

16+

ISSN: 2949-558X

# ВЕСТНИК

Керченского Государственного  
Морского Технологического Университета

СЕРИЯ

Морские Технологии

Выпуск 1  
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 № 2 от 20.03.2024 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>Вынгра А.В. АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ИНТЕРГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА .....</b>	<b>6</b>
<b>Голиков С.П., Сметюх Н.П., Повалей Н.С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЛОКЧЕЙНА ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....</b>	<b>16</b>
<b>СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) .....</b>	<b>24</b>
<b>Клименко Н.П., Брицкий В.О., Шишик С.А. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СУДОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ РЕЖИМАХ .....</b>	<b>24</b>
<b>Конюков В.Л. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБОКОМПРЕССОРА СУДОВОГО ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ УТЯЖЕЛЕНИИ ВИНТОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....</b>	<b>34</b>
<b>Попов В.В., Ивановская А.В. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА СУДОВОГО ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....</b>	<b>42</b>
<b>Конюков В.Л., Горбенко А.Н. СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УГЛА ОПЕРЕЖЕНИЯ ПОДАЧИ ТОПЛИВА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....</b>	<b>52</b>
<b>Шаратов А.С. ОЦЕНКА МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ ГЛАВНОЙ ВИНТО-РУЛЕВОЙ КОЛОНКИ МАНЕВРИРУЮЩЕГО СУДНА ПРИ СТРУЙНОЙ ПОДАЧЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА ЗАСАСЫВАЮЩУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЛОПАСТЕЙ .....</b>	<b>60</b>
<b>ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ .....</b>	<b>69</b>
<b>Святский В.В. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ПОДКИЛЬЕВОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СУДНОМ СТЕСНЕННЫХ АКВАТОРИЙ .....</b>	<b>69</b>

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.31

Вынгра А.В.

### АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ИНТЕРГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

**Аннотация.** Ввиду увеличения количества и мощности потребителей электроэнергии, а также развития отрасли электроснабжения в области интеллектуальных сетей все большее внимание уделяется обеспечению требуемых показателей качества электроэнергии и электромагнитной совместимости как в промышленных, так и бытовых сетях. В работе рассматриваются нормирование показателей качества электроэнергии и составление алгоритмов определения параметров искажения тока и напряжения для обеспечения дальнейшего их подавления. Произведён анализ существующих методов выявления гармоник в сети, предложен авторский алгоритм определения частного случая гармоник – интергармонических составляющих. На основании алгоритма разработана и представлена программа для ПК, позволяющая оператору оценивать уровень интергармонических составляющих тока и напряжения, полученных с цифрового осциллографа. Предложенное программное обеспечение и алгоритмы могут выступать основой программного обеспечения активных фильтров, применяющихся для подавления интергармонического искажения.

**Ключевые слова:** интергармонические составляющие, программное обеспечение, активный фильтр,

Vyngra A. V.

### ALGORITHMS AND SOFTWARE SOLUTIONS FOR ASSESSING THE LEVEL OF INTERHARMONIC COMPONENTS OF VOLTAGE AND CURRENT

**Abstract.** Due to the increase in the number and power of electricity consumers, as well as the development of the power supply industry in the field of smart grids, increasing attention is being paid to ensuring the required indicators of power quality and electromagnetic compatibility in both industrial and household networks. The work discusses the standardization of power quality indicators and the development of algorithms for determining the parameters of current and voltage distortion to ensure their further suppression. An analysis of existing methods for identifying harmonics in a network has been carried out, and an original algorithm for determining a special case of harmonics - interharmonic components - has been proposed. Based on the algorithm, a PC program has been developed and presented, allowing the operator to evaluate the level of interharmonic components of current and voltage obtained from a digital oscilloscope. The proposed software and algorithms can serve as the basis for the software of active filters used to suppress interharmonic distortion

**Keywords:** interharmonic components, software, active filter.

**Введение.** В настоящее время нормирование показателей качества электроэнергии происходит по следующим показателям: уровень гармонического и интергармонического искажения (суммарный коэффициент гармонических составляющих СКГС), провалы напряжения, отклонения напряжения, фликер и ряд других показателей. Гармонические составляющие напряжения и тока являются причиной снижения качества электроэнергии ввиду того, что вызывают искажения напряжения и тока, а также повышают реактивную мощность сети. В настоящее время широкое распространение энергосберегающих люминесцентных ламп и большое количества импульсных нагрузок привело к проявлению гармонических составляющих тока и напряжения в системах распределения электроэнергии [1]. Такие искажения могут создавать помехи и сбои в работе другого оборудования распределительной сети [2] Показатели интергармонических составляющих

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

регламентируются ГОСТ ИЕС/TR 61000-3-14—2019 [3], согласно которому опорный уровень для каждой интергармонической частоты будет равен уровню совместимости для следующей более высокой четной гармонике. Согласно Правил РС [4], ГОСТ ИЕС/TR 61000-3-14—2019 [5] и ГОСТ 32144-2013 значение СКГС кривой напряжения не должно превышать 8 %. Допускается использование отдельных шин с  $K_u > 8\%$  для питания мощных источников гармонических составляющих напряжения и невосприимчивого к ним электрооборудования при условии, что указанные шины подключаются к основным шинам сети через развязывающие устройства [6-7].

Измерение гармонических составляющих в распределительных сетях обычно производится с помощью коммерческих анализаторов гармоник. Исследование причин возникновения гармоник, а также точное определение их параметров имеет важное значение для повышения качества электроэнергии.

**Целью исследования** является разработка программного обеспечения для определения интергармонического искажения тока и напряжения.

**Материалы и методы исследования.** Любая периодическая волновая функция напряжения на интервале одного периода времени может быть выражена как последовательность гармоник, которые являются целыми кратными относительно основной частоты. Эти гармоники могут иметь разные амплитуды и фазы, а их результирующая кривая известна как частотный спектр [8]. Синусоидальный сигнал напряжения может быть представлен как

$$U(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

где  $U$  — амплитуда напряжения,  $\omega$  — основная частота, а  $\varphi$  — фаза.

Используя тождество,  $\sin(x + y) = \sin x \cos y + \sin y \cos x$ , мы можем переписать (1) в виде

$$U(t) = U_0 + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + \dots + A_n \sin 2n\omega t + B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t + \dots + B_n \cos 2n\omega t + \quad (2)$$

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos \omega t \quad (3)$$

Величины констант  $U_0$ ,  $A_n$  и  $B_n$  определяются выражениями

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (4)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin(n\omega t) dt \quad (5)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cos(n\omega t) dt \quad (6)$$

Из (3) и (4) получаем

$$U(t) = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin n\omega t}{T} \int_0^T U(t) \sin(n\omega t) dt + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos n\omega t}{T} \int_0^T U(t) \cos(n\omega t) dt \quad (7)$$

Амплитуды различных гармоник  $U_n$  и углы сдвига фаз  $\varphi_n$  определяются выражениями

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

$$U_n = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (8)$$

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (9)$$

Формы сигналов напряжения и тока, обусловленные нелинейными гармониками нагрузки, могут быть выражены суммой составляющих постоянного тока, основной гармоники и первых 50 гармоник.

$$U(t) = U_0 + \sum_{h=1}^{50} U_h \sinh(h\omega t + \varphi_h) \quad (10)$$

$$I(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{50} I_h \sinh(h\omega t + \varphi_h) \quad (11)$$

В большинстве цифровых анализаторов для измерения гармоник используются методы преобразования Фурье. Гармонические составляющие напряжения и тока характеризуются своими частотами, амплитудами и углами сдвига фаз. Существует несколько типов инструментов обработки сигналов для расчета и выявления гармоник. Стандартный метод преобразования в частотной области основан на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) посредством реализации алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Метод временно-частотной области основан на методах вейвлет-преобразования или дискретных вейвлет-преобразований. Усовершенствованные методы во временной области включают фильтр Калмана на основе модели в пространстве состояний для отслеживания амплитуды и фазы основных частот и гармонических частот. Существуют и другие методы измерения гармоник, такие как линейный метод наименьших квадратов, разложение по сингулярным значениям, классификация множественных сигналов, статистический анализ, конечная импульсная характеристика, гребенчатый фильтры и др. [9].

В некоторых исследованиях отмечается увеличение частоты отказов бытового оборудования из-за гармонических составляющих, возникающих в результате широкого использования люминесцентных ламп в домашнем, офисном, коммерческом и промышленном освещении. Гармонические искажения таких потребителей возможно снижать, добавив к отдельным устройствам фильтры, таким образом корректируя коэффициент мощности непосредственно возле потребителя. Коэффициент мощности можно корректировать с помощью пассивных и активных фильтров. Пассивные фильтры часто используются для подавления гармоник только с наибольшим процентом искажения, таких как 3-я, 5-я, 7-я и 11-я. Активные фильтры могут компенсировать все типы гармоник и интергармоники, однако их применение с экономической точки зрения не всегда целесообразно ввиду их высокой стоимости. Использование активной фильтрации должно быть обусловлено высоким уровнем искажений, вносимых в энергосистему предполагаемым потребителем.

Исходя из предыдущих исследований автора в области выявления причин возникновения интергармонических составляющих тока электроприводов поршневых компрессоров [10-11] существует необходимость создания унифицированного программного обеспечения, позволяющего точно определять параметры интергармонического искажения тока и напряжения по данным измерения фактической кривой тока и напряжения.

### **Алгоритм работы программы определения интергармоник в составе активного фильтра**

Представленное в работе программное обеспечение позволяет не только эффективно определять параметры интергармоник, но и генерировать управляющий сигнал активного фильтра для повышения показателей качества электроэнергии сети [12].



## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

За основу проектируемого программного обеспечения принят разработанный автором алгоритм, представленный на рисунке 1.

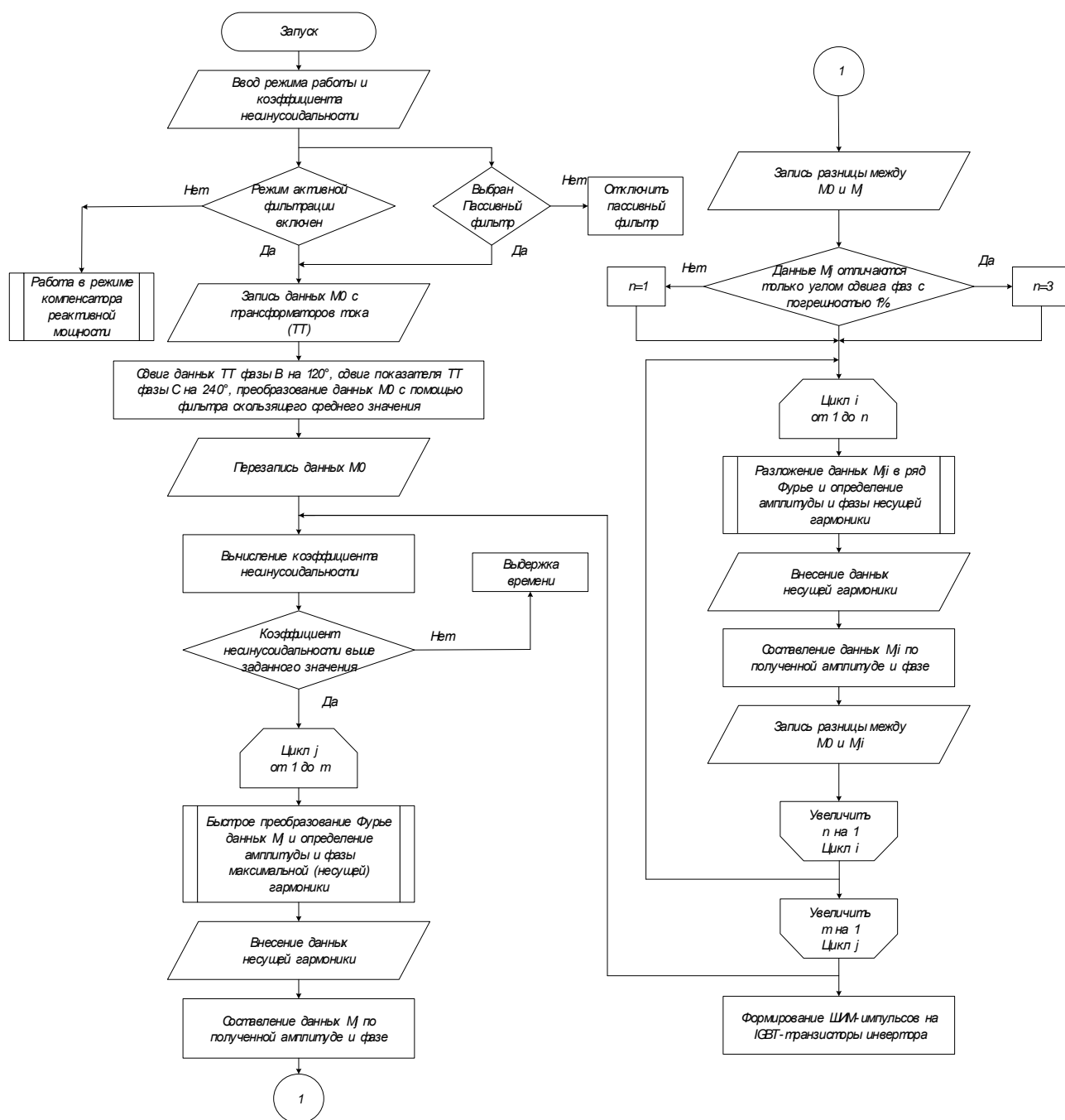


Рисунок 1 – Алгоритм выявления интергармоник и генерации управляющего сигнала активного фильтра

Данный алгоритм включает в себя циклы выбора режима работы фильтра, пассивного или активного фильтра, обработку данных осциллограмм трехфазного тока нагрузки для выделения интергармонического искажения, циклы спектрального анализа выделенных интергармоник, а также циклы генерации компенсирующего тока силовым инвертором активного фильтра с помощью гистерезисного регулятора с обратной связью по току.

### Формирование программного обеспечения для ПК

Исходя из предложенного алгоритма создана программа для ПК, код программы написан на языке Matlab, исходными данными для обработки сигнала являются матрица данных измеренного осциллографом тока или напряжения, представленная в формате .xls с

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

разделителем в виде запятой. Исходный файл программы представлен в исполнительном файле с расширением .exe [13].

Программа предназначена для определения параметров интергармоник. Визуализация осуществляется на базе языка Matlab с помощью представления интергармоник в виде графической зависимости. Программа позволяет формировать и отображать информацию в режиме заданного периода времени для данных, снятых с осциллографа. Такими данными могут быть ток или напряжения устройств, работающих на нелинейную нагрузку или на неравномерную периодическую нагрузку (компрессоры, роботы манипуляторы, насосы, лебедки, кулачковые механизмы и т.д.). Программа имеет интерфейс (рис. 2), в котором вводятся такие параметры для анализа спектра, как количество рассматриваемых периодов, начальное время отсчета и опорная частота.

