

16+

ISSN: 2949-558X

# ВЕСТНИК

Керченского Государственного  
Морского Технологического Университета

СЕРИЯ

Морские Технологии

Выпуск 4  
2024

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

### **Редакционный Совет журнала**

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

**Заместитель главного редактора:**

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

### **Редакционная коллегия журнала**

**2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)**

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

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

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

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

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

Серёгин С.С. – ответственный секретарь

Бобарькин О.В. – технический редактор, компьютерная верстка

Статьи в журнале издаются на русском и английском языках.

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

Издается по решению НТС ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», протокол № 10 от 20.12.2024 г.

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

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

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

## **Редакционная коллегия журнала**

### **2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)**

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

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

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

кафедры эксплуатации судовых механических установок

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ .....</b>	<b>6</b>
<b>Авдеев Б.А. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХПРОВОДНОГО СТАТКОМА В РЕЖИМЕ ИСТОЧНИКА РЕГУЛИРУЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>6</b>
<b>СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) .....</b>	<b>16</b>
<b>Ивановская А.В. ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРИВОД ПАЛУБНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ КОШЕЛЬКОВОМ ЛОВЕ .....</b>	<b>16</b>
<b>Конюков В.Л. СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ СУДОВОГО ДВУХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЛАВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБОКОМПРЕССОРА .....</b>	<b>24</b>
<b>Конюков В.Л., Горбенко А.Н., Кукушкин М.Ю. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА НА ПОКАЗАТЕЛИ НАПРЯЖЕННОСТИ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ .....</b>	<b>32</b>
<b>Федоровский К.Ю., Гриненко Н.К., Тимофеев В.А. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СЭУ .....</b>	<b>40</b>
<b>Шаратов А.С., Петрук В.А., Денисов А.А., Наумчик А.Р., Друзенко Р. Ю. ВЛИЯНИЕ ПОДАЧИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ КОНЦЕВЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАСТИ НА ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРЕБНОГО ВИНТА .....</b>	<b>48</b>
<b>ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ .....</b>	<b>56</b>
<b>Титов И.Л., Скляр А.В. ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ РАДИОНАВИГАЦИИ НА СУДАХ ПРОМЫСЛОВОГО ФЛОТА .....</b>	<b>56</b>

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.31

Авдеев Б.А.

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХПРОВОДНОГО СТАТКОМА В РЕЖИМЕ ИСТОЧНИКА РЕГУЛИРУЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Аннотация.** В этой статье приведено имитационное моделирование СТАТКОМа на базе MATLAB/Simulink. В качестве системы управления был использован метод шаблона единичного вектора, приведена его структурная схема и основные уравнения работы. Описан принцип работы данного метода. Работа СТАТКОМа была проверена с помощью динамического моделирования на платформе при нелинейных нагрузках. Приведены осциллограммы распределения активных и реактивных мощностей в сети с переменной нагрузкой. Также показаны осциллограммы трехфазного тока сети, переменной нагрузки и СТАТКОМа. Проанализированы показатели качества регулирования СТАТКОМа как источника напряжения для поддержания заданного уровня напряжения при колебании входного напряжения в пределах  $\pm 5\%$ . Управление СТАТКОМа с помощью метода шаблона единичного вектора обеспечивает хорошую производительность и стабилизирует напряжение в режиме источника регулируемого напряжения.

**Ключевые слова:** статический компенсатор, СТАТКОМ, регулирования напряжения, компенсация реактивной мощности, высшие гармоники, фильтр гармоник

Avdeev B.A.

### RESEARCH OF THREE-PHASE STATCOM OPERATION IN THE MODE OF A REGULATED VOLTAGE SOURCE

**Abstract.** This article presents a simulation modeling of a STATCOM based on MATLAB/Simulink. The unit vector template method was used as a control system, its structural diagram and basic operating equations are given. The operating principle of this method is described. The STATCOM operation was tested using dynamic modeling on the platform under nonlinear loads. Oscillograms of the distribution of active and reactive powers in a network with a variable load are given. Oscillograms of three-phase network current, variable load and STATCOM are also shown. The quality indicators of STATCOM regulation as a voltage source for maintaining a given voltage level with input voltage fluctuations within  $\pm 5\%$  are analyzed. STATCOM control using the unit vector template method provides good performance and stabilizes voltage in the regulated voltage source mode. **Keywords:** static compensator, STATCOM, voltage regulation, reactive power compensation, higher harmonics, harmonic filter

**Введение.** В настоящее время существует большое число нелинейных электроприёмников. К ним относят электроприводы насосов, частотные преобразователи, выпрямители, часть электрооборудования технологических линий, сварочные аппараты, электрохимическое оборудование и другие. Более того, нелинейные нагрузки быстро увеличиваются из-за расширения силовой электроники. Все эти электроприёмники являются источниками высших гармоник сети [1]. Помимо этого, любой асинхронный электродвигатель выступает в качестве активно-индуктивной нагрузки, что в свою очередь приводит к возникновению реактивной мощности. Также проблемой электросети являются провалы напряжения из-за пуска мощных электроприёмников и ограниченной мощности сети,

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

особенно если в ней имеются всё более возрастающее количество альтернативных источников электроэнергии. Данные явления являются нежелательными, т.к. они увеличивают потери в линиях электропередач и делают нестабильным питание конечных потребителей электроэнергии [2]. Следовательно, страдает качество и экономичность передачи электроэнергии. Для улучшения качества электроэнергии в последнее время всё чаще применяют статические синхронный компенсаторы – СТАТКОМы.

СТАТКОМ — это управляемый реактивный источник, который включает в себя преобразователь источника напряжения и шунтирующий конденсатор постоянного тока (иногда – отдельный источник постоянного напряжения), способный генерировать и/или поглощать реактивную мощность [3]. Принципы работы СТАТКОМов основаны на точной аналогии с обычным вращающимся синхронным компенсатором [4], однако помимо компактности и отсутствия подвижных частей СТАТКОМы позволяют устранять несинусоидальность тока или поддерживать заданный уровень напряжения при входных колебаниях напряжения. Существуют несколько различных систем управления, кратко рассмотренные в [5-7]. В этой статье инвертор напряжения на основе СТАТКОМа моделируется на платформе MATLAB/Simulink с системой управления на базе метода шаблона единичного вектора для поддержания качества электроэнергии.

СТАТКОМ используется в распределительной системе, которая может быть адаптирована для задач по улучшению качества электроэнергии, например, компенсации реактивной мощности, кратковременной стабилизации напряжения, балансировки нагрузки и компенсации гармоник тока [8]. Это один из лучших инструментов для устранения практически всех проблем с качеством электроэнергии. На сегодня существуют различные топологии СТАТКОМов, а именно двухпроводные, трехпроводные и четырехпроводные конфигурации. Трехпроводные конфигурации предпочтительнее из-за отсутствия нейтрального провода и, следовательно, экономии материалов проводника. Также трехпроводные системы могут быть использованы в электростанции ограниченной мощности с изолированной нейтралью, например, в судовом электротехническом комплексе или автономных предприятиях горнодобывающего комплекса [9].

СТАТКОМ состоит из автономного инвертора напряжения, со стороны постоянного тока подключенного к шине постоянного тока или к конденсатору большой емкости, а со стороны переменного тока подключенный параллельно нагрузкам конечного пользователя в так называемых точках общего подключения. Конденсатор пропускает входной пульсирующий ток преобразователя и является основным элементом накопления реактивной энергии. Этот конденсатор может заряжаться от аккумулятора или от самого преобразователя. Если выходное напряжение равно напряжению на клеммах переменного тока, реактивная мощность в систему не подается. Если выходное напряжение превышает напряжение на клеммах переменного тока, СТАТКОМ переходит в емкостной режим работы, и наоборот [10]. Величина потока реактивной мощности пропорциональна разнице двух напряжений. Следует отметить, что регулирование напряжения и коррекция коэффициента мощности не могут быть выполнены одновременно. Для СТАТКОМа, используемого для регулирования напряжения, компенсация должна быть такой, чтобы токи питания соответствовали напряжениям питания; в то время как для коррекции коэффициента мощности ток питания должен быть в фазе с напряжениями питания. В зависимости от режима работы СТАТКОМ можно рассматривать или как источник с регулируемым напряжением или как источник с регулируемым током [11]. В данной работе будет исследован режим источника регулируемого напряжения.

**Целью исследования** является разработка и анализ имитационной модели СТАТКОМа в сети с изменяющимся напряжением и переменной нагрузкой, работающего в режиме источника регулируемого напряжения с системой управления на основе метода шаблона единичного вектора.

**Основная часть.** В автономном инверторе напряжения используется управление на основе широтно-импульсной модуляции. Следовательно, для смягчения пульсаций переключения требуются небольшие фильтры гармоник [12, 13]. Для обеспечения сигналов

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

обратной связи необходимы датчики напряжения и тока. Структура управления реализована с помощью цифрового сигнального процессора для обеспечения стробирующего импульса для переключателей инвертора. Принципиальная схема трехпроводного СТАТКОМ в общем виде изображена на рисунке 1. Сеть имеет линейную активно-индуктивную и нелинейную (неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель) нагрузку. Для обеспечения более высокого качества напряжения в систему включён пассивный фильтр из конденсаторов  $C_{\phi}$ , включенный по схеме звезда.

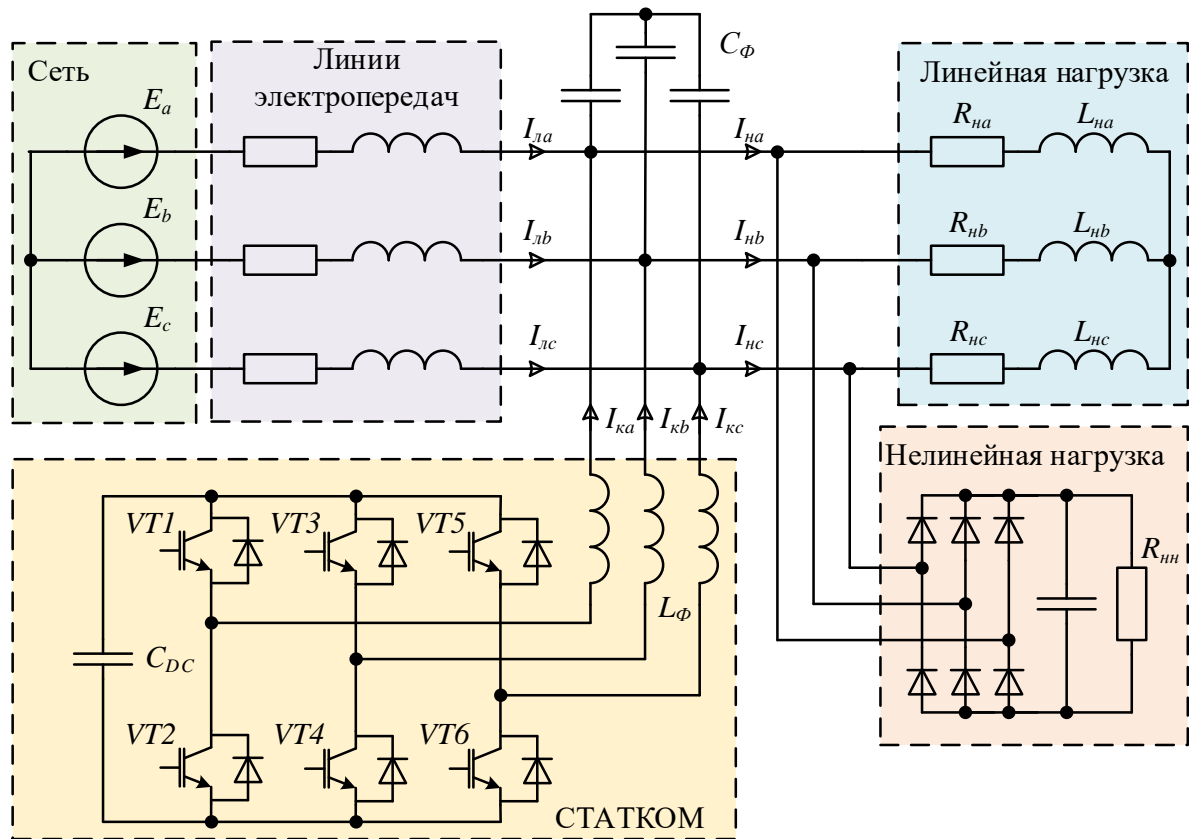


Рисунок 1 - Силовая часть трехпроводного СТАТКОМ

Автономный инвертор напряжения состоит из шести IGBT-транзисторов с антипараллельными диодами, собранными по мостовой схеме. Дополнительные катушки индуктивности  $L_{\phi}$  компенсируют гармоники компенсирующих токов [14]. Сигналы со схемы управления подаются на генератор ШИМ, который вырабатывает импульсы для IGBT-ключей инвертора [14]. Инвертор позволяет генерировать синусоидальное напряжение с любой требуемой величиной, частотой и фазовым углом. Данные силовые преобразователи широко используются в приводах с регулируемой скоростью, но также могут использоваться для смягчения провалов напряжения. Автономный инвертор напряжения используется либо для полной замены напряжения, либо для ввода «недостающего напряжения». «Недостающее напряжение» — это разница между номинальным напряжением и фактическим. Преобразователь обычно основан на каком-либо виде накопителя энергии, который будет снабжать преобразователь постоянным напряжением. Затем силовой преобразователь переключается для получения желаемого выходного напряжения. Обычно инвертор с накопительным аккумулятором используется не только для смягчения провалов напряжения, но и для других проблем с качеством электроэнергии, например, мерцания и гармоник.

Для управления статическим компенсатором был выбран метод шаблона единичного вектора, система управления СТАТКОМА, основанная на данном методе приведена на рисунке 2. Входным элементом является блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ),



## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

подстраивающий фазу управляемого инвертора так, чтобы она была равна фазе опорного сигнала от времени. ФАПЧ производит компонент единичных векторов  $\sin\theta$ ,  $\cos\theta$ , синхронизированный с трехфазными напряжениями. Этот компонент единичных векторов используется для вычисления смещенных на  $120^\circ$  единичных векторов  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ , получаемых с преобразователя координат ПК [15].

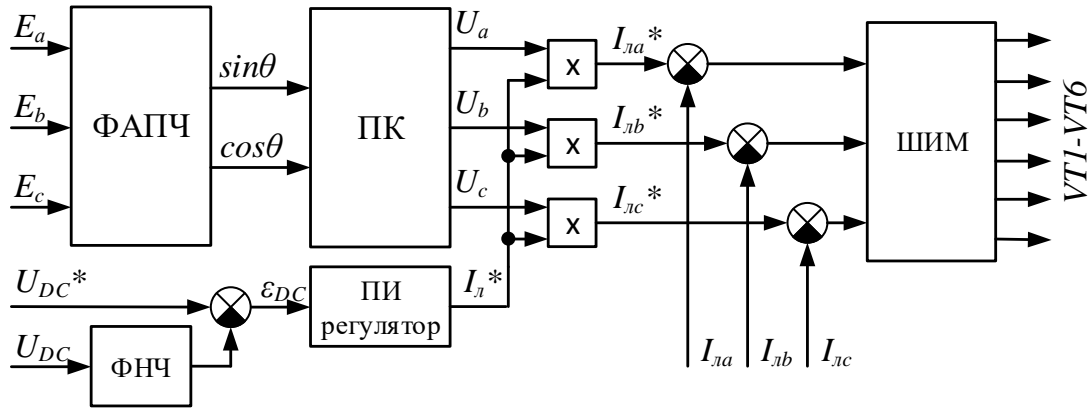


Рисунок 2 - Системы управления СТАТКОМом

ПК описывается следующим математическим выражением:

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix}.$$

Сигнал ошибки напряжения, который является разницей между требуемым напряжением постоянного тока  $U_{DC}^*$  и отфильтрованным напряжением постоянного тока  $U_{DC}$  с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ), обрабатывается в ПИ-регуляторе для достижения пикового значения требуемых токов источника  $I_l^*$ . Трехфазные опорные токи на стороне источника получаются путем умножения пикового значения на единичные векторы [16]:

$$\begin{pmatrix} I_{la}^* \\ I_{lb}^* \\ I_{lc}^* \end{pmatrix} = I_l^* \begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix}.$$

Исследуемая система содержит источник регулируемого трехфазного напряжения напряжением 0,4 кВ и частотой 50 Гц, линию электропередач с активным сопротивлением в 0,04 Ом и индуктивностью 8 мГн, СТАТКОМ, постоянная активно-ёмкостную нагрузку, соединенная звездой с мощностями 3 кВт и 0,5 кВАр, трансформатор, подключенного по схеме Y/Y. Ко вторичной обмотке трансформатора подключена переменная нагрузка с активной мощностью 43 кВт и индуктивной мощностью 3 кВАр. СТАТКОМ подключен к первичной обмотке для обеспечения мгновенного поддержания напряжения в точке нагрузки. В момент времени 0,2 с мощность уменьшается на 15%, в момент времени 0,3 – увеличивается на 15%. Конденсатор емкостью 75 мкФ на стороне постоянного тока обеспечивает накопление энергии в системе DSTATCOM. Также меняется напряжение сети по следующим закономерностям:

### 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

$$\begin{cases} u(t) = u_{ном} & \text{при } 0 \leq t < 0,2; \\ u(t) = 0,95u_{ном} & \text{при } 0,2 \leq t < 0,3; \\ u(t) = 1,05u_{ном} & \text{при } 0,3 \leq t < 0,4; \\ u(t) = u_{ном} & \text{при } 0,4 \leq t < 0,5; \end{cases}$$

На рисунке 3 приведены графики активных мощностей на входе сети и на переменной нагрузке без работы СТАТКОМа. На рисунке 4 приведены графики реактивных мощностей на входе сети и на переменной нагрузке при неработающем СТАТКОМе.

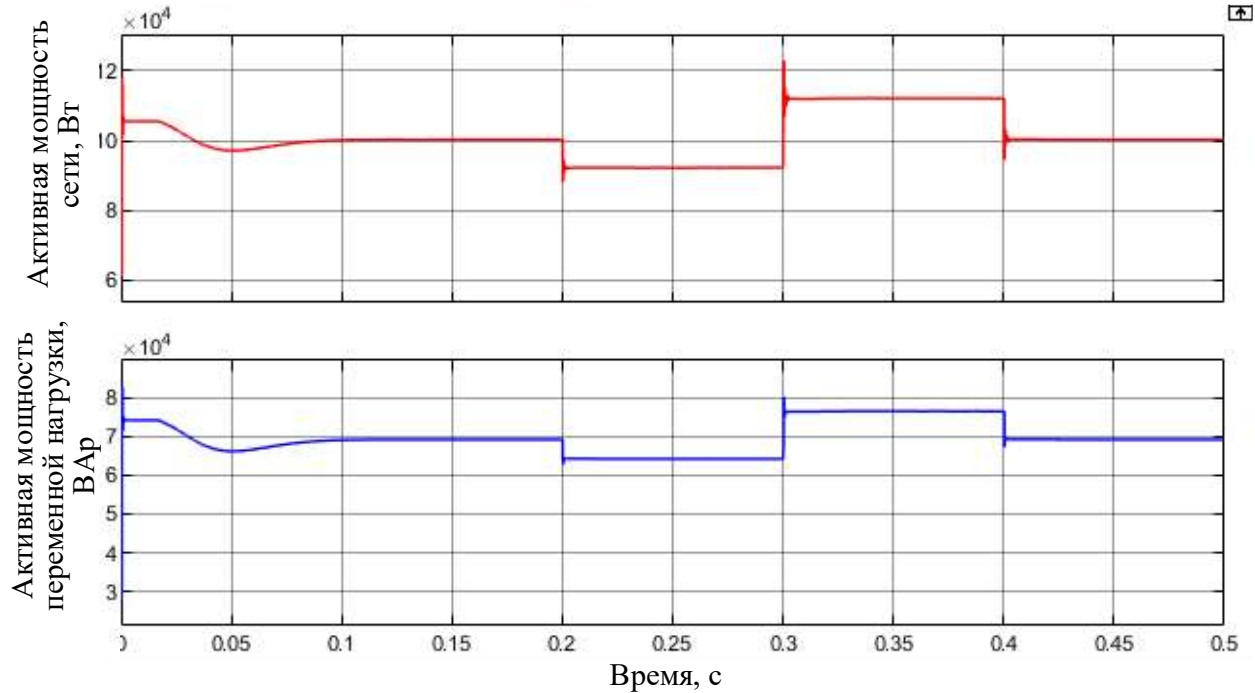


Рисунок 3 – Изменение активной мощности без СТАТКОМ

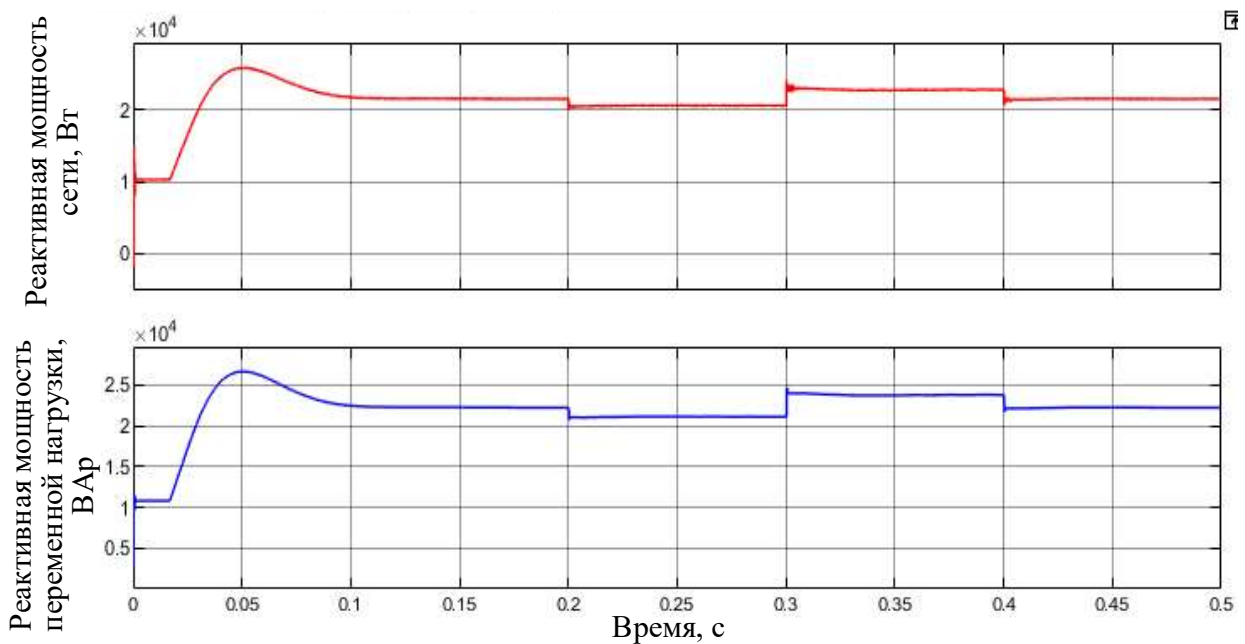


Рисунок 4 – Изменение реактивной мощности без СТАТКОМ

Оценим работы СТАТКОМа в режиме стабилизации напряжения. Устройство практически убрало колебания напряжения сети, что видно по рисунке 5. К негативным

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

моментам стоит отнести резкое возрастание входной мощности при работе СТАТКОМа, которое составляет 200% от установившегося уровня. Суммарная активная мощность, потребляемая компенсационной установкой, практически составляет нулю и тратится лишь на активном сопротивлении добавочной катушки и на падение напряжения в силовых транзисторах. Мощность, потребляемая системой без СТАТКОМа также имеет всплеск потребления мощности, вызванное емкостным элементом, однако он небольшой (порядка 10% для активной составляющей и 20% для реактивной) и без проблем будет выдержан системой. Для ограничения пускового тока необходимо предусмотреть плавное включение СТАТКОМа. Также СТАТКОМ вносит небольшие осцилляции в работе системе, вызванные резонансными явлениями между сглаживающими конденсаторами и катушками индуктивности, однако они не влияют на качество электроэнергии.

