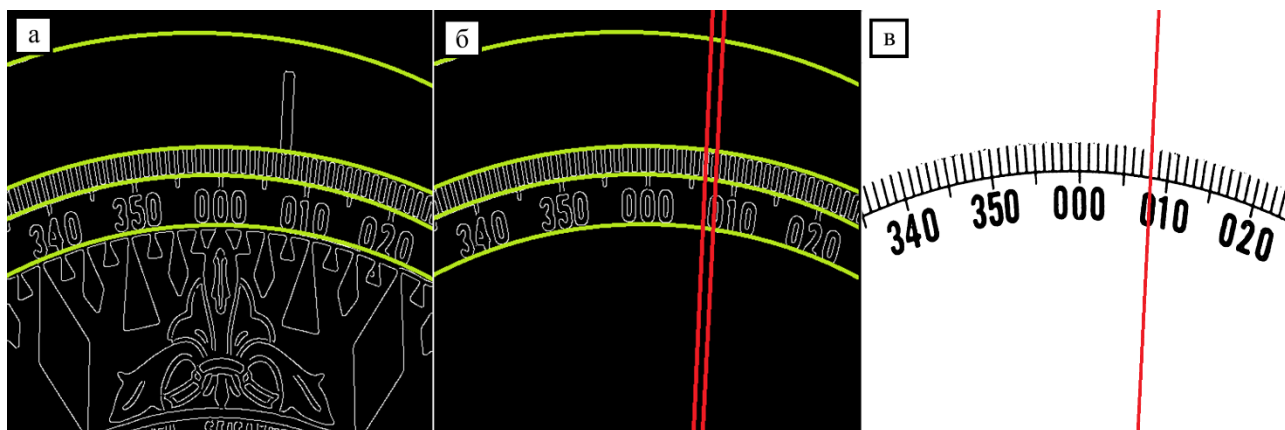


Рисунок 3 – Обработка частей изображения картушки: а – разбиение изображения на секции; б – построение прямой, соответствующей стрелке компаса; в – обработка делений шкалы, построение масштаба

Для обнаружения и распознавания цифр существует множество решений, начиная от классических алгоритмов компьютерного зрения, которые используются в системах распознавания изображений типа Adobe Fine Reader и заканчивая нейронными сетями. Учитывая, что положение камеры относительно картушки предопределено – проблемы с определением ориентации изображения не возникает и задача может быть решена множеством способов. Учитывая опыт работы над аналогичными проектами [5], было решено воспользоваться нейронной сетью архитектуры YOLOv8. При этом нейросеть применяется несколько раз – в первом случае для определения наличия троек цифр. Во втором – применительно к уже найденному прямоугольнику для чтения каждого конкретного символа (рисунок 4).

Аргументация выбора в пользу нейронной сети связана с гибкостью применения и отсутствием необходимости подстройки алгоритмов после обучения. Также, циферблат картушки представляет собой полукруг и некоторые числа находятся под наклоном, что требует дополнительных манипуляций при использовании классических алгоритмов.

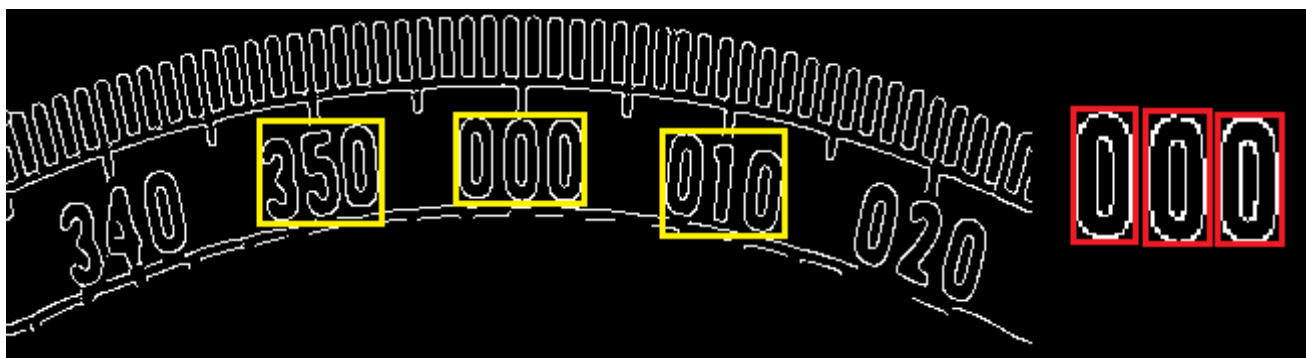


Рисунок 4 – Распознавание цифр на изображении

Зная расположение уравнение прямой, соответствующей стрелке магнитного компаса, расположение и значения цифр на картушке, обладая всей информацией о шкале МК и масштабе изображения становится возможным определить магнитный курс судна по точке пересечения стрелки МК и шкалы компаса. Получаемые измерения можно дополнительно обрабатывать с использованием фильтра Калмана [1].

Работа такой системы может осуществляться в реальном режиме времени, а потому становится возможной передача данных в НИС судна. Чтобы гарантировать совместную работу судового навигационного оборудования, Национальная Ассоциация Морской Электроники (NMEA) разработала особый протокол NMEA0183 [7]. Он позволяет

взаимодействовать с информацией, поступающей от гирокомпасов, GPS-приемников, эхолотов, радаров, барометров и прочих навигационных приборов, использующихся на морского флоте.

Все команды и сообщения передаются в текстовом формате ASCII. Сообщения начинаются с шифров, соответствующих определенному виду навигационного обо, в конце строки сообщения должны быть символы. В последнем поле сообщения может быть указана контрольная сумма текущего сообщения. Контрольная сумма соответствует всем символам сообщения (включая пробелы), расположенных между разделителями \$ и *, не включая последних. Реализация алгоритмов и программ проведена с помощью языка программирования Python, библиотек OpenCV (для компьютерного зрения) и Keras (для обучения нейросетей).

Выводы. Предложен способ дистанционной передачи показаний магнитного компаса в судовую навигационно-информационную систему на базе алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения. Способ может быть в значительной степени стандартизирован и использоваться на судах различных типов. Установка цифровой камеры на оптическую систему магнитного компаса позволяет избежать возникновения дополнительной девиации. Использование протокола NMEA0183 позволит интегрировать показания магнитного компаса в общесудовую систему. Предлагаемое решение позволяет обеспечить непрерывный контроль за показаниями магнитного компаса, их запись в журналы, а также получать актуальные таблицы девиации с учетом перевозимого груза.

Список использованной литературы:

1. *Ву Суан Хау.* Применение фильтра Калмана и метода интервальных оценок для обработки зашумленной выходной информации цифровой магнитной компасной системы / Ву Суан Хау, В. Э. Иванов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2020. – № 7. – С. 44–57.
2. *Ву Сюань Хау.* Разработка аппаратного обеспечения морского цифрового ретранслятора компаса и построение алгоритма управления им / Ву Сюань Хау, Иванов В. Э. // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – изд. 14. – №7. – 2020. – С. 51-56.
3. *Ву Суан Хау.* Исследование, изготовление корабельного цифрового магнитного компаса и применение фильтра Калмана для фильтрации зашумленной информации данного компаса / Ву Суан Хау, В. Э. Иванов, С. И. Кумков, Нгуен Динь Тхач // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2019. – №5. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/6/text.pdf> – DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.6
4. *Бранко Ливада.* Интеграция цифрового магнитного компаса со стационарной, наземной электронной системой наблюдения / Бранко Ливада, Саша Вуйич, Драган Радич, Томислав Ункашевич, Зоран Боньяк / Sensors. – 2019. – Том 19, 4331.
5. *Ивановский, А. Н.* Экономическое обоснование эффективности внедрения АСУ ТП Драфт сюрвей на судах типа балкер / А. Н. Ивановский, Е. Д. Коломейцева, А. Д. Кузнецов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2022. – № 3. – С. 242-253. – EDN LGIJF
6. Международный стандарт ISO 25862-2009 Корабли и морские технологии - морские магнитные компасы, бинокли и приборы для чтения азимута. – Первое издание. – 2009-05-15. – стр. 1-7.
7. Описание протокола NMEA-0183 [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://spacegrad.ru/NMEA-0183> (дата обращения 08.07.2023).
8. *Подпорин, С. А.* Системы курсоуказания современных шельфовых судов обеспечения / С. А. Подпорин, Э. Б. Велиев // Вісник СевНТУ. – 2014. – № 153. – С. 99-106. – EDN TSVKYH.

9. Резолюция ИМО А.382(X) Рекомендации по эксплуатационным стандартам для магнитных компасов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2469_14/1/.
10. Резолюция ИМО А.382(X)-1977 Стандарты перевозки магнитных компасов и эксплуатационные стандарты [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2469_14/1/.

References:

1. *Vu Xuan Hau*. Application of Kalman filter and interval estimation method for processing noise output information of digital magnetic compass system / Wu Suan How, V. E. Ivanov // Modern science: actual problems of theory and practice. Series "Natural and Technical Sciences". – 2020. – 7. – P. 44-57.
2. *Vu Xuan Hau*. Designing the maritime digital compass repeater hardware and its controlling algorithm / Wu Suan How, V. E. Ivanov // T-Comm – Telecommunications and Transport. – vol. 14. – no. 7. – 2020. – pp. 51-56.
3. *Vu Xuan Hau*. Research, manufacturing of the ship's digital magnetic compass and the use of the Kalman filter to filter the noise of the compass / Vu Xuan Hau, V. E. Ivanov, S. I. Kumkov, Nguyen Dinh Thach // Journal of Radio Electronics [e-magazine]. - 2019. - 5. - Access mode: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/6/text.pdf>. - DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.6
4. *Branko Livada*. Digital Magnetic Compass Integration with Stationary, Land-Based Electro-Optical Multi-Sensor Surveillance System / Branko Livada, Saša Vujić, Dragan Radić, Tomislav Unkašević, Zoran Banjac // Sensors. – 2019. – Volume 19, 4331.
5. *Aleksei N. Ivanovskii*, Analysis of an automated draught survey system implementation efficiency on bulkers / A. N. Ivanovskii, E. D. Kolomeytseva, A. D. Kuznetsov // Vestnik of Kerch State Maritime Technological University. - 2022. - 3. - P. 242-253. - EDN LGIJJF.
6. International standard ISO 25862–2009 Ships and marine technology — Marine magnetic compasses, binnacles and azimuth reading devices. First edition, 2009–05–15, pp. 1–7.
7. IMO Resolution A.382(X)—1977 Magnetic compasses carriage and performance standards [Electronic resource]. – Access mode: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2469_14/1/.
8. Description of protocol NMEA-0183 [Electronic resource]. - access mode: <http://spacegrad.ru/NMEA-0183> (date of circulation 08.07.2023).
9. *Podporin, S. A.* Systems of course indication of modern offshore supply vessels / S. A. Podporin, E. B. Veliyev // Vestnik SevNTU. – 2014. – 153. – pp. 99-106. - EDN TSVKYH.
10. IMO Resolution A.382(X) Recommendations on performance standards for magnetic compasses [Electronic resource]. Access mode: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2469_14/1/.