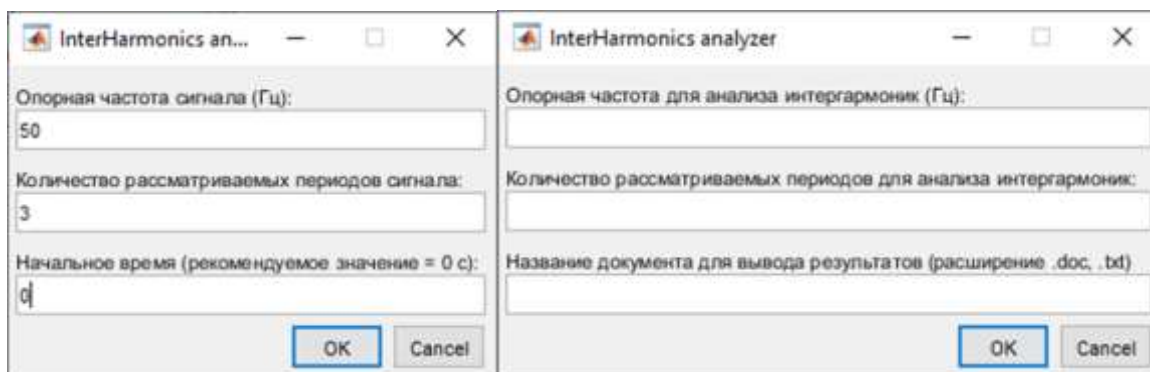


Рисунок 2 – Интерфейс диалоговых окон разработанной программы

Общую часть кода программы возможно разделить на два основных блока – выделение интергармоники и гармонический анализ по заданной начальной частоте. Ниже представлен фрагмент кода программы анализа и выделения интергармоник из полученной с осциллографа кривой напряжения.

```
data1={'Опорная частота сигнала (Гц):','Количество рассматриваемых периодов  
сигнала:','Начальное время (рекомендуемое значение = 0 с):'}  
N_cycle1=inputdlg(data1,'InterHarmonics analyzer');  
% основная частота  
f_cycle=str2double(N_cycle1{1}); % конвертация из матрицы в double основная частота  
% количество рассматриваемых циклов  
N_cycle=str2double(N_cycle1{2}); % конвертация из матрицы в double  
T_cycle=1/f_cycle; % период  
  
% устанавливаем начальное время  
t_start=str2double(N_cycle1{3}); % конвертация из матрицы в double начальное время  
t_end=t_start+N_cycle*T_cycle; % устанавливаем начальное время  
n_0=fix(t_start/dt)+1; % номер начальной ячейки выборки  
n_00=fix(t_end/dt)+1; % номер конечной ячейки выборки  
t=T1_cell(n_0:n_00); % исследуемые границы по времени  
u=U1_cell(n_0:n_00); % исследуемые границы по напряжению  
nend=length(t); % количество итераций  
n=(1:nend); % количество точек  
n=n';  
f1=2*pi*(n-1)/(nend-1)*N_cycle; % массив 1й гармоники  
uc1=u.*cos(f1);  
us1=u.*sin(f1);  
a1=2/(nend-1)*(0.5*(uc1(1)+uc1(length(t)))+sum(uc1(2:nend-1)));
```

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

```

b1=2/(nend-1)*(0.5*(us1(1)+us1(length(t)))+sum(us1(2:nend-1)));
N1=sqrt(a1^2+b1^2);           % Амплитуда 1й гармоники
if a1<0 & b1<0               % фаза 1й гармоники
    Phi1=atan(a1/b1+pi);
else
    Phi1=atan(a1/b1);
end
u1=N1*sin(2*N_cycle*pi.*t/t(nend)+Phi1); % выделенная 1я гармоника
delta_u=u-u1;                 % разность между сигналом и 1й гармоникой
plot(t,delta_u),
grid
title({'Выделенные интергармонические составляющие сигнала','(График сохранен под
именем report1.png)'});

```

После определения параметров интергармоник (несущей частоты и границ времени выборки) происходит спектральный анализ с последующим выводом результата на печать в файл (фрагмент кода представлен ниже).

```

data2={'Опорная частота для анализа интергармоник (Гц)';'Количество рассматриваемых
периодов для анализа интергармоник';'Название документа для вывода результатов
(расширение .doc, .txt)'}
N_cycle2=inputdlg(data2,'InterHarmonics analyzer');
% количество рассматриваемых циклов
N_cycle=str2double(N_cycle2{2}) % конвертация из матрицы в double циклов
f_cycle=str2double(N_cycle2{1}) % конвертация из матрицы в double опорной частоты
T_cycle=1/f_cycle;
t_start=0; % устанавливаем начальное время
t_end=t_start+N_cycle*T_cycle; % устанавливаем начальное время
n_0=fix(t_start/dt)+1; % номер начальной ячейки выборки
n_00=fix(t_end/dt)+1; % номер конечной ячейки выборки
t=T1_cell(n_0:n_00); % исследуемые границы по времени
u=delta_u(n_0:n_00); % исследуемые границы по напряжению
nend=length(t); % количество итераций
n=(1:nend); % количество точек
n=n';
a0=sum(u)/nend; % постоянная составляющая
f1=N_cycle*2*pi*(n-1)/(nend-1);
uc1=u.*cos(f1);
us1=u.*sin(f1);
a1=2/(nend-1)*(0.5*(uc1(1)+uc1(length(t)))+sum(uc1(2:nend-1)));
b1=2/(nend-1)*(0.5*(us1(1)+us1(length(t)))+sum(us1(2:nend-1)));
...
N1=sqrt(a1^2+b1^2);
...
N7=sqrt(a7^2+b7^2);
if ((a1<0) & (b1<0))
    Phi1=atan(a1/b1)+pi;
else
    Phi1=atan(a1/b1);
end
...
if ((a7<0) & (b7<0))

```

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

```
Phi7=atan(a7/b7)+pi;
else
Phi7=atan(a7/b7);
end

Bary=[N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7]; % гармоники в массив
Barx=[f_cycle, f_cycle*2, f_cycle*3, f_cycle*4, f_cycle*5, f_cycle*6, f_cycle*7];
bar(Barx,Bary, 0.8),
title('Гармонический анализ');
xlabel('Частота гармоники, Гц');
ylabel('Амплитуда гармоники, В');
h2=figure(1);
saveas(h2,'report2.png');
fprintf('Гармонический анализ построен и сохранен под именем report2.png \n','(График
сохранен под именем report2.png)');
```

Исходя из написанного кода, работа с программой заключается в последовательном выполнении оператором следующих действий:

1. После установки программы необходимо поместить файл данных с осциллографа в папку исполняемой программы. (Если есть ярлык на рабочем столе, поместите файл на рабочий стол.) Файл данных с осциллографа должен называться data.xlsx и содержать 300 значений матрицы время-напряжения.

3. В появившемся окне необходимо ввести основные параметры для исследования несинусоидальной величины. (Данные отображены на экране стандартного цифрового осциллографа)

4. Из полученных данных в матрице по введенным параметрам программа выделит интергармонические составляющие сигнала и отобразит в виде графика в отдельном окне. Так же программа сохранит файл с изображением интергармонической составляющей сигнала под именем report1.png [14].

5. Далее необходимо проанализировать график интергармонической составляющей и, для получения спектра согласно гармоническому ряду Фурье, необходимо ввести опорную частоту и количество рассматриваемых периодов интергармоник. Также оператору предлагается задать имя и расширение файла для вывода результатов.

6. Файл с результатами будет создан с заданным именем, на экран выведен спектр интергармонических составляющих относительно опорной частоты (рисунок 3).

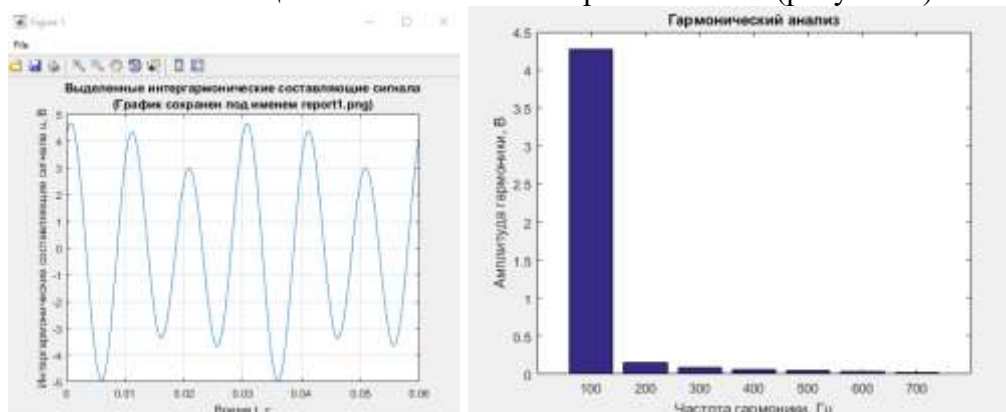


Рисунок 3 – Результаты выделения интергармоник и их гармонического анализа разработанной программой

Сформированный отчет в формате .doc или .txt содержит необходимые данные интергармоник для компенсации их в активном фильтре гармоник.

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Разработанные алгоритмы выявления и анализа интергармонических составляющих могут использоваться как основа программного обеспечения активных фильтров.

**Выводы.** Своевременное обнаружение нарушений качества электроэнергии присутствием интергармонического искажения позволит увеличить надежность систем электроснабжения и повысить эффективность передачи и использования электрической энергии. В работе рассматриваются нормирование показателей качества электроэнергии и составление алгоритмов определения параметров искажения тока и напряжения для обеспечения дальнейшего их подавления. Произведён анализ существующих методов выявления гармоник в сети, предложен авторский алгоритм определения частного случая гармоник – интергармонических составляющих. На основании алгоритма разработана и представлена программа для ПК, позволяющая оператору оценивать уровень интергармонических составляющих тока и напряжения, полученных с цифрового осциллографа. Предложенное программное обеспечение и алгоритмы могут выступать основой программного обеспечения активных фильтров, применяющихся для подавления интергармонического искажения.

Список использованной литературы:

1. *McLorn G. et al.* Load and harmonic distortion characterization of modern low-energy lighting under applied voltage variation //Electric Power Systems Research. 2019. Т. 169. С. 124-138.
2. *Giner-Sanz J. J., Ortega E. M., Pérez-Herranz V.* Total harmonic distortion based method for linearity assessment in electrochemical systems in the context of EIS //Electrochimica Acta. 2015. Т. 186. С. 598-612.
3. ГОСТ ИЕС/TR 61000-3-14-2019 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-14. Оценка норм эмиссии для гармоник, интергармоник, колебаний напряжения и несимметрии при подключении установок, создающих помехи, к низковольтным системам электроснабжения. Стандартиформ. 2019. 76 с.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI Электрическое оборудование – СПб.: Российский морской регистр судоходства. 2021. 349 с.
5. IACS UR E24. Harmonic distortion for ship electrical distribution system including harmonic filters. [электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.iacs.org.uk/publications/unified-requirements/ur-e/ur-e24-rev1-cln>. (дата обращения: 06.02.2022)
6. Патент № 2360260 С1 Российская Федерация, МПК G01R 23/16. Способ спектрального анализа периодических многочастотных сигналов, содержащих интергармоники и заданных цифровыми отсчетами : № 2007148269/28 : заявл. 24.12.2007 : опубл. 27.06.2009 / Е. В. Радаев, Е. И. Гольдштейн, Бюл № 18. – 12 с.
7. *Бирюлин В. И., Горлов А. Н.* Анализ нагрева кабельных линий токами высших гармоник и интергармоник // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 2(46). С. 61-67.
8. *Бирюлин В. И., Куделина Д. В.,* Применение вейвлет-преобразования для определения токов высших гармоник и интергармоник // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей: посвящается 80-летию со дня рождения проф. С.В. Хватова, Нижний Новгород, 21 декабря 2018 года / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Образовательно-научный институт электроэнергетики. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2018. С. 36-39.
9. *Дмитриев Б. Ф., Галушин С. Я., Калмыков А. Н. [и др.]* Методы улучшения качества электрической энергии в СЭЭС // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-2(45). С. 135-141.
10. *Авдеев Б.А., Вынгра А.В., Черный С.Г.* Системный анализ для идентификации интергармоник тока и напряжения в интеллектуальных сетях для компонентов робототехнических структур // Робототехника и техническая кибернетика. 2023. Т. 11, № 4. С. 312-320. DOI 10.31776/RTSJ.11408. EDN YZVOUT.

#### 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

11. Вынгра А.В., Подунай С.В. Оценка влияния работы электроприводов поршневых компрессоров на возникновение интергармонических составляющих в судовой электростанции // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии. 2023. № 2. С. 99-113.
12. Белей В.Ф., Брижак Р.О., Коротких К.В. Результаты экспериментальных и расчетных исследований электромагнитных помех, генерируемых электрооборудованием судовых энергетических установок и их элементов с нелинейными характеристиками // Известия Калининградского государственного технического университета. 2022. № 66. С. 129-142.
13. Свидетельство 2020616882. «InterHarmonics Analyzer»: программа для ЭВМ / Вынгра А.В. Авдеев Б.А. (RU) ; правообладатель ФГБОУ ВО «КГМТУ». № 2020616882; заявл. 08.06.2020 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 2020615843, (Ч. 1.). 600 Мб.
14. Аничков С. П. Гармонические колебания напряжения с частотами, не кратными частоте питающей сети // Управление большими системами: Материалы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых, Липецк, 21–24 мая 2012 года. Липецк: Издательство Першина Р.В., 2012. С. 131-133.