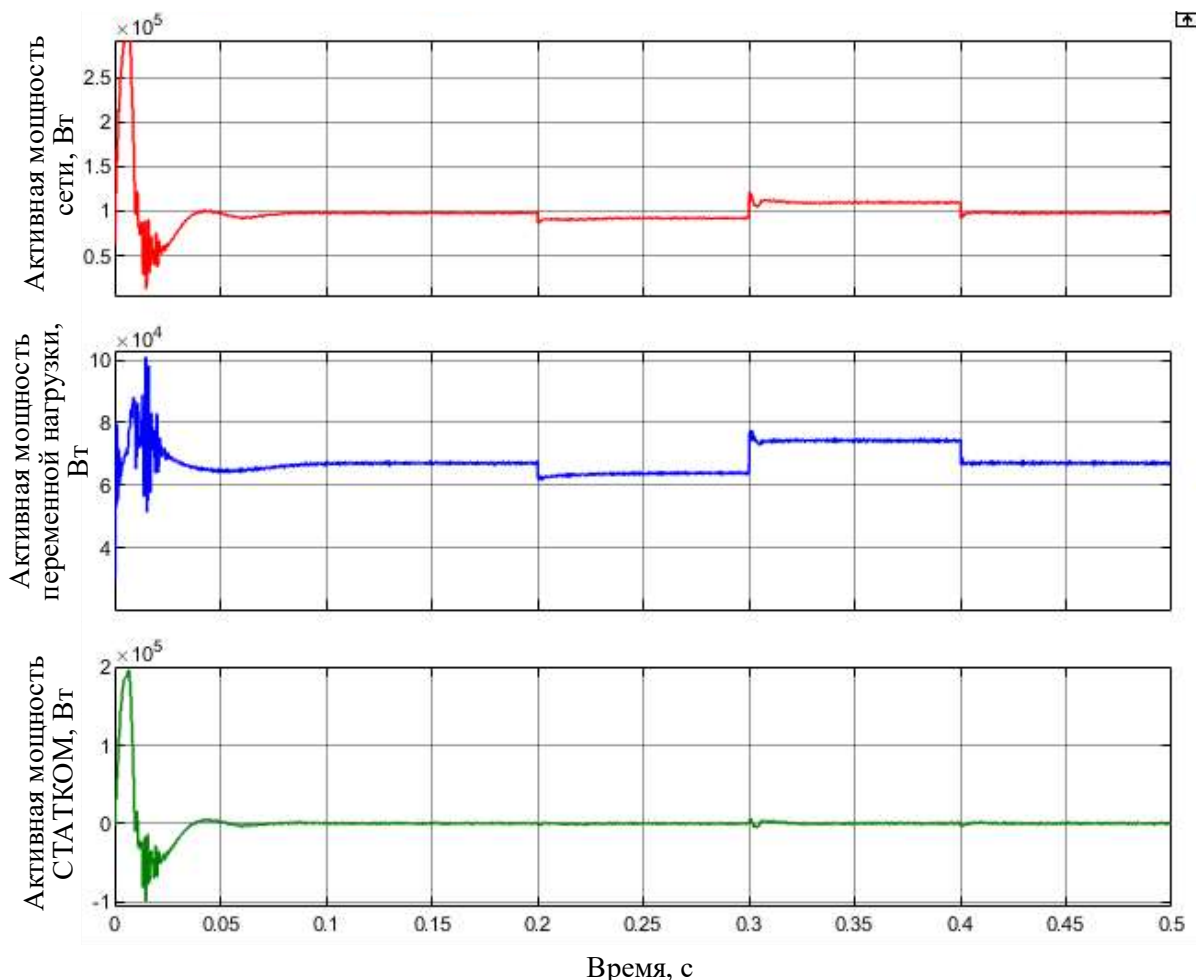


Рисунок 5 – Изменение активной мощности с работой СТАТКОМа

На рисунке 6 приведены осциллограммы мгновенных реактивных мощностей при работе СТАТКОМа. Наблюдаются небольшие осцилляции, идентичные осцилляциям активной мощности. СТАТКОМ обеспечивает стабилизацию реактивной мощности, так чтобы она составляла 22 кВАр в пределах 10% погрешности. Такая ошибка в регулировании объясняется тем, что СТАТКОМ не настроен на точную компенсацию реактивной мощности, а работает в режиме источника напряжения. Из рисунка 6 видно, что СТАТКОМ компенсирует реактивную мощность почти в 2 больше переменной нагрузки: 40 кВАр против 22 кВАр нагрузки. Отрицательный характер мощности означает её емкостной характер.

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

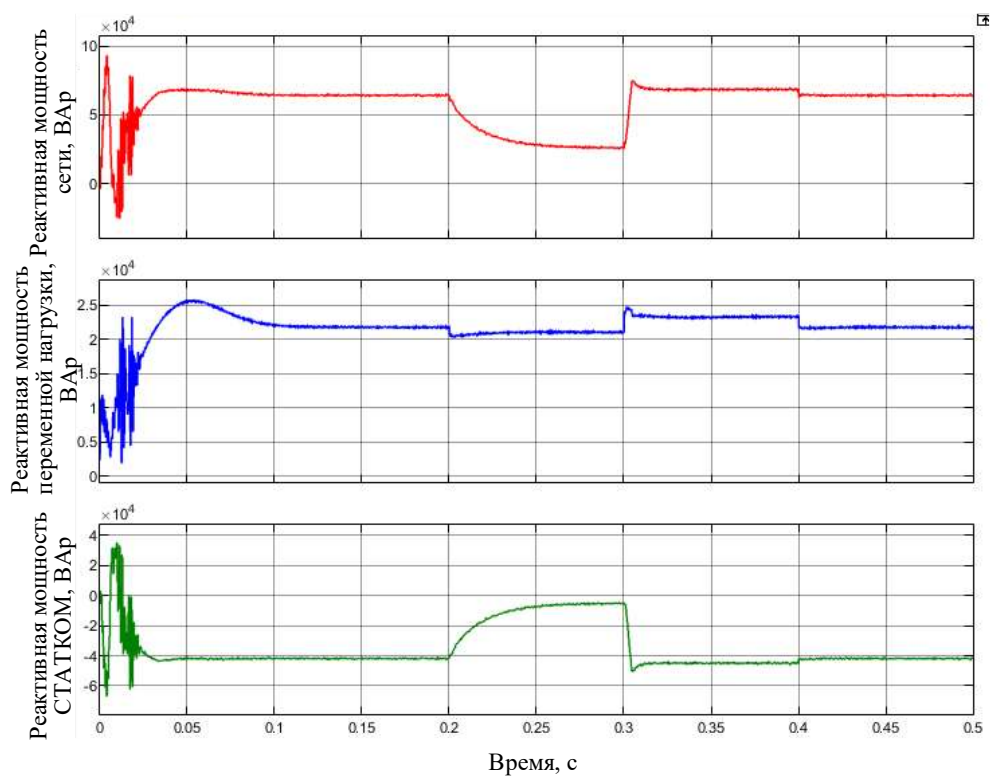


Рисунок 6 – Изменение реактивной мощности с работой СТАТКОМа

На рисунке 7 приведены осциллограммы токов, из которых видно как СТАТКОМ компенсирует колебания напряжения сети.

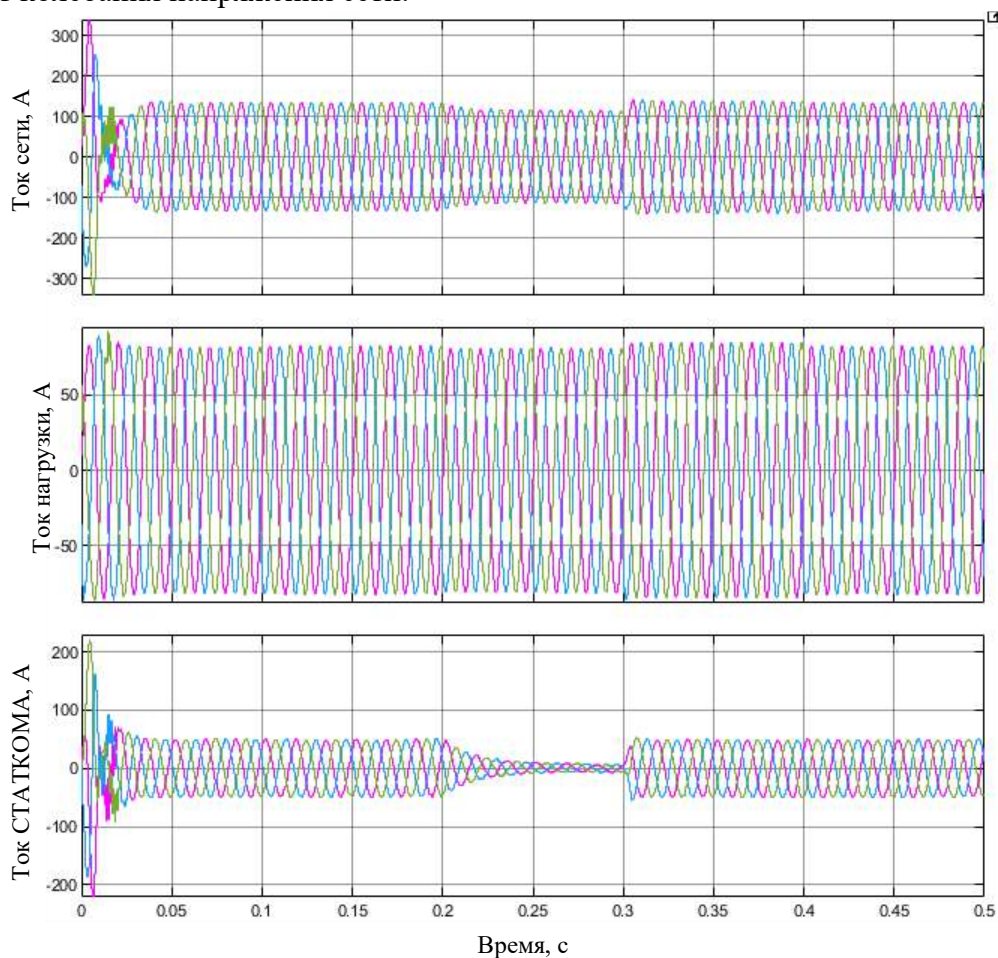


Рисунок 7 – Токи сети, переменной нагрузки и СТАТКОМа

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Таким образом можно констатировать, что СТАТКОМ полностью справился с задачей стабилизации напряжения.

**Выводы.** В статье разработана имитационная модель СТАТКОМа, которая полезна для изучения задач по улучшению качества электроэнергии, таких как регулирование напряжения и компенсация реактивной мощности в распределительной системе. Из приведенных выше результатов моделирования можно резюмировать, что СТАТКОМ является перспективным устройством, которое используется для снижения перепадов напряжения на стороне сети. По результатам было установлено, что СТАТКОМ поддерживает заданное значение напряжения и может применяться в системах с нестабильным напряжением питания и высокой реактивной мощностью.

### Список использованной литературы:

1. *Макаров А.В., Макаров В.Г., Макарова Т.В., Петров А.А.* Моделирование статического синхронного компенсатора для системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Вестник Чувашияского университета. 2020. № 3. С. 116-124.
2. *Никонов А.В.* Оценка влияния преобразователей напряжения СТАТКОМ на работу фазочувствительных защит контактной сети переменного тока // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 113-118.
3. *Уваров Г.Г., Зацепин Е.П.* СТАТКОМ как средство решения вопросов энергосбережения // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 4 (21). С. 157-164.
4. *Лазарев Г.Б.* Электромашинные компенсаторы реактивной мощности в электрических сетях современных энергосистем // Энергия единой сети. 2022. № 3-4 (64-65). С. 72-85.
5. *Мальцев И.А.* Компенсация реактивной мощности в узле нагрузки с использованием устройства СТАТКОМ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 174-180.
6. *Kumar R., Bhardwaj, A.K., Harshavardhan, Singh N.* Application of DSTATCOM Using MATLAB // Simulation in Power System. International Journal of Engineering Innovation & Research. 2013. Vol. 2, Is. 3. p. 258-261.
7. *Oghorada O.J.K., Li Z.* Analysis of star and delta connected modular multilevel cascaded converter-based STATCOM for load unbalanced compensation // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2018. Vol. 95. p. 341–352.
8. *Балабанов А.М., Митрофанов С.В.* Анализ эффективности систем СТАТКОМ в задачах повышения качества электроэнергии горнодобывающего предприятия // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 1 (57). С. 68-79.
9. *Авдеев Б.А.* Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2021. № 4. С. 99-113.
10. *Dash G., Jain P., Mathew E., Shukla R., Pandey V., Saxena S.* STATCOM Modelling Assessment and Performance Analysis in Rajasthan Renewable Complex of India // CIGRE Session 2024. 2024.
11. *Шмигель В.В., Угловский А.С.* Моделирование устройства компенсации реактивной мощности СТАТКОМ в электроэнергетической системе // Вестник АПК Верхневолжья. 2022. № 3 (59). С. 95-103.
12. *Вынгра А.В., Авдеев Б.А.* Проектирование, сборка и эксплуатация активного фильтра для компенсации интергармоник // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 519-523.
13. *Соболев А.С., Вынгра А.В., Черный С.Г.* Интеллектуальные системы для повышения эффективности робототехнических устройств на основе активных фильтров // В сборнике: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению "Робототехника". Сборник статей IV Всероссийской научно-технической конференции. Анапа, 2022. С. 236-242.

#### 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

14. Xu J., Tang S., He G., Gong Z., Lin G., Liu J. Modeling and Control Research of Fractional-Order Cascaded H-Bridge Multilevel STATCOM // *Fractal and Fractional*. 2024. Vol. 8. P. 392.
15. Zheng C.H.; Wu X. Quasi Resonant Sliding Mode Perturbation Observer of STATCOM for Harmonic Mitigation in Offshore Wind Farm. *Proc. CSEE* 2024, p. 1–16.
16. Anbuchandran S., Arumuga M., Silas D., Thinakaran M. A hybrid optimization for distributed generation and D-STATCOM placement in radial distribution network: a multi-faceted evaluation. // *Engineering Research Express*. 2024. Vol. 6.

#### References:

1. Makarov A.V., Makarov V.G., Makarova T.V., Petrov A.A. Modelirovanie staticheskogo sinxronnogo kompensatora dlya sistemy` e`lektrosnabzheniya s nelinejnoy nagruzkoj [Modeling of a static synchronous compensator for a power supply system with a nonlinear load] *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Vestnik Chuvashskogo universiteta]. 2020. No. 3. pp. 116-124. (In Russian).
2. Nikonov A.V. Ocenka vliyaniya preobrazovatelej napryazheniya STATKOM na rabotu fazochuvstvitel`ny`x zashhit kontaktnoj seti peremennogo toka [Assessment of the influence of STATCOM voltage converters on the operation of phase-sensitive protections of an AC contact network] *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2019. No. 1 (60). pp. 113-118. (In Russian).
3. Uvarov G.G., Zatsepin E.P. STATKOM kak sredstvo resheniya voprosov e`nergoberezheniya [STATCOM as a means of solving energy saving issues] *Agrotekhnika i energoobespecheniye* [Agrotechnics and energy supply]. 2018. No. 4 (21). pp. 157-164. (In Russian).
4. Lazarev G.B. E`lektromashinny`e kompensatory` reaktivnoj moshhnosti v e`lektricheskix setyax sovremenny`x e`nergosistem [Electric Machine Reactive Power Compensators in Electric Networks of Modern Power Systems] *Energiya yedinoj seti* [Energy of the Unified Grid]. 2022. No. 3-4 (64-65). pp. 72-85. (In Russian).
5. Maltsev I.A. Kompensaciya reaktivnoj moshhnosti v uzle nagruzki s ispol`zovaniem ustrojstva STATKOM [Reactive Power Compensation at the Load Node Using the STATCOM Device] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of Tula State University. Engineering Sciences]. 2022. No. 3. pp. 174-180. (In Russian).
6. Kumar R., Bhardwaj, A.K., Harshavardhan, Singh N. Application of DSTATCOM Using MATLAB. *Simulation in Power System. International Journal of Engineering Innovation & Research*. 2013. Vol. 2, Is. 3. pp. 258-261. (In English).
7. Oghorada O.J.K., Li Z. Analysis of star and delta connected modular multilevel cascaded converter-based STATCOM for load unbalanced compensation. *Int. J. Electr. Power Energy Syst*. 2018. vol. 95. pp. 341–352. (In English).
8. Balabanov A.M., Mitrofanov S.V. Analiz e`ffektivnosti sistem STATKOM v zadachax povy`sheniya kachestva e`lektroe`nergii gornodoby`vayushhego predpriyatiya [Analysis of the efficiency of STATCOM systems in the tasks of improving the quality of electric power of a mining enterprise] *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Power Engineering University]. 2023. Vol. 15. No. 1 (57). pp. 68-79. (In Russian).
9. Avdeev B.A. Intellektual`ny`e e`nergoe`ffektivny`e sistemy` morskix sudov [Intelligent energy-efficient systems of sea vessels] *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University]*. 2021. No. 4. pp. 99-113. (In Russian).
10. Dash G., Jain P., Mathew E., Shukla R., Pandey V., Saxena S. STATCOM Modelling Assessment and Performance Analysis in Rajasthan Renewable Complex of India. *CIGRE Session 2024*. 2024. (In English).
11. Shmigel V.V., Uglovskiy A.S. Modelirovanie ustrojstva kompensacii reaktivnoj moshhnosti STATKOM v e`lektroe`nergeticheskoy sisteme [Modelling of the reactive power compensation

#### 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

- device STATCOM in the electric power system] *Bulletin of the APK of the Upper Volga region*. 2022. No. 3 (59). pp. 95-103. (In Russian).
12. Vyngra A.V., Avdeev B.A. Proektirovanie, sborka i e`kspluataciya aktivnogo fil`tra dlya kompensacii intergarmolik [Design, assembly and operation of an active filter for interharmonic compensation] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. [Bulletin of the Tula State University. Technical sciences]. 2022. No. 12. pp. 519-523. (In Russian).
  13. Sobolev A.S., Vyngra A.V., Cherny S.G. Intellektual`ny`e sistemy` dlya povы`sheniya e`ffektivnosti robototekhnicheskix ustrojstv na osnove aktivny`x fil`trov [Intelligent systems for improving the efficiency of robotic devices based on active filters] *V sbornike: Sostoyaniye i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu "Robototekhnika". Cbornik statey IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [In the collection: State and prospects of development of modern science in the direction of "Robotics". Collection of articles of the IV All-Russian scientific and technical conference]. Anapa, 2022. pp. 236-242. (In Russian).
  14. Xu J., Tang S., He G., Gong Z., Lin G., Liu J. Modeling and Control Research of Fractional-Order Cascaded H-Bridge Multilevel STATCOM. *Fractal and Fractional*. 2024. Vol. 8. P. 392. (In English).
  15. Zheng C.H.; Wu X. Quasi Resonant Sliding Mode Perturbation Observer of STATCOM for Harmonic Mitigation in Offshore Wind Farm. *Proc. CSEE 2024*, pp. 1–16. (In English).
  16. Anbuchandran S., Arumuga M., Silas D., Thinakaran M. A hybrid optimization for distributed generation and D-STATCOM placement in radial distribution network: a multi-faceted evaluation. *Engineering Research Express*. 2024. Vol. 6. (In English).

#### Сведения об авторах / Information about authors

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

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

УДК 629.1

Ивановская А.В.

**ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК,  
ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРИВОД ПАЛУБНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ  
КОШЕЛЬКОВОМ ЛОВЕ**

**Аннотация:** В работе представлены основополагающие принципы формирования эксплуатационных нагрузок на грузоподъемное оборудование рыбопромыслового судна. Судовая лебедка является основным оборудованием при кошельковом лове, поэтому от ее надежности зависит успешность промысла и эффективность эксплуатации судна. Государственный стандарт по расчету нагрузок на грузоподъемное оборудование не рассматривает палубные устройства рыбопромысловых судов, работа которых осуществляется в условиях нестационарности. Проводимые исследования направлены на разработку методики расчета таких нагрузок и предполагают создание программного комплекса, который позволит автоматизировать процесс проектирования нового грузоподъемного оборудования. Рассмотрен случай воздействия переменного момента в приводе судовой лебедки, работа которой осуществляется с остановками, необходимыми для корректировки положения судна относительно невода на этапе его кошелькования.

**Ключевые слова:** грузоподъемное оборудование, рыбопромысловое судно, нестационарные процессы, надежность, кошелькование невода

Ivanovskaya A.V.

**PRINCIPLES OF MODELING THE OPERATIONAL LOADS ACTING ON THE  
DRIVE OF DECK EQUIPMENT DURING PURSE FISHING**

**Abstract.** The paper presents the fundamental principles of the formation of operational loads on the lifting equipment of a fishing vessel. The ship's winch is the main equipment for purse-line fishing, therefore, the success of fishing and the efficiency of the vessel's operation depend on its reliability. The State standard for calculating loads on lifting equipment does not consider deck devices for fishing vessels operating in unstable conditions. The ongoing research is aimed at developing a methodology for calculating such loads and involves the creation of a software package that will automate the design process of new lifting equipment. The case of the action of a variable torque in the drive of a ship's winch is considered, the operation of which is carried out with stops necessary to adjust the position of the vessel relative to the seine at the stage of its mooring.

**Keywords:** lifting equipment, fishing vessel, non-stationary processes, reliability, pursuing the seine

**Введение.** В «Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 26 ноября 2019 г. №2798-р заложены основные меры, обеспечивающие увеличение объема добычи водных биологических ресурсов. Ключевыми видами деятельности, кроме прочих, в них признаны «строительство, техническое обслуживание, модернизация, ремонт и утилизация судов рыбопромыслового флота, а также научно-исследовательская деятельность».

В 2015 году введен в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 32579.1-2013



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

«Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок». В данном стандарте определена методика расчета нагрузок и их комбинаций на все виды грузоподъемных кранов, в том числе и лебедки, тали и их элементы. Однако, действие этого стандарта не распространяется на грузоподъемные устройства, которые установлены на судах. Нагрузки на палубное рыбопромысловое оборудование также не рассматриваются в «Правилах по грузоподъемным устройствам морских судов» Российского морского регистра судоходства. Поэтому исследования в этом направлении являются актуальными и перспективными [1-2].

**Целью** работы является формулирование принципов моделирования эксплуатационных нагрузок, действующих на привод палубного оборудования при кошельковом лове.

**Материалы и методы исследования.** В основе математического моделирования технического объекта (процесса, явления) лежат следующие принципы:

- осуществимости;
- множественности;
- агрегирования;
- контроля адекватности.

Под осуществимостью понимается достижение поставленной цели исследования с заданной вероятностью на основе разработанной математической модели. Множественность модели подразумевает отражение исследуемых свойств реального объекта (процесса, явления), для полного исследования которых требуется ряд моделей, которые позволили бы более детально при разных условиях описать систему. Агрегирование или иначе иерархирование позволяет сложную систему представить через исследование подсистем. Любое моделирование должно адекватно отображать объект (процесс, явление), поэтому и подлежит контролю по следующим критериям: размерностей, порядков, характера зависимостей, экстремальных ситуаций, математической замкнутости [3-7].

Судовое грузоподъемное оборудование не является универсальным и отличается для механизации тех или иных операций какого-либо конкретного процесса. Механизм или систему машин и механизмов считают совершенными только в том случае, если он наиболее полно соответствует технологии данного процесса, отвечает его требованиям. Чтобы понять роль и значение того или иного механизма, взаимосвязь машин и механизмов в линии механизации, правильно оценивать промысловые требования, надо четко уяснить, что представляет собой та или иная операция, какова ее связь с другими (предыдущими и последующими) операциями, т.е. понять суть процесса в целом.

Эффективность кошелькового лова рыбы зависит при прочих равных условиях от состояния механизации отдельных операций и всего процесса в целом. Наивысшая эффективность достигается при комплексной механизации процесса. Важнейшим требованием к линии комплексной механизации является обеспечение при данных условиях и уровне техники наивысших технико-экономических показателей. Применительно к процессам промышленного рыболовства, осуществляемым с судов, весьма важным дополнительным требованием к машинам и устройствам для комплексной механизации является возможность целесообразной их компоновки на судне. Приведенные выше характеристики и требования в полной мере относятся и к комплексной механизации кошелькового лова рыбы. Комплексно механизированный процесс кошелькового лова с учетом современного состояния техники представляется в следующем виде. Судно с набранным неводом подготовлено к очередному замету. При обнаружении косяка рыбы и получении команды произвести замет плавучий якорь с помощью специального устройства с дистанционным управлением сбрасывается в воду. Начинается замет по бесшлюпочному способу. В процессе замета невод сходит с площадки без участия ручного труда, стяжной трос и проводник травятся с барабанов соответствующих лебедок. По окончании замета половины невода проводниковая лебедка переключается на выборку проводника, а лебедка стяжного троса продолжает его травить. К моменту замета весь проводник выбран, пятной

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

приуход невода подадут и крепят в носовой части судна, пятной конец стяжного троса присоединяют к переходному концу, закрепленному на барабане лебедки и пропущенному через канифас-блок.

Кошелькование производится за два конца. Невод оснащен разъемными кольцами. С подходами колец к борту они остаются висеть на тросе. Барабаны лебедки взяты на тормоза, подготавливаются к выборке невода. Невод выбирают с помощью неводовыборочных машин за одно или оба крыла одновременно.