Сведения об авторах / Information about authors

Ивановский Алексей Николаевич ассистент кафедры судовождения и промышленного рыболовства, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
aleksei.ivanovskii@yandex.ru

Aleksei N. Ivanovskii Assistant of the Department of Navigation and Industrial Fisheries, Kerch State Maritime Technological University
298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82

УДК 639.2.06:639.2.081.16

Рязанова Т.В.
**АНАЛИЗ СИЛОВОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРОМЫСЛОВОГО
СУДНА И РЫБОЛОВНОГО ТРАЛА**

Аннотация. Рассматриваются проблемы технического состояния промыслового флота. Наряду с вводом в эксплуатацию новых рыболовных судов, активно эксплуатируют траулеры, возраст которых более тридцати лет. Траулеры, за такой долгий срок эксплуатации теряют способность обеспечивать необходимую силу тяги вследствие увеличения сопротивления корпуса судна и износа машинно-двигательного комплекса. На примере морозильного траулера типа «Орлёнок», пр. Атлантик 333, проиллюстрирована возможность оперативной оценки тяговых характеристик судна. Рыболовный трал, как сложное техническое сооружение, имеет взаимовлияющие характеристики, наиболее значимые из них, в том числе зависимость агрегатного сопротивления траловой системы от скорости судна и других факторов, представляют собой систему уравнений, называемых паспортом трала. Приведены числовые примеры расчёта гидродинамического сопротивления рыболовного трала и фактической тяги судна на различных скоростях и нагрузках главного двигателя, позволяющие оценить возможность рыболовного судна оптимально вести промысел.

Ключевые слова. Фактическая тяга, потери тяги, паспорт трала, гидродинамическое сопротивление

Riazanova T.V.
**ANALYSIS OF THE POWER COMPATIBILITY OF A FISHING
VESSEL AND A FISHING TRAWL**

Abstract. The problems of the technical condition of the fishing fleet are considered. Along with the commissioning of new fishing vessels, trawlers whose age exceeds thirty years are actively being operated. Trawlers, for such a long period of operation, lose the ability to provide the necessary traction force due to an increase in the resistance of the vessel's hull and wear of the engine and propulsion complex. On the example of a freezing trawler of the "Eaglet" type, 333 Atlantic Ave., the possibility of an operational assessment of the vessel's traction characteristics is illustrated. A fishing trawl, as a complex technical structure, has mutually influencing characteristics, the most significant of them, including the dependence of the aggregate resistance of the trawl system on the speed of the vessel and other factors, are a system of equations called a trawl passport. Numerical examples of calculating the hydrodynamic drag of a fishing trawl and the actual thrust of the vessel at various speeds and loads of the main engine are given, allowing to assess the ability of a fishing vessel to optimally conduct fishing.

Keywords. Actual thrust, thrust losses, trawl passport, hydrodynamic resistance

Введение. Океаническое и морское рыболовство является основной составляющей рыбохозяйственного комплекса. «Главная цель функционирования рыбохозяйственного комплекса состоит в удовлетворении потребностей в рыбной продукции продовольственного и непродовольственного назначения. Именно первичный сектор рыбохозяйственного комплекса – рыболовство и рыбоводство, во многом предопределяет структуру, масштаб и конкретные функции элементов национальной экономики, вообще, и рыбохозяйственного комплекса, в частности» [1, С.564]. Несмотря на бурное развитие аквакультуры, потребность человечества в рыбной продукции эта отрасль не покрывает, к тому же гидробионты, добываемые посредством промысла, являются более экологически чистыми и полезными. «Всего в мире в 2021 году было произведено 178 млн тонн продукции; в этом объеме

продукция промышленного рыболовства составила 51 % (90 млн тонн), а продукция аквакультуры – 49 % (88 млн тонн)» [2].

Материалы и методы исследования. Начиная с 50-х годов прошлого столетия, рыбная промышленность начала бурно развиваться, произошла индустриализация отрасли, увеличились в размерах орудия промысла и появилось множество проектов рыболовных судов, которые после постройки успешно осуществляли, а некоторые и до сих пор осуществляют свою производственную деятельность по добычи рыбных и нерыбных объектов. Траулер морозильный типа «Орлёнок» проект Атлантик 333, в период 1981-85 года в Штральзунде было построено 84 судна такого типа, большинство из судов такого типа уже не эксплуатируются, но небольшая часть всё ещё продолжает промысел и для его успешности, нужно учитывать техническое состояние судна.

Одним из условий безопасной и прибыльной эксплуатации рыболовного судна является соизмерение величины тяговых усилий судна и сопротивления траловой системы, оптимальное соотношение которых составляет:

$$P_{pф} = \mp 0,95 * \sum R_{Тр} \quad (1),$$

где $P_{pф}$ – располагаемая фактическая тяга траулера, кН; $\sum R_{Тр}$ – суммарное агрегатное сопротивление рыболовной траловой системы, кН.

«Измерить фактическую тягу как сложную функцию можно единственным способом: сравнить тягово-скоростные характеристики, которыми обладало судно с момента постройки, так называемая тяга нового судна (эталон) с таковыми у судна, находящегося в эксплуатации» [3]. Воспользовавшись данными, приведёнными в литературном источнике [3], свели в таблицу 1 информацию о тяге нового судна типа «Орлёнок» в зависимости от мощности, передаваемой на винт судна и скорости, обработав таблицу, получили зависимость (2).

Таблица 1 - Результаты сдаточных испытаний судна пр. А-333

№ испытания	Ne, кВт	V, узл	Pp, кН	№ испытания	Ne, кВт	V, узл	Pp, кН
1	1765	0	244	12	1060	6	103
2	1588	0	228	13	1765	10	98
3	1412	0	208	14	1588	10	82
4	1060	0	164	15	1412	10	70
5	1765	2	229	16	1060	10	30
6	1588	2	215	17	1660	13,2	0
7	1412	2	194	18	1360	12,3	0
8	1060	2	151	19	1060	10,6	0
9	1765	6	177	20	760	7,0	0
10	1588	6	165	21	487	0	0
11	1412	6	144	22	1765	5	180

$$P_p = 0,462Ne - 1,223 \cdot 10^{-4}Ne^2 - 5,2634V - 0,891V^2 - 194,7. \quad (2),$$

где P_p – располагаемая тяга, кН; Ne – мощность, пошедшая на винт судна, кВт, V – скорость судна, узл.

«Зависимость (2) воспроизводит информацию из таблицы 1 с точностью: $\sigma(P_p)=\pm 4,6$ кН, при числе опытов 22 и доверительной вероятности 0,9 имеем $t_\alpha=1,725$, тогда $\Omega(P_p)=\pm 8,0$ кН, что является очень высокой точностью для данного случая. График зависимости (2) приведен на рисунке 1

На рисунке 1 верхняя кривая соответствует мощности, пошедшей на винт $Ne=1765$ кВт (100%), последующие – 1590 кВт (90%); 1410 кВт (80%) и 880 кВт (50%)» [3].

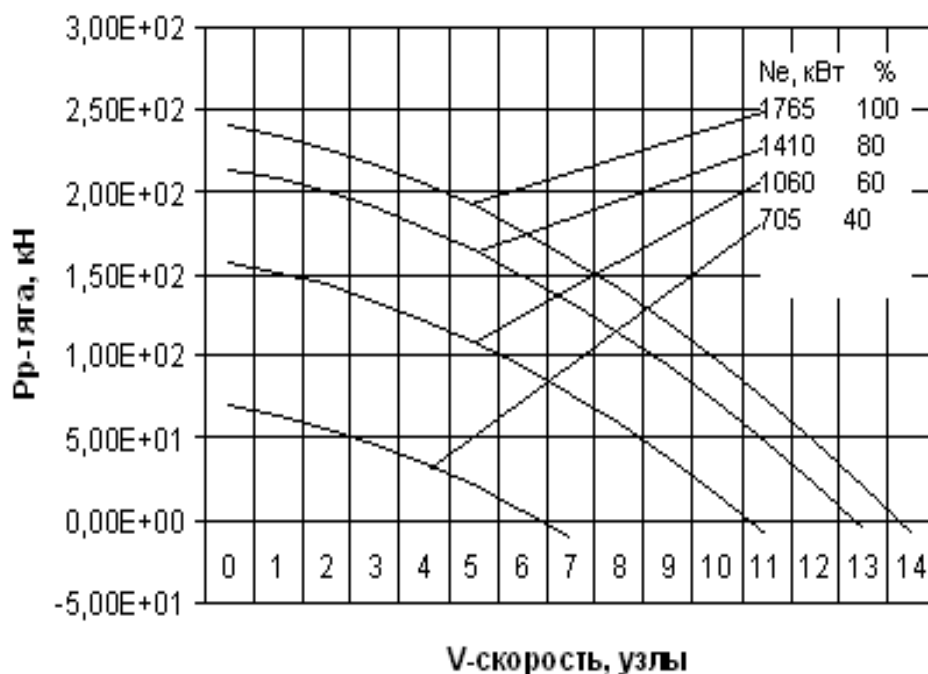


Рисунок 1 - Тяговая характеристика нового СТМ пр. А-333, тип «Орлёнок»

Главная энергетическая установка на судах пр. А-333 состоит из двух главных двигателей, суммарной мощностью 1765 кВт. По статистике, собранной с семи судов, с 14 двигателями в [3] получены зависимости определения относительной мощности главных двигателей по косвенным характеристикам t_{Γ} – температуре выхлопных газов и P_H – давлению наддува.

$$\overline{N_{e_{ГД}}} = 0,4973t_{\Gamma} + 186,36P_H - 11, \quad (3)$$

Зависимость (3) имеет достоверность $\Omega = \pm 9,2\%$ при $p = 0,9$.

Фактическую располагаемую траулером тягу можно определить как разницу между тягой P_{pH} , кН, которой судно располагало при сдаточных испытаниях и потерями судном тяги за время его эксплуатации ΔP_p , кН.

$$P_{pф} = P_{pH} - \Delta P_p, \quad (4)$$

P_{pH} для судов типа «Орлёнок» определяется по зависимости (2).

«Потеря тяги имеет два источника своего происхождения:

- износ машинно-двигательного комплекса (МДК) - $\Delta P_{p_{МДК}}$;
- износ корпус судна - $\Delta P_{p_{К}}$.

Первая составляющая $\Delta P_{p_{МДК}}$ появляется и меняется в процессе эксплуатации по следующим причинам:

- машина (ГД) в процессе эксплуатации теряет способность развивать номинальную мощность;
- гребной вал в процессе эксплуатации испытывает дополнительное трение в опорах из-за нарушения центровки, из-за износа подшипников, из-за деформации на волнении;
- винт в процессе эксплуатации меняет свои геометрические и гидродинамические характеристики.