#### References:

1. McLorn G. et al. Load and harmonic distortion characterization of modern low-energy lighting under applied voltage variation. Electric Power Systems Research, 2019, T. 169, pp. 124-138. (In English).
2. Giner-Sanz J. J., Ortega E. M., Pérez-Herranz V. Total harmonic distortion based method for linearity assessment in electrochemical systems in the context of EIS. Electrochimica Acta, 2015, T. 186, pp. 598-612. (In English).
3. GOST IEC/TR 61000-3-14-2019 *Elektromagnitnaia sovmestimost (EMS). Chast 3-14. Otsenka norm emissii dlia garmonik, intergarmonik, kolebanii napriazheniia i nesimmetrii pri podkliuchenii ustanovok, sozdaiushchikh pomekhi, k nizkovolnym sistemam elektrosnabzheniia*. [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-14. Estimation of emission standards for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalances when connecting interfering installations to low-voltage power supply systems] Standartinform. – 2019. – 76 s. (In Russian)
4. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast XI Elektricheskoe oborudovanie* [Rules for the classification and construction of sea vessels. Part XI Electrical equipment] – SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva. – 2021. – 349 s. (In Russian)
5. IACS UR E24. Harmonic distortion for ship electrical distribution system including harmonic filters. Aviable at: <https://www.iacs.org.uk/publications/unified-requirements/ur-e/ur-e24-rev1-cln>. (accessed: 11.11.2023). (In English).
6. Patent № 2360260 C1 Rossiiskaia Federatsiia, MPK G01R 23/16. *Sposob spektralnogo analiza periodicheskikh mnogochastotnykh signalov, soderzhashchikh intergarmoniki i zadannykh tsifrovymi otschetami* [Method for spectral analysis of periodic multi-frequency signals containing interharmonics and specified by digital samples]: № 2007148269/28 : zaiavl. 24.12.2007 : opubl. 27.06.2009 / E. V. Radaev, E. I. Goldshtein, Biul № 18. – 12 s. (In Russian)
7. Biriulin V. I. Gorlov A. N. Analiz nagreva kabelnykh linii tokami vysshikh garmonik i intergarmonik [Analysis of heating of cable lines by currents of higher harmonics and interharmonics]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Energy University], 2020, T. 12, № 2(46), pp. 61-67. (In Russian)
8. Biriulin V. I., Kudelina D. V. Primenenie veivlet-preobrazovaniia dlia opredeleniia tokov vysshikh garmonik i intergarmonik [Application of wavelet transform to determine currents of higher harmonics and interharmonics]. *Aktualnye problemy elektroenergetiki: sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei: posviashchaetsia 80-letiiu so dnia rozhdeniia prof. S.V. Khvatova, Nizhnii Novgorod, 21 dekabria 2018 goda / Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, Obrazovatelno-nauchnyi institut elektroenergetiki. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva* [Actual problems of the electric power industry: collection of scientific and technical articles: dedicated to the 80th

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

anniversary of the birth of Prof. S.V. Khvatov, Nizhny Novgorod, December 21, 2018 / Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Educational and Scientific Institute of Electric Power Engineering. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev], 2018, pp. 36-39. (In Russian)

9. Dmitriev B. F. Galushin S. Ia., Kalmykov A. N. et al. Metody uluchsheniia kachestva elektricheskoi energii v SEES [Methods for improving the quality of electrical energy in SEPS] *Morskie intellektualnye tekhnologii*. [Marine intelligent technologies], 2019, № 3-2(45), pp. 135-141. (In Russian)

10. Avdeev B.A., Vyngra A.V., Chernyj S.G. Sistemnyj analiz dlya identifikacii intergarmonik toka i napryazheniya v intellektual'nyh setyah dlya komponentov robototekhnicheskikh struktur [System analysis to identify current and voltage interharmonics in smart grids for robotic structure components] *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*. [Robotics and technical cybernetics], 2023, T. 11, № 4, pp. 312-320. (In Russian)

11. Vyngra A.V., Podunaj S.V. Ocenka vliyaniya raboty elektroprivodov porshnevnykh kompressorov na vzniknovenie intergarmonicheskikh sostavlyayushchih v sudovoj elektrostancii [Assessment of the influence of the operation of electric drives of piston compressors on the occurrence of interharmonic components in a ship power plant] *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Morskie tekhnologii*. [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University. Series: Marine Technologies], 2023, № 2, pp.99-113.

12. Belei V. F. Brizhak R. O Korotkikh K. V. Rezultaty eksperimentalnykh i raschetnykh issledovaniy elektromagnitnykh pomekh, generiruemykh elektrooborudovaniem sudovykh energeticheskikh ustanovok i ikh elementov s nelineinymi kharakteristikami [Results of experimental and computational studies of electromagnetic interference generated by electrical equipment of ship power plants and their elements with nonlinear characteristics] *Izvestiia Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of the Kaliningrad State Technical University], 2022, № 66, pp. 129-142. (In Russian)

13. Svidetel'stvo 2020616882. «InterHamonics Analyzer»: programma dlya EVM / Vyngra A.V. Avdeev B.A. (RU) ; pravoobladatel' FGBOU VO «KGMTU». № 2020616882; zayavl. 08.06.2020 ; opubl. 25.06.2020, Byul. № 2020615843, (Ch. 1.). 600 Mb

14. Anichkov S. P. Garmonicheskie kolebaniia napriazheniia s chastotami, ne kratnymi chastote pitaiushchei seti [Harmonic voltage fluctuations with frequencies not multiples of the supply network frequency] *Upravlenie bolshimi sistemami: Materialy IX Vserossiiskoi shkoly-konferentsii molodykh uchenykh, Lipetsk, 21–24 maia 2012 goda. – Lipetsk: Izdatel'stvo Pershina R.V.* [Managing Large Systems: Proceedings of the IX All-Russian School-Conference of Young Scientists, Lipetsk, May 21-24, 2012. Lipetsk: Pershin R.V. Publishing House.], 2012, pp. 131-133. (In Russian)

### Сведения об авторах / Information about authors

**Вынгра  
Алексей Викторович**

старший преподаватель кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства  
Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82  
avyngra@mail.ru

Vyngra  
Aleksei Viktorovich

lecturer of the Department of ships electrical equipment and industrial automation  
Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82  
avyngra@mail.ru

УДК 621.311

Голиков С.П., Сметюх Н.П., Повалей Н.С.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЛОКЧЕЙНА ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**Аннотация.** В данной работе рассмотрено внедрение новых интеллектуальных сетей электроснабжения. Приведены их примеры, выявлены преимущества и недостатки. Для решения основных проблем, связанных с работой и надежностью интеллектуальных сетей, была использована технология блокчейн, которая имеет ряд преимуществ в использовании. В ходе исследования также рассмотрена концепция нескольких блокчейн-платформ вместо одной, что обеспечит высокую модульность системы и упростит отслеживание данных. Данная технология поможет обеспечить потребность в электроэнергии для каждого конечного пользователя на основе реальной информации о потреблении и генерации электроэнергии близлежащих участников объединённого электrorынка. Показано ценообразование единицы электроэнергии на основе распределённой сети электроснабжения, содержавшие возобновляемые источники электроэнергии. Приведены ограничения в современных интеллектуальных сетях. Необходимая информация для управления энергосистемой на основе блокчейна может быть относительно легко получена с помощью нейронных сетей на основе большого объема статистических данных по производству и потреблению электроэнергии.

**Ключевые слова:** интеллектуальных сетей электроснабжения, блокчейн, твердотельный трансформатор, распределенные цепи, альтернативные источники электроэнергии.

Golikov S.P., Smetyukh N.P., Povaley N.S.

### **THE USE OF BLOCKCHAIN TO TRACK THE PARAMETERS OF DISTRIBUTED SMART GRIDS**

**Abstract.** In this paper, the introduction of new intelligent grids is considered. Their examples are given, advantages and disadvantages are revealed. To solve the main problems related to the operation and reliability of smart grids, blockchain technology was used, which has a number of advantages in use. The study also examined the concept of multiple blockchain platforms instead of one, which will ensure high modularity of the system and simplify data tracking. This technology will help to ensure the need for electricity for each end user based on real information about the consumption and generation of electricity from nearby participants of the combined electric market. The pricing of a unit of electricity based on a distributed power supply network containing renewable sources of electricity is shown. The limitations in modern smart grids are given. The necessary information for managing a blockchain-based energy system can be relatively easily obtained using neural networks based on a large volume of statistical data on electricity production and consumption.

**Key words:** smart grids, blockchain, solid-state transformer, distributed grids, alternative sources of electricity.

**Введение.** В последнее время как в мире, так и в Российской Федерации, наблюдается устойчивый рост потребления электроэнергии, при этом наблюдаемый рост выше, чем в конце XX-го века. Это связано с повальной электрификацией и цифровизацией производив и бытовых нужд, что приводит к повышению потребления электроэнергии. Однако увеличивать мощности традиционных источников электроэнергии (ТЭЦ, ГЭС) не всегда является экономически оправданным. В мире имеется явный тренд на возобновляемую и альтернативную энергетику, которая способствует сохранению природных ресурсов, уменьшает углеродный след и являются более экологичными. Основу новых установок возобновляемой энергии составляют солнечные панели и ветровое электростанции. С 2000 года по 2021 количество производимой мощности альтернативными и возобновляемыми



## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

источниками электроэнергии увеличилось более чем в 30 раз, т.е. прирост составляет более 1,5% в год; особенно бурное внедрение осуществляется в последние годы [1].

По мере увеличения доли ветряных и солнечных электростанций в энергосистеме возрастают проблема экономической целесообразности, качества электроэнергии и надежности электроснабжения. Проблема заключается, что возобновляемые источники электроэнергии не являются надежными производителями с точки зрения их зависимости от внешних условий, таких как облачность или отсутствие ветра. На ранних этапах энергосистемы полагались на крупные генерирующие станции в близлежащих городах для удовлетворения основных потребностей в освещении и отоплении. Новые технологии поставили многочисленные краткосрочные задачи и нагрузку на обычную энергосистему, превратив ее в сложную систему, требующую двунаправленного потока энергии и стандартов связи, которые позволяют потребителям производить и потреблять энергию. Например, владельцы солнечных панелей систем могут продавать избыточную электроэнергию обратно в сеть или хранить ее с помощью блоков аккумуляторных батарей для последующего использования. Эта и другие новые функции ознаменовали появление новых сетей электроснабжения, получивших название интеллектуальных сетей. Пример такой сети представлен на рисунке 1. Красная стрелка означает потребление электроэнергии из сети, зеленая – отдача электроэнергии в сеть.

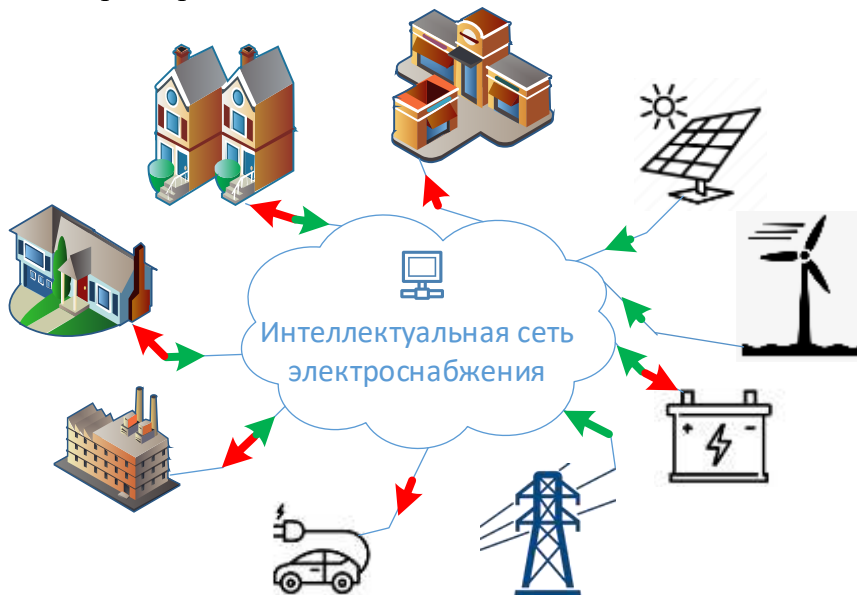


Рисунок 1 – Интеллектуальные сети электроснабжения

**Целью работы** является исследование возможности использования технологии блокчейна для отслеживания параметров интеллектуальных сетей электроснабжения, содержащие альтернативные и возобновляемые источники электроэнергии.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Умные сети могут включать в себя распределенные энергоресурсы, такие как солнечные панели и ветряки, электромобили, системы хранения энергии, суперконденсаторы, а также однофазные и трехфазные нагрузки [2]. Они предлагают множество преимуществ для конечных потребителей, включая отслеживание в режиме реального времени, эффективное управление энергопотреблением, механизмы переменного ценообразования и другие. Интеллектуальные сети электроснабжения можно охарактеризовать четырьмя основными чертами [3]:

- возможность локальной генерации электроэнергии с последующим её хранением;
- возможность работы в сетевой или изолированном режимах;
- мониторинг и диагностика в режиме реального времени;
- масштабируемость.

Существуют два основных типа интеллектуальных сетей электроснабжения: переменного и постоянного тока (рисунок 2). С развитием технологии твердотельного

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

трансформатора эти сети могут быть объединены в одну, что обеспечит ещё большую экономичность и надежность. Более подробно вопрос освещается в [4].

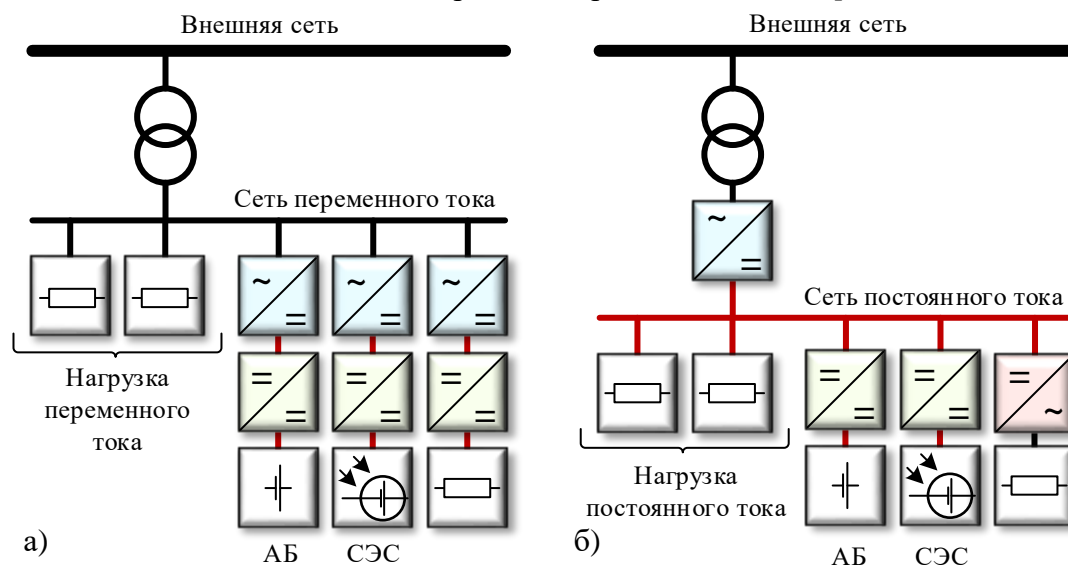


Рисунок 2 – Интеллектуальные сети электроснабжения: а) переменного тока; б) постоянного тока (АБ – аккумуляторные батареи, СЭС – солнечная электростанция)

Существует множество основных проблем, связанных с работой и надежностью интеллектуальных сетей электроснабжения в отношении требований к связи, защите и эксплуатации. Несмотря на большую важность надежной передачи информации, защит от кибератак и неисправностей, задержки и условия ограниченной полосы пропускания могут существенно повлиять на эксплуатационные характеристики сетей электроснабжения.

В настоящее время установление внутридневных цен на электроэнергию ограничено следующими факторами:

- мощностью сети;
- возобновляемые источники электроэнергии имеют ограничения по времени суток/года и погодой;
- субсидиями на экологически чистую энергию;
- географическим положением (передача электроэнергии в более отдалённые регионы при нехватке мощности в сети может быть ограничена из-за больших потерь при передаче на большие расстояния);
- льготной политикой продавцов;
- расходами на техническое обслуживание и стоимость передачи/распределения линий электропередачи.

Внутридневные цен на электроэнергию для конечных потребителей следующие:

- каждый день делится на равные промежутки времени,
- анализируется разницу в ценах между периодами времени в соответствии с имеющимися данными на спрос электроэнергию
- устанавливаются разные цены на электроэнергию в зависимости от спроса на электроэнергию в каждый период времени в конкретный день.