Если судно значительных размеров, то выбранный невод в зависимости от схемы выборки транспортируется с помощью машин к месту его укладки. С подходом сливной части осуществляется механизированная подсушка улова. В невод опускается погружной рыбонасос и выливают рыбу. С помощью лебедки регулируют положение погружного рыбонасоса в сливной части невода. По мере выливки при необходимости производится периодическая механизированная подсушка улова. По окончании выливки рыбы донабирают невод и подготавливают его к очередному замету.

Основным промысловым механизмом при кошельковом лове рыбы является лебедка, с помощью которой выбирают стяжной трос – кошелькуют невод. Каждая операция налагает на лебедку специфические требования как с точки зрения тягового усилия, скоростей тяги, мощности, так и с точки зрения ее конструктивного оформления и расположения на судне. Основные параметры лебедок, применяемых для кошелькования невода – тяговое усилие и диапазон скоростей тяги. Тяговое усилие, которое должна развивать лебедка в процессе кошелькования невода обуславливается режимом кошелькования.

При создании нового грузоподъемного оборудования немаловажную роль играет адекватная математическая модель, учитывающая условия работы лебедки (рис. 1).

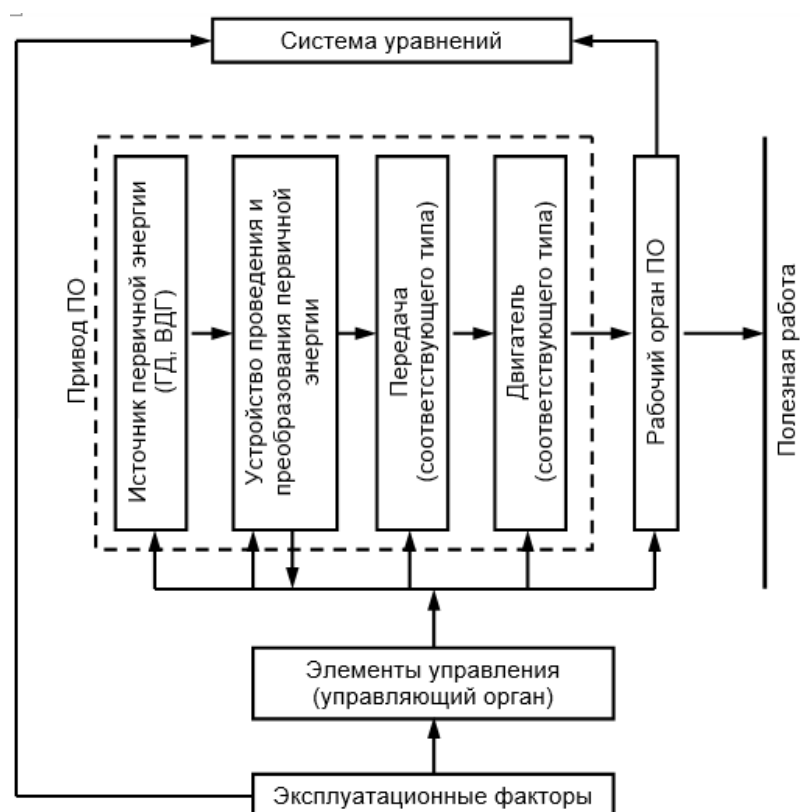


Рисунок 1 – Принцип моделирования эксплуатационных режимов палубного оборудования

**Результаты исследования и их обсуждение.** Характерной особенностью процесса подъема невода является то, что он осуществляется прерывисто: подъем часто останавливают для изменения положения судна относительно невода.

Для получения математической модели с учетом прерывистого режима работы представим вращающий момент в виде следующей функции

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

$$M(t) = \begin{cases} M_1, & 0 \leq t < l \\ M_0, & l < t \leq 2l \end{cases}$$

где  $l$  – время остановок грузоподъемного устройства.

Данная функция периодическая с периодом  $2l$ . Разложим ее в ряд Фурье (рис. 2)

$$M(t) = \frac{M_0 + M_1}{2} + \frac{M_1 - M_0}{\pi} \sum_{n=1}^m \frac{(-1)^n - 1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{l}t\right).$$

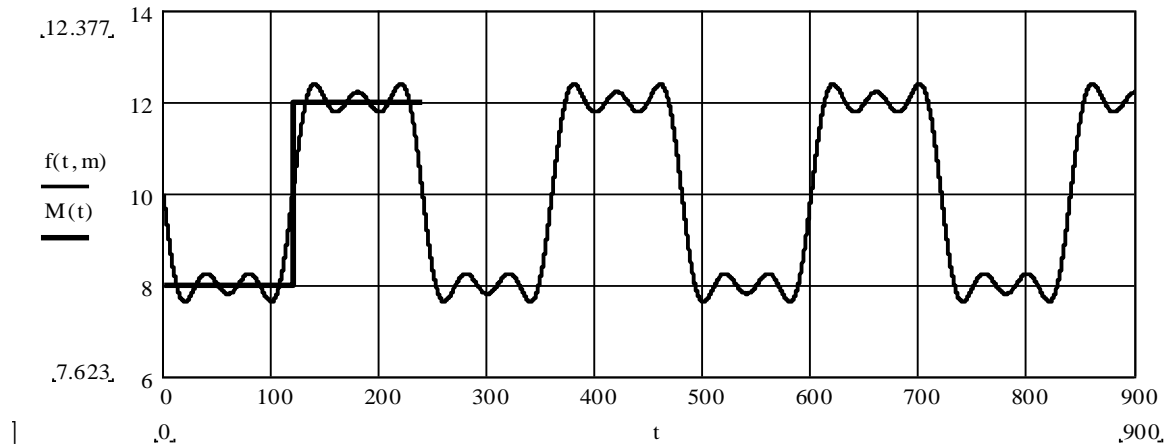


Рисунок 2 – График вращающего момента с учетом прерывистого режима работы лебедки и ее разложение в ряд Фурье

На основании теоремы про изменение кинетической энергии материальной системы в дифференциальной форме было получено дифференциальное уравнение, описывающее динамику системы «неводоыборочный барабан – невод – объект добычи» в процессе кошелькования невода [8-10]

$$\begin{aligned} \frac{R^2}{2} \left[ [m_0(1 + kt) + m_2 + 2m_3] \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{1}{2}m_0k\dot{\phi} \right] \cdot \dot{\phi} = \\ = (M(t) - k_1m_3g\phi R - F_cR) \cdot \dot{\phi} \end{aligned}$$

или

$$[m_0(1 + kt) + m_2 + 2m_3] \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{1}{2}m_0k\dot{\phi} + \frac{2k_1m_3g}{R}\phi = \frac{2M(t)}{R^2} - \frac{2F_c}{R}$$

Учитывая переменный момент, разложенный в ряд Фурье, получим

$$\begin{aligned} [m_0(1 + kt) + m_2 + 2m_3] \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{1}{2}m_0k\frac{d\phi}{dt} + \frac{2k_1m_3g}{R}\phi = \frac{M_0 + M_1}{R^2} + \\ + \frac{2(M_1 - M_0)}{\pi R^2} \sum_{n=1}^m \frac{(-1)^n - 1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{l}t\right) - \frac{2F_c}{R} + \frac{2H}{R} \sin pt \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d^2\phi}{dz^2} + \frac{2k_1m_3g}{R} \cdot \phi = \frac{M_0 + M_1}{R^2} - \frac{2F_c}{R} + \frac{2H}{R} \sin p \left( \frac{km_0}{4} z^2 - \frac{m_2}{km_0} - \frac{2m_3}{km_0} - \frac{1}{k} \right) + \\ + \frac{2(M_1 - M_0)}{\pi R^2} \sum_{n=1}^m \frac{(-1)^n - 1}{n} \sin \left( \frac{n\pi}{l} \left[ \frac{km_0}{4} z^2 - \frac{m_2}{km_0} - \frac{2m_3}{km_0} - \frac{1}{k} \right] \right). \end{aligned}$$

Для аналитического решения данного уравнения используем методику перехода дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами к дифференциальным уравнениям с постоянными коэффициентами по новой переменной  $z$

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

$$C_0 \frac{d^2\phi}{dz^2} + C_1 \frac{d\phi}{dz} + C_2\phi = Q_z.$$

Пусть  $z = f(t) = \frac{2}{m_0 \cdot k} \sqrt{m_0(1 + kt) + m_2 + 2m_3}$  – некоторая определяющая функция. Новые постоянные коэффициенты примем  $C_0 = 1$ ,  $C_1 = 0$ ,  $C_2 = \frac{2k_1 m_3 g}{R}$ .

В результате получим функцию, определяющую тяговое усилие на этапе кошелькования

$$\begin{aligned} T_1 = & F_c + k_1 m_3 g \left\{ K_{13} \sin \left( \frac{2}{m_0 \cdot k} \sqrt{\frac{2k_1 m_3 g [m_0(1 + kt) + m_2 + 2m_3]}{R}} \right) + \right. \\ & + K_{23} \cos \left( \frac{2}{m_0 \cdot k} \sqrt{\frac{2k_1 m_3 g [m_0(1 + kt) + m_2 + 2m_3]}{R}} \right) + \frac{M_0 + M_1}{2Rk_1 m_3 g} - \frac{F_c}{k_1 m_3 g} + \\ & \left. + K_3(t) \sin pt + K_4(t) \cos pt + \sum_{n=1}^m \left\langle L_{1n} \sin \left( \frac{n\pi}{l} t \right) + L_{2n} \cos \left( \frac{n\pi}{l} t \right) \right\rangle \right\} \end{aligned}$$

Программная реализация данной математической модели осуществлялась на языке Python (рис.3).

```
def tension(timescale: ndarray,
            params: ndarray,
            coefs: ndarray) -> ndarray:
    g = 9.81
    m0, m2, m3, r, R, F, fi0, fi10, k, M0, k1, M1, l, H, m = params
    K3, K4, DK4, L11, L21, DL21, L13, L23, DL23, L15, L25, DL25, L17, L27, DL27, K23, K13 = coefs
    s = pi / l
    p = s
    m1 = array([m0 * (1 + k * t) + m2 + 2 * m3 for t in timescale])
    z = array([2 / (m0 * k) * sqrt(i) for i in m1])

    fi = array([(M0 + M1) / (2 * R * k1 * m3 * g) +
                L11[i] * sin(s * t) +
                L21[i] * cos(s * t) +
                K13 * cos(sqrt((2 * k1 * m3 * g) / R) * z[i]) +
                K23 * sin(sqrt((2 * k1 * m3 * g) / R) * z[i]) -
                F / (k1 * m3 * g) +
                K3[i] * sin(p * t) +
                K4[i] * cos(p * t) +
                L13[i] * sin(3 * s * t) +
                L23[i] * cos(3 * s * t) +
                L15[i] * sin(5 * s * t) +
                L25[i] * cos(5 * s * t) +
                L17[i] * sin(7 * s * t) +
                L27[i] * cos(7 * s * t)
                # L19[i] * sin(9 * s * t) +
                # L29[i] * cos(9 * s * t) +
                # L111[i] * sin(11 * s * t) +
                # L211[i] * cos(11 * s * t)

                for i, t in enumerate(timescale)])

    return fi
```

Рисунок 3 – Фрагмент программы расчета тягового усилия и вращающего момента лебедки на этапе кошелькования невода

Программа предназначена для определения динамических параметров лебедки, особенностью работы которой является нестационарность процессов в механической системе. Математическая модель динамического поведения такой системы является дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами. В программе рассмотрены переменность нагружения со стороны буксируемого/поднимаемого груза и

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

действующего периодического момента, представленного рядом Фурье. Результатом работы программы является аналитическое определение тягового усилия и вращающего момента лебедки. Графическое представление позволит визуализировать колебательный процесс (рис. 4).

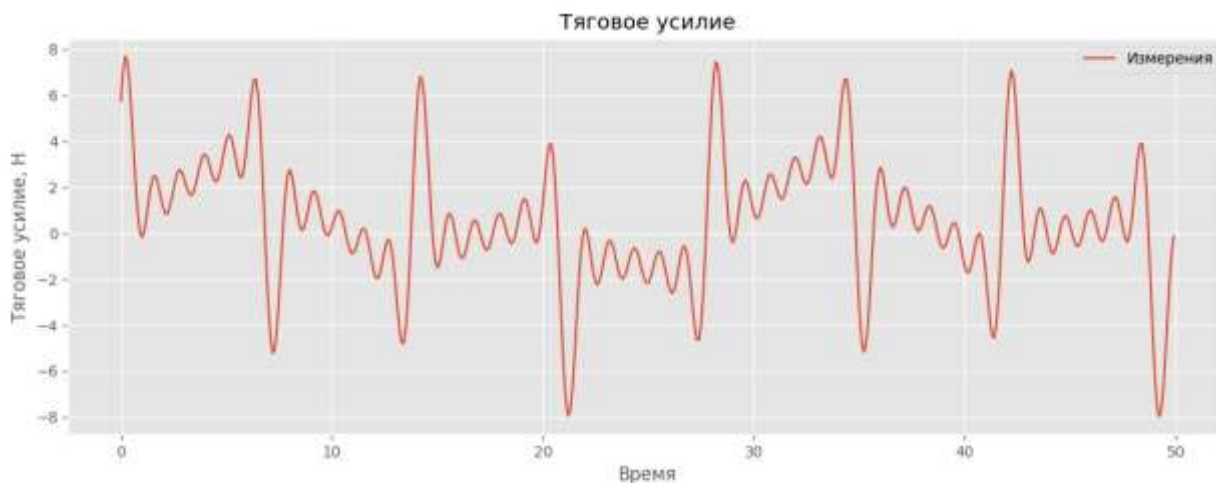


Рисунок 4 – Графическое представление силы натяжения в процессе кошелькования

Результаты расчета, полученные в программе, хорошо согласуются с данными, полученными при натурном эксперименте.

**Выводы.** Создание нового грузоподъемного оборудования для рыбопромысловых судов предполагает иные подходы к расчету эксплуатационных нагрузок, основанные на усовершенствованных математических моделях. Полученное программное обеспечение расчета нагрузки на лебедку в процессе кошелькования может быть рекомендовано и для других видов судового грузоподъемного оборудования, работающего в условиях нестационарности.

### Список использованной литературы:

1. *Тё, А. М.* Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств: учебное пособие. Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2014. 178 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. *Бабаков И.М.* Теория колебаний. М.: Наука, 1976. 592 с.
4. *Ананьев И.В.* Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. М.-Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1946. 223 с.
5. *Бидерман В.Л.* Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
6. *Тимошенко С.П.* Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
7. *Вибрации в технике. Справочник в 6 т. / Под ред. В.В. Болотина.* М.: Машиностроение, 1979. Т. 1. 352 с.
8. *Ивановская А. В.* Условия обеспечения эксплуатационной безопасности рыбопромыслового судна при кошельковании невода / А. В. Ивановская, С. Г. Черный, А. Н. Ивановский // Новые технологии в судостроении : Сборник трудов отраслевой научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 22 ноября 2022 года / Сост.: А.А. Калининченко, А.Н. Кириллов, В.К. Ханухов; АО «Центр технологии судостроения и судоремонта»,. – Санкт-Петербург: Центр технологии судостроения и судоремонта, 2022. – С. 65-70.
9. *Ивановская А. В.* Создание конкурентоспособного рыбопромыслового флота Республики Крым: проблема и пути решения / А. В. Ивановская, Е. В. Богатырева, А. Н. Ивановский // Развитие энергетики водного транспорта, информационных и

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

энергосберегающих технологий : сборник материалов I Всероссийской конференции, Астрахань, 12–13 декабря 2023 года. – Астрахань: Волжский государственный университет водного транспорта, 2023. – С. 84-88.

10. Ивановская А.В. Формализация движения буксируемого объекта по поверхности, как часть системного подхода при моделировании судовой лебедки / А. В. Ивановская // Вестник КГМТУ. Серия: Морские технологии. – 2023. – № 2. – С. 57-65.

### References:

1. Tyoh A.M. *Ekspluatatsiya sudovyh vspomogatel'nyh mekhanizmov, sistem i ustrojstv* [Operation of ship auxiliary mechanisms, systems and devices]. Vladivostok, MGU im. adm. G.I. Nevel'skogo, 2014, 178 p. (In Russian).
2. Bashurov B.P., Skiba A.N., Chebanov V.S. *Funkcional'naya nadezhnost' i kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sudovyh vspomogatel'nyh mekhanizmov* [Functional reliability and control of the technical condition of ship's auxiliary mechanisms]. Novorossiysk, MGA named after Admiral F.F. Ushakov Publ., 2009, 192 p. (In Russian).
3. Babakov I.M. *Teoriya kolebaniy* [Oscillation theory]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 592 p. (In Russian).
4. Anan'ev I.V. *Spravochnik po raschetu sobstvennyh kolebaniy uprugih sistem* [Handbook on the calculation of natural oscillations of elastic systems]. Moscow-Leningrad, OGIz, Gostekhizdat Publ., 1946, 223 p. (In Russian).
5. Biderman V.L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Theory of mechanical vibrations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980, 408 p. (In Russian).
6. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenerenom dele* [Fluctuations in engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1985, 472 p. (In Russian).
7. Bolotin V.V. (ed.) *Vibratsii v tekhnike. Spravochnik* [Vibration in engineering. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, vol. 1, 352 p. (In Russian).
8. Ivanovskaya, A.V., Cherny`j, S.G., Ivanovskij, A.N. Usloviya obespecheniya e`kspluatatsionnoj bezopasnosti ry`bopromy`slovogo sudna pri koshel`kovanii nevoda [Conditions for ensuring the operational safety of a fishing vessel when seining] *New technologies in shipbuilding : Proceedings of the Industry Scientific and Technical Conference: Center for Shipbuilding and Ship Repair Technology* [New technologies in shipbuilding : Proceedings of the Industry Scientific and Technical Conference: Center for Shipbuilding and Ship Repair Technology] 2022. pp. 65-70. (In Russian)
9. Ivanovskaya, A.V., Bogaty`reva, E.V., Ivanovskij, A.N. Sozdanie konkurentosposobnogo ry`bopromy`slovogo flota Respubliki Kry`m: problema i puti resheniya [Creation of a competitive fishing fleet of the Republic of Crimea: the problem and solutions] *Razvitie e`nergetiki vodnogo transporta, informacionny`x i e`nergosberegayushhix texnologij: sbornik materialov I Vserossijskoj konferencii: Volzhskij gosudarstvenny`j universitet vodnogo transporta* [Development of water transport energy, information and energy-saving technologies: proceedings of the First All-Russian Conference: Volga State University of Water Transport] 2023. pp. 84-88. (In Russian)
10. Ivanovskaya, A.V. Formalizatsiya dvizheniya buksiruемого ob`ekta po poverxnosti, kak chast` sistemnogo podxoda pri modelirovanii sudovoj lebedki [Formalization of the movement of a towed object on the surface, as part of a systematic approach to modeling a ship's winch] *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo texnologicheskogo universiteta. Seriya: Morskie texnologii*. [Bulletin of KSMTU. Series: Marine Technologies] 2023. № 2. pp. 57-65. (In Russian)

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

	Сведения об авторе / Information about author
<b>Ивановская Александра Витальевна</b>	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 621.43.018.7:536.8

Конюков В.Л.

### **СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ СУДОВОГО ДВУХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЛАВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБОКОМПРЕССОРА**

**Аннотация.** В работе исследовано влияние повышения давления наддува поворотом лопаток регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора на показатели и критерии тепловой напряженности судового двухтактного дизеля при утяжелении винтовой характеристики судна. Изменение эффективной площади проходного сечения турбины для различных коэффициентов утяжеления винтовой характеристики ограничивалось максимально допустимой механической напряженностью деталей цилиндропоршневой группы и исключением обратного заброса газов при выпуске из цилиндра. Для этих условий назначена зона нагрузок дизеля, в которой проводились исследования параметров и критериев тепловой напряженности. Для этой зоны получены зависимости предельно допустимых углов поворота лопаток, характер изменения которых свидетельствует о большей чувствительности двухтактных дизелей к таким воздействиям по сравнению с четырехтактными дизелями. Повышение давления наддува вызвало существенное снижение максимальной температуры и средней температуры по циклу дизеля. В то время как определяющие параметры тепловой напряженности: температура газа за цилиндром, температура газа в конце процесса расширения в цилиндре изменялись менее интенсивно. На основании анализа полученных результатов и сопоставления их с результатами тестовых заводских испытаний дизеля определена ограничительная характеристика по тепловой напряженности и назначена зона допустимых режимов эксплуатации, которая охватывала больший диапазон нагрузок по сравнению с исходным вариантом.

**Ключевые слова:** дизель, регулируемый сопловой аппарат, турбокомпрессор, эксплуатационные параметры, винтовая характеристика, коэффициент утяжеления, тепловая и механическая напряженность.

Konyukov V.L.

### **REDUCING THE THERMAL STRESS OF A MARINE TWO-STROKE DIESEL ENGINE IN VARIOUS NAVIGATION CONDITIONS USING AN ADJUSTABLE TURBOCHARGER NOZZLE**

**Abstract.** The paper investigates the influence of increasing the boost pressure by turning the blades of the adjustable turbocharger nozzle apparatus on the indicators and criteria of the thermal stress of a marine two-stroke diesel engine at weighting the screw characteristic of the vessel. Variation of the effective area of the turbine passage cross-section for different coefficients of screw characteristic weighting was limited by the maximum permissible mechanical stress of the cylinder-piston group parts and exclusion of the back throw of gases at the cylinder discharge. For these conditions the diesel engine load zone was assigned, in which the research of parameters and criteria of thermal stress was carried out. For this zone dependences of the maximum permissible angles of rotation of blades are received, the character of change of which testifies to greater sensitivity of two-stroke diesels to such influences in comparison with four-stroke diesels. Increasing the boost pressure caused a significant decrease in the maximum temperature and the average temperature over the diesel cycle. While the determining parameters of thermal stress: gas temperature behind the cylinder, gas temperature at the end of the expansion process in the cylinder changed less intensively. On the basis of the analysis of the obtained results and comparing them with the results of the test factory tests of the diesel engine, the limiting characteristic of thermal stress was



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

determined and the zone of permissible operating modes was assigned, which covered a larger range of loads compared to the initial variant.

**Keywords:** diesel engine, adjustable nozzle unit, turbochargers, operational parameters, screw characteristic, weighting coefficient, thermal and mechanical stress.

**Введение.** Утяжеление винтовой характеристики при изменении условий плавания сопровождается повышением температуры рабочего тела по циклу дизеля. При этом растут показатели тепловой напряженности. Каждая марка дизеля имеет ограниченный диапазон допустимых режимов эксплуатации, определяемых соотношением мощность – частота вращения, который выделен ограничительными характеристиками, назначенными дизельными фирмами [1, 2]. Работа судовых дизелей за пределами установленного диапазона приводит к увеличению тепловой и механической напряженности цилиндровой втулки, поршня, выпускных клапанов и других деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) [3]. Переход на более утяжеленную винтовую характеристику сопровождается снижением относительной мощности дизеля по причине достижения средним эффективным давлением предельно допустимого значения [4]. При таких условиях появляются дополнительные резервы повышения эффективности двигателя путем использования регулируемого соплового аппарата (РСА) турбокомпрессора [5–6]. Увеличение давления наддува при повороте лопаток РСА способствует снижению температуры рабочего тела в характерных точках цикла по причине увеличения коэффициента избытка воздуха при горении топлива. Следует отметить, что при таком регулировании расхода воздуха повышается экономичность дизеля [7, 8]. Исследования судового среднеоборотного четырехтактного дизеля показали, что использование РСА позволило существенно расширить диапазон допустимых режимов эксплуатации [9]. В результате исследований исходного варианта дизеля был сделан вывод, что определяющей ограничительной характеристикой тепловой напряженности четырехтактного дизеля является зависимость мощности от частоты вращения, полученная для постоянной температуры газа в конце процесса расширения в цилиндре при полной нагрузке дизеля и номинальной винтовой характеристике. Это было сделано на основании сопоставления характеристик, полученных в результате исследования дизеля с ограничительными характеристиками, установленными дизельной фирмой. Температура газа в конце процесса расширения в цилиндре определяет тепловое состояние выпускного клапана [10].

Сравнение результатов исследований двухтактных и четырехтактных судовых дизелей одного диапазона мощностей показали, что они по-разному реагируют на одни и те же внешние воздействия. Так при неизменных винтовых характеристиках соответствующих номинальным условиям плавания двухтактные дизели более чувствительно реагировали на изменение расхода воздуха в результате поворота лопаток РСА турбокомпрессора. Проведенные исследования судового двухтактного дизеля с газотурбинным наддувом 7S50MC при различных условиях плавания показали, что заводской ограничительной характеристике по тепловой напряженности соответствует зависимость мощности от частоты вращения, полученная для предельно допустимой температуры газа на выходе из цилиндра с учетом перемешивания с продувочным воздухом [11]. В научной и технической литературе отсутствуют данные о влиянии изменения расхода воздуха при повороте лопаток РСА турбокомпрессора на эксплуатационные параметры судового двухтактного дизеля для различных условий плавания.