Машина (ГД) теряет способность развивать номинальную мощность из-за ее износа:

- износ ЦПГ (цилиндропоршневой группы);
- износ топливной аппаратуры;
- износ ГТН (газотурбо нагнетателя);

-нарушение регулировок (клапанов, опережения момента впрыска топлива в цилиндры, закоксованности продувочных окон).

Винт меняет свои характеристики из-за роста шероховатости и даже из-за изменения его геометрии (подрезка кромок).

На практике есть и еще не прямые, а косвенные причины, увеличивающие $\Delta P_{Р\text{мдк}}$:

-изменение атмосферы ($t_{\text{возд.}}$, W , P_0);

-изменения температуры воды ($t_{\text{воды}}$);

-износ вспомогательных дизель-генераторов (ВДГ) и связанный с этим большой отбор мощности валогенераторами от ГД.

Вторая составляющая потеря тяги появляется по целому ряду причин:

-изменение осадки судна и связанное с этим изменение площади смоченной поверхности подводной части судна;

-изменение посадки судна (наличие дифферента или крена);

-ветер и волнение;

-рост шероховатости корпуса судна» [3].

В первом приближении потерю тяги предлагается описывать линейной моделью:

$$\Delta P_p = A_0 + A_1 V \quad (5)$$

Причем,

$$A_0 = \Delta P_{p\text{мдк}} \quad (6)$$

$$A_1 = \frac{\Delta P_{P\text{сх}} - \Delta P_{P\text{мдк}}}{V_{\text{сх}}}, \quad (7)$$

где $\Delta P_{P\text{сх}}$ – потеря тяги на свободном ходу, кН; $V_{\text{сх}}$ – скорость свободного хода, узл.

В таком случае задача по определению фактической тяги судна на заданной скорости (например, скорости траления оптимальной для заданного объекта лова в заданном районе промысла) и на заданной мощности, пошедшей на винт, сводится к методике, изложенной ниже.

- По мощности, пошедшей на винт N_e и V_T по зависимости $P_{PH} = f(N_e, V_T)$ рассчитывается P_{PH} , в рассматриваемом случае по зависимости (2).

- Проводится два этапа ходовых испытаний судна: на свободном ходу и в дрейфе с работающим ГД на винт при нулевом упоре.

«В ходе испытания на свободном ходу судно не отвлекается от выполнения производственных программ, так как на таком режиме судно находится на промысле много часов в сутки (забеги в точку постановки трала и местный поиск рыбы). Практика показала, что для более точного определения $\Delta P_{P\text{сх}}$ нужно, чтобы судно двигалось в заданном режиме не менее двадцати минут от последнего маневра машиной или рулем. За это время движение судна и работу главного двигателя можно считать пришедшими в положение равновесия» [3] При этом испытании судно следует прямым курсом при максимальной эксплуатационной нагрузке на ГД. Измеряются параметры – скорость свободного хода $V_{сх}$, относительная мощность главного двигателя $\overline{N_e}_{гд}$, (можно определить по судовому прибору или по косвенным характеристикам (t_g , P_H , P_z , G), отбор мощности валогенератором $N_{вг}$, если он имеется на судне. По $\overline{N_e}_{гд}$ рассчитывается мощность, подводимая к винту

$$N_e = \frac{\overline{N_e}_{гд} N_{eгдном}}{100\%} - \frac{N_{вг}}{\eta_{вг}} \quad (8)$$

У судна, двигающегося на полной скорости свободного хода тяговые усилия равны нулю, так как вся развиваемая мощность идёт на преодоление сопротивления движению и развитию скорости, следовательно величина полученной расчетом тяги нового судна на скорости свободного хода и будет потерянной для данного судна на свободном ходу

В ходе второго испытания – в дрейфе с работающим ГД на винт при нулевом упоре (так же не отвлекающим судно от выполнения производственных задач, так как такой режим характерен в фазе после подъема кутка тралового мешка на палубу) измеряют $\overline{N_e}_{гд}$, $N_{вг}$ По величине $\overline{N_e}_{гд}$ рассчитывается мощность, пошедшая на винт по (8). $\overline{N_e}_{гд}$ в этом случае

можно определить только по косвенным характеристикам, так как судовой прибор при такой небольшой мощности не работает [5].»

По величине N_e и $V=0$ с использованием зависимостей $P_{PH}=f(N_e, V)$ рассчитывается величина $P_{РМДК}$;

- по зависимости (7) рассчитывается коэффициент A_1 .

- по зависимости (5) рассчитывается вид зависимости $\Delta P_P=f(V)$ и сама величина ΔP_P на заданной скорости V_T ;

- рассчитывается по зависимости (4) величина фактической тяги траулера при заданных условиях (N_e, V) и при его фактическом техническом состоянии.

В таблицу 2 сведём данные, полученные экспериментальным путем и данные, полученные расчётом, по методике, описанной выше. Скорости траления выбираем минимально и максимально возможные для облова скумбрии, сардинеллы в районе ЦВА.

Таблица 2 – Определение фактической тяги траулера на различных скоростях траления.

	$\bar{N}_{егд},$ %	$t_r,$	P_H	$V_{тр},$ узл	$V_{сх},$ узл	$N_e,$ кВт	$P_{PH},$ кН	$P_{рсх},$ кН	$\Delta P_P,$ кН	$P_{рф},$ кН
1	97	188,2	0,049	4	13,1	1665	200,2	13,1	48,3	151,9
2	97	190,3	0,052	6	12,6	1665	172		54,6	117,4
3	92	230	0,072	4	10,9	1570	194		62,3	131,7
4	92	240	0,068	6	9,8	1570	165		58,4	106,6

Ранее [4], на многие пелагические тралы разработаны технические паспорта, представляющие собой систему уравнений, связывающих между собой факторы, которые изменяют в процессе промысла и функции отклика траловой системы, которые меняют свои значения вслед за изменяющимися факторами. Траловая система обладает множеством таких характеристик, но, в конечном итоге, для технических паспортов трала стали использовать по четыре фактора и четыре функции отклика. К факторам отнесены следующие параметры:

- L – длина вытравленных ваеров, варьируется в довольно широких пределах. Длиной вытравленных ваеров выводят трал на необходимый горизонт хода для наведения устья трала на рыбное скопление. Длина ваеров не бывает меньше 200 м, а максимум может достигать до 4000 м, в нашей работе возьмем длину ваеров для средних глубин – 1500 м.

- V - скорость траления, узл. Примем за минимальное значение скорость траления, равную 4 узлам, а максимальное 6 узлам.

$L_{кл}$ - длина кабельной оснастки трала. Этот фактор также изменяют на промысле в течение суток (дневные и ночные траления).

$M_{гу}$ - масса грузов-углубителей, также может варьироваться в зависимости от ночных и дневных тралений, примем $M_{min} = 250$ кг (ночное траление), $M_{max}=1000$ кг (дневное траление) [5].

При изменении вышеперечисленных факторов, существенно изменяются параметры траловой системы, которые отнесены к функциям отклика:

- R , – агрегатное сопротивление траловой системы, кН;

- H – горизонт хода трала, м;

- h – вертикальное раскрытие трала, м;

- L_T - расстояние между траловыми досками, м.

На судах типа «Орлёнок» ведут промысел такими тралами, как, например, 70/370, 78/420 [6].

Трал 70/370 имеет технический паспорт в виде:

$$\left. \begin{aligned} R &= 0,01L + 25,6V + 0,005M + 0,02l_k \\ H &= 0,2L - 43,8V + 0,077M + 0,08l_k + 96 \\ h &= 0,0005L - 9,2V + 0,01M + 0,08l_k + 58,5 \\ l_T &= 0,02L + 9,5V - 0,0007M + 0,3l_k + 21,5 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Трал 78/420 имеет технический паспорт в виде:
Трал 78/420

$$\left. \begin{aligned} R &= 0,015L + 27V + 0,008M + 0,035 \cdot l_k + 26 \\ H &= 0,23L - 51V + 0,08M + 0,1l_k + 103 \\ h &= 0,0005L - 5,25V + 0,011M + 0,08l_k + 44,6 \\ l_T &= 0,02L + 5,5V - 0,007M + 0,3l_k + 55,3 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Особенный интерес для нашего анализа будет представлять расчет агрегатного сопротивления траловой системы, поскольку оно должно быть соизмеримым с тяговым усилием, развиваемым траулером.

Рассчитаем сопротивление траловой системы с наименьшими и наибольшими значениями длины ваеров, кабельной оснастки, грузов-углубителей и скорости траления, значения которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчёт параметров тралов

Наименование фактора	Значение фактора		Функции отклика	70/370		78/420	
	min	max		min	max	min	max
Длина ваеров L, м	500	1500	Сопротивление трал. сист. R, кН	109,65	178,6	145	225
Скорость траления V _{тр} , узл	4	6	Горизонт хода H, м	44	226	39	242
Масса грузов-углуб. M _{гу}	250	1000	Верт.раскрыт. h, м	28,5	36	30,6	41
Длина кабельной Оснастки l _{кл} , м	50	200	Расст.между трал.досками l _T , м	84,3	160	100,5	171

По результатам расчётов таблиц 2 и 3 составим таблицу 4 для более удобного сравнения рассчитанных сопротивлений траловой системы и фактических тяг траулеров.

Таблица 4 – Сравнение силовых характеристик системы судно-трал

N _{егд}	92%		97%		92%		97 %	
	4	6	4	6	4	6	4	6
V _{тр} , узл	4	6	4	6	4	6	4	6
R _{рф} , кН	151,9	117,4	131,7	106,6	151,9	117,4	131,7	106,6
R _{тр} , кН	109,65	178,6	109,65	178,6	145	225	145	225
Трал	70/370				78/420			

Результаты исследования и обсуждения. Анализируя таблицу 4, можно сделать выводы о том, что рассчитанные значения сопротивления траловой системы на принятых

минимальных и максимальных значениях длины ваеров, скорости траления, массы грузов-углубителей и длины кабельной оснастки трала в большей части соответствуют тяге, которую может развить судно рассматриваемого типа, рассмотрим подробнее.

Режим 1: Относительная мощность энергетической установки 92%, скорость траления $V_{TR}=4$ узла, $L=500$ м, $M_{ГУ}=250$ кг, $l_{КЛ}=50$ м

$P_{рф} = 151,9$ кН $> R_{TR} = 109,65$ кН (трал 70/370)

$P_{рф} = 151,9$ кН $> R_{TR} = 145$ кН (трал 78/420)

На этом режиме соотношение между тягой судна и агрегатным сопротивлением трала оптимально, но следует учитывать, что скорость траления 4 узла не большая для рассматриваемых объектов лова и существует резерв по тяге для увеличения скорости траления, а значит, больших уловов.