Сетевая цена электроэнергии за период времени может быть выражена как функция от цены на электроэнергию от различных поставщиков электроэнергии:

$$P = F\{P_m, P_c, P_v, P_z, P_{mc}, P_{vc}\},$$

где  $P_m$ ,  $P_c$ ,  $P_v$ ,  $P_z$ ,  $P_{mc}$  и  $P_{vc}$  - цены на электроэнергию для традиционных источников энергии, солнечной энергии, энергии ветра и гидроэлектростанций, для традиционных источников энергии в соседних регионах и для новых энергетических электростанций в соседних регионах, соответственно.

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Стоимость покупки электроэнергии конечным потребителем может быть выражена как:

$$P_n = P_c + P_{np}$$

где,  $P_c$  и  $P_{np}$  - себестоимость и прибыль продавца, соответственно.

Стоимость покупки электроэнергии от электростанций к сетям может быть выражена как:

$$P_c = P_e + P_p$$

где  $P_e$  - цена за единицу чистой энергии;  $P_p$  - стоимостью передачи/распределения.

Стоимость электроэнергии может варьироваться, поскольку энергия по зеленому тарифу не может быть подключена к сети в течение всего дня, что влияет на конечную цену.

В настоящее время большинство существующих средств моделирования интеллектуальных сетей построены с использованием лицензионного программного обеспечения. Эти инструменты позволяют тестировать самые разные сценарии, поэтому они становятся очень полезными при выполнении диагностики и анализа в автономном режиме, однако запускать этот проприетарный код на встроены устройства часто не разрешается. Платформы моделирования и симуляции с открытым исходным кодом повысили бы гибкость и совместимость различных аппаратных решений, однако инструментов с открытым исходным кодом, обеспечивающих эти возможности на аппаратной стороне, недостаточно [5]. Эта область представляет собой нишу, которую следует использовать, поскольку большинство существующих сегодня проблем связаны с задержкой связи, потерей пакетов и коллизиями, которые можно эмулировать с помощью распределенных недорогих аппаратных устройств [3].

Для тех целей необходимо сформировать подход, позволяющий осуществлять работу распределенной интеллектуальной системы электроснабжения на основе технологии блокчейна [6]. Данная технология поможет обеспечить потребность в электроэнергии для каждого конечного пользователя на основе реальной информации о потреблении и генерации электроэнергии близлежащих участников объединённого электрорынка [7].

Основой системы является библиотека, предназначена для управления потоками нагрузки и распределением мощности, которая включает в себя математические модели конечных электропотребителей, источников электроэнергии (внешняя сеть электроснабжения, солнечные панели, ветряки), преобразователи энергии (инверторы, выпрямители, твердотельные трансформаторы) и аккумуляторные батареи, позволяющие запасать, хранить и отдавать электроэнергию. Также библиотека должна обладать статистическими данными о прогнозируемом потреблении электроэнергии в зависимости от времени года, погодных условий, дня недели (рабочий или выходной) и других важных факторов. Данная информация может быть относительно легко получена с помощью нейронных сетей на основе большого объема статистических данных [8]. Также библиотека должна учитывать потери мощности при передаче электроэнергии от одного участника объединенного энергорынка другому [9].

Использование блокчейн было обусловлено тем, чтобы отслеживание работы в интеллектуальных сетях электроснабжения являлось зашифрованным и надежно спрятанным от мошенников. Также возможно использования нескольких блокчейн-платформ вместо одной, что обеспечит высокую модульность системы [10]. В результате управление разрешениями на отслеживание данных упрощается, гарантируя при этом высокую степень конфиденциальности. Транзакции создаются и автоматически заносятся в стопку неподтвержденных транзакций. После этого алгоритм выбирает одну транзакцию и проверяет ее для дальнейшего добавления в новый блок. Если транзакция была полностью подтверждена, то блок добавляется в блокчейн соответствующей ноды.

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Блокчейн – это чуждая концепция для большинства политиков в секторе электроэнергетики, которым часто не хватает необходимых ресурсов, чтобы понять, что такое блокчейн, как конкретное приложение может способствовать достижению целей государственной политики и как следует регулировать блокчейн-сети. Глобальный толчок к принятию правил конфиденциальности данных делает особенно актуальным, чтобы политики понимали взаимосвязь блокчейна и конфиденциальности. Например, Общий регламент Европейского союза о конфиденциальности данных, вступивший в силу в мае 2018 года, требует в некоторых случаях обезличивания или удаления персональных данных, например, для соблюдения права человека на забвение [11]. Но могут ли записи блокчейна быть действительно анонимизированы, остается неясным; в лучшем случае данные физического лица могут существовать в блокчейне под псевдонимом. Более того, поскольку технология распределенной бухгалтерской книги по своей конструкции неизменна, данные, хранящиеся в ней, трудно стереть. Продуманная политика позволит сектору электроэнергетики использовать потенциал блокчейна, сохраняя при этом конфиденциальность данных. Директивным органам следует создать представителей научных кругов и промышленности, чтобы объяснить им основы блокчейна и его потенциальные приложения.

В настоящее время растущее число инициатив с их собственными проприетарными платформами может препятствовать перспективам масштабирования блокчейна. Тем не менее, обещание блокчейна заключается в обеспечении эффективных транзакций среди широкого круга участников сети. Набор стандартов, гарантирующих совместимость различных блокчейн-платформ, мог бы ускорить коммерциализацию технологии блокчейн. Одна из первых подобных попыток со стороны правительства США, межведомственный отчет, опубликованный Национальным институтом стандартов и технологий (NIST), содержит аудит блокчейн-приложений, но посвящает только два абзаца их возможному использованию в секторе электроэнергетики [12]. NIST, который имеет историю новаторских работ в области криптографических стандартов, начиная с 1970-х годов, должен пойти дальше. Полезным первым шагом могло бы стать объединение заинтересованных сторон, работающих над различными типами приложений, для определения того, где общие стандарты — например, для блокчейна и типов протоколов — могут быть осуществимыми, конструктивными или непрактичными.

**Выводы.** Представлен проект для отслеживания состояния интеллектуальных сетей электроснабжения на базе технологии блокчейн. Эта технология позволит быстро обрабатывать большое количество входной информации о сети. Применение данной технологии позволит снизить расходы по сравнению с классическими сетями за счет единого энергорынка. Использование блокчейна в качестве поддерживающей технологии для одноранговых сетей позволяет надежно записывать транзакции, сохраняя при этом конфиденциальность пользователей. Показано, что технология блокчейн лучше подходит для современных распределительных сетей электроснабжения, чем классическая централизованная схема. Приведено ценообразование за единицу электроэнергии, учитывающие различные тарифы на возобновляемую электроэнергию.

### Список использованной литературы:

1. *Василенко Я.В.* Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития // Проблемы российской экономики на современном этапе: Материалы Всеросс. науч.-практ. конф. М., 2020. С. 105-111.
2. *Авдеев Б.А.* Перспективы использования твердотельных трансформаторов для интеллектуальных сетей электроснабжения двойного назначения // Сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции «Технологии энергообеспечения. Аппараты и машины жизнеобеспечения», Анапа, 17 сентября 2020, С. 340-348.
3. *Kim S.-K., Huh, J.-H.* A Study on the Improvement of Smart Grid Security Performance and Blockchain Smart Grid Perspective // *Energies*, 2018. № 11.

#### 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

4. Доровской В.А., Сметюх Н.П., Прокофьев А.Е., Димитров К.С. Синтез первичной информации интеллектуальных систем // Стратегическая стабильность. 2020. № 2 (91). С. 48-51.
5. Авдеев Б.А. Устранение несимметрии трехфазного напряжения с помощью твердотельного трансформатора в интеллектуальных сетях электроснабжения // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ, 2021. – № 4. – С. 67-75.
6. Грабчак Е.П., Логинов Е.Л. Цифровые подходы к управлению объектами электро- и теплоэнергетики с применением интеллектуальных киберфизических систем // Надежность и безопасность энергетики. 2019. Т. 12. № 3. С. 172-176.
7. Перекальский И.Н., Кокин С.Е. Применение технологий распределённого реестра (blockchain) в электроэнергетических системах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 1. С. 64-75.
8. Горячев И.С., Сметюх Н.П., Козаченко Л.Н. Модель оценки уровня рисков на основе программных средств многофункционального виртуального тренажера // Транспортное дело России. 2023. № 1. С. 205-207.
9. Трегубов В. Н. Реализация автономной логистики на основе технологий интернета вещей и блокчейн // Современные информационные технологии и ИТ-образование, 2019. - Т. 15. № 3. С. 782-790.
10. Авдеев Б.А. Вынгра А.В. Использование нейронных сетей в системах управления интеллектуальными сетями электроснабжения // Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы», Анапа, 22–23 апреля 2021 года. – Т.1. – С. 80-84.
11. Huh J.-H., Seo K. Blockchain-based mobile fingerprint verification and automatic log-in platform for future computing // J. Supercomput. 2018, 1–17.
12. Liang G., Weller S.R., Luo F. et al. Distributed blockchain-based data protection framework for modern power systems against cyber attacks // IEEE Trans Smart Grid, 2018, 10 (3), pp. 3162-3173.

#### References:

1. Vasilenko Ya.V. Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects. *Problemy rossiyskoy ekonomiki na sovremennom etape: Materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. [Problems of the Russian economy at the present stage: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]* М., 2020. pp. 105-111. (In Russian).
2. Avdeev B.A. Prospects of using solid-state transformers for intelligent dual-purpose power supply networks. *Sbornik statey vtoroy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnologii energoobespecheniya. Apparaty i mashiny zhizneobespecheniya» [Collection of articles of the second All-Russian Scientific and Technical Conference "Energy supply technologies. Life support devices and machines"]*, Anapa, September 17, 2020, pp. 340-348. (In Russian).
3. Kim S.-K., Ha, J.-H. Research on improving the security efficiency of intelligent networks and the prospects of the Smart Grid blockchain // *Energiya [Energia]*, 2018. No. 11.
4. Dorovskoi V.A., Smetyukh N.P., Prokofiev A.E., Dimitrov K.S. Synthesis of primary information of intelligent systems. *Strategicheskaya stabil'nost' [Strategic stability]*. 2020. No. 2 (91). pp. 48-51. (In Russian).
5. Avdeev B.A. Elimination of three-phase voltage asymmetry using a solid-state transformer in intelligent power supply networks. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the MEI]*, 2021. No. 4. pp. 67-75. (In Russian).
6. Grabchak E.P., Loginov E.L. Digital approaches to the management of electric and thermal power facilities using intelligent cyberphysical systems. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki. [Reliability and safety of energy]*. 2019. Vol. 12. No. 3. pp. 172-176. (In Russian).
7. Perekalsky I.N., Kokin S.E. Application of distributed registry technologies (blockchain) in electric power systems. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*

## 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

[*Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*]. 2020. Vol. 20. No. 1. pp. 64-75. (In Russian).

8. Goryachev I.S., Smetyukh N.P., Kozachenko L.N. Risk assessment model based on software tools of a multifunctional virtual simulator. *Transportnoye delo Rossii [Transport business of Russia]*. 2023. No. 1. pp. 205-207. (In Russian).

9. Tregubov V. N. Implementation of autonomous logistics based on Internet of Things and blockchain technologies. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye [Modern information technologies and IT education]*, 2019. Vol. 15. No. 3. pp. 782-790. (In Russian).

10. Avdeev B.A. Vygra A.V. The use of neural networks in control systems of intelligent power supply networks. *Sbornik statey k III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu «ASU, informatsionno-telekommunikatsionnyye sistemy» [Collection of articles for the III All-Russian scientific and technical conference "State and prospects of development of modern science in the field of automated control systems, information and telecommunication systems"]*, Anapa, April 22-23, 2021. Vol. 1. pp. 80-84(In Russian).

11. Huh J.-H., Seo K. Blockchain-based mobile fingerprint verification and automatic log-in platform for future computing. *J. Supercomput.* 2018, 1–17.

12. Liang G., Weller S.R., Lo F. et al. Distributed blockchain-based data protection system for modern power systems against cyber attacks. *IEEE Trans Smart Grid*, 2018, 10 (3), pp. 3162-3173. (In Russian).

### Сведения об авторах / Information about authors

<b>Голиков Сергей Павлович</b>	канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрооборудования судов и автоматизации производства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 golosaa@mail.ru
Golikov Sergey Pavlovich	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Ships Electrical Equipment and Production Automation Kerch State Marine Technological University 82 Ordzhonikidze str., Kerch, Republic of Crimea, 298309 golosaa@mail.ru
<b>Сметюх Надежда Павловна</b>	канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 nadya.s.2011@yandex.com
Smetyukh Nadezhda Pavlovna	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 nadya.s.2011@yandex.com

#### 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

<b>Повалей Николай Сергеевич</b>	курсант 3 курса морского факультета специальности «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 kolapovalej@gmail.com
Povaley Nikolay Sergeevich	3rd year cadet of the Maritime Faculty of the specialty "Operation of marine electrical equipment and automation equipment" Kerch State Marine Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 kolapovalej@gmail.com

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

УДК 62-192

Клименко Н.П., Брицкий В.О., Шишик С.А.

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СУДОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ИСПЫТАНИЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ РЕЖИМАХ**

**Аннотация.** В статье приведена методика последовательного накопления информации о технологических факторах и их влиянии на ресурс однотипных объектов, а также построение соответствующих математических моделей, которые позволяют ограничить задачу ускоренных испытаний оценкой влияния на долговечность только тех конструктивных и технологических особенностей объекта, которые отличают его от аналогов-предшественников. Такой подход позволяет уменьшить степень случайности (рассеивание) результатов испытаний и за счет контроля технологических параметров у испытываемых образцов обойтись значительно меньшим объемом испытаний. При проведении испытаний нового объекта и его аналога каждая пара образцов испытывается при определенном значении форсирующего параметра. Форсирующий параметр при испытаниях варьируется на нескольких уровнях. Диапазон этих изменений позволяет обеспечивать физическое подобие потери работоспособности на стенде и в реальных условиях. Результатом таких многоуровневых испытаний являются попарно соответствующие друг другу (по режиму нагружения) средние наработки до отказа новых объектов и аналогов.

**Ключевые слова:** надежность, судовые технические средства, прогнозирование надежности, распределение вероятностей, комбинированный режим испытания.

Klimenko N.P., Britskii V.O., Shishik S.A.

**RELIABILITY OF SHIP MECHANISMS IS CALCULATED BASED ON THE  
RESULTS OF TESTS IN COMBINED MODES**

**Abstract.** The article presents a method for the consistent accumulation of information about technological factors and their impact on the resource of similar objects, as well as the construction of appropriate mathematical models that allow us to limit the task of accelerated tests to assessing the impact on durability of only those structural and technological features of the object that distinguish it from its predecessor analogues. This approach makes it possible to reduce the degree of randomness (dispersion) of test results and, by controlling the technological parameters of the tested samples, to do with a significantly smaller volume of tests. When testing a new object and its analogue, each pair of samples is tested at a certain value of the forcing parameter. The boost parameter varies at several levels during testing. The range of these changes makes it possible to provide a physical similarity of the loss of performance on the stand and in real conditions. The result of such multi-level tests is the average operating time to failure of new facilities and analogues corresponding to each other in pairs (according to the loading mode).