**Целью работы** является сравнение показателей тепловой напряженности судового двухтактного дизеля при предельно допустимом повороте лопаток РСА для различных условий плавания и анализ изменений диапазона допустимых режимов эксплуатации.

**Материалы и методы исследования.** В качестве объекта исследований принят дизель марки 7S50MC [11]. Этот дизель является типовым главным двигателем на судах транспортного морского флота с прямой передачей энергии на винт. Следует отметить, что для этого дизеля накоплен определенный объем исследовательского материала по влиянию

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

ряда внешних факторов на его характеристики. Проектные параметры дизеля определялись с помощью программы «Diesel-K» [12]. Методика исследований приведена в работах [9, 11].

С целью расширения диапазона исследований по нагрузкам дизеля коэффициент утяжеления винтовой характеристики изменялся в интервале  $0,25 \leq \bar{C} \leq 3,6$ . При этом, для каждого исследованного значения коэффициента утяжеления винтовой характеристики относительная мощность дизеля менялась в диапазоне  $0,25 \leq \bar{N}_e \leq 1,0$ . Это позволило охватить широкое поле возможных эксплуатационных режимов, определяемых соотношением мощность ( $\bar{N}_e$ ) – частота вращения ( $\bar{n}$ ). Поворот лопаток РСА турбокомпрессора осуществлялся в сторону уменьшения угла их установки. При этом повышалось давление наддува, снижался удельный эффективный расход топлива, увеличивалось максимальное давление цикла  $p_z$  и уменьшалась степень понижения давления при продувке цилиндров  $e_{п}$ . Последние два фактора ограничивали диапазон нагрузок дизеля для исследований и максимальный угол поворота лопаток РСА. В качестве максимально допустимого значения  $p_z$  принята величина, соответствующая стопроцентной загрузке дизеля для номинальной винтовой характеристики. Минимально допустимая степень понижения давления при продувке цилиндров была принята  $e_{п min} = 1,005$ , которая исключала обратный заброс газов при открытии выпускного клапана и обеспечивала необходимую очистку цилиндров от остаточных продуктов сгорания топлива.

Воздействием поворотом лопаток РСА турбокомпрессора на давление наддува и, соответственно, расход воздуха изменялись эксплуатационные параметры дизеля. При этом изменялись и соотношения мощность-частота вращения, при которых ряд этих параметров достигал предельно допустимого значения по тепловой или механической напряженности. Это привело к изменению диапазона исследованных режимов по сравнению с исходным вариантом [11]. На рис.1 показана зона исследованных режимов работы дизеля с использованием РСА турбокомпрессора в координатах  $\bar{N}_e$ - $\bar{n}$ . Эта зона определена фигурой *ABCD*, которая ограничена характеристикой *AB*, соответствующей  $p_{z max}$ , здесь пунктирной линией для сравнения приведена аналогичная характеристика исходного варианта. В варианте с РСА характеристики  $p_{z max} = const$  и  $p_e = const$  для относительной частоты вращения  $0,7 \leq \bar{n} \leq 1,0$  практически совпадают. Также выделенная зона ограничена утяжеленной винтовой характеристикой швартовного режима *BC*, характеристикой минимально исследованной мощности *CD* ( $\bar{N}_e = 0,25$ ). Характеристики минимально допустимой степени продувки цилиндров  $e_{п min} = const$  (зависимости 6), практически, не ограничивали назначенный диапазон исследований, но следует отметить, что в варианте с РСА по сравнению с исходным вариантом эта характеристика смещена правее, снижая зону исследованных режимов эксплуатации. Для сравнения, здесь также пунктирной линией приведена аналогичная характеристика исходного варианта.

Таким образом, использование РСА турбокомпрессора при отмеченных выше предельных значениях  $p_{z max}$  и  $e_{п min}$  сократило зону исследованных режимов эксплуатации двухтактного дизеля.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Выше отмечалось, что двухтактный дизель, по сравнению с четырехтактным двигателем, является более чувствительным к ряду внешних факторов, определяющих условия его эксплуатации. Это проявилось и при воздействии на эксплуатационные параметры поворотом лопаток РСА. Предельно допустимые значения ограничивающих параметров, а именно  $p_{z max}$  и  $e_{п min}$ , достигались при существенно меньших углах поворота [9]. На рис.2 представлены зависимости угла поворота лопаток РСА  $\theta$ , при которых один из указанных параметров достигал предельно допустимого значения от нагрузки дизеля для различных винтовых характеристик. Из рисунка следует, что с утяжелением винтовой характеристики, для исследованного диапазона нагрузок, зона воздействия РСА на характеристики дизеля повышается.

В отличие от четырехтактного дизеля, где с уменьшением относительной мощности имеет место монотонное увеличение предельно допустимого угла поворота лопаток РСА [9], у двухтактного дизеля первоначальное увеличение прироста  $\theta$  меняется на снижение такого

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

прироста. Это можно объяснить более ранним достижением двухтактным дизелем минимально допустимой степени понижения давления при продувке  $e_{п min}$ .

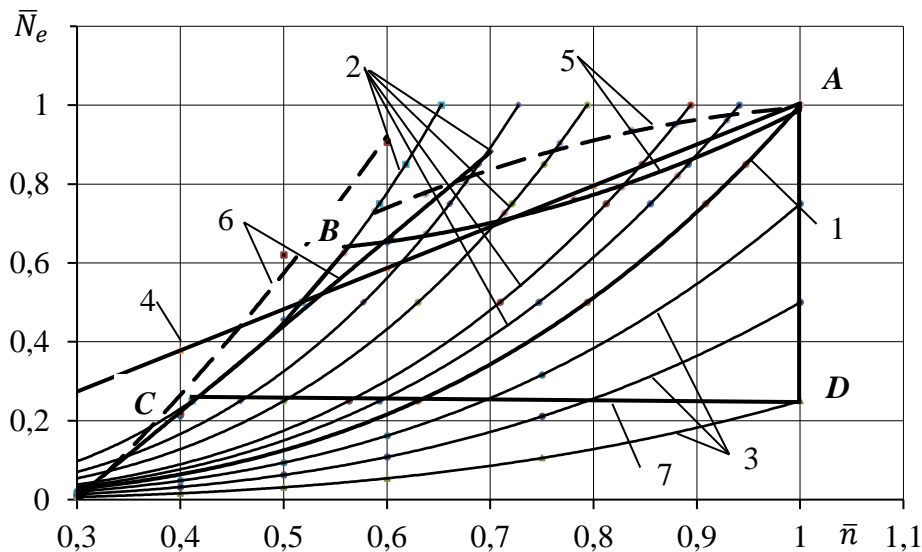


Рисунок 1 – Зона режимов дизеля, исследованных с применением PCA турбокомпрессора:

1 – номинальная винтовая характеристика ( $\bar{C}=1,0$ ); 2 – утяжеленные винтовые характеристики ( $\bar{C}= 1,2; 1,4; 2,0; 2,6; 3,6$ ); 3 – облегченные винтовые характеристики ( $\bar{C}=0,25; 0,5; 0,75$ ); 4 – ограничительная характеристика  $p_e=\text{const}$ ; 5 – ограничительная характеристика  $p_{z max}=\text{const}$ ; 6 – ограничительная характеристика  $e_{п min}=\text{const}$ ; 7 – граница минимальной мощности исследований

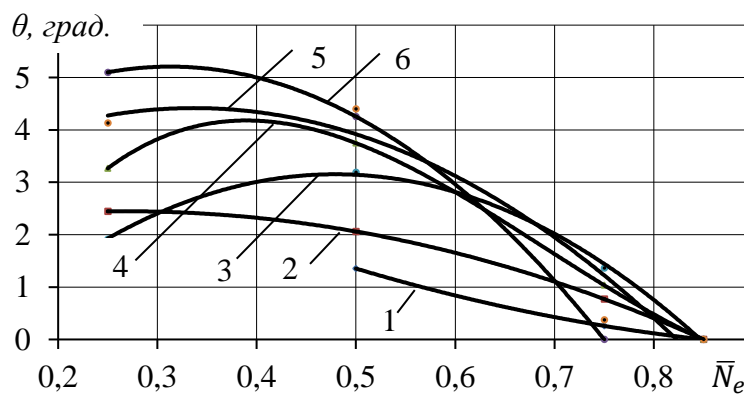


Рисунок 2 – Изменение предельно допустимого угла поворота лопаток PCA в зависимости от нагрузки дизеля для различных коэффициентов утяжеления винтовой характеристики: 1 -  $\bar{C}=0,75$ ; 2 -  $\bar{C}=1,0$ ; 3 -  $\bar{C}=1,4$ ; 4 -  $\bar{C}=2,0$ ; 5 -  $\bar{C}=2,6$ ; 6 -  $\bar{C}=3,6$

Выполненные исследования исходного варианта двухтактного дизеля для различных условий плавания и сопоставление полученных данных с результатами тестовых заводских испытаний позволили определить ограничительную характеристику тепловой напряженности. Такой определяющей ограничительной характеристикой является зависимость мощности от частоты вращения при постоянной предельно допустимой температуре отработавшего в цилиндре газа с учетом его перемешивания с продувочным воздухом ( $T_t=\text{const}$ ). Таким образом, по величине этой температуры можно контролировать состояние тепловой напряженности двигателя [11]. В варианте с PCA турбокомпрессора исследовались зависимости мощности  $\bar{N}_e$  от частоты вращения  $\bar{n}$  для постоянных предельно

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

допустимых параметров и критериев, влияющих на теплонапряженность дизеля. В качестве предельно допустимых величин принимались значения, соответствующие параметрам при полной нагрузке дизеля для номинальной винтовой характеристики. В работе рассмотрены характеристики соответствующие предельно допустимым параметрам: постоянной максимальной температуре газа в цикле ( $T_z=\text{const}$ ), постоянной температуре газа в конце процесса расширения в цилиндре ( $T_b=\text{const}$ ), средней температуре рабочего тела по циклу дизеля ( $T_{cp}=\text{const}$ ), а также для постоянного удельного теплового потока через стенки цилиндра в охлаждающую воду ( $q_c=\text{const}$ ).

На рис. 3 приведены ограничительные характеристики тепловой напряженности двухтактного дизеля при использовании РСА турбокомпрессора. Для сравнения пунктирными линиями показаны соответствующие характеристики исходного варианта. При использовании РСА все исследованные показатели тепловой напряженности расположены в узкой зоне между характеристиками  $T_{cp}=\text{const}$  (кривая 2) и  $T_z=\text{const}$  (кривая 6).

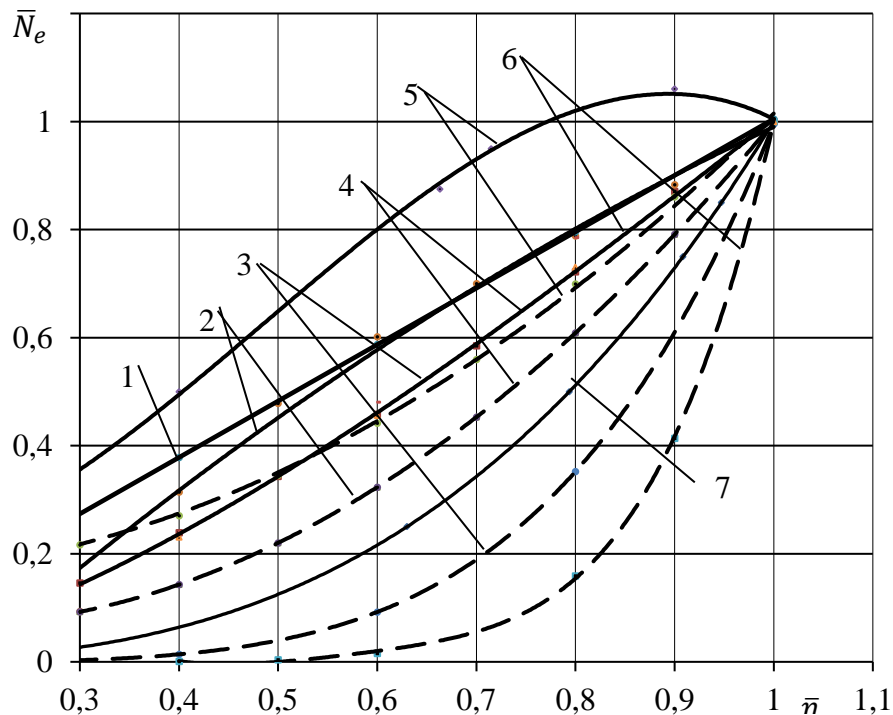


Рисунок 3 – Сравнение ограничительных характеристик тепловой напряженности двухтактного дизеля при использовании РСА турбокомпрессора: 1 -  $p_e=\text{const}$ ; 2 -  $T_t=\text{const}$ ; 3 -  $T_{cp}=\text{const}$ ; 4 -  $T_b=\text{const}$ ; 5 -  $q_c=\text{const}$ ; 6 -  $T_z=\text{const}$ ; 7 – номинальная винтовая характеристика

Для исходного варианта (без РСА) характеристики  $T_b=\text{const}$  и  $T_t=\text{const}$  практически совпадают, что позволяет по температуре  $T_t$  контролировать тепловое состояние выпускного клапана, определяемого температурой  $T_b$  [10]. В варианте с РСА снижение  $T_b$  происходит менее интенсивно по сравнению  $T_t$ . Это связано с увеличением давления в цилиндре и большей степенью понижения давления при выпуске газа из цилиндра. Поэтому характеристика  $T_b=\text{const}$  расположена правее характеристики  $T_t=\text{const}$ . Это означает, что при утяжелении винтовой характеристики дизель быстрее выходит на предельное значение  $T_b$ . Следует отметить, что при использовании РСА характеристика  $T_b=\text{const}$  и характеристика  $T_{cp}=\text{const}$  практически совпадают.

Снижение температуры рабочего тела в характерных точках цикла вызвало соответствующее уменьшение удельного теплового потока через стенки цилиндра к охлаждающей воде  $q_c$ . Это выразилось в смещении характеристики  $q_c=\text{const}$  в область меньших оборотов. Из рис. 3 следует, что эта характеристика не играет определяющей роли в ограничении режимов эксплуатации дизеля по теплонапряженности.

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

Сравнивая результаты проведенных исследований с результатами тестовых испытаний дизеля [13] можно сделать вывод, что управление расходом воздуха с помощью предельно допустимого поворота лопаток РСА позволяет существенно расширить диапазон режимов эксплуатации без тепловой перегрузки дизеля. Итоговая диаграмма определяющих ограничительных характеристик представлена на рис. 4. На этой диаграмме, в соответствии с рекомендацией фирмы MAN-B&W, ограничительные характеристики варианта с РСА  $T_b = \text{const}$  и без РСА  $T_{cp} = \text{const}$  получены соединением соответствующих характеристик с точкой **B** ( $\bar{N}_e = 0,95$ ,  $\bar{n} = 0,95$ ).

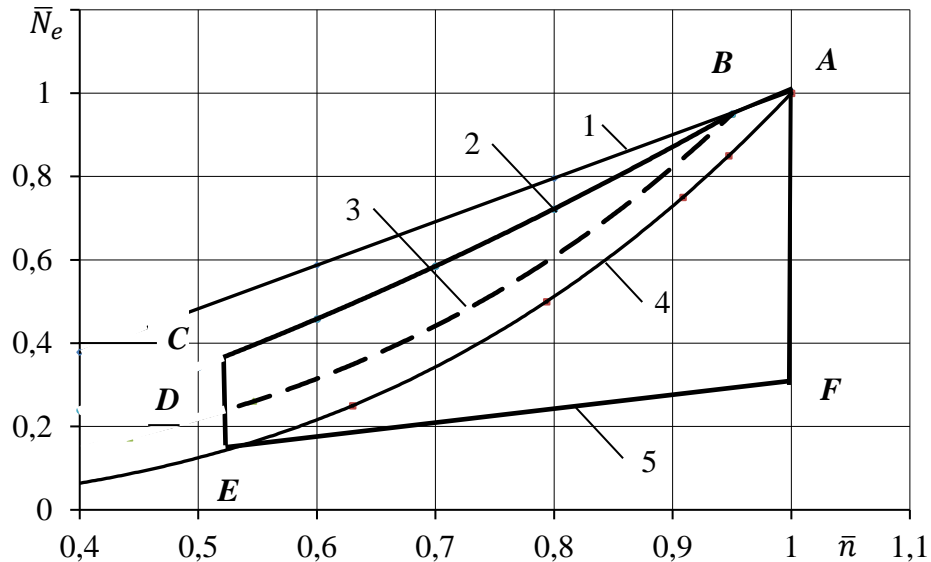


Рисунок 4 – Определяющие ограничительные характеристик двухтактного дизеля с использованием РСА турбокомпрессора: 1 -  $p_e = \text{const}$ ; 2 -  $T_b = \text{const}$ ; 3 -  $T_t = \text{const}$  без использования РСА; 4 - номинальная винтовая характеристика; 5 - характеристика холостого хода

Таким образом, зона допустимых режимов работы двухтактного дизеля с РСА турбокомпрессора без тепловой перегрузки на диаграмме (рис.4) определена криволинейной фигурой **ABCEFA**. Эта зона, по сравнению с исходным вариантом больше на величину фигуры **BCDB**.

**Выводы.** Исследования параметров тепловой напряженности судового двухтактного дизеля с использованием РСА турбокомпрессора проводились для широкого интервала коэффициента утяжеления винтовой характеристики. Угол поворота лопаток РСА турбокомпрессора ограничивался либо максимально допустимым давлением цикла, либо минимально допустимой степенью понижения давления при продувке цилиндров. Для этой зоны получены зависимости предельно допустимых углов поворота лопаток РСА, при которых один из указанных параметров достигал предельного значения. При сравнении полученных результатов с аналогичными зависимостями четырехтактного дизеля выявлено, что двухтактный дизель более чувствительно реагирует на утяжеление винтовой характеристики. Это проявляется в большем изменении исследованных параметров при изменении угла поворота лопаток РСА.

Работа дизеля с повышенным коэффициентом избытка воздуха для горения топлива при увеличении давления наддува путем поворота лопаток РСА турбокомпрессора привело к понижению параметров рабочего тела, влияющих на теплонапряженность дизеля. Это означает, что такие параметры достигнут предельно допустимых значений в зоне меньших частот вращения, когда дизель будет перегружен по определяющему параметру тепловой напряженности.

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

На основании анализа полученных результатов исследований в варианте с РСА и рекомендаций дизельной фирмы определена зона допустимых режимов эксплуатации, которая расширена по сравнению с исходным вариантом.

### Список использованной литературы:

1. *Кацман Ф.М.* Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987 – 223 с.
2. *Олейников Б. Н.* Техническая эксплуатация дизелей судов флота рыбной промышленности. М.: Агропромиздат, 1986. 269 с.
3. *Гаврилов В.С., Камкин С.В., Шмелев В.П.* Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. Учебное пособие для вузов. – Изд. 3-е перераб. И доп. М.: Транспорт, 1985. – 288 с.
4. *Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П.* Эксплуатация судовых дизелей. М.: Транспорт, 1990. 344 с.
5. Turbocharger aftermarket Honeywell Garrett. Garrett variable geometry turbochargers [Text]: Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003.-32 p. (30e)
6. How does Variable Turbine Geometry Work. [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье: <http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-vfrbable-turbine-geometry-work/>.
7. *Васькевич Ф.А., Зубко С.С.* Оценка параметров рабочего процесса главного судового дизеля по данным эксплуатационных испытаний. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2018, №3, с. 89-94. <https://dx.doi.org/10.17213/0321-2653-2018-3-83-94>
8. *Байков Б.П., Бордуков В.Г., П.В. Иванов В.Г.* Турбокомпрессоры для наддува дизелей: справочное пособие - Л.: Машиностроение, 1975.- 200с.
9. *Конюков В.Л.* Расширение диапазона допустимых нагрузок четырехтактного дизеля при использовании регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора. Научные проблемы водного транспорта. Нижний-Новгород 2024, №79 (2) С. 114-121. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79/494>
10. *Горб С.С., Сандлер А.К., Будуров Н.И.* Повышение эффективности работы главного двигателя корректировкой упора гребного винта. Автоматизация судовых технических средств. Вып. 25, 2019, с. 35-52
11. *Конюков В.Л.* Проектная оценка диапазона допустимых режимов эксплуатации судового двухтактного дизеля. Научные проблемы водного транспорта. Нижний-Новгород 2024, №78 (1) С. 97-106. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78/418>
12. Свидетельство RU2022685277 Российская Федерация. Программа расчета параметров рабочего процесса дизеля с наддувом «Diesel К»: программа для ЭВМ / А.Н. Горбенко. – Оpubл. 22.12.2022, Бюл. №1.
13. *Shop Test Protocol. Marine main engine 7S50MC.* – Augsburg: MAN-B&W, 2004. – 17 p.

### References:

1. Katsman F.M. *Ekspluatatsiya propulsivnogo kompleksa morskogo sudna.* [Operation of a propulsive complex of a marine vessel]. M.: Transport. 1987 – 223 p. (In Russian)
2. Oleinikov B. N. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya dizelei sudov flota rybnoi promyshlennosti* [Technical operation of diesel engines on fishing vessels]. Moscow, Agropromizdat, 1986. 269 p. (In Russian)
3. Gavrilov V.S., Kamkin S.V., Shmelev V.T. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudovykh dizelnykh ustanovok* [Technical operation of marine diesel installations]. [Tekst] Uchebnoye posobiye dlya vuzov. 3-e izdaniye pererab. i dop M.: Transport. 1985. – 288 p. (In Russian)
4. Kamkin S.V., Voznitsky I.V., Shmelev V.P. *Ekspluatatsiya sudovykh dizelej* [Operation of marine diesel engines]. M., Transport, 1990, 344 p. (In Russian).
5. Turbocharger aftermarket Honeywell Garrett. Garrett variable geometry turbochargers [Text]: Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003.-32 p. (30e)

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

6. How does Variable Turbine Geometry Work. [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье: <http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-vfrbable-turbine-geometry-work/>.
7. Vaskevich F.A., Zubko S.S. *Otsenka parametrov rabocheho protsessa glavnogo sudovogo dizelya po dannym ekspluatatsionnykh ispytaniy*. [Evaluation of the parameters of the working process of the main marine diesel engine according to operational tests] *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki*. [News of universities. The North Caucasus region. Technical sciences], 2018. №3. pp. 89-94. <https://dx.doi.org/10.17213/0321-2653-2018-3-83-94> (In Russian)
8. Baykov. B.P. *Turbokompressory dlya nadduva dizeley: spravochnoye posobiye* [Turbochargers for supercharging diesel engines: a reference guide]. / B.P. Baykov. V.G. Bordukov. P.V. Ivanov. - L.: Mashinostroyeniye. 1975.- 200 p (In Russian)
9. Konyukov V.L. *Rasshirenie diapazona dopustimyh nagruzok chetyrekhtaktnogo dizelya pri ispol'zovanii reguliruemogo soploвого apparatusa turbokompressora*. [Expansion of the range of permissible loads of a four-stroke diesel engine when using an adjustable turbocharger nozzle] *Nauchnye problemy vodnogo transporta*. [Scientific problems of water transport] Nizhnij-Novgorod 2024, №79 (2) P. 114-121. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79/494> (In Russian)
10. Gorb S.S., Sandler A.K., Budurov N.I. *Povysheniye effektivnosti raboty glavnogo dvigatelya korrekcirovkoy upora grebnogo vinta*. [Improving the efficiency of the main engine by adjusting the propeller stop]. *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv*. [Automation of ship technical means]. Vyp. 25. 2019. pp. 35-52 (In Russian)
11. Konyukov V.L. *Proektnaya ocenka diapazona dopustimyh rezhimov ekspluatatsii sudovogo dvuh-taktnogo dizelya*. [Design assessment of the range of permissible operating modes of a marine two-stroke diesel engine] *Nauchnye problemy vodnogo transporta*. [Scientific problems of water transport] Nizhnij-Novgorod 2024, №78 (1) P. 97-106. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78/418> (In Russian)
12. Svidetelstvo RU2022685277 Rossiyskaya Federatsiya. *Programma rascheta parametrov rabocheho protsessa dizelya s nadduvom «Diesel K»: programma dlya EVM* Certificate RU2022685277 Russian Federation. [The program for calculating the parameters of the working process of a supercharged diesel "Diesel K": computer program] / A.N. Gorbenko. – Opubl. 22.12.2022. Byul. №1. (In Russian)
13. *Shop Test Protocol. Marine main engine 7S50MC*. – Augsburg: MAN-B&W, 2004. – 17 p.