Режим 2: Относительная мощность энергетической установки 92%, скорость траления $V_{TR}=6$ узла, $L=1500$ м, $M_{ГУ}=1000$ кг, $l_{КЛ}=200$ м

$P_{рф} = 117,4$ кН $< R_{TR} = 178,6$ кН (трал 70/370)

$P_{рф} = 117,4$ кН $< R_{TR} = 225$ кН (трал 78/420)

На этом режиме условие $P_{рф} = \mp 0,95 * \sum R_{TR}$ не выполняется, судну «тяжело» буксировать тралы указанных конструкций при скорости 6 узл, длине вытравленных ваеров 1500 м, длительная эксплуатация на таком режиме может привести к поломкам двигателей.

Режим 3: Относительная мощность энергетической установки 97 %, скорость траления $V_{TR}=4$ узла, $L=500$ м, $M_{ГУ}=250$ кг, $l_{КЛ}=50$ м

$P_{рф} = 131,7$ кН $> R_{TR} = 109,65$ кН (трал 70/370)

$P_{рф} = 131,7$ кН $< R_{TR} = 145$ кН (трал 78/420)

Для трала 70/370 условие соотношение тяги судна и сопротивления трала выполняется, для трала 78/420 не выполняется, но не критично.

Режим 4: Относительная мощность энергетической установки 97%, скорость траления $V_{TR}=6$ узла, $L=1500$ м, $M_{ГУ}=1000$ кг, $l_{КЛ}=200$ м

$P_{рф} = 106,6$ кН $< R_{TR} = 178,6$ кН (трал 70/370)

$P_{рф} = 106,6$ кН $< R_{TR} = 225$ кН (трал 78/420)

На этом режиме условие $P_{рф} = \mp 0,95 * \sum R_{TR}$ не выполняется, судну «тяжело» буксировать тралы указанных конструкций при скорости 6 узл, длине вытравленных ваеров 1500 м, длительная эксплуатация на таком режиме может привести к аварийным ситуациям, в частности, к поломкам двигателей.

Проведенный расчет позволяет наглядно убедиться в важности определения и понимания значения тягового усилия, которым обладает промысловое судно в текущий момент, также важно знать агрегатное сопротивление буксируемого за судном трала, его зависимость от варьирования других параметров траловой системы – скорости траления, длины ваеров и кабельной оснастки, и других факторов. Правильный подбор компонентов системы «судно-трал» позволит вести промысел безаварийно и прибыльно.

Список использованной литературы:

- 1 Яркина Н. Н., Ушаков В. В. Рыбохозяйственный комплекс Российской Федерации: секторально-функциональная систематизация и структурирование в контексте устойчивого развития // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2022. № 4. С. 561-575;
- 2 Сайт продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН. Состояние Мирового рыболовства и аквакультуры – 2022. URL: <https://www.fao.org/3/cc0461ru/online/sofia/2022/world-fisheries-aquaculture.html> (дата обращения 18.08.2023);
- 3 Рязанова Т.В. Повышение эффективности промысловой эксплуатации траулеров на основе факторного анализа их тяг: дис. ...канд.техн.наук. Калининград,2011. 168 с;

- 4 Долин Г.М. Паспортизация орудий рыболовства // материалы VI Международного Балтийского морского форума. Калининград, 2018. Том 2. С. 364-368;
- 5 Долин Г.М., Рязанова Т.В. Опыт технической паспортизации малого рыболовного траля // «Рыбпром». 2009. № 3. С.62-63;
- 6 Татарников В.А., Акишин В.В., Истомин И.Г., Астафьев С.Э. Способы и орудия лова: справочное пособие. Москва, ВНИРО, 2016.286 с.

References:

- 1 Iarkina N. N., Ushakov V. V. Rybokhoziaistvennyi kompleks Rossiiskoi Federatsii: sektoral'no-funktsional'naia sistematzatsiia i strukturirovanie v kontekste ustoichivogo razvitiia [Fisheries complex of the Russian Federation: sectoral and functional systematization and structuring in context of sustainable development]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2022, no. 4, pp. 561-575.
- 2 Sayt prodovol'stvennoj i sel'skohozyajstvennoj organizacii OON. Sostoyanie Mirovogo rybolovstva i akvakul'tury – 2022 [Site of Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture 2022]. (In Russian). Available at: <https://www.fao.org/3/cc0461ru/online/sofia/2022/world-fisheries-aquaculture.html> (accessed 18.08.2023).
3. Riazanova T. V. *Povyshenie effektivnosti promyslovoi ekspluatatsii traulerov na osnove faktornogo analiza ikh tiag. Dissertatsiia ...kand. tekhn. nauk* [Improving efficiency of commercial operation of trawlers based on factor analysis of their thrusts: Diss.... Cand.Tech.Sci.]. Kaliningrad, 2011. 168 p. (In Russian);
- 4 Dolin G.M. Paspportizaciya orudij rybolovstva [Certification of fishing gear]. materialy VI Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma. Kaliningrad, 2018. vol.2, pp. 364-368. (In Russian);
- 5 Dolin G.M., Riazanova T.V. Opyt tekhnicheskoy pasportizacii malogo rybolovnogo trala [Experience in technical certification of small fishing trawl], 2009, no.3, pp.62-63. (In Russian);
- 6 Tatarnikov V.A., Akishin V.V., Istomin I.G., Astaf'ev S.E. Sposoby i orudiya lova: spravocnoe posobie [Fishing methods and tools: a reference guide]. Moscow, VNIRO, 2016, 236 p. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

Рязанова Валерьевна Татьяна канд. техн. наук., доцент кафедры судовождения и промышленного рыболовства Керченский государственный морской технологический университет
298309, Республика Крым, г.Керчь, ул. Орджоникидзе,82
methodmf@mail.ru

Riazanova Valer'evna Tatiana Ph.D. (Technical) Associat Professor of the Department of Navigation and Commercial Fishing
Kerch State Maritime Technological University
298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze, str.,82
methodmf@mail.ru

УДК 656.61.052-049.5:519.67

Святский В.В.

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА МОРСКИХ ПУТЯХ

Аннотация. В данной статье исследуются проблемы обеспечения безопасности расхождения с судами которые могут представлять потенциальную опасность. В исследовании рассматривается содержательная модель, разработанная для решения задач, связанных с оценкой опасности столкновения и выбором оптимального маневра. Основным результатом данного исследования является создание каталога сценариев сближения судов и вариантов маневров, позволяющих избежать столкновения. Этот каталог может служить основой для разработки формализованных моделей, позволяющих автоматически выбирать оптимальные маневры или предлагать решения для поддержки принятия решений. Рассмотренные принципы и алгоритмы позволяют произвести синтез структуры системы управления маневрированием для различных условий плавания, классов решаемых задач и создать условия для обеспечения гарантированной безопасности плавания.

Ключевые слова: предотвращение столкновений, безопасный маневр, навигационная безопасность.

Sviatskii V.V.

CONTENT MODEL OF THE TASK OF ENSURING NAVIGATIONAL SAFETY ON SEA ROUTES

Abstract. This paper investigates the problems of ensuring the safety of diverging from vessels that may pose a potential danger. The study considers a meaningful model developed to solve problems related to collision hazard assessment and selection of an optimal manoeuvre. The main result of this study is the creation of a catalogue of convergence scenarios and manoeuvre options to avoid collision. This catalogue can serve as a basis for the development of formalised models to automatically select optimal manoeuvres or to propose solutions for decision support. The considered principles and algorithms allow to synthesise the structure of manoeuvring control system for different sailing conditions, classes of solved problems and to create conditions for guaranteed safety of navigation.

Keywords: collision avoidance, safe manoeuvring, navigation safety

Актуальность и проблемы исследований. После того, как заданный алгоритм функционирования системы управления составлен с учетом жестких ограничений и прогноза внешних условий, начинается процесс движения. При этом появляются мягкие ограничения в виде других судов, количество и характер опасности встречи с которыми носит случайный характер. Для контроля над ситуацией сближения и решения вопроса о необходимости изменения заданного алгоритма функционирования системы судоводитель должен оценить обстановку и принять решение [1]. При большом количестве судов такая задача существенно усложняется, а кибернетических устройств, для поддержки принятия решения не существует.

Цель исследований. Для обоснования алгоритма интеллектуальных действий судоводителя рассмотрим содержательную модель решения задачи оценки опасности столкновения и выбора маневра.

Методы исследований. Для разработки алгоритмов интеллектуальных действий оператора использовались: теория исследования операций, теория алгоритмов и систем, метод возможного направления при разработке каталога ситуаций сближения и маневров расхождения; методы аналитической геометрии, теория множеств, теории алгоритмов и

кинематики тел на плоскости при решении задачи расхождения на судах в море и береговых СНО; теория управления, математическое программирование при формализации безопасных маневров и разработке системы поддержки принятия решения при чрезмерном сближении в стесненных условиях; теория прогнозирования, теория систем и методы исследования операций использовались при обосновании и разработке системы гарантированной безопасности маневрирования.

Результаты исследований. При использовании радиолокатора (РЛС) судоводитель визуально выбирает на экране опасные, по его мнению, отметки по характеру изменения полярных координат, определяет лимитирующее судно и относительно него выполняет маневр. Для того, чтобы произвести оценку ситуации, определить опасность столкновения и решить задачу без выполнения расчетов, необходимо четко знать закономерности перемещения судов в режиме относительного движения [2]. Для их понимания нет необходимости производить какие-либо вычисления, а требуется четко вести непрерывное наблюдение за экраном РЛС и знать факторы, от которых зависит изменение обстановки при маневрировании собственного и других судов [3]. Характер изменения относительного движения судов зависит от трех факторов, которые определяют ситуацию сближения: расположения других судов относительно курса собственного судна – справа или слева; величины курсового угла между линией относительного движения (ЛОД) и диаметральной плоскостью своего судна, курсового угла ЛОД - $\alpha < 90^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha > 90^\circ$; расположением ЛОД относительно собственного судна – пересекает курс по носу, проходит через нас или пересекает линию курса по корме. Рассмотрим пример (см.рис.1). Судно А. Расположено слева относительно ДП, курсовой угол ЛОД $\alpha < 90^\circ$, ЛОД пересекает курс по носу. Судно В. Расположено справа относительно ДП, курсовой угол ЛОД $\alpha > 90^\circ$, ЛОД пересекает линию курса по корме. Изменение относительного движения будем характеризовать двумя параметрами:

- направлением разворота ожидаемой линии относительного перемещения (ОЛОД) относительно первоначальной ЛОД – по часовой стрелке или против часовой стрелки;
- изменением расположения ОЛОД по отношению к собственному судну – удаляется от нас или приближается к нам.