**Keywords:** reliability, ship technical means, reliability prediction, probability distribution, combined test mode.

**Введение.** При испытаниях элементов машин в комбинированных режимах нагружения может возникать ситуация, когда эксплуатационный режим за ограниченный период испытаний оказывает заметное (устойчиво фиксируемое) повреждающее воздействие только на малую часть образцов, имеющих пониженную сопротивляемость воспроизводимому виду повреждения (выносливость, износостойкость и т.д.). При этом повреждающий эффект ввиду его малости и ограниченного количества испытанных элементов может в среднем не проявляться. Тогда прогнозируемый с помощью регрессионных моделей повреждаемости



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

средний эксплуатационный ресурс может оказаться практически неограниченным и поэтому долговечность следует оценивать с помощью гамма-процентных показателей. Такое положение особенно вероятно, если в ужесточенном режиме на стенде «доламываются» детали, которая эксплуатировалась до этого в рядовых условиях, где наработка известна, но характеристики реальной нагруженности не регистрировались и имели случайный характер. В этом случае меньший остаточный ресурс детали на стенде может быть следствием не только большей продолжительности ее эксплуатации, но и обусловлен более высокой эксплуатационной нагруженностью.

**Цель исследования.** Разработать способ оценивания надежности судовых механизмов, при использовании минимально необходимого количества образцов, и при этом, полученную оценку можно будет обоснованно использовать для оценивания показателей, при условии, что технологические факторы не выйдут за пределы интервала, в котором они находились при испытаниях.

**Материалы и методы исследования.** Статистические данные такого типа, полученные путем ускоренного доведения до усталостного разрушения на стенде однотипных деталей, выработавших перед этим в эксплуатации известную величину наработки, приведены в работе [1-3]. На заимствованном из этих работ рисунке 1 показаны результаты испытаний в виде точек, координатами которых являются:  $n_i$  – ресурс в циклах нагружения, выработанный деталью в эксплуатации;  $N_i$  – остаточный ресурс в циклах этой детали до разрушения на стенде. Ломаной линией показан тренд величины среднего остаточного ресурса, полученный методом «скользящей средней» и не выявивший какой-либо устойчивой тенденции в поведении величины этой средней. В этом случае целесообразно учитывать повреждаемость и оценивать гамма-процентный ресурс деталей по данным только о тех из них, которые имели наибольшую интенсивность повреждений.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Элементы с наибольшей интенсивностью повреждения (ЭНИП) могут быть отобраны с помощью следующего алгоритма:

В качестве первого ЭНИП принимают тот, у которого координата  $n_1 = n_{\min}$  из всех элементов испытанной выборки (точка 1 на рис. 1), а если таких элементов несколько, то из них выбирается тот, у которого координата  $N_1$  минимальна. После этого рассматриваемую выборку сокращают, удаляя из нее все элементы, у которых  $N_i \geq N_1$ .

В качестве второго ЭНИП принимают тот, у которого координата  $n_2$  минимальна среди всех элементов сокращенной выборки (точка 2 на рис. 1). При наличии нескольких таких элементов вторым ЭНИП принимается из них тот, у которого минимальна координата  $N$ . Далее выборка опять сокращается путем удаления из нее тех элементов, у которых  $N_i \geq N_2$ .

Третий и последующие ЭНИП отбираются аналогично, причем у последнего ЭНИП координата  $N = N_{\min}$ .

После отбора всех ЭНИП их координаты используются для оценки параметров линейной или нелинейной регрессионной модели повреждаемости и прогнозирования величины гамма-процентного ресурса.

Данные о четырех ЭНИП в условиях рассматриваемого примера приведены в табл. 1. Линейная регрессионная модель повреждаемости, построенная по этим данным, имеет вид

$$\frac{n}{47,33 \cdot 10^3} + \frac{N}{18,39 \cdot 10^3} = 1.$$

Следовательно, оценка с помощью линейной модели гамма-процентного эксплуатационного ресурса испытывавшейся детали составляет  $n_\gamma = 47,33$  тыс. циклов, причем соответствующая вероятность безотказной работы  $\gamma = \frac{(38 - 4)}{38} \approx 0,9$ .

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

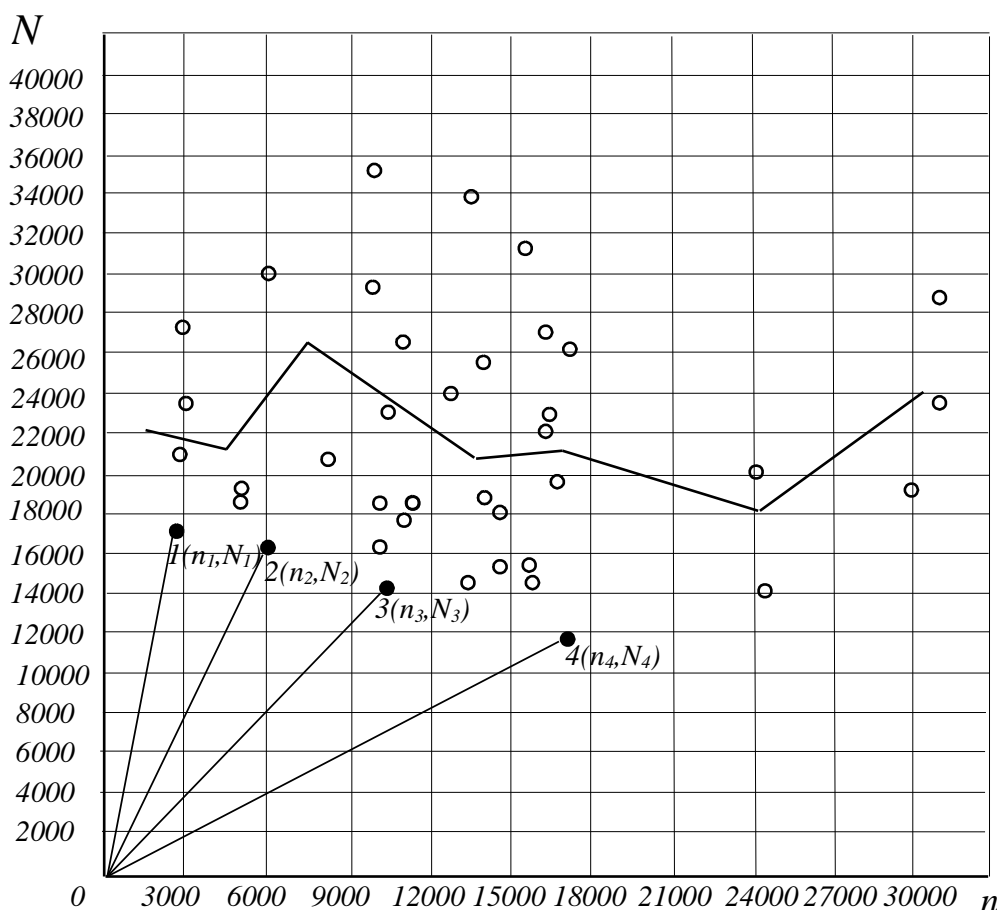


Рисунок 1 – Данные о результатах испытаний в комбинированных режимах

Таблица 1 – Данные о результатах испытаний элементов с наибольшей интенсивностью повреждения для построения линейной регрессионной модели

№ пп	$n_i$ , тыс.цикл.	$N_i$ , тыс.цикл.	$n_i^2$	$N_i^2$	$n_i N_i$
1	2,65	17,17	7,0225	294,8089	45,5005
2	6,00	16,33	36,00	266,6689	97,98
3	10,38	14,33	107,7444	205,3489	148,7454
4	17,19	11,67	295,4961	136,1889	200,6073
$\Sigma$	36,22	59,5	446,263	903,0156	492,8332

При небольшом числе испытанных в комбинированных режимах элементов точечные статистические оценки среднего или гамма-процентного ресурса, получаемые с помощью регрессионных моделей, не могут иметь высокую достоверность. Поэтому целесообразно проводить и интервальное оценивание указанных показателей. Это можно выполнить, используя статистическое моделирование, в частности бутстреп-моделирование.

Моделируя бутстреп-выборки попарно связанных результатов испытаний и оценивая по каждой из них параметры регрессионных моделей повреждаемости и величину эксплуатационного среднего ресурса, получают выборку моделируемых значений оцениваемого ресурса достаточно большого объема. По этой выборке путем отбрасывания заданного количества ее крайних членов определяют границы интервала, отвечающего заданной доверительной вероятности.

Стендовые ускоренные испытания опытных образцов, как правило, проводят при их ограниченном количестве (3-10 шт.) [2-6]. Режим таких испытаний по сравнению с условиями эксплуатации обычно значительно более стабилен. Важной составляющей планирования

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

испытаний является выбор необходимого количества образцов, обеспечивающего оценивание показателей с достаточной точностью. При определении минимально необходимого количества образцов для испытаний или наблюдений используется понятие доверительного интервала для оцениваемого показателя. Ширина доверительного интервала, отнесенная к точечной оценке показателя, определяет относительную ошибку  $\delta$  оценки.

В таблице 2 приведены данные о минимальном количестве образцов при оценке среднего ресурса для различных значений относительной ошибки, доверительной вероятности  $\beta$  и коэффициента вариации  $\nu$  ресурса.

При  $\nu \leq 0,3$  предполагается нормальное распределение ресурса, а при  $0,4 \leq \nu \leq 1$  – закон распределения Вейбулла. Предусмотрено, что все образцы испытываются до наступления предельного состояния.

Над чертой данные соответствуют  $\beta = 0,8$ , а под чертой -  $\beta = 0,9$ .

Таблица 2 – Минимальное количество испытываемых образцов

$\nu \backslash \delta$	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1
0,10	$\frac{3}{5}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{8}{13}$	$\frac{10}{15}$	$\frac{13}{32}$	$\frac{25}{50}$	$\frac{32}{65}$	$\frac{50}{100}$	$\frac{58}{125}$	$\frac{65}{150}$	$\frac{100}{200}$
0,20	$\frac{3}{3}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{5}{10}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{10}{20}$	$\frac{15}{32}$	$\frac{20}{40}$	$\frac{22}{44}$	$\frac{25}{50}$

Если количество испытанных образцов определено с помощью таблицы 2, то с доверительной вероятностью  $\beta$  можно гарантировать, что средний ресурс объекта  $T$  находится в интервале

$$\bar{T}(1 - \delta) < T < \bar{T}(1 + \delta),$$

где  $\bar{T}$  - точечная оценка среднего ресурса, полученная по результатам испытаний.

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что обеспечение практически приемлемой точности при оценивании средних показателей по выборке малого объема (не более 10-15 образцов) возможно только в случае, если коэффициент вариации ресурса будет достаточно мал ( $\nu \leq 0,3$ ).

Уменьшению относительного рассеивания результатов испытаний способствует проведение их в стабильном режиме, как по нагрузке, так и по другим повреждающим воздействиям. Во многих случаях бывают известны основные технологические факторы, например, начальный зазор в сопряжении, твердость и шероховатость поверхности, величина которых влияет на ресурс. Если изготовить или отобрать опытные образцы для испытаний, у которых значения таких факторов будут находиться в достаточно узких границах около номинальных значений, то это может обеспечить снижение разброса результатов испытаний по сравнению со случайно выбранными образцами [7-8].

Такой способ хотя и приведет к уменьшению необходимого количества образцов, однако полученную оценку можно будет обоснованно использовать только для оценивания показателей, типа средних при условии, что технологические факторы не выйдут за пределы интервала, в котором они находились при испытаниях. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Если влияние технологических факторов на ресурс количественно оценивается с помощью известной детерминированной функции случайных факторов  $\varphi_T(x_1, x_2, \dots, x_k)$ , то удобно считать, что параметр сопротивляемости модели [2] можно представить в виде произведения  $C_{\Pi} = \varphi_T(x_1, x_2, \dots, x_k) \cdot C_0$ , где  $C_0$  – случайная составляющая

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

сопротивляемости, не зависящая от факторов  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , распределение которой необходимо оценить путем испытаний. Тогда модель долговечности объекта при ускоренных испытаниях принимает вид

$$t_y = \varphi_T(x_1, x_2, \dots, x_k) \frac{C_o}{Q_y^m}. \quad (1)$$

Учитывая, что случайные величины  $\varphi_T$  и  $C_o$  независимы, средний ресурс объекта можно определить по формуле

$$T_y = \frac{m_\varphi \cdot m_o}{Q_y^m}, \quad (2)$$

где  $m_\varphi$  и  $m_o$  - математические ожидания (средние значения) величин  $\varphi_T$  и  $C_o$ .

Среднее квадратическое отклонение величины  $t_y$  определяется из выражения

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{Q_y^{2m}} (\sigma_\varphi^2 \cdot \sigma_o^2 + \sigma_\varphi^2 \cdot m_o^2 + \sigma_o^2 \cdot m_\varphi^2). \quad (3)$$

Прибавив к левой и правой частям выражения (формула 3) величину  $T_y^2$ , разделим левую часть на  $T_y^2$ , а правую с учетом (формула 2), на  $\frac{m_\varphi^2 \cdot m_o^2}{Q_y^{2m}}$  и получим выражение, связывающее коэффициенты вариации величин  $t_y$ ,  $\varphi_T$  и  $C_o$

$$v_t^2 + 1 = (v_\varphi^2 + 1)(v_o^2 + 1). \quad (4)$$

Рассмотрим величину  $\tau = \frac{t_y}{\varphi_T(x_1, x_2, \dots, x_k)}$ . Из (формула 1) следует, что коэффициент вариации  $v_\tau$  величины  $\tau$  равен  $v_o$  и, учитывая (формула 4), он может быть вычислен по формуле

$$v_\tau = \sqrt{\frac{v_t^2 - v_\varphi^2}{1 + v_\varphi^2}}. \quad (5)$$

Как видно из (формула 5)  $v_\tau < v_t$ . Так, например, если  $v_t = 0,5$ , а  $v_\varphi = 0,35$ , то  $v_\tau = 0,337$ . Поэтому для достоверной оценки среднего значения  $\tau$  потребуется меньшее количество испытаний, чем для непосредственного оценивания по реализациям ресурса  $t_{yi}$  с этой же точностью величины  $T_y$ . Из табл. 2 следует, что при относительной ошибке оценивания  $\delta = 0,1$  и доверительной вероятности  $\beta = 0,8$ , если  $v = 0,5$ , то минимальное количество образцов равно 25, а при  $v = 0,337$  достаточно испытать 11 образцов (при  $\delta = 0,2$  соответственно 8 и 4). Практически реализации величины  $\tau$  следует определять с учетом измеренных значений

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

факторов на каждом испытанном образце  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$  и ресурса образца  $t_{yi}$  как отношение

$$\tau_i = \frac{t_{yi}}{\varphi_T(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki})}. \text{ По значениям } \tau_i \text{ оцениваются параметры масштаба } a_\tau \text{ и формы } b_\tau$$

закона Вейбулла. Тогда у величины  $C_o$  параметр формы распределения Вейбулла  $b_o = b_\tau$ ,

$$\text{параметр масштаба } a_o = a_\tau \cdot Q_y^m \text{ и среднее значение } m_o = a_o \Gamma \left( 1 + \frac{1}{b_\tau} \right).$$

Оценивания этих показателей достаточно при сравнительных испытаниях различных вариантов однотипных изделий, у которых функция  $\varphi_T(x_1, x_2, \dots, x_k)$  одна и та же, причем такой способ совместного использования результатов контроля качества образцов и ресурсных испытаний позволяет повысить достоверность выводов [9-10].