#### Сведения об авторах / Information about authors

<b>Конюков Вячеслав Леонтьевич</b>	канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 <a href="mailto:seykgmtu@mail.ru">seykgmtu@mail.ru</a>
Konyukov Viacheslav Leontievich	Ph.D. (Engin.), Associate Professor at the department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crime, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 <a href="mailto:seykgmtu@mail.ru">seykgmtu@mail.ru</a>

УДК 621.43.018.7:536.8

Конюков В.Л., Горбенко А.Н., Кукушкин М.Ю.

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА НА ПОКАЗАТЕЛИ НАПРЯЖЕННОСТИ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ**

**Аннотация.** В работе приводится анализ основных эксплуатационных параметров и критериев главного судового двухтактного дизеля, влияющих на напряженность деталей цилиндропоршневой группы при изменении температуры наддувочного воздуха. Исследования выполнены для нагрузочной характеристики дизеля, который форсирован по наддуву. Актуальность работы связана с существенным повышением температуры забортной воды в ряде регионов мирового океана в связи с глобальным потеплением. Увеличение температуры забортной воды вызывает рост температуры наддувочного воздуха и, в ряде случаев, ее невозможно понизить до проектного значения. С повышением температуры наддувочного воздуха увеличиваются определяющие параметры тепловой напряженности. Это приводит к ограничению диапазона допустимых нагрузок дизеля при превышении проектного значения температуры наддувочного воздуха. С ростом температуры наддувочного воздуха снижаются определяющие параметры статической механической напряженности ЦПП, в то время как динамические показатели механической напряженности имеют небольшое увеличение. Установлено, что каждое снижение температуры наддувочного воздуха на 10°C уменьшает удельный эффективный расход топлива на 1%. В то же время, для каждого значения температуры наддувочного воздуха имеет место относительная мощность дизеля, соответствующая минимальному расходу топлива – оптимальная нагрузка дизеля, которая с повышением температуры смещается в область больших относительных мощностей.

**Ключевые слова:** дизель, температура наддувочного воздуха, эксплуатационные параметры, тепловая напряженность, механическая напряженность, ограничительные характеристики.

Konyukov V.L., Gorbenko A.N., Kukushkin M.Yu.

### **ANALYSES OF THE INFLUENCE OF BLOWING AIR TEMPERATURE ON STRESS INDICATORS OF MARINE DIESEL ENGINE**

**Abstract.** The paper analyses the main operating parameters and criteria of the main marine two-stroke diesel engine affecting the stress of the cylinder piston group parts at the change of the charge air temperature. The research is carried out for the load characteristic of the diesel engine, which is forced by supercharging. The relevance of the work is associated with a significant increase in the temperature of the intake water in a number of regions of the world ocean due to global warming. The increase in the intake water temperature causes a rise in the charge air temperature and, in some cases, it is impossible to lower it to the design value. As the charge air temperature increases, the determinants of thermal stress increase. This leads to limitation of the range of permissible diesel engine loads when the design value of charge air temperature is exceeded. With the growth of the charge air temperature the determinants of static mechanical tension of the CKD decrease, while the dynamic parameters of mechanical tension have a slight increase. It is found that each 10°C decrease in charge air temperature reduces specific effective fuel consumption by 1%. At the same time, for each value of the charge air temperature there is a relative power of the diesel engine corresponding to the minimum fuel consumption - the optimum load of the diesel engine, which with increasing temperature shifts to the region of large relative powers.

**Keywords:** diesel engine, charge air temperature, operating parameters, thermal stress, mechanical stress, limiting characteristics.



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

**Введение.** Гидрометеорологические наблюдения за состоянием атмосферы и мирового океана фиксируют повышение температуры атмосферного воздуха и морской воды, что связано с глобальным потеплением. В отдельных районах мирового океана (Красное море, Персидский залив, западная прибрежная зона центральной Америки и др.) в летний период температура морской воды превышает  $35^{\circ}\text{C}$  [1]. В судовых энергетических установках забортная вода является основным источником теплоты низкого потенциала, которая используется в охлаждающих системах различного назначения [2]. Увеличение температуры забортной воды приводит к повышению температуры рабочих тел, что отражается на экономичности, а также средней температуре отдельных деталей главных и вспомогательных двигателей, определяющей их ресурс [3, 4].

Современные судовые главные и вспомогательные дизели выполняются высокофорсированными по наддуву. Для повышения их экономичности используется охлаждение наддувочного воздуха [5]. При высоких температурах забортной воды система охлаждения не способна поддерживать проектные значения температуры рабочих тел и, в том числе, проектную температуру наддувочного воздуха. Изменение температуры наддувочного воздуха приводит к изменению температуры рабочего тела по циклу дизеля, что отражается на параметрах и критериях, определяющих тепловую и механическую напряженность дизеля.

Дизельные фирмы включают в инструкции по эксплуатации судовых дизелей зоны допустимых режимов, определяемые соотношениями, эффективная мощность-частота вращения. Эти зоны выделены характеристиками, которые называются ограничительными. Эксплуатация дизеля с показателями, выходящими за пределы ограничительных характеристик, не допускается, т.к. при этом дизель будет работать с перегрузкой либо по тепловой, либо по механической напряженности. При этом дизельные фирмы не указывают, по каким параметрам или критериям сформированы ограничительные характеристики [6]. Проведенные расчетно-теоретические исследования судовых дизелей для различных условий плавания позволили оценить определяющие параметры, которые соответствовали заводским ограничительным характеристикам по тепловой напряженности [7, 8]. В научной и технической литературе нет исчерпывающего объема материала по влиянию повышенной температуры наддувочного воздуха на эксплуатационные параметры главных судовых дизелей, работающих по различным характеристикам.

**Целью работы** является определение влияния температуры забортной охлаждающей воды на состояние наддувочного воздуха и параметры главного судового двухтактного дизеля.

**Материалы и методы исследования.** Исследования проводились расчетно-теоретическим методом с использованием программы «Diesel-K» [9]. Методика исследований приведена в работе [10]. Параметры и критерии, в соответствие с целью работы, определялись для дизеля марки 7S70ME-C с номинальной мощностью 21727 кВт при частоте вращения 91 об/мин и давлением наддува 0,378 МПа, при условии его работы по нагрузочной характеристике.

Для условий отличных от проектных, давление наддува определялось с помощью гидравлической характеристики турбины турбокомпрессора, которая получена по результатам теплового расчета дизеля, согласованными с результатами тестовых заводских испытаний [9]. Гидравлическая характеристика турбины представлена на рис.1, где  $e_T$  – степень понижения давления газа в турбине;  $G_T$  – расход газа через турбину, кг/с.

Регрессионное уравнение и достоверность аппроксимации приведены на поле зависимости.

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

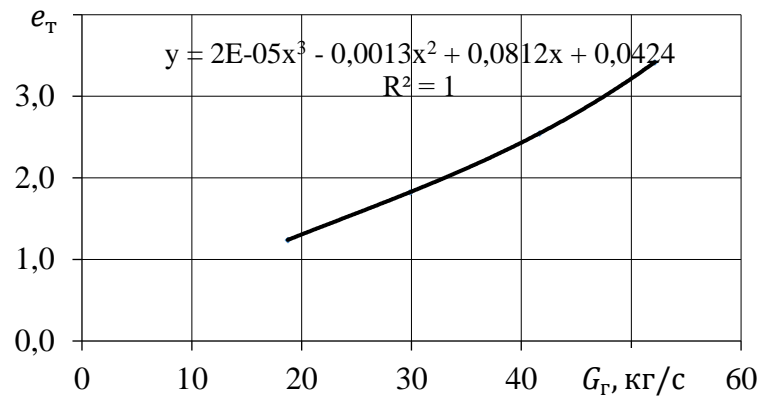


Рисунок 1 – гидравлическая характеристика турбины

Результаты исследований представлены в относительных величинах, где в качестве соответствующих параметров эталонного режима приняты значения 100%-ой нагрузки дизеля и температурой наддувочного воздуха 40 С.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Изменение внешних условий эксплуатации дизеля, таких как утяжеление винтовой характеристики или увеличение температуры наддувочного воздуха, прежде всего, изменяет коэффициент избытка воздуха при горении топлива [7, 10]. Это, в свою очередь, отражается на параметрах газа по циклу. Зависимости относительного изменения параметров и критериев от температуры наддувочного воздуха  $t_k$  представлены ниже на соответствующих графиках, на которых отмечены позиции, соответствующие относительной мощности: 1- $\bar{N}_e=100\%$ ; 2- $\bar{N}_e=75\%$ ; 3- $\bar{N}_e=50\%$ ; 4- $\bar{N}_e=25\%$ .

Относительное изменение коэффициента избытка воздуха при горении  $\bar{\alpha}$  представлено на рис.2. Из рисунка следует, что с уменьшением нагрузки дизеля  $\bar{\alpha}$  растет, и влияние  $t_k$  на  $\bar{\alpha}$  увеличивается, особенно сильно это проявляется для диапазона  $0,25 \leq \bar{N}_e \leq 0,5$ . Если сравнить эти результаты с результатами исследования аналогичного дизеля, но для винтовой характеристики, то следует отметить, что для винтовой характеристики снижение относительной мощности приводит к уменьшению  $\bar{\alpha}$ , которое для  $\bar{N}_e=100\%$  составило 38% [7].

Относительное изменение максимальной температуры цикла  $\bar{T}_z$  при повышении температуры наддувочного воздуха показано на рис. 3. Повышение температуры наддувочного воздуха приводит к монотонному увеличению  $\bar{T}_z$  во всем диапазоне нагрузок дизеля, которое превышает 12%. Снижение относительной мощности дизеля от  $\bar{N}_e=0,5$  до  $\bar{N}_e=0,25$  вызвало существенное снижение  $\bar{T}_z$ , которое составило 8%. В области высоких нагрузок  $\bar{N}_e \geq 0,5$  такое изменение не превысило 2%.

Сравнения результатов исследований судовых двухтактных дизелей с рекомендациями дизельных фирм по диапазонам допустимых режимов эксплуатации подтверждают предположения, что ограничительной характеристикой по тепловой напряженности двигателя является зависимость эффективной мощности от частоты вращения, построенная для предельно допустимой температуры газа в конце процесса расширения в цилиндре. Эта температура газа определяет тепловое состояние и ресурс выпускного клапана [8].

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

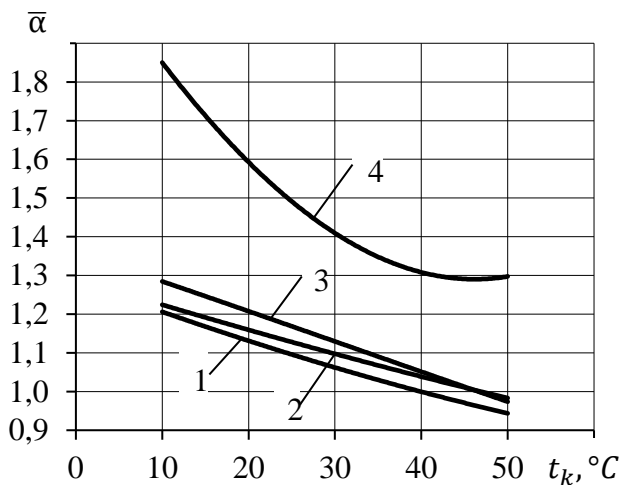


Рисунок 2 – Относительное изменение  $\bar{\alpha}$

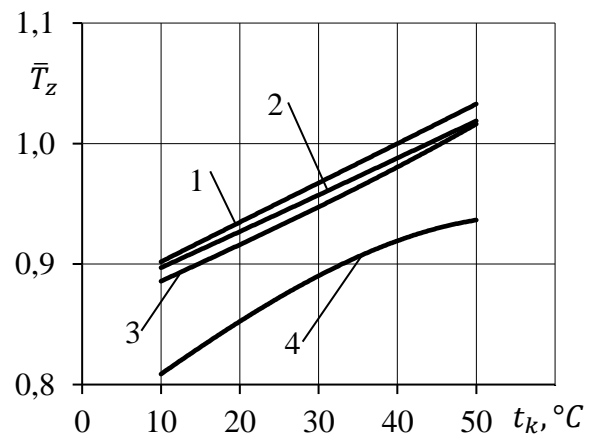


Рисунок 3 – Относительное изменение  $\bar{T}_z$

На рис. 4 представлены зависимости относительного изменения температуры газа в конце процесса расширения в цилиндре  $\bar{T}_b$ . Здесь интенсивность изменения  $\bar{T}_b$  для постоянной относительной мощности такая же, как и у  $\bar{T}_z$ . Однако с уменьшением нагрузки понижение  $\bar{T}_b$  будет больше, чем  $\bar{T}_z$ . Если в качестве проектной температуры наддувочного воздуха принять значение  $40^\circ C$ , то превышение проектной температуры воздуха на входе в цилиндр приведет к тепловой перегрузке выпускного клапана. Для аналогичного дизеля, работающего по винтовой характеристике, снижение нагрузки привело к повышению  $\bar{T}_z$ , а уменьшение  $\bar{T}_b$  для проектных внешних условий составило 9% против 25% для нагрузочной характеристики.

Оценить теплонапряженность деталей ЦПГ можно величиной удельного теплового потока от газа в цилиндре к охлаждающей воде [4]. Тепловой поток зависит от перепада температуры, который определяет термические напряжения в стенке цилиндра или в головке поршня. На рис.5 приведены зависимости относительного изменения удельного теплового потока  $\bar{q}_w$  от температуры наддувочного воздуха. Характер изменения  $\bar{q}_w$  соответствует изменению средней температуры рабочего тела.

На основе анализа экспериментальных данных и гидродинамической теории теплообмена разработаны критерии, позволяющие выполнять сравнительную оценку теплонапряженности втулки цилиндра (критерий Камкина С.В.) и теплонапряженности поршня (критерий Костина А.К.) [11]. На рис.6 и рис.7 показаны зависимости относительного изменения критерия теплонапряженности цилиндра  $\bar{K}_c$  и критерия теплонапряженности поршня  $\bar{K}_п$  от температуры наддувочного воздуха. Характер изменения  $\bar{K}_c$  соответствует изменению максимальной температуры цикла (рис. 3), а зависимости  $\bar{K}_п$  соответствуют зависимостям удельного теплового потока от газа к охлаждающей воде (рис. 5).

Увеличение температуры наддувочного воздуха снижает массу воздушного заряда цилиндра, что уменьшает расход газа через турбину. При этом уменьшается мощность турбокомпрессора и, соответственно, снижается давление наддува, что отражается на давлении в характерных точках цикла.

Зависимости относительного давления наддува  $\bar{p}_k$  и относительного максимального давления цикла  $\bar{p}_z$  от температуры наддувочного воздуха приведены соответственно на рис. 8 и рис.9. Как следует из рисунков характер изменения  $\bar{p}_k$  и  $\bar{p}_z$  один и тот же, однако при повышении температуры наддувочного воздуха от 10 до  $50^\circ C$  снижение  $\bar{p}_k$  происходит более интенсивно. Уменьшение давления рабочего тела по циклу дизеля при увеличении температуры наддувочного воздуха свидетельствует о снижении статических показателей механической напряженности деталей ЦПГ, в то время как динамические показатели механической напряженности имеют небольшое увеличение

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

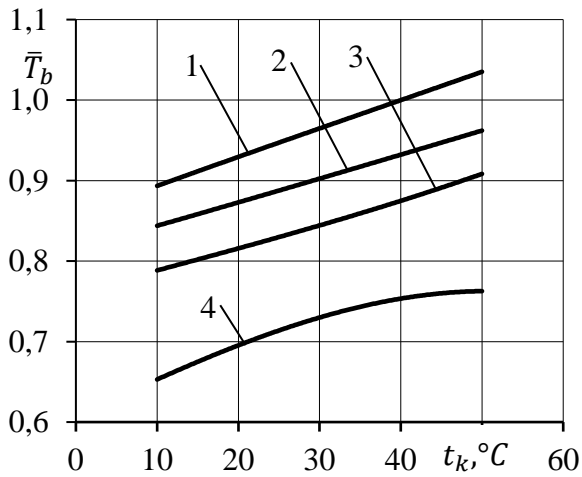


Рисунок 4 – Относительное изменение  $\bar{T}_b$

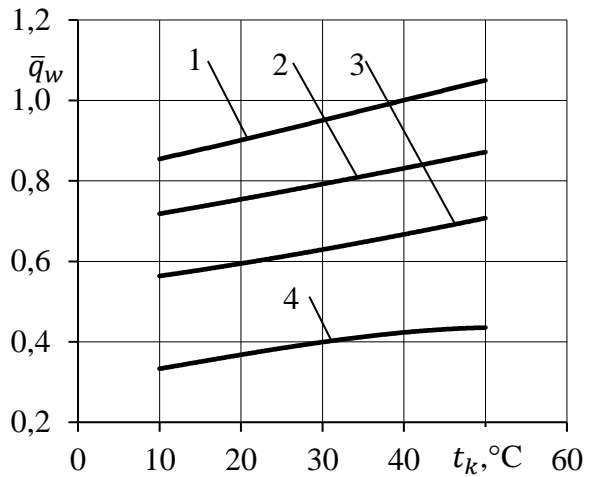


Рисунок 5 – Относительное изменение  $\bar{q}_w$

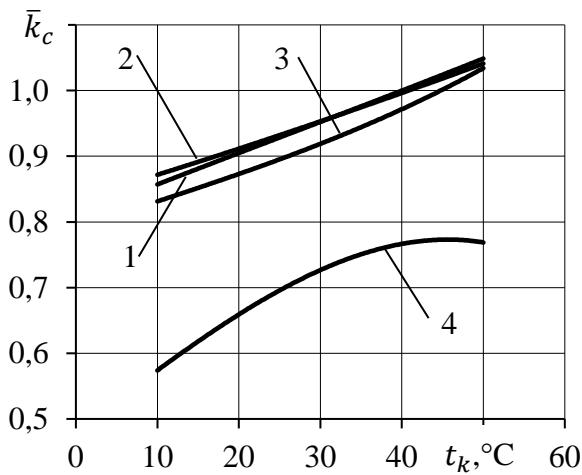


Рисунок 6 – Относительное изменение  $\bar{K}_c$

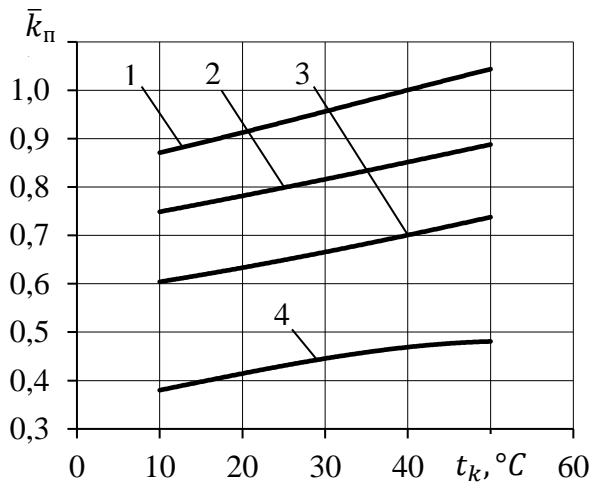


Рисунок 7 – Относительное изменение  $\bar{K}_\Pi$

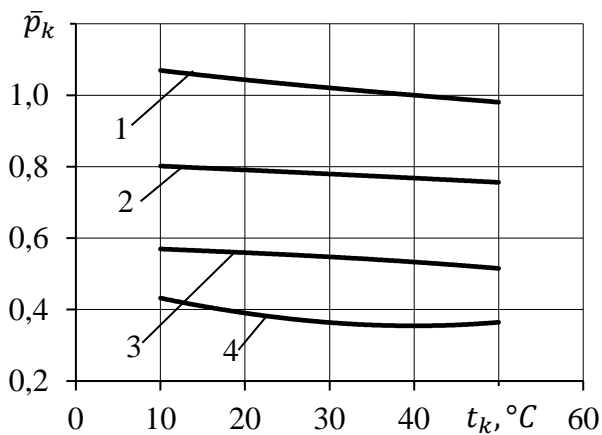


Рисунок 8 – Относительное изменение  $\bar{p}_k$

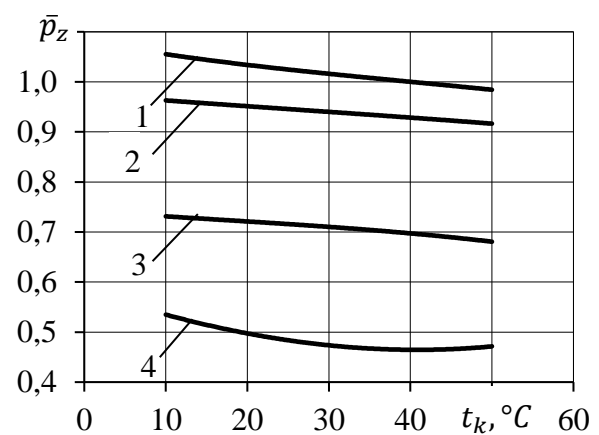


Рисунок 9 – Относительное изменение  $\bar{p}_z$

Увеличение давления наддува с понижением температуры наддувочного воздуха повышает массу воздушного заряда цилиндра и, следовательно, его работоспособность. Это улучшает экономические показатели дизеля. На рис. 10 представлены зависимости относительного изменения удельного эффективного расхода топлива  $\bar{g}_e$  от нагрузки дизеля для различных значений температуры наддувочного воздуха, а на рис. 11 приведены зависимости  $\bar{g}_e$  от температуры наддувочного воздуха для различных нагрузок дизеля. Из

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

рисунков следует, что каждое снижение температуры наддувочного воздуха на  $10^{\circ}\text{C}$  уменьшает  $\bar{g}_e$  на 1%. В то же время, для каждого значения температуры наддувочного воздуха имеет место относительная мощность дизеля, соответствующая минимальному расходу топлива – оптимальная нагрузка дизеля, которая с повышением температуры смещается в область больших относительных мощностей.

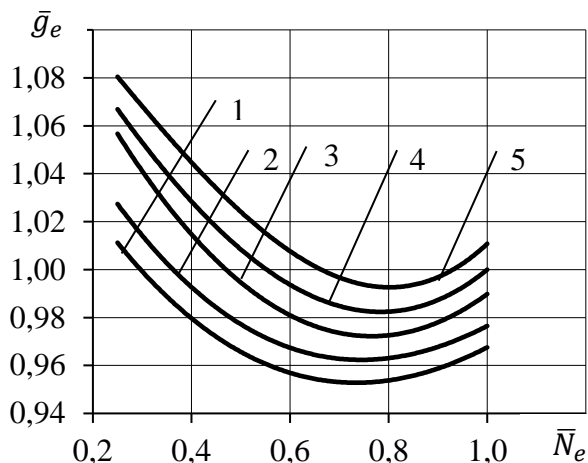


Рисунок 10 – Относительное изменение удельного эффективного расхода топлива от нагрузки дизеля для различной  $t_k$ : 1- $t_k=10^{\circ}\text{C}$ ; 2- $t_k=20^{\circ}\text{C}$ ; 3- $t_k=30^{\circ}\text{C}$ ; 4- $t_k=40^{\circ}\text{C}$ ; 5- $t_k=50^{\circ}\text{C}$

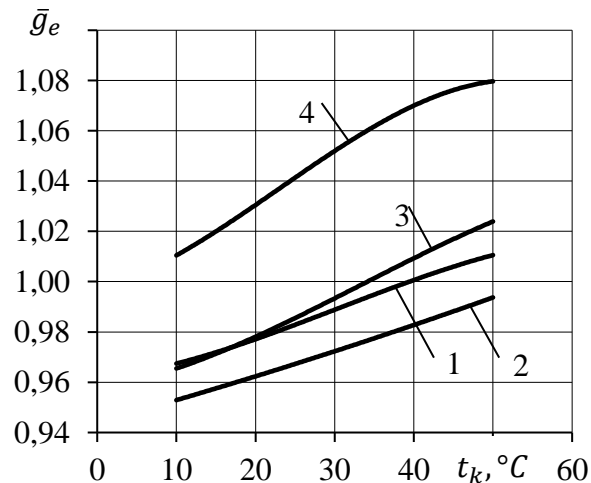


Рисунок 11 – Относительное изменение удельного эффективного расхода топлива от температуры наддувочного воздуха для различных нагрузок дизеля: 1- $\bar{N}_e=100\%$ ; 2- $\bar{N}_e=75\%$ ; 3- $\bar{N}_e=50\%$ ; 4- $\bar{N}_e=25\%$

**Выводы.** Анализ выполненных исследований показал, что малооборотные двухтактные дизели, работающие по нагрузочной характеристике при изменении внешних воздействий в меньшей степени подвержены тепловым перегрузкам деталей ЦПГ, по сравнению с аналогичными дизелями, работающими по винтовой характеристике.

С повышением температуры наддувочного воздуха увеличиваются определяющие параметры тепловой напряженности. Это приводит к ограничению диапазона допустимых нагрузок дизеля при превышении проектного значения температуры наддувочного воздуха.