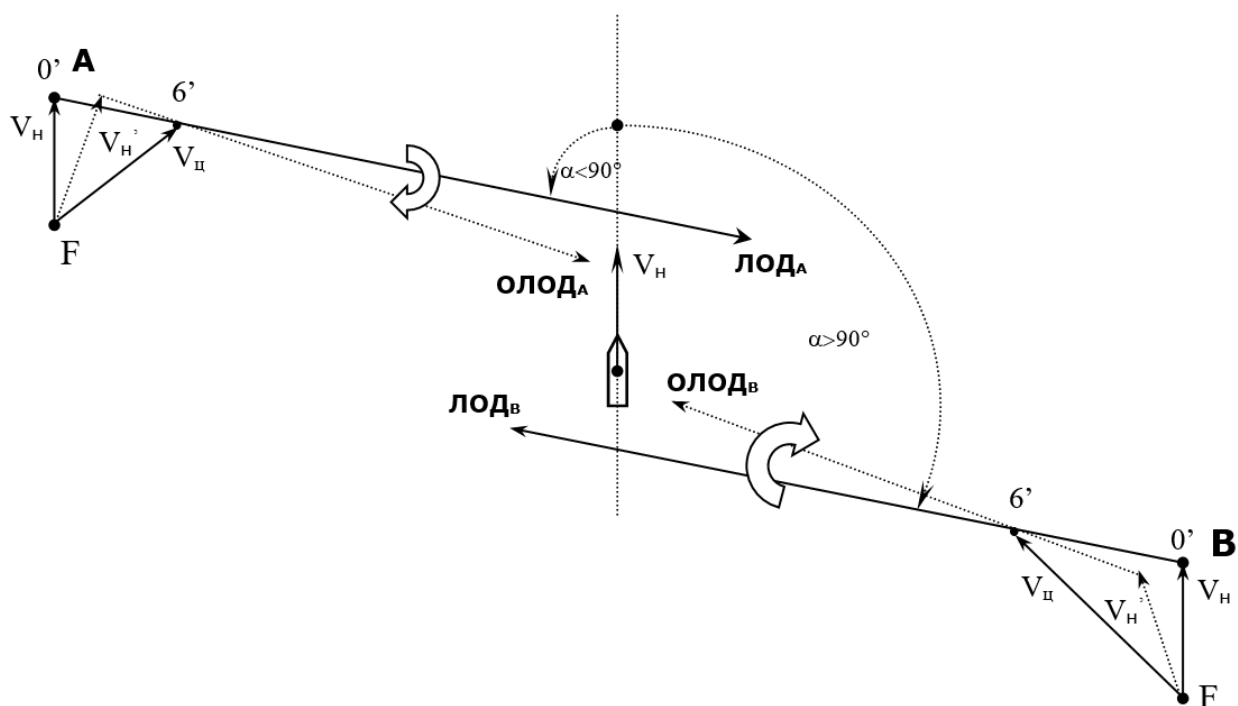


Рисунок 1 – Закономерности относительного движения

Целью всякого маневра для расхождения является необходимость того, чтобы ОЛОД удалялся от нас.

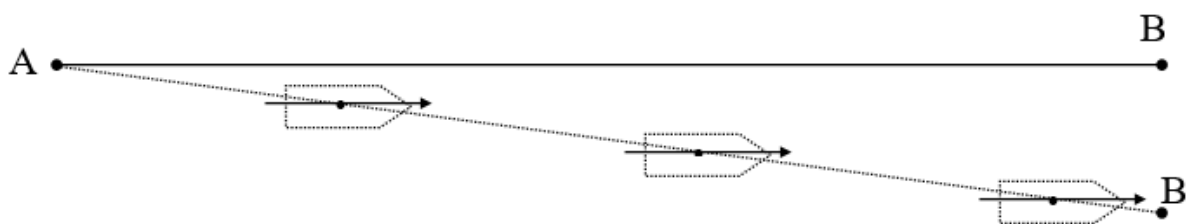


Рисунок 2 – Схема движения при курсовом способе управления движением

Пример (см.рис.2). Судно А. Собственное судно выполнило маневр поворота вправо и имеет вектор перемещения V_n' . В результате ЛОДА развернулся по часовой стрелке и приблизился к нам. Судно В. Собственное судно выполнило разворот влево и имеет вектор перемещения V_n' . В результате ЛОДВ развернулся по часовой стрелке и приблизился к нам. При решении задачи расхождения без вычислений производят качественную оценку ситуации и принимают принципиальное решение по маневрированию – изменять курс и/или скорость [4]. Критерием правильности принятого решения является тот факт, что действия собственного судна являются заметными для других, которые наблюдают ситуацию только с использованием РЛС [5]. Первоначально для систематизации ситуаций сближения и видов маневрирования рассмотрим все возможные случаи расхождения и изменения режима движения, полагая, что никаких ограничений на действия судоводителей нет [6, 7]. Решение задачи расхождения представляет собой комбинаторную процедуру рассмотрения относительного перемещения всех сочетаний из двух судов и применяемых маневров. Для определения числа сочетаний необходимо вычислять факториалы элементов $r!$, $K!$ и их комбинацию по известным формулам:

$$r! = \prod_{r=1}^n r \text{ и } K! = \prod_{k=1}^m K. \quad (1)$$

Для вычислений факториалов будем использовать приближенную формулу Стирлинга:

$$r! \approx r^r \cdot e^{-r} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}. \quad (3)$$

При 20-ти судах, наблюдаемых на экране РЛС, число сочетаний по два судна, вычисленное по формуле (2), будет равно 190. Количество возможных маневров собственного и другого судна, включающие все виды маневрирования, равно 16 и приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика видов маневров для расхождения

Судно	№№ пп	Условное обозначение	Характеристика вида маневра
Собственное судно	1	$V_{нп}$	Отворот вправо собственного судна
	2	$V_{нл}$	Отворот влево собственного судна
	3	$V_{нум}$	Уменьшение скорости собственного судна
	4	$V_{нув}$	Увеличение скорости собственного судна
	5	$V_{нпум}$	Отворот вправо и уменьшение скорости собственного судна
	6	$V_{нпув}$	Отворот вправо и увеличение скорости собственного судна
	7	$V_{нлум}$	Отворот влево и уменьшение скорости собственного судна
	8	$V_{нлув}$	Отворот влево и увеличение скорости собственного судна

Другое судно	9	$V_{цп}$	Отворот вправо другого судна
	10	$V_{цл}$	Отворот влево другого судна
	11	$V_{цум}$	Уменьшение скорости другого судна
	12	$V_{цув}$	Увеличение скорости другого судна
	13	$V_{цпум}$	Отворот вправо и уменьшение скорости другого судна
	14	$V_{цпув}$	Отворот вправо и увеличение скорости другого судна
	15	$V_{цлум}$	Отворот влево и уменьшение скорости другого судна
	16	$V_{цлув}$	Отворот влево и увеличение скорости другого судна

Характеристика возможных ситуаций расхождения, с учетом взаимного расположения собственного и других судов, представлена в табл.2.

Таблица 2 – Классификация ситуаций расхождения

Суда	КУ ЛОД	№№ пп	Характеристика прохождения ЛОД
Справа	$\alpha < 90^0$	1	ЛОД пересекает линию курса по носу
	$\alpha < 90^0$	2	ЛОД проходит через нас
	$\alpha < 90^0$	3	ЛОД пересекает линию курса по корме
	$\alpha = 90^0$	4	ЛОД пересекает линию курса по носу
	$\alpha = 90^0$	5	ЛОД проходит через нас
	$\alpha = 90^0$	6	ЛОД пересекает линию курса по корме
	$\alpha > 90^0$	7	ЛОД пересекает линию курса по носу
	$\alpha > 90^0$	8	ЛОД проходит через нас
	$\alpha > 90^0$	9	ЛОД пересекает линию курса по корме
Слева	$\alpha < 90^0$	10	ЛОД пересекает линию курса по носу
	$\alpha < 90^0$	11	ЛОД проходит через нас
	$\alpha < 90^0$	12	ЛОД пересекает линию курса по корме
	$\alpha = 90^0$	13	ЛОД пересекает линию курса по носу
	$\alpha = 90^0$	14	ЛОД проходит через нас
	$\alpha = 90^0$	15	ЛОД пересекает линию курса по корме
	$\alpha > 90^0$	16	ЛОД пересекает линию курса по носу
	$\alpha > 90^0$	17	ЛОД проходит через нас
	$\alpha > 90^0$	18	ЛОД пересекает линию курса по корме

Всего возможных ситуаций взаимного расположения судов, которые учитывают расположение другого судна справа/слева, курсового угла ЛОД - $\alpha < 90^0$, $\alpha = 90^0$ и $\alpha > 90^0$, а также прохождение ЛОД относительно собственного судна – пересекает курс по носу, проходит через нас или пересекает курс по корме, может быть, восемнадцать.

На основании приведенных в табл.1 видов маневра и в табл.2 ситуаций расхождения были рассмотрены все возможные виды маневра, которые для другого судна слева при $\alpha < 90^0$ и ЛОД по носу приведены на рис.3.

Для каждой ситуации расхождения и видов маневра были детализованы характеристики изменения положения ОЛОД по отношению к ЛОД, которые в совокупности образовали блок выбора маневра, структурная функциональная схема которого приведена на рис.4.