Для оценки среднего ресурса и других показателей долговечности объекта необходимо знать вид и параметры распределений случайных технологических факторов  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , входящих в модель (формула 1), что позволяет практически при любых законах распределения факторов, эксплуатационной нагрузки  $Q$  и предела сопротивляемости  $C_o$  оценивать распределение ресурса методом статистического моделирования.

Последовательное накопление информации о технологических факторах и их влиянии на ресурс однотипных объектов, а также построение соответствующих математических моделей позволяет ограничить задачу ускоренных испытаний оценкой влияния на долговечность только тех конструктивных и технологических особенностей объекта, которые отличают его от аналогов-предшественников. Такой подход позволяет уменьшить степень случайности (рассеивание) результатов испытаний и за счет контроля технологических параметров у испытываемых образцов обойтись значительно меньшим объемом испытаний.

Рассмотрим возможности использования сравнительных стендовых испытаний нового объекта и его предшественника-аналога для ускоренной оценки надежности в эксплуатационных условиях.

Информативность сравнительных стендовых испытаний можно повысить, проводя их по многоуровневой программе. Для этого из совокупности параметров, определяющих работоспособность объекта выделяют тот, по которому удобно форсировать испытания (обычно для механических объектов это параметр нагружения). Требуется также, чтобы при изменении такого форсирующего испытания параметра ресурс объекта менялся монотонно: только возрастал или только убывал [10-12].

При проведении испытаний нового объекта и его аналога каждая пара образцов испытывается при определенном значении (на заданном уровне) форсирующего параметра. Таким образом, форсирующий параметр при испытаниях варьируется на нескольких уровнях. Диапазон этих изменений должен быть таким, чтобы обеспечивалось физическое подобие потери работоспособности на стенде и в реальных условиях.

Остальные параметры, влияющие на ресурс объектов данного типа в меньшей степени и контролируемые при испытаниях, варьируются на двух или более уровнях в пределах их возможного изменения в условиях эксплуатации. Существенно при этом, чтобы каждая пара образцов – новый объект и его аналог – испытывалась в режиме, при котором все общие для нового изделия и предшественника контролируемые и воспроизводимые на стенде параметры имели одинаковое значение.

Результатом таких многоуровневых испытаний являются попарно соответствующие друг другу (по режиму нагружения) средние наработки до отказа новых объектов и аналогов. По этим данным известными методами может быть получена регрессионная зависимость между ресурсом нового объекта  $\tau_n$  и его аналога-предшественника  $t_n$ , являющаяся функцией перехода

$$\tau_n = \varphi(t_n).$$

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

Наличие линейной регрессионной зависимости между ресурсами объектов на стенде вида

$$\tau_{ni} = A \cdot t_{ni} \quad (6)$$

позволяет с помощью коэффициента перехода  $A$  от ресурса объекта-аналога к ресурсу нового изделия прогнозировать долговечность последнего в эксплуатационных условиях [7-9].

Если  $\tau_{ni}$  – значения среднего ресурса при испытаниях нового объекта на  $i$ -ом уровне форсирующего параметра, а  $t_{ni}$  – соответствующие по режиму испытаний значения среднего ресурса его аналога-предшественника, то по этим данным можно оценить методом наименьших квадратов значение коэффициента перехода  $A$  с помощью формулы

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{ni} \cdot t_{ni}}{\sum_{i=1}^n t_{ni}^2}, \quad (7)$$

где  $n$  – число уровней форсирующего параметра.

Учитывая, что  $n$  ограничено, целесообразно оценить доверительные границы для коэффициента перехода. Это можно сделать, используя известные рекомендации для определения доверительных границ коэффициента линейной регрессии, который и является в данном случае коэффициентом перехода.

Доверительный интервал определяется выражением

$$A_{\min}^{\max} = A \pm t_p \cdot S_A, \quad (8)$$

где  $t_p$  – квантиль распределения Стьюдента, соответствующая доверительной вероятности  $p$  и числу степеней свободы  $k = n - 2$ ;

$S_A$  – статистическая оценка среднего квадратического отклонения коэффициента регрессии  $A$ , определяемая как

$$S_A = \sqrt{\frac{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \delta_i^2}{\sum_{i=1}^n (t_{ni} - \bar{t}_{ni})^2}}, \quad (9)$$

где  $\delta_i = \tau_{ni} - A \cdot t_{ni}$ ;  $\bar{t}_{ni} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ni}$ .

Как следует из выражения (формула 9), доверительный интервал для коэффициента перехода  $A$  будет тем уже, чем больше интервал изменения ресурса  $t_{ni}$  относительно среднего значения  $\bar{t}_{ni}$ . Увеличению этого интервала способствует проведение сравнительных испытаний в достаточно широком диапазоне изменения форсирующего параметра, т.е. по многоуровневой программе.

**Выводы.** Таким образом, проведение многоуровневых испытаний при том же числе испытываемых образцов нового объекта позволяет повысить точность оценки коэффициента перехода по сравнению с испытаниями на одном уровне форсирующего параметра.

Определив по результатам сравнительных стендовых испытаний нового объекта и его аналога-предшественника функцию или коэффициент перехода, можем использовать их для

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

ускоренной оценки показателей надежности нового изделия в эксплуатационных условиях. Для этого требуются определенные по эксплуатационным данным показатели надежности предшественника.

Список использованной литературы:

1. *Алдошин Г.Т.* Теория линейных и нелинейных колебаний : учебное пособие. СПб.: Лань, 2013, 311 с.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Т.5: Проектный анализ надежности / Под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1988, 316 с.
3. *Коренев Б.Г.* Некоторые задачи теории упругости и теплопроводности, решаемые в бесселевых функциях. М.: Физматгиз, 1960, 459 с.
4. *Ивановская А.В., Богатырева Е.В.* Исследование динамических процессов при работе неводоВыборочного комплекса // Инновационные технологии в науке и образовании ИТНО-2015: сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию ДГТУ. Г. Ростов-на-Дону – п. Дивноморское, 7-10 сентября 2015. С. 198-203.
5. *Анилович В.Я., Гринченко А.С., Клименко Н.П.* Способ оценки надёжности системы по выборочным данным о надёжности элементов // Новые решения в современных технологиях: сб. науч. тр. / Вестник ХГПУ. Харьков, 1999. Вып. №66. С.102-106.
6. *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. 192с.
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.
8. *Половко А. М., Гуров С. В.* Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
9. *Коренев Б.Г., Смирнов А.Ф.* Справочник проектировщика. Динамический расчёт специальных инженерных сооружений и конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 466 с.
10. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
11. *Головченко В.П.* Возможности использования распределения Вейбулла в качестве универсальной модели аппроксимации // Труды ГосНИИГА. 1988. №279. С. 91-98.
12. *Те А. М.* Судовые вспомогательные механизмы, системы и устройства: учеб. пособие. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. 208 с.

References:

1. Aldoshin G.T. *Teoriya linejnyh i nelinejnyh kolebanij* [Theory of linear and nonlinear oscillations]. SPb.: Lan', 2013, 311 p.
2. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: Spravochnik: V 10 t. T.5: Proektnyj analiz nadezhnosti.* [Reliability and efficiency in engineering: Handbook: In 10 v. Vol. 5: Design analysis of reliability]. Pod red. V.I. Patrusheva i A.I. Rembezy. M.: Mashinostroenie, 1988, 316 p.
3. Korenev B.G. *Nekotorye zadachi teorii uprugosti i teploprovodnosti, reshaemye v besselevykh funkciyah* [Some problems of the theory of elasticity and thermal conductivity solved in Bessel functions]. M.: Fizmatgiz, 1960, 459 p.
4. Ivanovskaya A.V., Bogatyreva E.V. *Issledovanie dinamicheskikh processov pri rabote nevodovyborochnogo kompleksa.* [The study of dynamic processes during the operation of the seine sampling complex]. *Innovacionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii ITNO-2015* [Innovative technologies in science and education ITNO-2015] *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 85-letiyu DGTU.* G. Rostov-na-Donu – p. Divnomorskoe, 7-10 sentyabrya 2015, pp. 198-203.
5. Anilovich V.Ya., Grinchenko A.S., Klimenko N.P. *Sposob ocenki nadyozhnosti sistemy po vyborochnym dannym o nadyozhnosti elementov* [A method for assessing the reliability of the system based on sample data on the reliability of elements]. *Novye resheniya v sovremennykh tekhnologiyah.*

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

- Sb. nauch. tr. Vestnik HGPU* [New solutions in modern technologies. Bulletin of KHSPU]. Har'kov, 1999, Вып. №66, pp.102-106.
6. 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 imeni admirala F.F.Ushakova, 2009, 192 p.
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. Tekhnicheskkiye nauki* [News of universities. The North Caucasus region. Technical sciences], 2018, no. 3, pp. 89-94. (In Russian).
8. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory] SPb, BHV-Peterburg, 2006, 704 p.
9. Korenev B.G., Smirnov A.F. *Spravochnik proektirovshchika. Dinamicheskij raschyot special'nyh inzhenernyh sooruzhenij i konstrukcij* [Designer's Handbook. Dynamic calculation of special engineering structures and structures]. M.: Strojizdat, 1988, 466 p.
10. Ventcel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya* [Probability theory and its engineering applications]. M.: Nauka, 1988, 480 p.
11. Golovchenko V.P. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya raspredeleniya Vejbul'la v kachestve universal'noj modeli approksimacii* [Possibilities of using the Weibull distribution as a universal approximation model]. *Trudy GosNIIGA* [Proceedings of GOSNIIG], 1988, №279, pp. 91-98.
12. Те А. М. *Sudovye vspomogatel'nye mekhanizmy, sistemy i ustrojstva* [Ship auxiliary mechanisms, systems and devices: studies. stipend] Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2013, 208 p.

### Сведения об авторах / Information about authors

<b>Клименко Николай Петрович</b>	канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 knp-878@mail.ru
Klimenko Nikolai Petrovich	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 knp-878@mail.ru
<b>Брицкий Вячеслав Олегович</b>	аспирант кафедры судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 seykgmtu@gmail.com
Britskii Vjacheslav Olegovich	post-graduate at the Department of marine power plants Kerch State Maritime Technological University 28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82 seykgmtu@gmail.com



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

<b>Шишик</b>	аспирант кафедры судовых энергетических установок
<b>Сергей</b>	Керченский государственный морской технологический
<b>Александрович</b>	университет
	298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
	seykgmtu@gmail.com
Shishik	post-graduate at the Department of marine power plants
Sergei	Kerch State Maritime Technological University
Aleksandrovich	28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
	seykgmtu@gmail.com

Конюков В.Л.

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛОВОГО АППАРАТА  
ТУРБОКОМПРЕССОРА СУДОВОГО ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ  
УТЯЖЕЛЕНИИ ВИНТОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы улучшения эксплуатационных параметров судового четырехтактного дизеля при изменении условий плавания, которые сопровождаются переходом на новый вид винтовых характеристик. С этой целью предлагается использовать регулируемый сопловой аппарат турбонаддувочного агрегата, диапазон изменения угла поворота лопаток которого ограничен условиями механической напряженности цилиндропоршневой группы и качеством продувки цилиндров. Выполнено сравнение полученных эксплуатационных характеристик с результатами ранее проведенных исследований исходного варианта (без использования регулируемого соплового аппарата) для принятого диапазона коэффициента утяжеления винтовой характеристики. Исследования показали, что эффективность регулируемого соплового аппарата увеличивается с понижением относительной мощности дизеля для всего исследованного диапазона коэффициента утяжеления винтовой характеристики. что воздействие на параметры турбокомпрессора поворотом лопаток РСА позволяет существенно улучшить ряд основных эксплуатационных параметров дизеля на режимах долевых нагрузок. При этом, прежде всего, снижается удельный эффективный расход топлива, повышается коэффициент избытка воздуха при сгорании топлива, уменьшается температура газа по циклу, понижаются показатели тепловой напряженности цилиндропоршневой группы. Однако при этом, увеличивается максимальное давление цикла, что свидетельствует о некотором повышении механической напряженности.  
**Ключевые слова:** дизель, регулируемый сопловой аппарат, турбокомпрессор, эксплуатационные параметры, винтовая характеристика, коэффициент утяжеления, тепловая и механическая напряженность.

Konyukov V.L.

**ANALYSIS OF THE OPERATIONAL PARAMETERS OF A MARINE  
FOUR-STROKE DIESEL ENGINE WHEN CHANGING  
THE SCREW CHARACTERISTICS.**

**Abstract.** The paper considers the issues of improving the operational parameters of a marine four-stroke diesel engine under changing sailing conditions, which are accompanied by a transition to a new type of screw characteristics. For this purpose, it is proposed to use an adjustable nozzle apparatus of the turbo supercharger, the range of change in the angle of rotation of the blades of which is limited by the conditions of mechanical stress of the cylinder piston group and the quality of cylinder purging. Comparison of the obtained performance characteristics with the results of previously conducted studies of the initial variant (without the use of adjustable nozzle apparatus) for the adopted range of the screw characteristic weighting coefficient has been performed. The studies have shown that the efficiency of the adjustable nozzle apparatus increases with the decrease in the relative power of the diesel engine for the whole range of the screw characteristic weighting coefficient studied. that the impact on the turbocharger parameters by rotating the PCA blades allows to significantly improve a number of the main operating parameters of the diesel engine at the modes of fractional loads. At that, first of all, the specific effective fuel consumption decreases, the excess air ratio at fuel combustion increases, the gas temperature along the cycle decreases, the indicators of thermal stress of cylinder-piston group decrease. However, at the same time, the maximum cycle pressure increases, which indicates some increase in mechanical tension.

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

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

**Введение.** Ранее выполненные исследования показали улучшение ряда эксплуатационных параметров судового дизеля путем использования регулируемого соплового аппарата (РСА) турбокомпрессора [1, 2]. Переход на новый вид винтовой характеристики, как правило, сопровождается изменением соотношения мощности и частоты вращения главного двигателя. В результате изменяются резервы воздействия на параметры наддувочного воздуха по причине достижения предельного состояния тепловой и механической напряженностью деталей цилиндропоршневой группы, а так же качеством продувки цилиндров [3, 4]. Увеличение давления наддува повышает потенциал располагаемой работы воздушного заряда цилиндра, что способствует повышению КПД дизеля. Современные дизели для транспортных морских судов проектируются на параметры, исключающие резерв мощности [5]. В связи с этим использование РСА ограничено режимами без превышения установленных параметров, определяющих тепловую и механическую напряженность.