С ростом температуры наддувочного воздуха снижаются определяющие параметры статической механической напряженности ЦПГ, в то время как динамические показатели механической напряженности имеют тенденцию к небольшому увеличению.

Установлено, что каждое снижение температуры наддувочного воздуха на  $10^{\circ}\text{C}$  уменьшает удельный эффективный расход топлива на 1%. В то же время, для каждого значения температуры наддувочного воздуха имеет место относительная мощность дизеля, соответствующая минимальному расходу топлива – оптимальная нагрузка дизеля, которая с повышением температуры смещается в область больших относительных мощностей.

### Список литературы

1. Cheng, L. J., and Coauthors. New record ocean temperatures and related climate indicators in 2023 // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2024. 41(6), pp. 1068–1082. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-3378-5>.
2. Овсянников М.К., Петухов В.А. Дизели в пропульсивном комплексе морских судов. Справочник. Л.: Судостроение, 1987. 256 с.
3. Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей. М.: Транспорт, 1990. 344 с.
4. Олейников Б. Н. Техническая эксплуатация дизелей судов флота рыбной промышленности. М.: Агропромиздат, 1986. 269 с.

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

5. *Ванштейдт В.А.* Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1977. 392 с.
6. *Кацман Ф.М.* Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
7. *Конюков В.Л.* Проектная оценка диапазона допустимых режимов эксплуатации судового двухтактного дизеля. // Научные проблемы водного транспорта. Нижний Новгород. 2024. №78 (1). С. 97-106. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.418>.
8. *Горб С.С., Сандлер А.К., Будуров Н.И.* Повышение эффективности работы главного двигателя корректировкой упора гребного винта. // Автоматизация судовых технических средств. 2019. Вып. 25. С. 35-52.
9. Свидетельство RU2022685277 Российская Федерация. Программа расчета параметров рабочего процесса дизеля с наддувом «DieselK»: программа для ЭВМ / А.Н. Горбенко. – Оpubл. 22.12.2022, Бюл. №1.
10. *Конюков В.Л.* Расширение диапазона допустимых нагрузок четырехтактного дизеля при использовании регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора. // Научные проблемы водного транспорта. Нижний Новгород. 2024. №79 (2). С. 114-121. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.494>.
11. *Возницкий И.В. Иванов Л.А.* Предотвращение аварий судовых двигателей внутреннего сгорания. М.: Транспорт, 1971. 191 с.

#### References

1. Cheng, L. J., and Coauthors. New record ocean temperatures and related climate indicators in 2023 // *Advances in Atmospheric Sciences*, 2024, 41(6), pp. 1068–1082. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-3378-5>.
2. Ovsyannikov M.K., Petukhov V.A. *Dizeli v propulsivnom komplekse morskikh sudov. Spravochnik* [Diesel engines in the propulsion complex of marine vessels. Guide]. L.: Sudostroyeniye, 1987, 256 p. (In Russian).
3. Kamkin S.V., Voznitsky I.V., Shmelev V.P. *Ekspluatatsiya sudovykh dizelej* [Operation of marine diesel engines]. M., Transport, 1990, 344 p. (In Russian).
4. Oleinikov B.N. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya dizelei sudov flota rybnoy promyshlennosti* [Technical operation of diesel engines on fishing vessels]. M., Agropromizdat, 1986, 269 p. (In Russian).
5. Vanshejdt V.A. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Marine internal combustion engines]. L., Sudostroyeniye, 1977, 392 p. (In Russian).
6. Katsman F.M. *Ekspluatatsiya propulsivnogo kompleksa morskogo sudna* [Operation of a propulsive complex of a marine vessel]. M., Transport, 1987, 223 p. (In Russian).
7. Konyukov V.L. Proektnaya ocenka diapazona dopustimyh rezhimov ekspluatatsii sudovogo dvuhtaktnogo dizelya [Design assessment of the range of permissible operating modes of a marine two-stroke diesel engine]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta*. [Scientific problems of water transport], Nizhnij-Novgorod, 2024, no. 78 (1), pp. 97-106. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.418>.
8. Gorb S.S., Sandler A.K., Budurov N.I. Povysheniye effektivnosti raboty glavnogo dvigatelya korrektyrovkoy upora grebnogo vinta [Improving the efficiency of the main engine by adjusting the propeller stop]. *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv* [Automation of ship technical means], 2019, no. 25, pp. 35-52. (In Russian).
9. *Svidetelstvo RU2022685277 Rossiyskaya Federatsiya. Programma rascheta parametrov rabocheho protsessa dizelya s nadduvom «Diesel K»: programma dlya EVM* [Certificate RU2022685277 Russian Federation. The program for calculating the parameters of the working process of a supercharged diesel "Diesel K": computer program] / A.N. Gorbenko. Opubl. 22.12.2022, Byul. №1. (In Russian).
10. Konyukov V.L. Rasshirenie diapazona dopustimyh nagruzok chetyrekhtaktnogo dizelya pri ispol'zovanii reguliruемого соплового аппарата турбокомпрессора [Expansion of the range

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

of permissible loads of a four-stroke diesel engine when using an adjustable turbocharger nozzle]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta* [Scientific problems of water transport], Nizhniy Novgorod, 2024, no. 79 (2), pp. 114-121. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi79.494>.

11. Voznitsky I.V., Ivanov L.A. Predotvrashchenie avarij sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Prevention of emergency marine internal combustion engines]. M., Transport, 1971, 191 p. (In Russian).

#### Сведения об авторах / Information about authors

<b>Конюков Вячеслав Леонтьевич</b>	канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок, Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 seykgmtu@mail.com
Konyukov Viacheslav Leontievich	Ph.D. (Eng.), Associate Professor at the Department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 seykgmtu@mail.com
<b>Горбенко Александр Николаевич</b>	канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок, Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 gan0941@yandex.ru
Gorbenko Alexander Nikolaevich	Ph.D. (Eng.), Associate Professor at the Department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 gan0941@yandex.ru
<b>Кукушкин Михаил Юрьевич</b>	аспирант кафедры судовых энергетических установок, Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 seykgmtu@mail.ru
Kukushkin Mihail Yur'evich	postgraduate student at the Department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 seykgmtu@mail.ru

УДК 629.12

Федоровский К.Ю., Гриненко Н.К., Тимофеев В.А.

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СЭУ**

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы обеспечения эффективности инноваций на этапе создания судовой энергетической установки на основе системы управления данным процессом. Показаны и описаны его основные этапы с учетом совокупности определяющих факторов: технических, экологических и социальных. Они требуют совокупного учета в виде интегрального показателя эффективности. При этом следует применять комплексный подход, основными принципами которого являются: многоаспектность, многовариантность, многокритериальность и взаимосвязанность. Система управления предусматривает наличие обратных информационных связей, основанных на мониторинге судовой энергетической установки в процессе эксплуатации и среде её функционирования. Эффективные инновационные решения, заложенные на этапе создания энергоустановки чрезвычайно важны, поскольку обеспечивают потенциальные возможности дальнейшей эффективной эксплуатации.

**Ключевые слова:** судовая энергетическая установка, эффективность, инновации, система управления, субъект и объект управления.

Fedorovskiy K.Yu., Grinenko N.K., Timofeev V.A.

### **ENSURING INNOVATION EFFICIENCY IN THE CREATION OF MARINE POWER PLANTS**

**Abstract.** The article considers the issues of ensuring the efficiency of innovations at the stage of creating a ship power plant based on the process control system. Its main stages are shown and described taking into account the set of determining factors: technical, environmental and social. They require a combined accounting in the form of an integral efficiency indicator. In this case, an integrated approach should be used, the main principles of which are: multi-aspect, multi-variant, multi-criterial and interconnected. The control system provides for the presence of feedback information based on monitoring the ship power plant during operation and the environment of its operation. Effective innovative solutions laid down at the stage of creating the power plant are extremely important, since they provide potential for further efficient operation.

**Keywords:** ship power plant, efficiency, innovation, control system, subject and object of control.

**Введение.** Необходимость повышения эффективности СЭУ [1, 2, 3] является актуальной проблемой, решение которой базируется на всестороннем учете совокупности определяющих факторов. Вновь создаваемые суда, включая их СЭУ, должны рассматриваться с учетом всего спектра определяющих факторов, включая экономические, технические, экологические и социальные. При этом следует учитывать все ужесточающиеся требования и нормы, обозначенные в конвенциях, принятых под эгидой Международной морской организации (ИМО), Международной организации труда (ILO) и др. Это может быть сделано на основе комплексного подхода, основными принципами которого являются: многоаспектность, многовариантность, многокритериальность и взаимосвязанность [4, 5].

Должна существовать и постоянно функционировать система управления эффективностью инноваций [6] на различных этапах жизненного цикла судна, в частности СЭУ. Этап создания является чрезвычайно важным, поскольку именно здесь закладываются потенциальные возможности обеспечения высокой эффективности, реализуемые в дальнейшем на этапе эксплуатации СЭУ.

При оценке эффективности, в конечном счете, важное значение имеет экономическое выражение влияния всех рассматриваемых факторов [7].



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

**Целью исследования является** построение системы управления эффективностью инноваций в СЭУ, включая её элементы, на этапе создания СЭУ, закладывающем потенциальные возможности эффективного функционирования на последующем этапе, связанном с эксплуатацией.

**Методы исследования.** При проведении исследований использовались: метод морфологического анализа систем управления, базирующийся на выявлении нескольких характеристик - структурных или функциональных морфологических признаков, каждый из которых может характеризовать какой-то параметр рассматриваемого объекта в обеспечении достижения основной цели; принципы комплексного подхода к оценке объекта рассмотрения.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Как указывалось ранее, оценка экономической эффективности инноваций является основой для выработки необходимого управленческого решения [8, 9] в отношении выбора направления совершенствования СЭУ. На различных этапах жизненного цикла инноваций можно и нужно по-разному воздействовать на объект с целью обеспечения его максимальной эффективности.

Укрупнено можно выделить два важнейших этапа жизненного цикла инноваций: этап создания и этап эксплуатации. Решения, принятые на этапе создания, являются чрезвычайно важными, они в значительной степени определяют взаимодействие со средой функционирования и, в конечном счете, эффективность следующей за этим самой эксплуатацией.

В основе управления с одной стороны лежит потребность и возможность субъекта управления управлять и, с другой - потребность и возможность объекта управления выполнять управленческие команды. Важной стороной вопроса является наличие у субъекта управления рычагов воздействия на объект управления, с помощью которых можно побуждать объект управления выполнять управленческие команды. Это предполагает, что в распоряжении субъекта управления имеется набор стимуляторов, которые могут быть скомпонованы таким образом, что их применение потенциальную готовность объекта управления выполнять управленческие команды превратит в реальную деятельность объекта управления по выполнению этих команд.

Нельзя анализировать возможность и потребность субъекта управления осуществлять управление, рассматривая его изолированно от объекта управления. Более того, анализ его возможностей принципиально задается объектом управления, порождается им и в его же деятельности реализуется. Следовательно, возможности субъекта управления коренятся в возможности и готовности объекта управления выполнять управленческие команды.

Механизм стимулирования субъекта управления должен отвечать следующим требованиям. Во-первых, он должен обладать действенностью на протяжении всего времени функционирования объекта управления и не ослабевать по мере удовлетворения потребностей объекта управления. Этого можно добиться за счет комплексного использования рычагов воздействия, периодического чередования методов стимулирования, ориентации стимулирующих на удовлетворение стабильных долгосрочных потребностей.

Во-вторых, механизм стимулирования должен увязывать уровень стимулирования со степенью достижения конечных целей. В настоящее время практикой управления разработан и широко используется достаточно большой арсенал средств стимулирования, отвечающих данным требованиям. В то же время следует отметить, что отсутствуют универсальные средства (по-видимому, их не может быть в принципе), которые могут давать эффективные результаты во всех случаях жизни. Поэтому формирование механизмов стимулирования должно строиться на ситуационной основе.

Анализ тенденций развития производства показывает постоянное усложнение его технической составляющей, структуры реализуемых социально-экономических целей, появление новых форм собственности и, как следствие этих тенденций, наращивание внутренних и внешних производственных связей.

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

Каждому типу конкретной ситуации, возникающей в производственной организации, должны соответствовать своя последовательность процедуры управления с ее информационным обеспечением, специфические формы взаимодействия элементов производственной организации, свои критерии и методы принятия решений. Тем самым обеспечивается возможность адаптации структуры управления к динамически меняющимся условиям функционирования производственной организации, внешней среды и их элементов.

Рассмотрим систему управления эффективностью на этапе создания СЭУ (рис. 1). Постановка задачи необходимости инновационной с целью повышения эффективности СЭУ (при этом в дальнейшем подразумеваются и её элементы) неразрывно связана с обозначением исходных задающих условий и показателей эффективности. Последние в значительной степени определяются существующей нормативной требованиями, задаваемыми, например требованиями Международной конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74), Международной конвенция по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL 73/78), Конвенции о труде в морском судоходстве №186 и др.

При планировании развития систем управления нормативное обеспечение играет важную роль в определении количественных ориентиров изменений их отдельных элементов. Общие требования стратегического характера устанавливаются, что нормативы должны: отражать действие экономических законов, быть научно обоснованными, прогрессивными, соответствовать целям развития отрасли и объектов управления, обеспечивать сближение уровней развития элементов и сторон деятельности внутри отдельных систем управления и производственных объектов отрасли между собой, быть постоянно направленными на улучшение значения нормируемых показателей, учитывать необходимые соотношения между нормативными значениями отдельных показателей.

Далее осуществляется важнейшая функция любой системы управления - сбор информации. При этом в первую очередь накапливается информация по среде функционирования СЭУ, по возможной элементной базе и по эффективности эксплуатации существующих аналогичных объектов [10, 11].

Необходимым является и сбор информации по существующей нормативной базе. В результате комплексного анализа данной информации вырабатываются концепции возможных инноваций СЭУ и их предварительное обоснование, что на практике составляет основу эскизного этапа проектирования.

Выбранные возможные инновационные варианты СЭУ подвергаются процедуре оценки эффективности с использованием системы частных показателей, которые в дальнейшем обычно сводятся в обобщающий интегральный показатель эффективности [12, 13]. Совершенно очевидно, что на данном этапе еще отсутствуют все необходимые данные по разрабатываемым вариантам СЭУ. Здесь могут быть использованы данные, позволяющие выполнять приблизительную предварительную оценку недостающих параметров [14]. При анализе эффективности осуществляется выделение факторов взаимодействия СЭУ со средой функционирования [15]. На этой базе выбирается система показателей эффективности. Происходит комплексная оценка экономической эффективности инновационных вариантов и выбор наиболее предпочтительных. В результате количество рассматриваемых вариантов сокращается до одного-двух.

Следующим этапом создания СЭУ является техническое проектирование. В результате дальнейшей разработки инновационных вариантов систем, включая и процедуры оптимизации, происходит уточнение параметров.

Более детально разработанные варианты системы повторно подвергаются описанной выше процедуре оценки эффективности, в результате чего принимается решение о создании одного единственного варианта, характеризующегося наилучшим показателем эффективности и возможностью практической реализации.

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

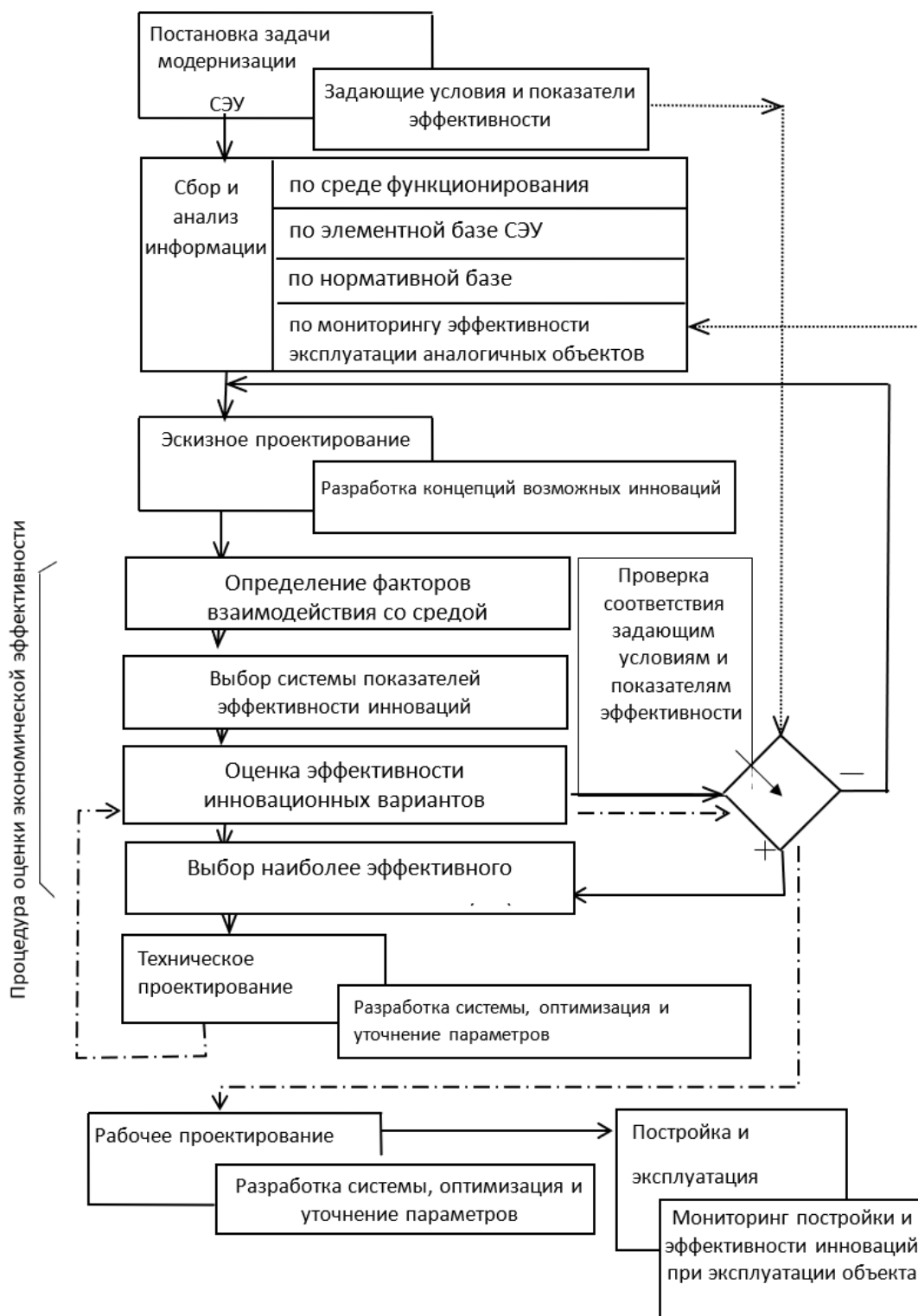


Рисунок 1 – Система управления эффективностью инноваций на этапе создания СЭУ

Выбранный вариант подлежит детальной разработке, что соответствует этапу рабочего проектирования. Далее приступают непосредственно к изготовлению СЭУ. При этом разработчиком осуществляется авторское сопровождение постройки системы с тем, чтобы заложенные при проектировании инновационного решения и требования соблюдались, что обеспечит требуемую эффективность создаваемой установки.

Следует подчеркнуть, что важнейшей функцией системы управления эффективностью инноваций СЭУ является периодический мониторинг созданных ранее и уже эксплуатирующихся объектов [10]. Полученные сведения являются важной составляющей

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

частью информационного канала системы управления, базой для систематизации и анализа эффективности, выполненной ранее инновационных решений.

**Выводы.** Представленная система управления обеспечивает выбор инновационного и реализацию решения, направленного на создание эффективной СЭУ, с учетом совокупности определяющих факторов – технических, экологических и социальных. Система предусматривает мониторинг, накопление и анализ показателей функционирования созданной СЭУ, что является основой для проведения дальнейших эффективных инноваций.

Список использованной литературы:

1. *Тихонов Н.Ф., Гартфельдер В.А., Шумихина Е.Г.* Повышение эффективности судовых энергетических установок // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 38. С. 515-519.
2. *Ильин Р.А.* Анализ методов оценки эффективности судовых энергетических установок // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2013. № 1. С. 117-122.
3. *Ле К.Т.* Исследование методов оценки эффективности судовых энергетических установок с целью обеспечения безопасности в эксплуатации // Наука, техника и образование. 2017. № 7(37). С. 28-33.
4. *Скворцова И.В., Федорец О.В.* Оценка эффективности инновационной деятельности на промышленных предприятиях // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 3(121). С. 245-249.
5. Claire Cole. How an integrated approach to project management leads to better bids for shipbuilding projects, december 21, 2021 - URL: <https://blogs.sw.siemens.com/marine/2021/12/21/integrated-project-management-approach-for-better-shipbuilding-projects-bids/> (дата обращения 19.10.2024).
6. *Москаленко Г.Н.* Инновации и методы оценки их эффективности // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2010. № 3-1(16). С. 61-64.
7. *Кархов А.Н.* Экономическая эффективность инноваций в энергетике // Атомная энергия. 2011. Т. 111, № 3. С. 174-177.
8. *Никитин Д.М.* Методы и модели обоснования управленческих решений и способы повышения эффективности управленческих решений // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 57-7. С. 50-54.
9. *Даниловский А.Г.* Разработка моделей и методов обоснования технических решений по судовым энергетическим установкам: специальность 05.08.05 "Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Даниловский Алексей Глебович. – Санкт-Петербург, 2010. 243 с.
10. *Бурков Д.Е.* Применение судовой информационной системы для контроля и мониторинга технического состояния судового оборудования // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2023. Т. 15, № 5. – С. 893-902.
11. *Safonova Yu.A.* Quality of life of patients with f combination of sarcopenia and osteoarthritis of lower extremity // Annals of the Rheumatic Diseases. 2019. Vol. 78, No. S2. P. 515.
12. *Гуменюк Н.О.* Система частных и интегральных показателей, критерий и методы расчета эффективности энергосберегающих технологий // Актуальные вопросы экономических наук. 2012. № 24-2. С. 132-138.
13. *Федоровская Н.К., Федоровский К.Ю.* Оценка эффективности систем охлаждения судовых энергетических установок с учетом экологического фактора // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13, № 4. С. 559-568.

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

14. *Медведев В.В., Хруцкий О.В., Равин А.А.* Краткий обзор и анализ примеров имитационного моделирования судовых энергетических установок и их элементов // *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. № 4-1(42). С. 133-139.
15. *Джаманаква Д.Т., Чернов Р.С., Белая М.Н., Белый В.Н.* Анализ факторов, влияющих на безопасность и качество эксплуатации судовых дизельных энергетических установок // *Заметки ученого*. 2021. № 5-2. С. 86-91.