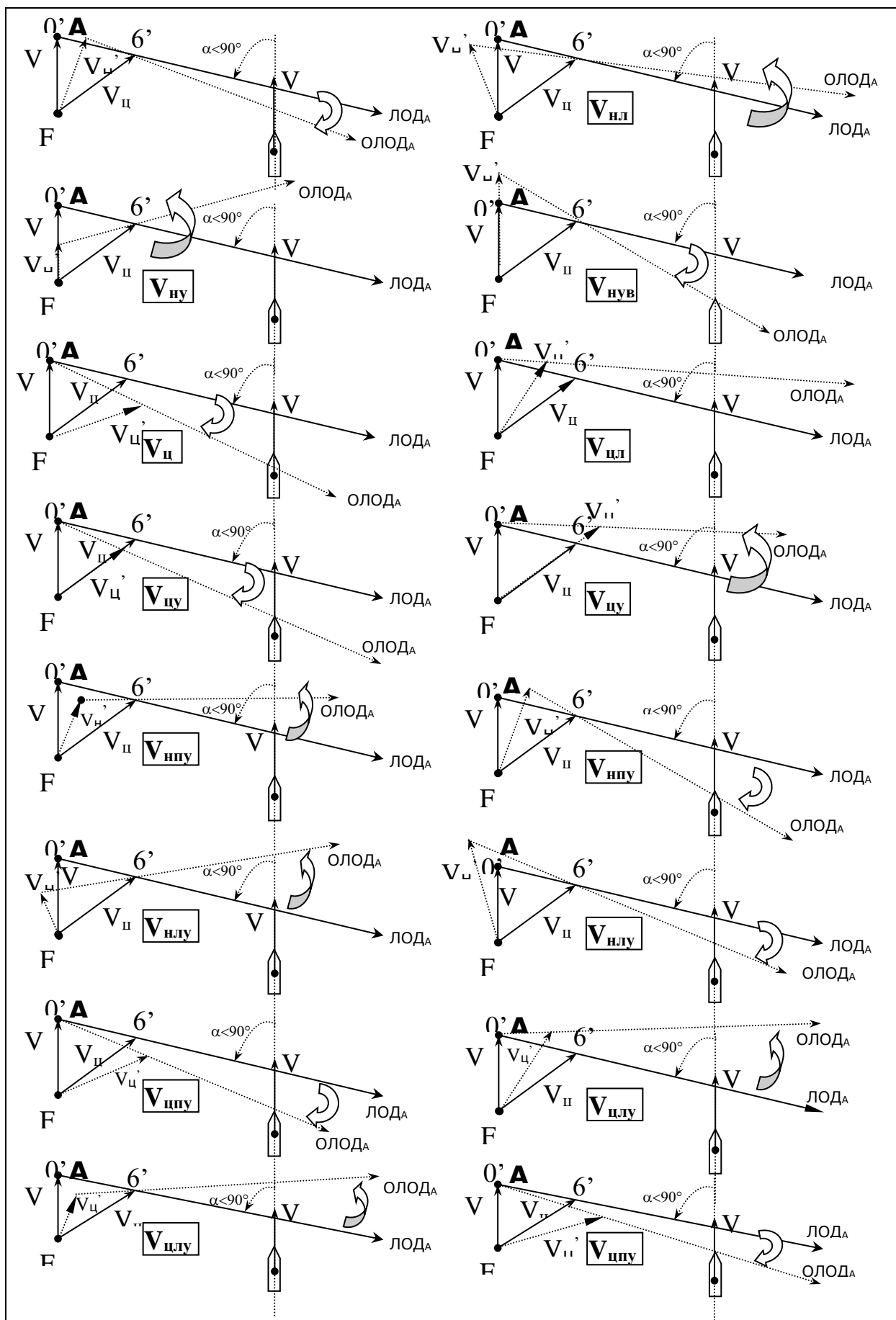


Рисунок 3 – Ситуация относительного движения при цели слева $\alpha < 90^\circ$, ЛОД по носу

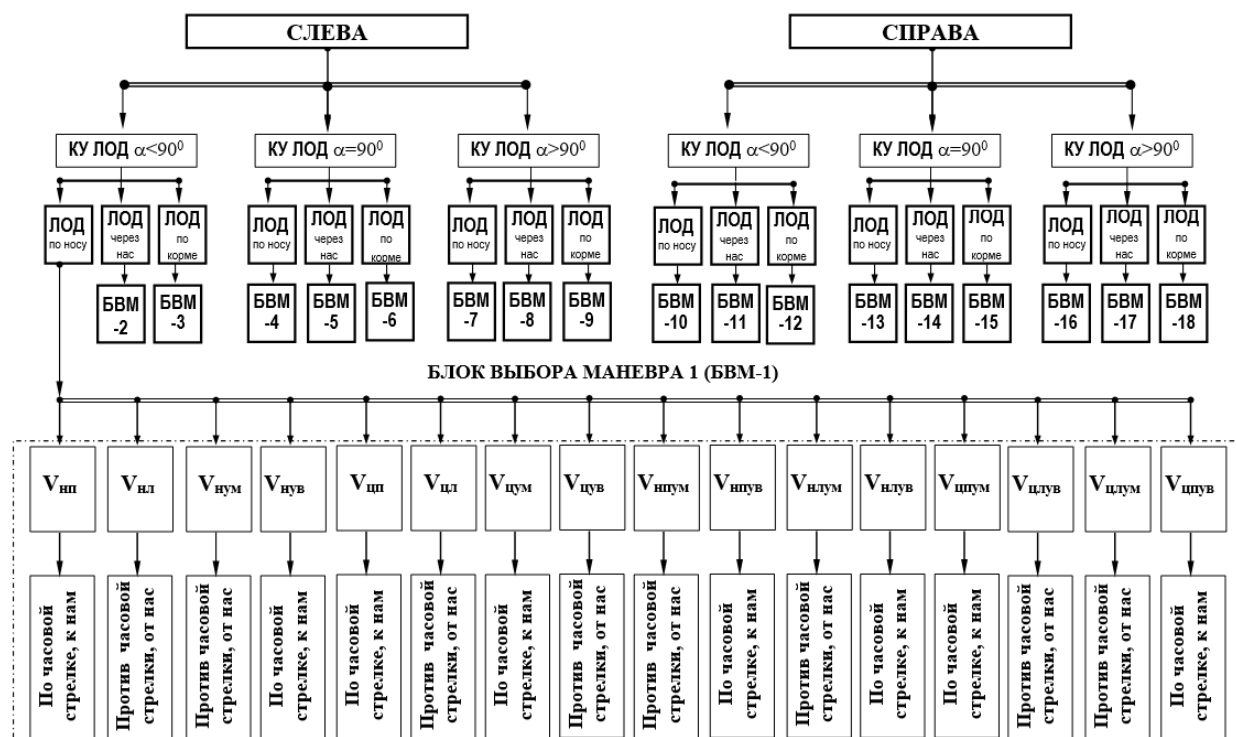


Рисунок 4 – Структурная функциональная схема каталога ситуаций сближения и видов маневра при расхождении для БВМ-1

Совокупность графического изображения изменения ситуации для каждого возможного случая относительного расположения судов и всех видов маневра представляет собой «Каталог ситуаций и видов маневра». В табличной форме фрагмент каталога приведен в табл. 3. Полностью каталог в графической форме в виде ситуаций относительного движения и соответствующих структурных функциональных схем.

Таблица 3 – Каталог ситуаций расхождения и видов маневра

Для судов слева, ЛОД по носу, курсовой угол $\alpha < 90^{\circ}$		
№№ шп	Вид маневра	Характер изменения относительного движения
1	2	3
1	$V_{шп}$	По часовой стрелке, к нам
2	$V_{шл}$	Против часовой стрелки, от нас
3	$V_{шум}$	Против часовой стрелки, от нас
4	$V_{шув}$	По часовой стрелке, к нам
5	$V_{шпум}$	По часовой стрелке, к нам
6	$V_{шпув}$	Против часовой стрелки, от нас
7	$V_{шлум}$	По часовой стрелке, к нам
8	$V_{шлув}$	Против часовой стрелки, от нас
9	$V_{шцп}$	Против часовой стрелки, от нас
10	$V_{шцл}$	По часовой стрелке, к нам
11	$V_{шцум}$	Против часовой стрелки, от нас
12	$V_{шцув}$	По часовой стрелке, к нам

13	$V_{цшум}$	По часовой стрелке, к нам
14	$V_{цшув}$	Против часовой стрелки, от нас
15	$V_{цшум}$	Против часовой стрелки, от нас
16	$V_{цшув}$	По часовой стрелке, к нам

Требования правил МППСС-72, которые не рекомендуют использовать отворот влево, оставляют единственно возможным маневром отворот вправо с уменьшением скорости. Это качественное решение задачи [8]. Для выбора величины курса и скорости требуется аналитическое решение задачи с учетом формы и размеров зоны навигационной безопасности (ЗНБ).

Обратная задача позволяет определить вид маневрирования другого судна по характеру изменения ОЛОДа. Для приведенной выше ситуации расхождения при маневре $V_{цш}, V_{цшум}, V_{цшув}, V_{цшум}$ ОЛОД будет приближаться к нам и такое его изменение режима движения неблагоприятно. Ситуация улучшится при маневре $V_{цш}, V_{цшув}, V_{цшув}, V_{цшум}$ другого судна.

Разработанный каталог представляет собой содержательную модель решения задачи расхождения, которая является основанием для создания формализованных моделей и системы поддержки принятия решения. Он позволяет сформировать у судоводителя алгоритм интеллектуальных действий при решении задачи расхождения. Он может быть использован как на судне, так и в береговых системах судовождения.

Выводы. Проведенные исследования позволили установить, что быстродействие работы системы управления маневрированием при выполнении морских операций обеспечивается оптимизацией операторской деятельности по логическим детерминированным алгоритмам. Безопасное расхождение предложено оценивать вектором относительного движения судов и маневром предупреждения столкновения с учетом жестких и переменных ограничений по каталогу типичных ситуаций и маневров системы поддержки принятия решений. Усовершенствована методика оценки закономерностей относительного движения и принятия решения по маневрированию, как основа системы поддержки принятия решений для корректировки траектории движения судна и модель процесса решения задачи расхождения при криволинейных траекториях судов путем оценки расстояния приближения в зависимости от частоты измерения параметров движения. Разработанные алгоритмы интеллектуальных действий оператора и формализованные модели по принятию решения при расхождении могут быть использованы в экспертных системах принятия решения на берегу в СУДС, навигационных устройствах на судах и при проектировании систем управления [9]. Разработанный каталог ситуаций сближения и маневров расхождения является основанием для создания формализованных моделей выбора варианта корректировки плановой траектории и системы поддержки принятия решения. Предложенная концептуальная модель решения задачи расхождения определяет алгоритм работы оператора при анализе ситуации, выборе опасного судна и маневра расхождения с ним. Ее можно использовать в береговых и бортовых системах управления движением и автоматизированной радиолокационной прокладки. Она дает новое направление для обеспечения безопасного плавания судов в прибрежных водах и может послужить новым этапом на пути создания судна без экипажа. Визуализация графической схемы сближения с опасными объектами с предупредительной сигнализацией и выдачей рекомендации на экране судовой РЛС позволит выполнять оперативный контроль ситуации расхождения.

В перспективе можно применить искусственный интеллект что позволит не только использовать предложенные алгоритмы, но и даст возможность обучать интеллектуальные системы анализу и принятия решений на основе большого объема данных о морских операциях и ситуациях расхождения. Это способствует дальнейшему совершенствованию систем безопасности на море и развитию автономных судов, предоставляя новые возможности

для повышения эффективности и надежности морской навигации, а также позволит достичь значительного экономического эффекта [10].