Техническая документация судового дизеля содержит результаты тестовых заводских испытаний, полученные для номинальных характеристик потребителей механической энергии [6]. В процессе эксплуатации судна реальные характеристики потребителей механической энергии могут существенно отличаться от номинальных. Для главных судовых двигателей это, прежде всего, проявляется в утяжелении или облегчении винтовой характеристики [7].

**Целью исследований** является анализ эффективности регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора судового четырехтактного дизеля путем воздействия на параметры наддувочного воздуха для различных условий плавания.

**Материалы и методы исследования.** В качестве объекта исследований был выбран широко используемый на морских судах четырехтактный дизель 8L58/64 фирмы MAN-B&W, эксплуатационные характеристики которого приведены в работе [8]. Эксплуатационные параметры и характеристики дизеля определялись методом последовательных приближений с использованием программы «Diesel-K» [9]. Настройка программы проводилась по результатам тестовых испытаний данного двигателя [6]. Так же по результатам расчета номинального режима дизеля определялась характеристика турбины турбокомпрессора, которая использовалась для вычисления параметров турбины и давления наддува на режимах, отличных от номинального.

Изменение винтовой характеристики оценивалось коэффициентом его утяжеления, который определялся как отношение мощности измененной винтовой характеристики к мощности номинальной винтовой характеристики, соответствующих одной и той же частоте вращения

$$\bar{c} = \frac{N_e}{N_{en}} = \frac{c}{c_n}. \quad (1)$$

Современные транспортные суда работают в широком диапазоне условий плавания: проход узкостей, мелководье, ледовая обстановка, штормовые условия, изменение состояния корпуса и движителя и др. С целью полного учета всех возможных режимов эксплуатации коэффициент  $\bar{c}$  принимался в диапазоне 0,25÷3,6, а относительная мощность  $\bar{N}_e$  при этом изменялась в пределах 0,25÷1,0. Методика обработки результатов исследований подробно изложена в работе [10].

Угол поворота лопаток РСА определялся из соотношения эффективных площадей проходного сечения турбины исходного варианта и варианта после предельно допустимого поворота лопаток в предположении, что процесс расширения газа в турбине идет по условной политропе с показателем политропного процесса « $n$ ». Следует отметить, что параметры исходного варианта дополнительно обозначены индексом «0».

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

$$\theta = \alpha_{10} - \arcsin \left[ \sin \alpha_{10} \frac{G}{G_0} \left( \frac{p_{t0}}{p_t} \right)^{\frac{n-1}{n}} \sqrt{\frac{T_t}{T_{t0}}} \sqrt{\frac{1 - \left( \frac{p_{z0}}{p_{t0}} \right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left( \frac{p_z}{p_t} \right)^{\frac{k-1}{k}}}} \right]. \quad (2)$$

Поворот лопаток проводился только в сторону уменьшения угла их установки и только для режимов с  $p_z < p_{z0}$ , что соответствовало улучшению эксплуатационных параметров дизеля. Уменьшение угла установки лопаток РСА при их повороте приводит к увеличению  $p_z$  и уменьшению степени понижения давления на продувку цилиндров  $e_{пр} = p_k/p_t$ . В связи с этим поворот лопаток РСА для исследуемого режима прекращался при достижении  $p_z = p_{z0}$ , либо  $e_{пр} = 1,05$ .

**Результаты исследования и их обсуждение.** Изменение условий плавания судна с переходом на утяжеленную характеристику требует увеличения мощности для поддержания скорости хода. С целью исключения перегрузки дизеля снижают частоту вращения. При этом уменьшается расход рабочего тела и, как следствие, падает мощность турбины и компрессора [10]. Снижение давления в характерных точках цикла дизеля повышает резерв улучшения его эксплуатационных параметров поворотом лопаток РСА, так как одним из факторов, ограничивающих предельно допустимый поворот лопаток конкретного режима, является максимальное давление сгорания топлива  $p_z$ .

Влияние относительной мощности дизеля  $\bar{N}_e$  на предельно допустимый угол поворота лопаток РСА  $\theta$  для различных коэффициентов утяжеления винтовой характеристики представлено на рис. 1. Уменьшение нагрузки дизеля допускает больший диапазон угла поворота лопаток РСА. В области облегченных винтовых характеристик  $\bar{C} < 1,0$  имеет место выраженный экстремум соотношения  $\theta$  и  $\bar{C}$ , который с понижением относительной мощности дизеля смещается в область больших значений  $\theta$  (рис.2). При этом резерв управлением расходом воздуха с уменьшением  $\bar{N}_e$  повышается.

Уменьшение эффективной площади проходного сечения турбины вследствие поворота лопаток РСА приводит к увеличению ее мощности, что отражается на давлении наддува и расходе воздуха.

На рис.3 приведены зависимости относительной мощности турбины  $\bar{N}_T$ , соответствующей максимально допустимому значению  $\theta$  от  $\bar{C}$  для различной относительной мощности дизеля. Для исследованного диапазона  $\bar{C}$  с уменьшением  $\bar{N}_e$  относительное изменение  $\bar{N}_T$  снижается. При этом следует отметить, что большая доля изменений  $\bar{N}_T$  приходится на облегченные винтовые характеристики.

Влияние коэффициента утяжеления винтовой характеристики на давление наддува, соответствующее максимально допустимому значению  $\theta$ , для различной  $\bar{N}_e$  показано на рис.4. Здесь наибольшее изменение  $\bar{p}_k$  соответствует наименее нагруженному из рассмотренных режимов ( $\bar{N}_e = 0,25$ ), которое превысило 50%. Следует отметить, что большее изменение  $\bar{p}_k$  приходится на диапазон облегченных винтовых характеристик. В исходном варианте (без РСА) для исследованного диапазона изменения  $\bar{C}$  изменение  $\bar{p}_k$  не превысило 10% независимо от  $\bar{N}_e$  [10].

Относительное изменение расхода воздуха  $\bar{G}$ , при предельно допустимом повороте лопаток РСА, от коэффициента утяжеления винтовой характеристики  $\bar{C}$  для различной относительной мощности дизеля  $\bar{N}_e$  представлено на рис. 5. Расход воздуха относительно варианта без РСА с понижением  $\bar{N}_e$  увеличивается. Для  $\bar{N}_e = 0,5$  такое увеличение  $\bar{G}$  в среднем по диапазону изменения  $\bar{C}$  составило около 10% [10]. Следует отметить, что при уменьшении  $\bar{N}_e$  относительное изменение  $\bar{G}$  от  $\bar{C}$  снижается, что свидетельствует о повышении влияния угла поворота лопаток РСА турбокомпрессора на эксплуатационные параметры дизеля.

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

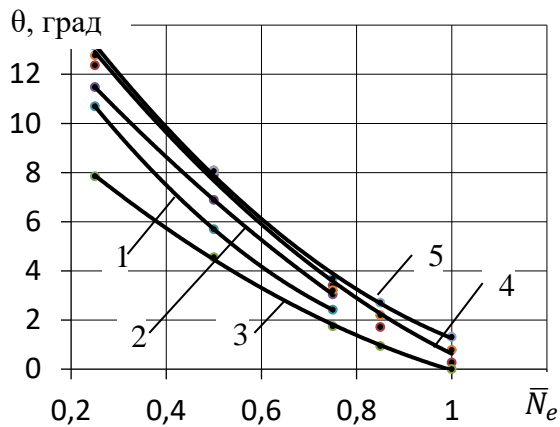


Рисунок 1 – Зависимость  $\theta$  от нагрузки дизеля для различных коэффициентов утяжеления: 1- $\bar{C}=0,5$ ; 2- $\bar{C}=0,75$ ; 3- $\bar{C}=1,0$ ; 4- $\bar{C} = 1,4$ ; 5- $\bar{C}=2,0$

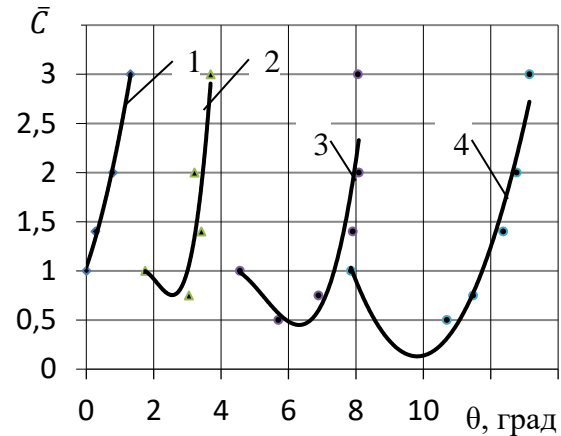


Рисунок 2 – Связь между  $\theta$  и  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

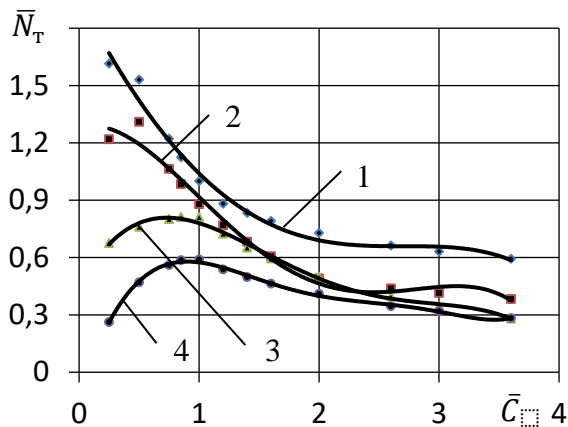


Рисунок 3 – Зависимости относительного изменения  $\bar{N}_T$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

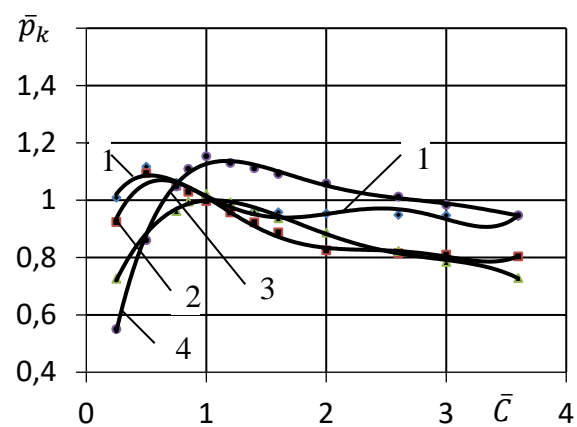


Рисунок 4 – Зависимости относительного изменения  $\bar{p}_k$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

Горение топлива при повышенном воздушном заряде цилиндра приводит к росту коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , изменение которого при предельно допустимом повороте лопаток РСА приведено на рис. 6. Здесь уменьшение  $\bar{N}_e$  приводит к существенному увеличению  $\alpha$ , которое для номинальной винтовой характеристики ( $\bar{C}=1,0$ ) превышает 50%. В варианте без РСА имело место уменьшение  $\alpha$  с понижением  $\bar{N}_e$ , которое для  $\bar{C}=1,0$  составило 20% [10].

Исследования показали, что утяжеление винтовой характеристики приводит к увеличению удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  как в варианте с РСА, так и в исходном варианте [10]. Управление расходом воздуха с использованием РСА проводилось на режимах долевых нагрузок дизеля ( $\bar{N}_e < 1$ ) для диапазона, исключающего превышение  $p_z$  значения, установленного для номинальной его нагрузки. Зависимости относительного изменения  $\bar{g}_e$ , соответствующее максимально допустимому  $\theta$ , от  $\bar{C}$  для различной относительной мощности дизеля приведены на рис.7. Использование РСА позволяет существенно снизить  $g_e$ , так для номинальной винтовой характеристики ( $\bar{C}=1$ ) при  $\bar{N}_e=0,5$   $g_e$  снижается на 4,5% по сравнению с исходным вариантом, а при  $\bar{N}_e=0,25$  такое снижение составило 10%. С повышением  $\bar{C}$  снижение  $g_e$  при использовании РСА увеличивается.

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

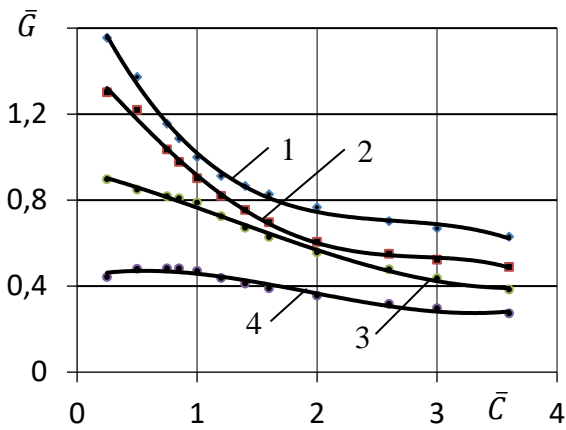


Рисунок 5 – Зависимости относительного изменения  $\bar{G}$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

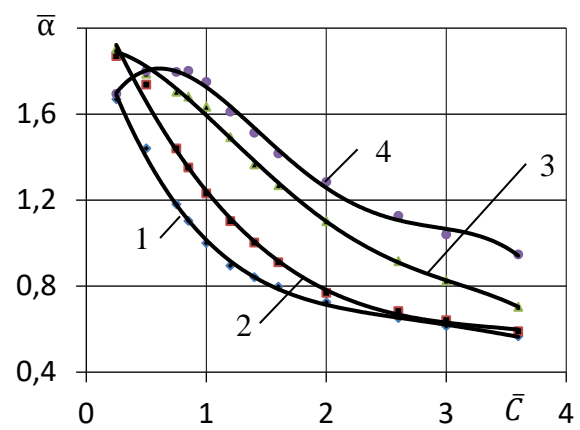


Рисунок 6 – Зависимости относительного изменения  $\bar{\alpha}$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

На рис. 8 приведены зависимости относительного изменения  $\bar{g}_e$ , так же соответствующие максимально допустимому значению  $\theta$ , от  $\bar{N}_e$  для различных коэффициентов утяжеления винтовой характеристики. Увеличение  $\bar{C}$  смещает минимальное значение  $\bar{g}_e$  в область меньших величин  $\bar{N}_e$ , это потребует дополнительных исследований по определению оптимального угла опережения подачи топлива при использовании РСА турбокомпрессора.