#### References:

1. Tikhonov N.F., Hartfelder V.A., Shumikhina E.G. Povyshenie effektivnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok [Increasing the efficiency of ship power plants] *Innovacii. Nauka. Obrazovanie* [Innovations. Science. Education], 2021, No. 38, pp. 515-519. (In Russian).
2. Piyin R. A. Analiz metodov ocenki effektivnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok [Analysis of methods for assessing the efficiency of ship power plants] *Vestnik Astraxanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology], 2013, No. 1., pp. 117-122. (In Russian).
3. Le K. T. Issledovanie metodov ocenki effektivnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok s cel'yu obespecheniya bezopasnosti v ekspluatatsii [Study of methods for assessing the efficiency of ship power plants in order to ensure operational safety] *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, Technology and Education], 2017, No. 7 (37), pp. 28-33. (In Russian).
4. Skvortsova I.V., Fedorets O.V. Ocenka effektivnosti innovacionnoj deyatel'nosti na promyshlennykh predpriyatiyakh [Evaluation of the effectiveness of innovation activities at industrial enterprises] *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnical University], 2011, No. 3(121), pp. 245-249. (In Russian).
5. *Claire Cole. How an integrated approach to project management leads to better bids for shipbuilding projects*, December 21, 2021 - URL: <https://blogs.sw.siemens.com/marine/2021/12/21/integrated-project-management-approach-for-better-shipbuilding-projects-bids/> (accessed 10/19/2024).
6. Moskalenko G.N. Innovacii i metody ocenki ix effektivnosti [Innovations and methods for assessing their effectiveness] *Vestnik Altajskoj akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law], 2010, No. 3-1 (16), pp. 61-64. (In Russian).
7. Karkhov A.N. Ekonomicheskaya effektivnost' innovacij v energetike [Economic efficiency of innovations in the energy sector] *Atomnaya energiya* [Atomic energy], 2011, Vol. 111, No. 3, pp. 174-177. (In Russian).
8. Nikitin D.M. Metody i modeli obosnovaniya upravlencheskikh reshenij i sposoby povysheniya effektivnosti upravlencheskikh reshenij [Methods and models for substantiating management decisions and ways to improve the effectiveness of management decisions] *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], 2019, No. 57-7, pp. 50-54. (In Russian).
9. Danilovsky A.G. *Razrabotka modelej i metodov obosnovaniya tekhnicheskikh reshenij po sudovym energeticheskim ustanovkam: special'nost' 05.08.05 "Sudovye energeticheskie ustanovki i ix elementy (glavny'e i vspomogatel'ny'e)": dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk* [Development of models and methods for substantiating technical solutions for ship power plants: specialty 05.08.05 "Ship power plants and their elements (main and auxiliary)": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. St. Petersburg, 2010, 243 p. (In Russian).
10. Burkov D.E. Primenenie sudovoj informacionnoj sistemy dlya kontrolya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya sudovogo oborudovaniya [Application of a ship information system for monitoring and controlling the technical condition of ship equipment] *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*

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

- [Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and River Fleet], 2023, Vol. 15, No. 5, pp. 893-902. (In Russian).
11. Safonova Yu.A. Quality of life of patients with f combination of sarcopenia and osteoarthritis of lower extremity. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 2019, Vol. 78, No. S2, P. 515. (In English).
  12. Gumenyuk N.O. Sistema chastny`x i integral`ny`x pokazatelej, kriterij i metody` rascheta e`ffektivnosti e`nergosberegayushhix texnologij [System of private and integral indicators, criterion and methods for calculating the efficiency of energy-saving technologies] *Aktual`ny`e voprosy` e`konomicheskix nauk* [Actual issues of economic sciences], 2012, No. 24-2, pp. 132-138. (In Russian).
  13. Fedorovskaya N.K., Fedorovsky K.Yu. Ocenka e`ffektivnosti sistem oxlazhdeniya sudovy`x e`nergeticheskix ustanovok s uchetom e`kologicheskogo faktora [Evaluation of the efficiency of cooling systems of ship power plants taking into account the environmental factor] *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* [Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and River Fleet], 2021, Vol. 13, No. 4, pp. 559-568. (In Russian).
  14. Medvedev V.V., Khrutsky O.V., Ravin A.A. Kratkij obzor i analiz primerov imitacionnogo modelirovaniya sudovy`x e`nergeticheskix ustanovok i ix e`lementov [Brief review and analysis of examples of simulation modeling of ship power plants and their elements] *Morskie intellektual`ny`e texnologii* [Marine intellectual technologies], 2018, No. 4-1 (42), pp. 133-139. (In Russian).
  15. Dzhamanakova D.T., Chernov R.S., Belaya M.N., Bely V.N. Kratkij obzor i analiz primerov imitacionnogo modelirovaniya sudovy`x e`nergeticheskix ustanovok i ix e`lementov [Analysis of factors affecting the safety and quality of operation of marine diesel power plants] *Zametki uchenogo* [Notes of a scientist], 2021, No. 5-2, pp. 86-91. (In Russian).

### Сведения об авторах / Information about authors

<b>Федоровский Константин Юрьевич</b>	Доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергоустановки морских судов и сооружений», Севастопольский государственный университет, 299053, Россия, ул. Университетская 33, г. Севастополь. e-mail: fedkonst@rambler.ru
Fedorovskiy Konstantin Yu.	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Power Installations of Marine Vessels and Structures, Sevastopol State University, 299053, Russia, Universitetskaya 33st., Sevastopol. e-mail: fedkonst@rambler.ru
<b>Гриненко Надежда Константиновна</b>	Канд.техн. наук, доцент кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений», Севастопольский государственный университет, 299053, Россия, ул. Университетская 33, г. Севастополь. e-mail: nkgrinenko@mail.ru
Grinenko Nadezhda K.	Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Department of Power Plants of Sea Vessels and Structures, Sevastopol State University, 299053, Russia, st. Universitetskaya 33, Sevastopol. e-mail: nkgrinenko@mail.ru

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

**Тимофеев Вячеслав Алексеевич** старший преподаватель кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений»,  
Севастопольский государственный университет, 2  
99053, Россия, ул. Университетская 33, г. Севастополь.  
e-mail: sevastim@mail.ru

Timofeev Vyacheslav A. Senior Lecturer, Department of Power Plants for Marine Vessels and Structures,  
Sevastopol State University,  
299053, Russia, Universitetskaya St. 33, Sevastopol.  
e-mail: sevastim@mail.ru

Шаратов А.С., Петрук В.А., Денисов А.А., Наумчик А.Р., Друзенко Р. Ю.  
**ВЛИЯНИЕ ПОДАЧИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ КОНЦЕВЫЕ  
ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАСТИ НА ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ  
ГРЕБНОГО ВИНТА**

**Аннотация.** В работе рассмотрен механизм возникновения индуктивного сопротивления гребного винта. Дана схема сил, возникающих на лопасти при индицировании индуктивного сопротивления лопасти. Предложена математическая модель лопасти гребного винта с дополнительным воздействием на перетекание жидкости через концевые кромки лопастей за счет струйной механизации. Выполнена верификация математической модели с помощью прямого численного моделирования в программном комплексе FlowVision. На основании данных расчетного исследования определены закономерности, характеризующие физический эффект от струйной подачи дополнительной воды через концевую кромку лопасти гребного винта. Разработаны рекомендации по подбору параметров вылива жидкости в зависимости от величины угла набегающего потока и требуемого обратного качества профиля. На основании полученных результатов определены дальнейшие направления исследований.

**Ключевые слова.** гребной винт, лопасть, индуктивное сопротивление, профиль, струйная механизация, гидродинамические характеристики гребного винта, сопловой аппарат.

Sharatov A.S., Petruk V.A., Denisov A.A., Naumchik A.R., Druzenko R. Yu.

**THE EFFECT OF ADDITIONAL WATER SUPPLY THROUGH THE END SURFACES  
OF THE BLADE ON THE INDUCTIVE RESISTANCE OF THE PROPELLER**

**Abstract.** The paper considers the mechanism of the inductive resistance of the propeller. A diagram of the forces arising on the blade when indicating the inductive resistance of the blade is given. A mathematical model of a propeller blade with an additional effect on the flow of liquid through the end edges of the blades due to jet mechanization is proposed. The mathematical model was verified using direct numerical modeling in the FlowVision software package. Based on the data of the computational study, the patterns characterizing the physical effect of the jet supply of additional water through the end edge of the propeller blade were determined. Recommendations have been developed for the selection of liquid discharge parameters depending on the magnitude of the incoming flow angle and the required reverse profile quality. Based on the results obtained, further research directions have been determined.

**Keywords.** propeller, blade, inductive resistance, profile, jet mechanization, hydrodynamic characteristics of the propeller, nozzle apparatus.

**Введение.** В рамках стратегии развития внутреннего водного транспорта [1] существует необходимость обеспечения рентабельности работы энергетической установки судна, что формирует запрос практики, направленный на сохранение режима работы двигателя в изменяющихся условиях эксплуатации в области максимально возможных гидродинамических показателей.

В качестве показателей, характеризующих гидродинамическое совершенство лопасти гребного винта при изменении потерь [2], сопровождающих работу лопастного двигателя, применяются коэффициенты подъемной силы и профильного сопротивления лопасти.

На рисунке 1 показан процесс формирования завихренности потока воды под влиянием перемещения лопастей вращающегося гребного винта. Образованная на поверхности лопастей завихренность сбегает в поток и формирует систему вихревой пелены. При перераспределении скоростей потока, на концах лопасти возникает перетекание жидкости с нагнетающей части лопасти винта на подсасывающую через торцевую поверхность.



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

Перетекание вызывает образование вихря, что способствует повышению индуктивного сопротивления. Способы снижения индуктивного сопротивления, и, следовательно, повышения эффективности винта могут быть получены на основании анализа вихреобразования потока (рис. 1) и различны по своей природе [3 - 6].

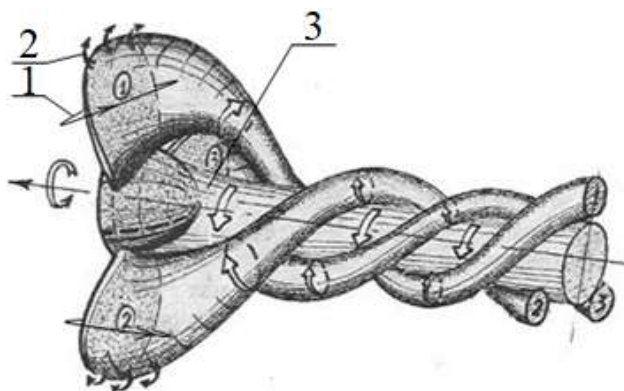


Рисунок 1 — Элементы завихренности потока, сопровождающие работу гребного винта в жидкости: 1 – несущий вихрь (циркуляция вокруг лопасти), 2 – свободный или концевой вихрь, 3 – вихревой жгут

Одним из предлагаемых в научных публикациях способов является использование струйной механизации лопастей гребного винта [7].

Струйная механизация лопасти гребного винта заключается в струйной подаче дополнительной воды через профилированные сопловые насадки, установленные в наиболее значимых районах поверхности лопасти [8]. Выполняя вылив (выдув) струй жидкости (газа) на концах лопасти винта относительно нагнетающей и всасывающей поверхности можно уменьшить перетекание жидкости, а, следовательно, уменьшить индуктивное сопротивление.

**Целью исследования** является оценка изменения индуктивного сопротивления профиля лопасти гребного винта под влиянием дополнительного струйного потока воды, подаваемого через торцевую поверхность вдоль хорды профиля.

На основании полученных результатов численного моделирования и расчетного исследования определена величина подъемной силы и профильного сопротивления, перераспределение которых характеризует изменение индуктивного сопротивления.

**Материалы и методы исследования.** Одним из способов борьбы с индуктивным сопротивлением является установка на концах лопастей специальных шайб, установленных по нормали к поверхности лопасти [6]. Однако установка таких шайб на лопасти винта практически невозможна, из-за конструктивных особенностей гребного винта. Применение гребных винтов типа Kappel Design ограничено крупнотоннажным судостроением [4]. Предлагается в качестве замещающего устройства, играющего роль шайб использовать струю воды выливаемую из торцевой поверхности лопасти винта. На рисунке 2 показаны зоны струйной механизации гребного винта в абсолютной системе координат.

Гидродинамическая теория винта Н.Е. Жуковского позволяет рассчитать силу, действующую на лопасть винта по функциональной зависимости:

$$P = 0,5\rho FV^2 \cos \alpha (C_y + C_x \operatorname{tg} \alpha), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность;

$F$  – площадь поверхности;

$V$  – скорость потока;

$\alpha$  – угол атаки лопасти винта;

$C_y$  – безразмерный коэффициент подъемной силы;

$C_x$  – безразмерный коэффициент профильного сопротивления.

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

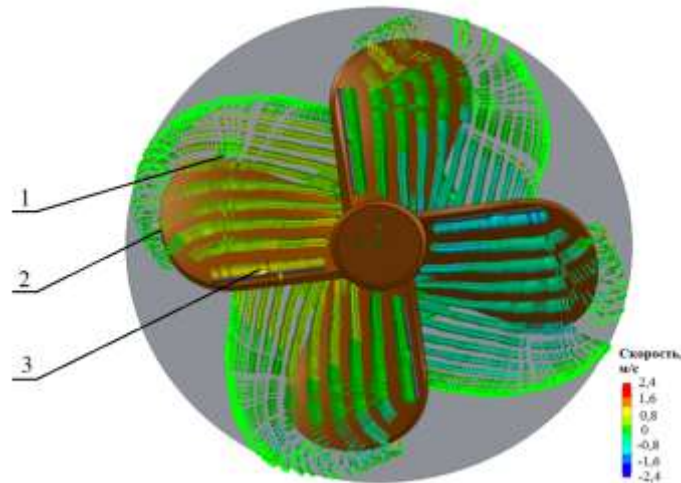


Рисунок 2 – Струйная механизация гребного винта фиксированного шага: 1,2 – подача дополнительной воды через концевые кромки лопасти; 3 – подача воды на входную кромку засасывающей поверхности

Вихревые жгуты лопастей (рис. 1) при несимметричном расположении вращаются в разные стороны и создают боковой направленный поток, сообщая потоку жидкости, обтекающему лопасть, дополнительную скорость, направленную в сторону всасывающей кромки, тем самым увеличивая профильное сопротивление:

$$C_x = C_{x_0} + C_{x_{ind}}, \quad (2)$$

где  $C_{x_0}$  – сопротивление лопасти при нулевом угле атаки,  $\alpha=0$ ;

$C_{x_{ind}}$  – индуктивное сопротивление, зависящее от перетекания потока с нижней нагнетающей на верхнюю всасывающую поверхность лопасти винта в концевой ее части. Стремление увеличить подъемную силы лопасти винта приводит к росту индуктивного сопротивления.

### 1. Расчетная схема профиля лопасти со струей, выливаемой из торцевой кромки лопасти винта

На рисунке 3 показан слабоизогнутый профиль со струей, вытекающей из задней кромки. Ось абсцисс направим лена параллельно вектору скорости набегающего потока. Начало координат выберем в середине хорды профиля. Профиль и реактивную струю в вихревой теории рассматривают как линию непрерывно распределенных вихрей, интенсивность которых, отнесенная к единице длины, выбирается так, чтобы лопасть было линией тока.

Основываясь на гидродинамической теории гребного винта с учетом влияния индуктивного сопротивления (1-2) выполнена серия расчетов при изменении скорости набегающего потока и параметров жидкости, выливаемой с концевой кромки лопастей. Для расчета скоростей, вызванных движением лопастей гребного винта, использован программный продукт [9].

### 2 Расчет гидродинамических характеристик профиля лопасти гребного винта с дополнительной струйной подачей воды с торцевой кромки в FlowVision

Прямой численное моделирование реализовано путем решения уравнений гидродинамики методом конечных объемов. Модель элемента лопасти гребного винта моделируется в комплексе твердотелого моделирования и импортируется в расчетный комплекс.

На рисунке 4 показаны результаты расчета поля скоростей лопасти при граничных условиях численного моделирования: скорость набегающего потока  $V_\infty=0,1$  м/с; турбулентность потока 0,03; скорость подачи жидкости  $V_i = 0$  м/с ÷ 0,3 м/с.

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

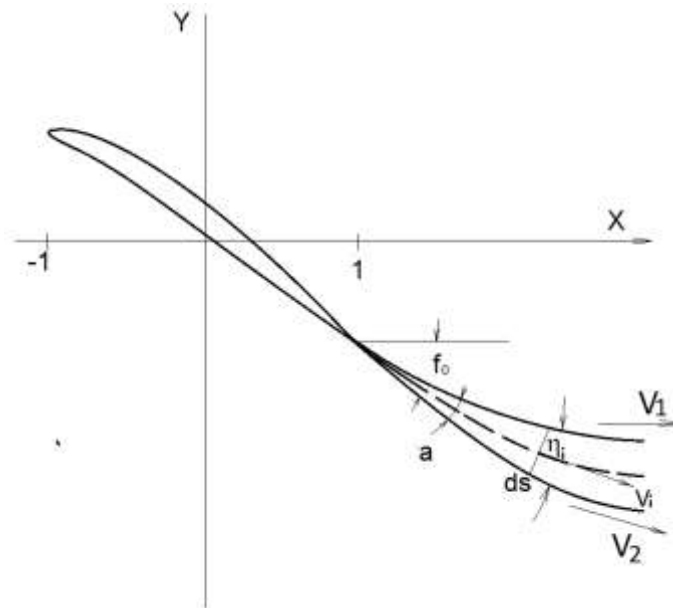


Рисунок 3 – Схема сил на струе:  $\eta_i$  – угол, образованный касательной к средней линии струи с осью абсцисс;  $V_1, V_2$  – проекции скорости возмущенного течения;  $V_i$  – скорость частиц в струе;  $ds$  – площадь струи;  $\alpha$  – угол раскрытия струи;  $f_0$  – угол подачи струи

Согласно расчетной схеме, построенной на основании математической модели, в согласовании с принятой схемой сил (рис. 3) задаются эксплуатационные условия: скорость и турбулентность набегающего потока, направление подачи дополнительной среды и ее скорость, тип подаваемой среды.

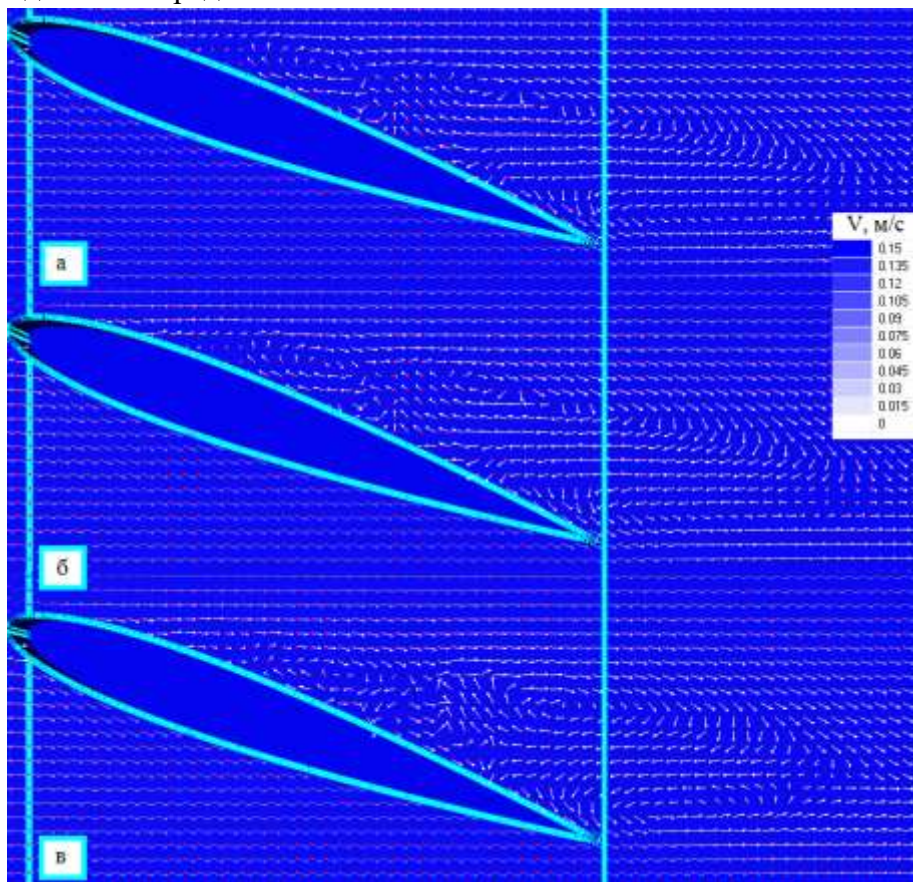


Рисунок 4 – Векторное поле жидкости, обтекающий профиль лопасти с дополнительной струйной подачей воды через торцевую кромку при  $f_0 = \alpha = 20^\circ$ :  
 а –  $V_i/V_\infty = 1$ ; б –  $V_i/V_\infty = 2$ ; в –  $V_i/V_\infty = 3$

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

В соответствии с рекомендациями к численному моделированию элемента лопасти винта [9 - 11] задаются граничные условия для исследуемого объекта области: симметричность, условия непротекания жидкости и свободный вылив потока для плоскости параллельной входу. Численное моделирование выполняется для различной точности расчетной сетки, что позволяет оценить достоверность полученных результатов.

Полученные путем численного моделирования результаты (рис. 4) показали, что применение реактивной струи, выдуваемой с кромки лопасти, позволяет уменьшить перетекание жидкости с нагнетающей поверхности на подсосывающую, а, следовательно, и снизить индуктивное сопротивление.

Результаты расчетного исследования профиля NACA-0012 при подаче жидкости с задней кромки профиля, обобщенные по углу набегающего потока, представлены на рисунке 5.

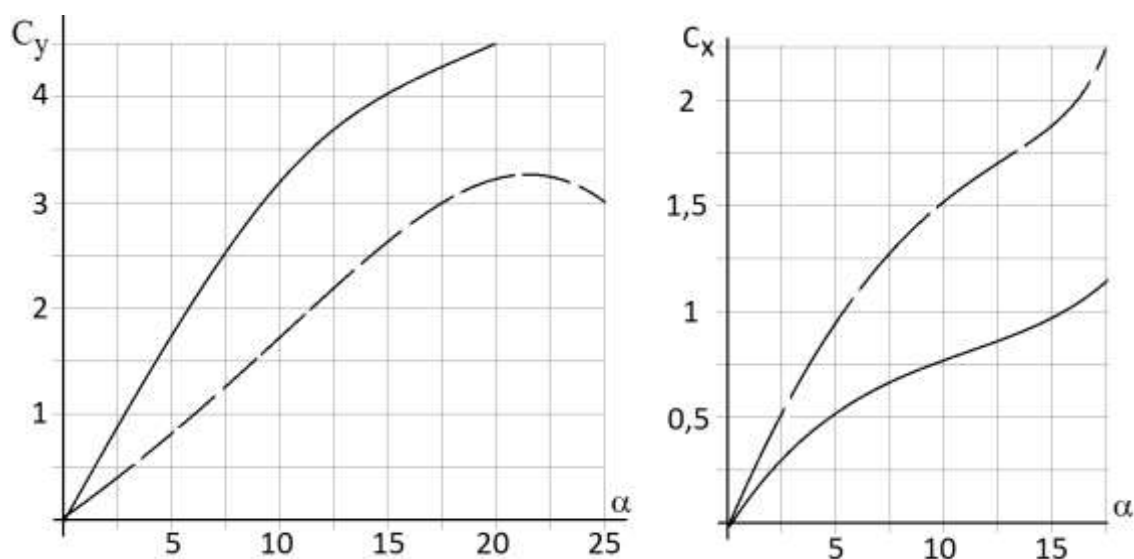


Рисунок 5 – Подъемная сила профиля ( $C_y$ ) и профильное сопротивление ( $C_x$ ) лопасти со струйной подачей дополнительной жидкости параллельно хорде профиля с задней кромки, соотношение скоростей  $V_i/V_\infty=3$ ,  $f_0=\alpha$ :

———— сопловой аппарат включен, — — — сопловой аппарат выключен

Согласно представленным на рис. 5 результатам наблюдается устойчивое снижение индуктивного сопротивления профиля лопасти гребного винта, вызывающего рост профильного сопротивления  $C_x$ .

**Выводы.** На основании принятой расчетной схемы выполнено расчетное исследование профиля лопасти гребного винта с дополнительным струйным воздействием на поток при различных углах набегающего потока.

Результаты численного моделирования позволили установить следующие закономерности:

– струйная подача воды с торцевой кромки лопасти позволяет управлять жидкостью, обтекающей профиль лопасти (см. рис 4);

– управление режимом перетекания жидкости с нагнетательной кромки на всасывающую позволяет изменять интенсивность вихреобразования на входной и выходной кромках профиля лопасти (см. рис 4);

– установлены параметры (вектор скорости жидкости и его скалярная величина  $V_i$ , угол подачи струи  $f_0$ ), которые характеризуют влияние дополнительно подаваемой воды на величину подъемной силы и профильное сопротивление (см. рис.5);

– устойчивое формирование отрыва потока на засасывающей поверхности лопасти при значительных углах атаки ( $\alpha = 20^\circ \div 45^\circ$ ) требует применения струйной механизации засасывающей поверхности [7].

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

– при малых углах атаки (до  $15^\circ$ ) следует учитывать, что избыточная скорость вылива ( $V_i/V_\infty > 5$ ) приводит к дополнительному вихреобразованию, что в свою очередь приводит к повышению профильного сопротивления.

Полученные результаты подтверждают, что за счет вылив струи жидкости с торцевой кромки лопасти с относительной скоростью  $V_i/V_\infty = 3$ , достигается уменьшение коэффициент индуктивности силы  $C_{x\ ind}$  на 20-30%. Полученные в результате численного моделирования данные согласуются с исследованиями подачи дополнительной воды с выходной кромки лопасти перпендикулярно набегающему потоку [12].