Список использованной литературы:

1. *Кацман Ф. М., Ершов А. А.* Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства //Транспорт Российской Федерации. -2006,-№5.-С. 82-8.
2. *Коростелев И. Ф.* Столкновения судов и их причины //Научные труды Дальрыбвтуза. - 2012. -Т. 25.-С. 69-74.
3. Международные правила предупреждения столкновений судов в море, 1972 г. (МППСС-72).- М.: МОРКНИГА, 2018.- 168 с.
4. *Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л.* Повышение информативности судовых систем предупреждения столкновений //Судовождение: Сб. науч. трудов ОНМА, Вып. 16. – Одесса: ИздатИнформ, 2009. — С. 18-26.
5. *Романов Г.С.* Анализ аварийности в районе БДЛК и ХМК за период 1978-2002 годы.//Судовождение: Сб.научных трудов ОНМА.-Вып.6.-Одесса :Феникс,2003.-С.108-114.
6. *Liu Y. and Yang W.* The structure Design of an Intelligent Decision Support System for Navigation Collision Avoidance. IEEE The Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 1, pp 302-307, August 2004.
7. *Yuhong Liu, Shenping Hu.* An Evaluation System for Single-Target Ship Collision Avoidance Based on Data Fusion. NAVIGATION OF CHINA, vol. 65, no. 4, pp. 40-45, Dec. 2005.
8. *Снопков В.И., Конопелько Г.И., Васильева В.Б.* Безопасность мореплавания. – М.: Транспорт, 1994. – 247 с.
9. *Александров В.Л., Матлах А.П., Нечаев Ю.И., Поляков В.И., Ростовцев Д.М.* Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях/Под ред. Ю.И. Нечаева. СПб: Изд.центр СПбГТМУ, 2001.-391 с.
10. *Ивановский, А. Н.* Экономическое обоснование эффективности внедрения АСУ ТП Драфт сюрвей на судах типа балкер / А. Н. Ивановский, Е. Д. Коломейцева, А. Д. Кузнецов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2022. – № 3. – С. 242-253.

References:

1. *Katsman F. M., Ershov A. A.* Accident rate of marine fleet and problems of navigation safety //Transport of the Russian Federation. -2006,-№5.-С. 82-8.
2. *Korostelev I. F.* Collisions of ships and their causes // Scientific works of Dalrybvtuz. - 2012. - Т. 25.-С. 69-74.
3. International Rules for the Prevention of Collisions at Sea, 1972 (IPCSS-72).- М.: MORKNIGA, 2018.- 168 p.
4. *Vagushchenko L.L., Vagushchenko A.L.* Increasing the informativeness of ship collision warning systems //Sudovozhdenie: Collection of scientific papers of ONMA, Vyp. 16. - Odessa: IzdatInform, 2009. -- С. 18-26.
5. *Romanov G.S.* Analysis of the accident rate in the area of BDLC and KMK for the period 1978-2002 //Sudovozhdenie: Collection of scientific works of ONMA.-Vyp.6.-Odessa: Phoenix, 2003.-S.108-114.
6. *Liu Y. and Yang W.* The structure Design of an Intelligent Decision Support System for Navigation Collision Avoidance. IEEE The Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 1, pp 302-307, August 2004.
7. *Yuhong Liu, Shenping Hu.* An Evaluation System for Single-Target Ship Collision Avoidance Based on Data Fusion. NAVIGATION OF CHINA, vol. 65, no. 4, pp. 40-45, Dec. 2005.
8. *Snopkov V.I., Konopelko G.I., Vasilieva V.B.* Safety of Navigation. - Moscow: Transport, 1994. - 247 с.

9. Aleksandrov V.L., Matlakh A.P., Nechaev Yu.I., Polyakov V.I., Rostovtsev D.M. Intelligent systems in marine research and technology / Edited by Yu.I. Nechaev. SPb: Izd.centr SPbGTMU, 2001.-391 p.
10. Ivanovskiy, A. N. Economic substantiation of efficiency of implementation of ACS TP Draft Survey on bulk carriers / A. N. Ivanovskiy, E. D. Kolomeitseva, A. D. Kuznetsov // Bulletin of Kerch State Maritime Technological University. - 2022. - № 3. - С. 242-253.

Сведения об авторах / Information about authors

**Святский Виталий
Владимирович**

преподаватель кафедры Судовождения и промышленного
рыболовства «Керченский государственный морской
технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309,
Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82,
vetal-s25-009@mail.ru

Sviatskii Vitalii
Vladimirovich

Lecturer of the Department of Navigation and Industrial Fishing, Kerch
State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch,
298309, Russian Federation, e-mail: vetal-s25-009@mail.ru

УДК 001.892:627.77

Тищенко М.С. Ивановский Н.В.
**ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВЫПУКЛОГО
ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ «ПОИСКА И
СПАСЕНИЯ ЛЮДЕЙ НА МОРЕ»**

Аннотация. В работе решается задача построения математической модели поисковой операции в заданных районах поиска с ограничением по времени. В связи с техническим прогрессом, суда оснащаются современными средствами навигации и связи. Постоянно совершенствуются конструкции судов с целью повышения мореходных качеств, но неутешительная статистика составляет потери около 200 судов в год. При этом благодаря системам оповещения о бедствии поисковые операции проводятся оперативно, но с учетом неблагоприятных гидрометеорологических факторов члены экипажа судна, которое потерпело бедствие находятся в отдалении от точки крушения. Зачастую связь с членами экипажа утрачена, таким образом мы имеем задачу поиска людей в определенном районе и с ограничением по времени. Предложенная в работе модель может быть использована для внедрения в систему поиска и спасения.

Ключевые слова: судно, математическая модель, поиск и спасение, обнаружение, программирование.

Tishchenko M.S. Ivanovskii N.V
**APPLICATION OF THE EXTREME MODEL OF CONVEX
PROGRAMMING TO SOLVE THE PROBLEM OF «SEARCH AND RESCUE OF
PEOPLE AT SEA»**

Abstract. The article solves the problem of construction of a mathematical model of a search operation in given areas of search with time limitation. Due to technological progress, ships are equipped with modern means of navigation and communication. Vessel designs are constantly being improved to improve seaworthiness, but disappointing statistics are accounting for the loss of about 200 ships per year. At the same time, search operations are carried out thanks to the disaster warning systems, but taking into account adverse hydrometeorological factors, the members of the crew of a vessel which is in a distance from the point of crash. Communication with crew members is often lost, so we have the task of locating people in a certain area and with time limitations. The proposed model can be used for introduction into the search and rescue system.

Keywords: ship, mathematical model, search and rescue, detection, programming.

Введение. По статистике международной организации ИМО в год терпит крушение около 200 судов. А опасности утонуть подвергается более 6 тысяч человек. При оставлении судна, терпящего бедствие в соответствии с установленным порядком средствами связи, предоставляется информация о происшествии, и планируемых действия экипажа. Задействуется аварийное оборудование с целью указания местоположения терпящих бедствие. Данные процедуры выполняются для облегчения поисковых и спасательных операций.

Зачастую с учетом гидрометеорологических факторов члены экипажа, которые покинули судно терпящее бедствие оказываются разбросаны в акватории, отдаленной от точки крушения. В качестве примера рассмотрим крушение судна «Seamark». Данное судно, на борту которого был груз около 3 тысяч тонн мраморной крошки переломилось и затонуло при сильных условиях шторма зимой, в Черном море у берегов порта Новороссийск (рис. 1).



Рисунок 1 – Крушение судна Seamark

На борту судна находилось 11 человек, к месту происшествия в 415 район направили поисково-спасательную группу. Экипаж при крушении судна разделился на две основные группы, которые были отдалены от места крушения. Этим и были обусловлены сложности поисковой операции, к тому же имелось ограничение по времени поиска, так как время удержания температуры гидрокостюмом ограничено.

На сегодняшний день процесс поисковых операций слабо формализован, отсутствуют практические модели для организации поисковых операций. При этом имеются достаточная теоретическая база для построения поисковых моделей, имеющих практическую значимость. Поэтому задача разработки моделей и алгоритмов поисковых операций по спасению людей на море является актуальной.

Целью исследований является разработка математической модели поисковой операции в заданных районах поиска с ограничением по времени.

Материалы и методы исследования. Актуальность исследуемой задачи вызвана запросом практики. В качестве статистической базы использовалась информация Международной морской организации. Данная задача носит вероятностный характер, поэтому для ее решения необходимо использовать вероятностные методы. Различные подходы к решению данного типа задач изложены в работах [1]-[8]. Для реализации цели исследования будем использовать экстремальные модели выпуклого программирования [9]-[10]. Для решения ряда моделей выпуклого программирования используется лемма Гиббса [10] и при построении модели мы будем использовать ее.

Результаты исследования и их обсуждение. Довольно часто обнаружение того или иного объекта связано с необходимостью проведения n поисковых действий. В каждом из этих действий используется объем ресурсов x_j . Каждый ресурс определяет $f_j(x_j)$ – локальный результат, определенный j ресурсом. Предположим, что все события являются независимыми, поэтому в соответствии с теоремой о сложении вероятностей [9] общий результат есть сумма отдельных действий, определяемых ресурсами X . Очевидно, что для решения экстремальной задачи необходимо соответствующим образом распределить ресурсы и определить $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$, удовлетворяющий ограничениям

$$\sum_{j=1}^n x_j = X, \quad (1)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \quad (2)$$

и максимизирующий (минимизирующий) функционал

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n f_j(x_j), \quad (3)$$

Примем, что функции f_j (а следовательно, и f) являются выпуклыми или вогнутыми.

Функция $f(x)$ называется выпуклой по x [10]; если:

$$f[ax_1 + (1-a)x_2] \leq af(x_1) + (1-a)f(x_2) \\ (x_1, x_2 \in x; 0 \leq a \leq 1).$$

Функция $f(x)$ называется вогнутой по x [10], если:

$$f[ax_1 + (1-a)x_2] \geq af(x_1) + (1-a)f(x_2) \\ (x_1, x_2 \in x; 0 \leq a \leq 1).$$

Для утверждения, того что функция обладает свойством выпуклости или вогнутости устанавливается критерий с вычислением ее вторых производных (если они существуют) [10]: при $f''(x) \geq 0$ для $0 \leq x \leq 1$ функция $f(x)$ является выпуклой; при $f''(x) \leq 0$ для $0 \leq x \leq 1$ функция $f(x)$ является вогнутой.

Описанная в выражениях (1) – (3) модель является экстремальной моделью выпуклого программирования.

При решении задачи (1) – (3) будем использовать лемму Гиббса [10].

Как следствие, если существует число λ , при котором

$$f'_j(x_j^*) \begin{cases} = \lambda, \text{ если } x_j^* > 0, \\ \leq \lambda, \text{ если } x_j^* = 0, \end{cases} \quad (4)$$

то вектор $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ максимизирует вогнутую функцию $\sum_{j=1}^n f_j(x_j)$, в области $\sum_{j=1}^n x_j = X$ и $x_j \geq 0$.

Аналогично, если существует число λ , при котором

$$f'_j(x_j^*) \begin{cases} = \lambda, \text{ если } x_j^* > 0, \\ \geq \lambda, \text{ если } x_j^* = 0, \end{cases} \quad (5)$$

то вектор $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ минимизирует выпуклую функцию $\sum_{j=1}^n f_j(x_j)$, в области $\sum_{j=1}^n x_j = X$ и $x_j \geq 0$.

Решение экстремальной модели выпуклого программирования вида (1) – (3) сводится к определению x_j^* посредством условия (4) или (5) через константу λ . В свою очередь, λ определяется подстановкой решения в уравнение (1). На практике, эта вычислительная процедура довольно легко выполняема.

Допустим, что после аварии судна его необходимо обнаружить не более чем за время X . Известно, что он находится с вероятностями a_1^*, \dots, a_n^* в одном из районов, число которых равно n , а число обнаружений m в каждом районе распределено по закону Пуассона, т. е. вероятность обнаружения m раз j – м районе выражается формулой

$$P_j(m) = \frac{b_j^m}{m!} e^{-b_j},$$

где b_j математическое ожидание числа обнаружений в единицу времени.

Очевидно, что вероятность обнаружения в единицу времени ровно 0 раз равна e^{-b_j} , а вероятность обнаружения хотя бы один раз равна $1 - e^{-b_j}$. Тогда вероятность обнаружения при затратах времени $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n$ в различных районах равна

$$\sum_{j=1}^n a_j (1 - e^{-b_j \bar{x}_j}),$$

где x_j – время поиска в j – м районе.

Требуется определить время поиска \bar{x}_j в j – м районе ($j=1, \dots, n$) так, чтобы $\sum_{j=1}^n \bar{x}_j = X$, а вероятность обнаружения терпящих бедствия была максимальной. Следовательно, надо найти вектор $\bar{x}^* = (\bar{x}_1^*, \dots, \bar{x}_n^*)$, который удовлетворяет ограничениям

$$\sum_{j=1}^n \bar{x}_j = X, \quad (6)$$

$$\bar{x}_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \quad (7)$$

и максимизирует целевую функцию

$$f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) = \sum_{j=1}^n a_j (1 - e^{-b_j \bar{x}_j}), \quad (8)$$

Положив $x_j = \bar{x}_j / X$, можно считать, что $X = 1$. Тогда задачу максимизации целевой функции $a_j(1 - e^{-b_j x_j})$ можно заменить минимизацией функции $\sum_{j=1}^n a_j e^{-b_j x_j}$ при условии, $\sum_{j=1}^n x_j = 1$ и $x_j \geq 0$.

Предположим, что величины a_j и b_j положительные. Найдем

$$f'_j(x) = -a_j b_j e^{-b_j x_j}.$$

Согласно выражению (5), имеем

$$-a_j b_j e^{-b_j \bar{x}_j} \begin{cases} = \lambda, \text{ если } x_j > 0, \\ \geq \lambda, \text{ если } x_j = 0, \end{cases} \lambda \leq 0 \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что если $-a_j b_j \geq \lambda$, то $x_j = 0$, так как $e^{-b_j x_j} < 1$. При $-a_j b_j < \lambda$ равенство $x_j = 0$ невозможно, так как из второй строки формулы (9) следует, что $-a_j b_j \geq \lambda$. Отсюда находим что $x_j > 0$, и поэтому справедлива верхняя строка формулы (1.65), т. е. $-a_j b_j e^{-b_j x_j} = \lambda$, если $a_j b_j < \lambda$.

Решение последнего уравнения тривиально, и оно дает ненулевые значения x_j^*

$$x_j^* = \frac{1}{b_j} \ln\left(-\frac{a_j b_j}{\lambda}\right) \text{ для } -a_j b_j < \lambda \quad (10)$$

Величина λ определяется подстановкой (10) в дополнительное условие, $\sum_{j=1}^n x_j = 1$, т. е. λ должно удовлетворять следующему уравнению:

$$h(\lambda) = \sum_j \frac{1}{b_j} \ln\left(-\frac{a_j b_j}{\lambda}\right) = 1, \quad (11)$$

где j перебирает все значения, удовлетворяющие условию неравенства $-a_j b_j < \lambda$. Легко установить, что каждое слагаемое уравнения (11) при $0 > \lambda > \max(-a_j b_j)$ увеличивается, а их число изменяется, только когда λ проходит через величину $-a_j b_j$. Более того, когда λ достигает значения $-a_j b_j$, исключенные члены становятся равными нулю. Из этого следует что функция аргумента λ остается непрерывной и строго возрастающей по аргументу λ , в конечном итоге приравниваясь к единице при определенном значении λ , которое и является искомым. На основании этого вычислительная процедура определения выглядит следующим образом:

а) вычислить $a_j b_j$, расположить в порядке $a_i b_i > a_j b_j$ для $i > j$ и перенумеровать согласно следующей форме:

j старое j_1, j_2, \dots, j_n ,

j' новое $1, 2, \dots, n$

б) вычислить для $\lambda_1 = -a_2 b_2$

$$h(\lambda_1) = -\frac{1}{b_1} \ln \frac{a_1 b_1}{a_2 b_2}$$

в) вычислить для $\lambda_2 = -a_3 b_3$

$$h(\lambda_2) = -\frac{1}{b_1} \ln \frac{a_1 b_1}{a_3 b_3} + \frac{1}{b_2} \ln \frac{a_2 b_2}{a_3 b_3}$$

и так далее, пока еще сумма меньше единицы. Обозначить j_0 последний индекс, при котором вычисленная сумма меньше единицы;

г) вычислить

$$\lambda_0 = a_{j_0} b_{j_0} \exp\left(\frac{h(-a_{j_0} b_{j_0}) - 1}{\sum_{j=1}^{j_0} \frac{1}{b_j}}\right);$$

д) вычислить

$$x_j^* = \begin{cases} \frac{\ln(-a_j b_j)}{\lambda_0} & , \text{если } a_j b_j < \lambda_0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пусть $X=10$ ч, а величины a_j и b_j принимают значения, приведенные в таблице 1. Вычислить

Таблица 1 – Расчеты

i	b_j	a_j	$a_j b_j$	i'
1	0,51	0,27	0,138	3
2	0,65	0,31	0,202	2
3	0,85	0,42	0,357	1

$$h(\lambda_1) = -\frac{1}{b_1} \ln \frac{a_1 b_1}{a_2 b_2} = 0,74,$$

$$h(\lambda_2) = -\frac{1}{b_1} \ln \frac{a_1 b_1}{a_3 b_3} + \frac{1}{b_2} \ln \frac{a_2 b_2}{a_3 b_3} = 1,61 > 1.$$

Следовательно, $j_0=2$. Находим $\lambda_0=0,123$. $x_1^*=0,81$, $x_2^*=1-x_1^*=0,19$, так как $j_0'=2$. Возвращаясь к старой нумерации, имеем $x_1^*=0$, $x_2^*=0,19$, $x_3^*=0,81$. Отсюда $t_1=0$ ч, $t_2=1,9$ ч, $t_3=8,1$ ч.

Таким образом, поиск судна, потерпевшего аварию, целесообразно осуществлять в районах 2 и 3, затратив 1,9 ч и 8,1 ч соответственно.

Выводы. В результате приведенных исследований получена модель поисковой операции с ограничениями по главному ресурсу при поиске – времени. Приведено аналитическое решение, но при большом количестве районов поиска целесообразно использовать численные методы для поиска решения. Полученные результаты могут быть использованы при построении поисковых систем. При разработке комплексной модели поиска необходимо будет формализовать процесс нахождения следующих параметров: математическое ожидание числа обнаружений в единицу времени; вероятность нахождения объекта в заданном районе.

Список использованной литературы:

1. Сиротин П.А. Количественная оценка поиска // Морской сборник. 1969 г. №8. С. 12-17
2. Дубровин К.О., Сиротин П.А. Время пребывания цели в районе поиска // Морской сборник. 1965 г. №6. С. 11-15
3. Запольский М.Б. Расчеты маневрирования при поиске цели // Морской сборник. 1969 г. №6. С. 19-25
4. Дьячков С.Г., Тененбаум Д.Я. Оперативное управление группой судов на промысле методом статистических игр // Рыбное хозяйство. 1968. №8. С. 45 -57
5. Емельянов Л.А., Абчук В.А. Теория поиска в военном деле. М., Воениздат, 1964. 123 с.
6. Гурин Л.С., Дымарский Я.С. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. М., «Советское радио», 1968. 160 с.
7. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы. М., «Мир», 1973. 114 с.
8. Кендал М., Моран П. Геометрические вероятности. – М.: Наука, 1972. 192 с.
9. Киткин П.А. Введение в математические исследования операций управления в рыбной промышленности. – Калининград: Атлант НИРО, 1969. 142с.
10. Вентцель Е.С. Исследование операций. М., «Советское радио», 1972. 235 с.

References:

1. Sirotin P.A. Kolichestvennaya ocenka poiska [Quantitative assessment of search]. Morskoj sbornik [Marine collection]. 1969 No. 8. pp. 12-17
2. Dubrovin K.O., Sirotin P.A. Vremya prebyvaniya celi v rajone poiska [The time of the target's stay in the search area]. Morskoj sbornik [Marine collection]. 1965 No. 6. pp. 11-15
3. Zapolsky M.B. Raschety manevrirovaniya pri poiske celi [Calculations of maneuvering in the search for a target]. Morskoj sbornik [Marine collection]. 1969 No. 6. pp. 19-25
4. Dyachkov S.G., Tenenbaum D.Ya. Operativnoe upravlenie gruppoj sudov na promysle metodom statisticheskix igr [Operational management of a group of vessels in the fishery by the method of statistical games]. Rybnoe khozyajstvo [Fisheries]. 1968. No.8. pp. 45-57
5. Emelyanov L.A., Abchuk V.A. Teoriya poiska v voennom dele [Theory of search in military affairs]. M., Voenizdat [M., Voenizdat], 1964. 123 p.
6. Gurin L.S., Dymarsky Ya.S. Zadachi i metody optimal'nogo raspredeleniya resursov [Problems and methods of optimal resource allocation]. M., "Sovetskoe radio" [M., "Soviet Radio"], 1968. 160 p.
7. Saati T. Celochislennye metody optimizacii i svyazannye s nimi ekstremalnye problemy [Integer optimization methods and related extreme problems]. M., Mir, 1973. 114 p.
8. Kendal M., Moran P. Geometricheskie veroyatnosti [Geometric probabilities]. – M.: Nauka, 1972. 192 p
9. Kitkin P.A. Vvedenie v matematicheskie issledovaniya operacij upravleniya v rybnoj promyshlennosti [Introduction to mathematical research of control operations in the fishing industry]. – Kaliningrad: AtlantNIRO, 1969. 142s.
10. Wentzel E.S. Issledovanie operacij [Operations Research.]. M., "Sovetskoe radio" [M., "Soviet Radio"], 1972. 235 p.

Сведения об авторах / Information about authors

**Тищенко
Максим Сергеевич**

Tishchenko
Maksim Sergeevich

ассистент кафедры судовождения и промышленного рыболовства «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, masa.33@mail.ru
professor assistant of Department of Navigation and Industrial Fishing, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: masa.33@mail.ru

**Ивановский
Николай Владимирович**

Ivanovskii
Nikolai Vladimirovich

к.т.н., доцент, доцент кафедры судовождения и промышленного рыболовства «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 inv8@mail.ru
PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Navigation and Industrial Fishing, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: inv8@mail.ru