### Список использованной литературы:

1. Об утверждении Стратегии развития внутреннего водного транспорта до 2030 года. URL: <http://government.ru/docs/22004/> (дата обращения: 10.03.2020).
2. Кацман Ф. М., Дорогостайский Д.В. Теория судна и движители. Л.: Судостроение, 1979. 280с.
3. Шаратов А.С. Сравнительный анализ способов совершенствования энергоэффективности гребных винтов фиксированного шага // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2019. Т. 3. С. 260-267.
4. Basic Principles of Ship Propulsion. URL: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship/> (дата обращения: 10.09.2020).
5. Лукашевский В.А., Банникова Т.И., Банников Ю.М., Цейтлин М.Ю. Исследование гидродинамических характеристик глиссирующих поверхностей с интерцепторами на задней кромке // Труды ЦАГИ. 1978. Вып. 1906.
6. Мавлюдов М.А., Садовников Ю.М., Титов М.А. Интерцепторы – средства управления гидродинамическими параметрами быстроходного судна // Катера и яхты. 2000. № 1 Вестник Керченского государственного морского технологического университета Технические науки 49 (170). С. 48-50.
7. Шаратов А.С. Проверка гипотезы дополнительного струйного воздействия воды, подаваемой через щелевую насадку на лопасти гребного винта // Эксплуатация морского транспорта. 2019. № 1. С. 67-76.
8. Шаратов, А. С. Режимы работы судового гидромеханического комплекса при струйной подаче дополнительной воды на поворотную направляющую насадку и лопасти винта фиксированного шага // Эксплуатация морского транспорта, 2023. № 2(107). С. 223-232.
9. Король Ю. М., Бражко А. С. Моделирование работы гребного винта в насадке в косом набегающем потоке // Збірник наукових праць НУК, 2013. №1. С. 30-36.
10. Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Калашиников С.В., Митин А.Л. К вопросу применения модели турбулентности k-ε FlowVision для исследования обтекания профиля крыла при малых числах Рейнольдса // Инженерные системы: труды Международного форума. 2017. С. 82-89.
11. Аракелян С.М. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. 99 с.
12. Клименко Н. П., Шаратов А. С., Охлопин В. А. Анализ влияния струйного интерцептора лопасти на поток воды, взаимодействующий с гребным винтом // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2020. – № 4. – С. 42-50. – DOI 10.47404/2619-0605\_2020\_4\_42.

### References:

1. *Ob utverzhdenii Strategii razvitiya vnutrennego vodnogo transporta do 2030 goda* [Approval of Inland Water Transport Strategy 2030]. Available at: <http://government.ru/docs/22004/> (accessed 10.03.2020). (In Russian).
2. Katsman F.M., Dorogostaysky D.V. *Teoriya sudna i dvizhiteli* [Ship theory and propellers].

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

- Leningrad, Sudostroenie Publ., 1979, 280 p. (In Russian).
3. Sharatov A.S. *Sravnitel'nyj analiz sposobov sovershenstvovaniya energoeffektivnosti grebnyh vintov fiksirovannogo shaga* [Comparative analysis of ways to improve the energy efficiency of fixed-pitch propellers]. *Sbornik nauchnyh statej nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Collection of scientific articles of the national scientific and practical conference of the faculty of FSBOU VO "GUMRF named after Admiral S.O. Makarov"]. St. Petersburg, GUMRF named after S. O. Makarov Publ., 2019, vol. 3, pp. 260-267. (In Russian).
  4. *Basic Principles of Ship Propulsion*. (In English). Available at: <https://marine.manes.com/propeller-aft-ship/> (accessed 10.09.2020).
  5. Lukashevsky V.A., Bannikova T.I., Bannikov Yu.M., Zeitlin M.Yu. *Issledovanie gidrodinamicheskikh harakteristik glissiruyushchih poverhnostej s inter-septorami na zadnej kromke* [Study of hydrodynamic characteristics of gliding surfaces with interceptors on the trailing edge]. *Trudy TsAGI [TsAGI Works]*, 1978, vol. 1906. (In Russian).
  6. Mavludov M., Sadovnikov Y., Titov V. *Interceptory – sredstva upravleniya gidrodinamicheskimi parametrami bystrohodno-go sudna* [The Interceptors as the Mean of Controlling the Hydrodynamic Parameters of a High-Speed Vessel]. *Katera i yahty [Power&Sail boat]*, 2000, vol. 170, pp. 48-50. (In Russian).
  7. Sharatov A.S. *Proverka gipotezy dopolnitel'nogo strujnogo vozdejstviya vody, podavaemoj cherez shchelevuyu nasadku na lopasti grebnogo vinta* [Verification of the hypothesis of jet the impact of additional water supplied to the blades of the propeller]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta* [Operation of sea transport], 2019, no. 1, pp. 67-76. (In Russian).
  8. Sharatov A. S. *Rezhimy raboty sudovogo gidromekhanicheskogo kompleksa pri strujnoj podache dopolnitel'noj vody na povorotnuyu napravlyayushchuyu nasadku i lopasti vinta fiksirovannogo shaga* [The operation modes of the ship's hydro-mechanical systems with the jet supply of additional water to the duct fixed-pitch propeller for the screw blades and the steering nozzle] *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. [Operation of marine transport]. 2023. No. 2(107). pp. 223-232. (In Russian)
  9. Korol YU. M. Brazhko A. S. *Modelirovanie raboty grebnogo vinta v nasadke v kosom nabegayushchem potoke* [Simulation of the operation of the propeller in the nozzle in an oblique incoming flow] *Zbirnik naukovih prac NUK*. [Collection of scientific papers NUK]. 2013. №1. pp. 30-36. (In Russian)
  10. Aksenov A.A., Zhluktoy S.V., Kalashnikov S.V., Mitin A.L. *K voprosu primeneniya modeli turbulentnosti k-ε FlowVision dlya issledovaniya obtekaniya profilya kryla pri malyh chislakh Rejnol'dsa* [To the issue of applying the k-a FlowVision turbulence model to study the streamlining of the wing profile at small Reynolds numbers]. *Trudy Mezhdunarodnogo foruma «Inzhenernye sistemy»* [Proceedings of the International Forum "Engineering systems"], 2017, pp. 82-89. (In Russian).
  11. Arakelyan S.M. *Metody vychislitel'noj gidrodinamiki v raschetah dvizheniya zhidkosti v sistemah so slozhnoj topologiej* [Methods of computational hydrodynamics in the calculation of fluid motion in systems with complex topology]. Vladimir, VISU Publ., 2015, 99 p. (In Russian).
  12. Klimenko N.P., SHaratov A.S., Ohlonin V.A. *Analiz vliyaniya strujnogo interceptora lopasti na potok vody, vzaimodejstvuyushchij s grebnym vintom* [Analysis of impact of blade jet interceptor on water current interacting with propeller] *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*. [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University]. 2020. № 4. pp. 42-50. DOI 10.47404/2619-0605\_2020\_4\_42. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

**Шаратов  
Алексей**

канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок,

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

<b>Сергеевич</b>	Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 relicts@yandex.ru
Sharatov Aleksi Sergeevich	Ph.D. (Eng.), Associate Professor at the Department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 relicts@yandex.ru
<b>Петрук Виктор Артурович</b>	аспирант кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 iietryk@gmail.com
Petruk Victor Arturovich	Post-graduate at the Department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 iietryk@gmail.com
<b>Денисов Артем Александрович</b>	аспирант кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 seykgmtu@gmail.com
Denisov Artem Alexandrovich	Post-graduate at the Department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 seykgmtu@gmail.com
<b>Наумчик Алексей Романович</b>	аспирант кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 seykgmtu@gmail.com
Naumchik Alexey Romanovich	Post-graduate at the Department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 seykgmtu@gmail.com
<b>Друзенко Руслан Юрьевич</b>	аспирант кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 seykgmtu@gmail.com
Druzenko Ruslan Yurievich	Post-graduate at the Department of ship power plants Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 seykgmtu@gmail.com

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 621.43.018.7:536.8

Титов И.Л., Скляр А.В.

### ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ РАДИОНАВИГАЦИИ НА СУДАХ ПРОМЫСЛОВОГО ФЛОТА

**Аннотация.** В данной работе рассматривается развитие радионавигационных технологий на судах промыслового флота, начиная с первых радиопеленгаторов и радиомаяков, вплоть до современных спутниковых систем GPS. Также анализируется вклад систем Loran-C и Деcca в обеспечение безопасности и эффективности морской навигации. Подчеркивается большая значимость перехода к цифровым технологиям и спутниковой навигации, включая GPS, что позволило достичь высокой точности, а также к автоматизации навигационных процессов. Обсуждаются немалые перспективы интеграции с искусственным интеллектом и развитие резервных технологий, таких как eLoran. Радионавигация сыграла свою ключевую роль в морской отрасли, предоставляя надежные решения для работы в сложных морских условиях. Проведенное исследование подчеркивает важность дальнейшего совершенствования систем для повышения устойчивости и безопасности мореплавания.

**Ключевые слова:** радионавигация, спутниковая навигация, морской транспорт, технологии, судовождение, автоматизация.

Titov I.L., Skliar A.V.

### HISTORICAL DEVELOPMENT OF RADIO NAVIGATION ON FISHING VESSELS

**Annotation.** This paper examines the development of radio navigation technologies on ships of the fishing fleet, starting with the first direction finders and radio beacons up to modern GPS satellite systems. The contribution of the Loran-C and Decca systems to ensuring the safety and efficiency of maritime navigation is also analyzed. The great importance of the transition to digital technologies and satellite navigation, including GPS, is emphasized, which has made it possible to achieve high accuracy, as well as to automate navigation processes. Considerable prospects for integration with artificial intelligence and the development of backup technologies such as eLoran are also being discussed. Radionavigation has played a key role in the maritime industry, providing reliable solutions for operation in difficult marine conditions. The study highlights the importance of further improving systems to enhance the sustainability and safety of navigation.

**Key words:** radio navigation, satellite navigation, maritime transport, technologies, ship navigation, automation.

**Введение.** Радионавигация сыграла ключевую роль в обеспечении безопасности мореплавания, особенно для промыслового флота, деятельность которого сопряжена с работой в отдаленных районах, зачастую при неблагоприятных погодных условиях. С момента появления первых радиотехнологий в конце XIX века и до современных спутниковых систем, навигационные технологии претерпели значительные изменения, существенно повлияв на эффективность и безопасность морского промысла.

**Целью работы** является обзор развития радионавигационных технологий на судах промыслового флота, начиная с первых радиопеленгаторов и радиомаяков до современных



### 2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

спутниковых систем GPS, анализ вклада систем Loran-C и Деcca в обеспечение безопасности и эффективности морской навигации.

**Материалы и методы.** Начало применения радиотехнологий в морской навигации связано с изобретением радиосвязи. В 1895 году Гульельмо Маркони впервые продемонстрировал возможность передачи радиосигналов на большие расстояния. В России же изобретателем радио стал Александр Попов. Оба учёных трудились в разных странах в одно и то же время, независимо друг от друга. Попов представил аппаратуру 7 мая 1895 года, а Маркони подал заявку на изобретение 2 июня 1896 года. А ещё через год американский учёный получил патент на изобретение. Первоначально радиосвязь использовалась исключительно для передачи сообщений, однако со временем ее функции расширились. Одним из первых достижений в этой области стало использование радиопеленгации, которая позволяла судам определять направление на радиопередающие станции (также известная как радиоопределение направления RDF). Эта технология начала применяться на промысловом флоте в 1920-х годах. Радиопеленгация на судах использовалась для определения местоположения судов. Для этого применялись пеленгаторы двух типов:

1) береговые – позволяли обнаруживать суда с берега путём пеленгации корабельных радиопередатчиков. Таким пеленгаторам, как правило, требовалось 2 – 3 засечки, в зависимости от количества пеленгующих станций, для точного определения координат корабля и выхода с ним на связь.

2) корабельные – для определения пеленга корабль со своей радиостанции отправлял запрос и излучал радиосигнал, пока пеленг не будет определён. Позволяли устанавливать свое местонахождение и связываться в нужный момент с портовыми службами [2].

Существовало множество различных систем как береговых, так и корабельных пеленгаторов. В первой половине 1920-х годов в США на Тихоокеанском побережье было 20 радиопеленгаторных станций и 24 на Атлантическом побережье.

Важным этапом в развитии радионавигации стало создание береговых радиомаяков, которые начали активно использоваться в 1930-х годах. Радиомаяки обеспечивали передачу сигналов на фиксированных частотах, позволяя судам определять свое местоположение с помощью радиопеленгаторов. Для промыслового флота это означало возможность эффективного перемещения между портами и промысловыми районами, особенно в условиях ограниченной видимости или при навигации в сложных районах. Радиомаяки стали основой для создания более сложных систем радионавигации [3].

Резкий скачок в развитии радионавигации произошел во время Второй мировой войны, когда в ответ на военные потребности были разработаны более точные и дальнедействующие системы. Одной из таких систем стала LORAN (Long Range Navigation), позднее модифицированная в Loran-C (рис. 1). Long Range Navigation – гиперболическая радионавигационная система, разработанная в Соединённых Штатах. Она позволяла приёмнику определять своё местоположение путём пеленгации низкочастотных радиосигналов, передаваемых стационарными наземными радиомаяками. Сначала LORAN использовался для конвоирования судов, пересекающих Атлантический океан, а затем патрульными самолётами дальнего действия. Основное применение нашёл на кораблях и самолётах, действовавших на Тихоокеанском театре военных действий во время Второй мировой войны. К концу войны насчитывалось 72 станции LORAN с более чем 75 000 используемыми приёмниками. После войны Loran перешел к гражданским судам, включая промысловый флот. Его использование позволило судам определять свое местоположение на больших расстояниях от берега, что было особенно важно для рыболовных операций в открытых водах.

## 2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография



Рисунок 1 – Приёмник системы Loran-C

Одновременно с Loran-C была разработана система Десса, базировавшаяся на измерении фазовых различий сигналов от трех или четырех наземных станций. Во время Второй мировой войны Королевский военно-морской флот впервые применил радионавигационную систему Десса. Она позволяла кораблям и самолётам определять своё местоположение с помощью радиосигналов от специальной системы статических радиопередатчиков. Система была изобретена и разработана компанией Десса в Великобритании (рис.2). Во время войны её использовали для разминирования минных полей, чтобы обеспечить высадку десанта в день «Д» – день высадки союзников в Нормандии в 1944 году [4].



Рисунок 2 – Приёмник Десса Mk.51

На пике своего развития насчитывалось около 180 передающих станций, использующих «цепочки» из трёх или четырёх передатчиков в каждой, что позволяло фиксировать местоположение путём построения пересекающихся электронных линий. Десса обеспечивала высокую точность навигации, особенно в прибрежных зонах, что делало ее популярной среди рыбаков, работающих в районах с интенсивным судоходством. Однако обе эти системы имели ограничения: Десса была эффективна лишь на ограниченных расстояниях от станций, а Loran-C зависел от равномерного распределения передатчиков, что не всегда было возможно.

В 1960–1970-х годах началась цифровизация навигационных технологий. Появление первых электронных навигационных систем позволило обрабатывать радионавигационные сигналы с большей точностью, а также сокращать время, затрачиваемое на поиск промысловых зон.

### 2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

Следующим этапом в развитии радионавигации стало появление спутниковых систем. Первый значительный шаг в этом направлении был сделан в 1960-х годах с запуском спутниковой системы Transit (также известная как NAVSAT Navy Navigation Satellite System). Transit обеспечивал относительно высокую точность определения местоположения, однако для получения координат требовалось значительное время, что ограничивало оперативность. Для промыслового флота это был важный шаг вперед, хотя функциональность системы оставалась далекой от современных стандартов. Система Transit имела следующие недостатки:

- 1) низкое быстродействие;
- 2) потребность в длительном наблюдении спутников;
- 3) возможность позиционировать только стационарные или медленно движущиеся объекты;
- 4) определение только двухмерных координат.

Революцию в морской навигации произвело появление системы GPS (Global Positioning System) в 1980-х годах. Эта спутниковая система предоставляла пользователям возможность определения местоположения с высокой точностью в реальном времени. На промысловом флоте GPS стал незаменимым инструментом, особенно при работе в условиях открытого моря, где точность позиционирования имеет решающее значение для успеха промысловых операций. В сочетании с электронными картами и системами управления судами GPS позволил автоматизировать значительную часть навигационных процессов, включая планирование маршрутов и мониторинг окружающей обстановки. Конструкция GPS частично основана на аналогичных наземных радионавигационных системах, таких как LORAN и навигационная система Десса, разработанных в начале 1940-х годов. Изначально глобальная система позиционирования создавалась исключительно для военных целей. Однако после трагического инцидента в 1983 году, когда самолет корейских авиалиний с 269 пассажирами был сбит в воздушном пространстве Советского Союза, президент США Рональд Рейган принял решение разрешить ее ограниченное использование в гражданских целях. При этом точность системы намеренно снижалась с помощью специального алгоритма.

В GPS используется Всемирная геодезическая система 1984 года (WGS-84). Обновление WGS 84 до системы координат G2296, выпущенной 7 января 2024 года, внесло изменения, направленные на повышение точности и согласованности с международными стандартами.

Таблица 1 – Параметры WGS 84 на 2024 год

Параметр	Значение
Большая полуось $a$ , м	6 378 137.0
Параметр сжатия $f$	1/298.257223563
Угловая скорость вращения Земли $\omega$ , рад/с	$7.292115 \times 10^{-5}$
Гравитационная постоянная Земли $GM$ , м <sup>3</sup> /с <sup>2</sup>	$3.986004418 \times 10^{14}$

Основные изменения включают выравнивание с новой реализацией Международной Территориальной Референсной Системы (ITRF2020) и использованием данных IGS20 от Международной GNSS-службы (IGS). Это обеспечило улучшение позиционирования, особенно для высокоточных приложений, таких как геодезия и спутниковая навигация.

Интеграция с GPS III предоставляет улучшенные сигналы, устойчивые к помехам, что особенно актуально в районах с высоким уровнем радиозлектроновых интерференций.

В последние десятилетия радионавигационные технологии интегрировались с другими системами. Современные суда промыслового флота оснащены автоматическими идентификационными системами (AIS), электронными картами (ENC) и метеорологическими сервисами, что позволяет им принимать решения на основе комплексного анализа данных. AIS служит для передачи идентификационных данных судна, информации о его состоянии, текущем местоположении и курсе. ECDIS (электронно-картографическая навигационно-информационная система) собирает и использует сообщения AIS, данные с радаров, GPS и

### 2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

прочих судовых датчиков и сопоставляет их со вшитыми картами. Система используется для навигации, автоматизации некоторых задач судоводителя и повышения навигационной безопасности мореплавания. Для повышения точности используются технологии дифференциального GPS (DGPS). DGPS берёт информацию от спутников и добавляет дополнительную точность от наземных опорных станций. В результате можно получить точность от 10 метров до нескольких сантиметров. Такие системы находят применение в промышленных операциях, требующих точного позиционирования, например, при установке сетей или работе с донным промыслом.

Несмотря на доминирование спутниковых технологий, радионавигационные системы, такие как Logan-C, продолжают использоваться в качестве резервных решений. Например, в Великобритании и Ирландии активно применяют модернизированную версию системы Logan-C – eLogan. Её используют как вспомогательную совместно с глобальными спутниковыми системами навигации. eLogan обеспечивает резервный метод позиционирования на случай отказа или потери точности позиционирования. Также в США Национальный закон о временной устойчивости и безопасности от 2017 года предлагал восстановить Logan в качестве резервной копии на случай сбоя GPS. Их устойчивость к помехам и возможность работы при отказе спутниковой связи делают их важным элементом навигационного оборудования. Кроме того, развитие технологий ИИ открывает новые возможности для радионавигации. В будущем возможно создание систем, которые будут автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям, интегрируя данные с метеорологических спутников, биологических исследований и океанографических наблюдений.

**Выводы.** Таким образом, развитие радионавигации на судах промышленного флота представляет собой путь от простейших методов радиопеленгации до современных спутниковых систем, которые обеспечивают непревзойденную точность и надежность. Технологии, такие как Logan-C и Десса, сыграли важную роль на определенных этапах этого развития, подготовив почву для появления глобальных систем навигации. Сегодня радионавигация продолжает развиваться, предлагая новые решения для повышения эффективности и устойчивости морской деятельности.

#### Список использованной литературы:

1. *Исхаков И. Р., Пушкарев В. А., Колбая К. Ч.* Системы определения координат и местоположения // Перспективные научные исследования как двигатель современной науки. 2023. С. 47-49.
2. *Красноженова Е. Е., Виноградов С. В., Ещенко Ю. Г.* Роль радиопеленгации в развитии арктического мореплавания в 1920-е гг // Ученые записки Новгородского государственного университета. 2021. №. 5 (38). С. 510-515.
3. *Куприянов А. О.* Глобальные навигационные спутниковые системы // Москва: МИИГАиК. 2017.
4. *Резников В. Ю.* Использование спутниковой навигации при мониторинге промысловых судов // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2002. №. 1. С. 19-25.
5. *Филатова А. О.* История внедрения ГНСС-инноваций в геодезию // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее. 2017. С. 241-244.
6. *Шеметов, А.* Гидрографической службе России - 185 лет // Морской сборник. 2012. № 11(1988). С. 35-42.
7. *Резников В. Ю.* Использование спутниковой навигации при мониторинге промысловых судов // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2002. №. 1. С. 19-25.
8. *Песков Ю. А.* Эволюция систем и методов морской радионавигации и связи для мониторинга движения судов // Вестник государственного морского университета имени адмирала ФФ Ушакова. 2014. №. 2. С. 42-44.

### 2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

9. Карцан И. Н. Качественные параметры радионавигационных систем // Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах. 2022. С. 258-266.
10. Дараган П. А. Навигация на морских судах: видовая классификация // ББК: 9.122 (КР) Я43 М. 2016. С. 17.

#### References:

1. Iskhakov I. R., Pushkarev V. A., Kolbaya K. Ch. Sistemy` opredeleniya koordinat i mestopolozheniya [Systems of coordinate and location determination] *Perspektivny`e nauchny`e issledovaniya kak dvigatel` sovremennoj nauki* [Prospective scientific research as the engine of modern science], 2023, pp. 47-49. (In Russian).
2. Krasnozhenova E. E., Vinogradov S. V. V., Yeschenko Y. G. Rol` radiopelengacii v razvitii arkticheskogo moreplavaniya v 1920-e gg [The role of radio direction finding in the development of Arctic navigation in the 1920s] *Ucheny`e zapiski Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific Notes of Novgorod State University], 2021, №. 5 (38), pp. 510-515. (In Russian).
3. Kupriyanov A. O. [Global navigation satellite systems]. Moscow, MIIGAiK, 2017. (In Russian).
4. Reznikov V. Yu. Ispol`zovanie sputnikovoj navigacii pri monitoringe promy`slovy`x sudov [Use of satellite navigation in monitoring of fishing vessels] *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta* [Vestnik Kamchatka State Technical University], 2002, №. 1, pp. 19-25. (In Russian).
5. Filatova A. O. Istoriya vnedreniya GNSS-innovacij v geodeziyu [History of GNSS innovations implementation in geodesy] *Nauka i obrazovanie: soxranayaya proshloe, sozdayom budushhee* [Science and Education: preserving the past, creating the future], 2017, pp. 241-244. (In Russian).
6. Shemetov, A. Gidrograficheskoy sluzhbe Rossii - 185 let [Hydrographic service of Russia - 185 years] *Morskoy sbornik* [Marine collection], 2012, № 11(1988), pp. 35-42. (In Russian).
7. Reznikov V. Yu. Ispol`zovanie sputnikovoj navigacii pri monitoringe promy`slovy`x sudov [Use of satellite navigation in monitoring of fishing vessels] *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta* [Vestnik Kamchatka State Technical University], 2002, №. 1, pp. 19-25. (In Russian).
8. Peskov Yu. A. E`volyuciya sistem i metodov morskoy radionavigacii i svyazi dlya monitoringa dvizheniya sudov [Evolution of systems and methods of marine radio navigation and communication for ship traffic monitoring] *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala FF Ushakova* [Vestnik of Admiral FF Ushakov State Maritime University], 2014, №. 2, pp. 42-44. (In Russian).
9. Kartsan I. N. Kachestvenny`e parametry` radionavigacionny`x sistem [Qualitative parameters of the radio-navigation systems] *Tehnologii polucheniya i obrabotki informacii o dinamicheskix ob`ektax i sistemax* [Technologies of obtaining and processing the information about dynamic objects and systems], 2022, pp. 258-266. (In Russian).
10. Daragan P. A. Navigaciya na morskix sudax: vidovaya klassifikaciya [Navigation on marine vessels: species classification] ББК: 9.122 (КР) Я43 М, 2016, Р. 17. (In Russian).

#### Сведения об авторах / Information about authors

**Титов Иван Леонидович** канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства  
Керченский государственный морской технологический университет  
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82  
vanya-titov-1993@mail.ru

## 2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

Titov  
Ivan  
Leonidovich                      Ph.D. (Engin.), Associate Professor of the Department of Electrical  
Equipment of Ships and Production Automation  
Kerch State Maritime Technological University  
298309, Republic of Crime, Kerch, Ordzhonikidze str., 82  
vanya-titov-1993@mail.ru

**Скляр**  
**Александр**  
**Владимирович**                      курсант специальности Судовождение  
Керченский государственный морской технологический  
университет  
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82  
vanya-titov-1993@mail.ru

Sklar  
Alexander  
Vladimirovich                      a cadet specializing in Navigation  
Kerch State Maritime Technological University  
298309, Republic of Crime, Kerch, Ordzhonikidze str., 82  
vanya-titov-1993@mail.ru