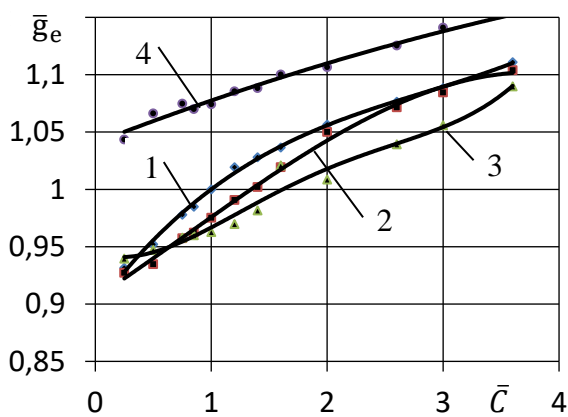


Рисунок 7 – Зависимости относительного изменения  $\bar{g}_e$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

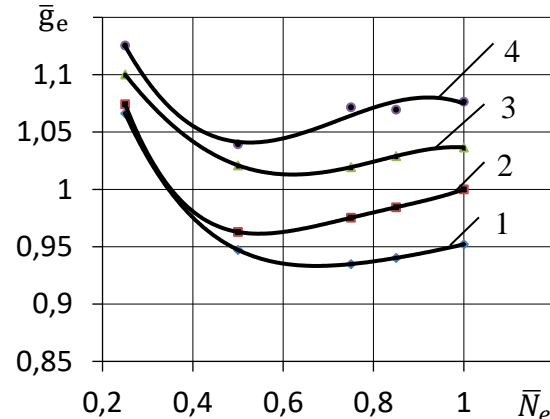


Рисунок 8 – Зависимости относительного изменения  $\bar{g}_e$  от  $\bar{N}_e$  для различных коэффициентов утяжеления: 1- $\bar{C}=0,5$ ; 2- $\bar{C}=1,0$ ; 3- $\bar{C}=1,6$ ; 4- $\bar{C}=2,6$

Изменение коэффициента избытка воздуха при сгорании топлива, прежде всего, влияет температуру газа в характерных точках цикла. Влияние  $\bar{C}$  на максимальную температуру цикла  $T_z$  и температуру газа в конце процесса расширения в цилиндре  $T_b$ , соответствующих максимально допустимому повороту лопаток РСА, показано, соответственно, на рис. 9 и рис. 10. Для номинальной винтовой характеристики ( $\bar{C}=1$ ) при  $\bar{N}_e=0,5$  имело место снижение  $T_z$  на 7%, а при  $\bar{N}_e=0,25$   $T_z$  повысилась на 2%. В исходном варианте (без РСА) для таких же условий максимальная температура цикла только увеличивалась, соответственно на 8% и 20%. В то же время, с уменьшением относительной мощности дизеля имело место существенное снижение  $T_b$ . Для номинальной винтовой характеристики ( $\bar{C}=1$ ) при  $\bar{N}_e=0,5$  снижение  $T_b$  составило 27%, а при  $\bar{N}_e=0,25$   $T_b$  уменьшилась на 19%. В исходном варианте (без РСА) для таких же условий

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

температура  $T_b$  снизилась, соответственно, на 5% и 0%.

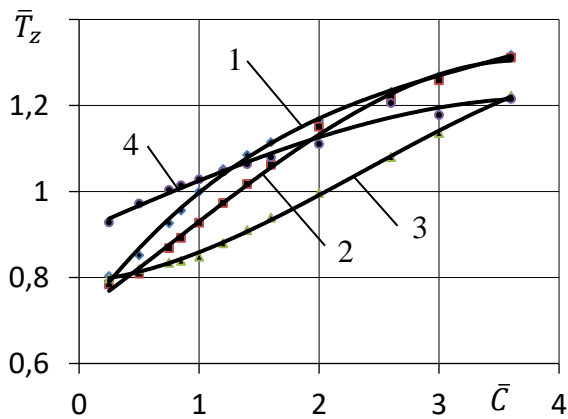


Рисунок 9 – Зависимости относительного изменения  $\bar{T}_z$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

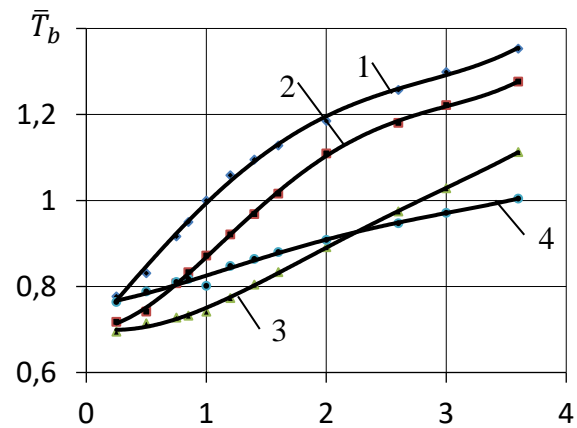


Рисунок 10 – Зависимости относительного изменения  $\bar{T}_b$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

Для оценки теплонапряженности поршня  $K_{\Pi}$  и втулки цилиндра  $K_c$  использованы критерии, полученные на основе гидродинамической теории теплопередачи и экспериментальных данных [11]. Зависимости относительного изменения критерия теплонапряженности поршня  $K_{\Pi}$  и критерия теплонапряженности втулки цилиндра  $K_c$ , соответствующих предельно допустимым углам поворота лопаток РСА, от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля представлены на рис. 11 и рис. 12. Увеличение коэффициента утяжеления винтовой характеристики приводит к существенному повышению  $K_{\Pi}$ , в то время как  $K_c$  изменяется менее интенсивно и в диапазоне облегченных винтовых характеристик наблюдается его снижение. Если сравнивать с исходным вариантом, то снижение  $\bar{N}_e$  в варианте с РСА приводит к более интенсивному уменьшению этих критериев: для  $K_{\Pi}$  это снижение превышает 10%, а для  $K_c$ , соответственно, 100%.

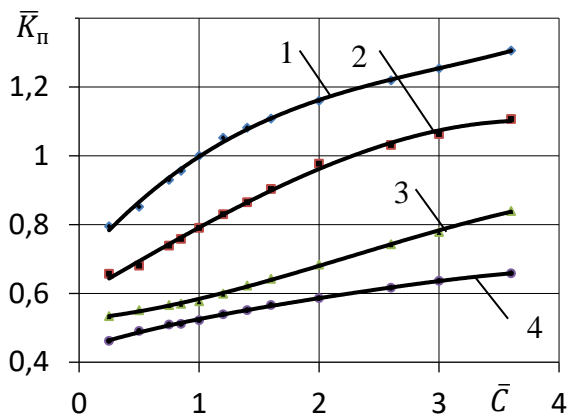


Рисунок 11 – Зависимости относительного изменения  $\bar{K}_{\Pi}$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

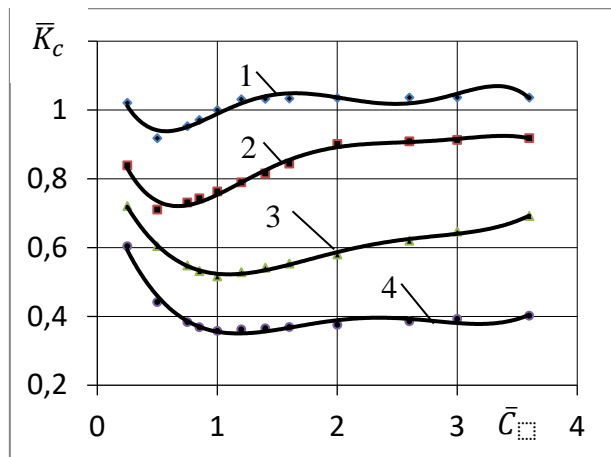


Рисунок 12 – Зависимости относительного изменения  $\bar{K}_c$  от  $\bar{C}$  для различной нагрузки дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$

**Выводы.** Анализ эффективности регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора судового четырехтактного дизеля выполнен для широкого диапазона изменения коэффициента утяжеления винтовой характеристики и различной относительной мощности

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

дизеля. При этом поворот лопаток РСА использовался только для режимов долевых нагрузок и ограничивался достижением максимальным давлением цикла значения, установленного для номинального режима, а также принятой степенью понижения давления при продувке цилиндров.

Установлено, что диапазон управления расходом воздуха дизеля с помощью РСА в области утяжеленных винтовых характеристик ограничен  $p_{z0}$ , а для облегченных винтовых характеристик принятой степенью понижения давления при продувке цилиндров.

Сравнение полученных эксплуатационных характеристик с результатами исходного варианта (без РСА) для исследованного диапазона коэффициента утяжеления винтовой характеристики показало, что воздействие на параметры турбокомпрессора поворотом лопаток РСА позволяет существенно улучшить ряд основных эксплуатационных параметров дизеля на режимах долевых нагрузок. Прежде всего, снижается удельный эффективный расход топлива, повышается коэффициент избытка воздуха при сгорании топлива, уменьшается температура газа по циклу, понижаются показатели тепловой напряженности цилиндропоршневой группы. Однако при этом, увеличивается максимальное давление цикла, что свидетельствует о некотором повышении механической напряженности.

Результаты работы будут полезны для совершенствования проектирования и эксплуатации судовых дизелей.

### Список использованной литературы

1. How does Variable Turbine Geometry Work. [Электронный ресурс]. Режим доступа к статье: <http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-variable-turbine-geometry-work/>.
2. Байков Б.П., Бордуков В.Г., П.В. Иванов В.Г. Турбокомпрессоры для наддува дизелей: справочное пособие - Л.: Машиностроение, 1975.- 200с.
3. Turbocharger aftermarket Honeywell Garrett. Garrett variable geometry turbochargers [Text]: Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003.-32 p. (30e)
4. Конюков В.Л. Влияние коэффициента избытка воздуха при горении на показатели напряженности двухтактного дизеля в широком диапазоне режимов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. Астрахань, 2020. №3. – С. 54-61. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-54-63.
5. Кацман Ф.М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987 – 223 с.
6. Shop Test Protocol. Marine main engine 8 L 58/64. – Augsburg: MAN-B&W, 2006. – 27 p.
7. Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей. М.: Транспорт, 1990. 344 с.
8. Конюков В.Л. Улучшение эксплуатационных параметров четырехтактного дизеля, работающего по винтовой характеристике, путем использования регулируемого соплового аппарата турбокомпрессора при увеличении противодавления на выпуске // Вестник керченского государственного морского технологического университета. Керчь, 2022. Вып. 3. -С.73-89.
9. Свидетельство RU2022685277 Российская Федерация. Программа расчета параметров рабочего процесса дизеля с наддувом «Diesel-K»: программа для ЭВМ / А.Н. Горбенко. – Оpubл. 22.12.2022, Бюл. №1.
10. Конюков В.Л. Анализ эксплуатационных параметров судового четырехтактного дизеля при изменении винтовой характеристики. // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Керчь, 2023. Вып. 2. -С.54-63.
11. Возницкий И.В., Иванов Л.А. Предотвращение аварий судовых двигателей внутреннего сгорания. М.: Транспорт, 1971. – 191 с.

### References:

1. How does Variable Turbine Geometry Work. Available at: [http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-variable-turbine-geometry-work](http://paultan.org/archives/2006/08/16/how-does-variable-turbine-geometry-work/). (In English).



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

2. Baykov. B.P., Bordukov V.G., Ivanov P.V. *Turbokompressory dlya nadduva dizeley: spravochnoye posobiye* [Turbochargers for supercharging diesel engines: a reference guide]. L, Mashinostroyeniye. 1975, 200 p. (In Russian).
3. Turbocharger aftermarket Honeywell Garrett. Garrett variable geometry turbochargers [Text]: Cheshire: Honeywell U.K. LTD, 2003.-32 p. (30e). (In English).
4. Konyukov V.L. Vliyaniye koeffitsienta izbytko vozduha pri gorenii na pokazateli napryazhennosti dvuhtaktnogo dizelya v shirokom diapazone rezhimov [Analysis of the coefficient of excess air during combustion based on the fall rates of a two-stroke diesel engine in various modes]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser.: Marine engineering and technology], Astrakhan, 2020, no. 3, pp. 54-61. (In Russian). DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-54-63.
5. Katsman F.M. *Ekspluatatsiya propulsivnogo kompleksa morskogo sudna*. [Operation of a propulsive complex of a marine vessel]. M., Transport. 1987, 223 p. (In Russian)
6. *Shop Test Protocol. Marine main engine 8 L 58/64*, Augsburg: MAN-B&W, 2006, 27 p. (In English).
7. Kamkin S.V., Voznitsky I.V., Shmelev V.P. *Ekspluatatsiya sudovyh dizelej* [Operation of marine diesel engines]. M., Transport, 1990, 344 p. (In Russian).
8. Konyukov V.L. *Uluchsheniye ekspluatatsionnykh parametrov chetyrekhtaktnogo dizelya. rabotayushchego po vintovoy kharakteristike. putem ispolzovaniya reguliruyemogo soplovoogo apparata turbokompressora pri uvelichenii protivodavleniya na vypuske* [Improving the operational parameters of a four-stroke diesel engine operating according to the screw characteristic by using an adjustable turbocharger nozzle with an increase in the back pressure at the outlet]. // *Vestnik kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*. [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University], Kerch. 2022. Vyp. 3, pp.73-89. (In Russian)
9. Gorbenko A.N. *Programma rascheta parametrov rabocheho processa dizelya s nadduvom «Diesel-K»: programma dlya EVM* [Program for calculating the working process parameters of a supercharged diesel engine “Diesel-K”: computer program] Certificate RF RU2022685277, Publ. 12.22.2022, Bulletin no. 1. (In Russian).
10. Konyukov V.L. *Analiz ekspluatatsionnykh parametrov sudovogo chetyrekhtaktnogo dizelya pri izmenenii vintovoy kharakteristiki*. [Analysis of the operational parameters of a marine four-stroke diesel engine when changing the screw characteristics]. // *Vestnik kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*. [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University], Kerch, 2023. Vyp. 2, pp.54-63. (In Russian)
11. Voznickij I.V., Ivanov L.A. *Predotvrashchenie avarij sudovyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya*. [Prevention of accidents of 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@gmail.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@gmail.com

Попов В.В., Ивановская А.В.

### ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА СУДОВОГО ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** В работе исследуются судовые палубные грузоподъемные устройства. Для повышения надежности траловой лебедки рыбопромыслового судна была выбрана адаптивная система управления с обратной связью. С помощью адаптивной системы обратной связи по давлению нагрузки можно согласовывать давление и объемный расход в соответствии с требованиями потребителя. Неотъемлемым этапом создания новых конструкций гидравлических приводов судовых грузоподъемных устройств с устройством управления являются экспериментальные исследования, позволяющие определить рабочие характеристики указанных приводов и управляющих устройств при изменении их параметров. Приведены цели экспериментальных исследований, рассмотрены задачи, подлежащие решению, в соответствии с поставленной целью, разработана методика проведения экспериментальных исследований гидравлического привода судовой лебедки, приведена принципиальная схема экспериментального стенда. Данная установка может использоваться при исследовании адаптивных гидравлических приводов, работающих в особых условиях.

**Ключевые слова.** изменение нагружения, гидравлический привод, судовые палубные грузоподъемные устройства, системы адаптивного управления, гидросистема, управляющее устройство

Popov V.V., Ivanovskaya A.V.

### IMPROVING THE RELIABILITY OF THE HYDRAULIC DRIVE OF MARINE LIFTING EQUIPMENT

**Abstract.** The work examines shipboard deck lifting devices. To increase the reliability of the trawl winch of a fishing vessel, an adaptive feedback control system was selected. With the help of an adaptive load pressure feedback system, pressure and volume flow can be adjusted according to customer requirements. An integral stage in the creation of new designs of hydraulic drives for marine lifting devices with a control device is experimental research that allows us to determine the performance characteristics of these drives and control devices when their parameters change. The objectives of experimental research are given, the tasks to be solved in accordance with the set goal are considered, a methodology for conducting experimental studies of the hydraulic drive of a ship's winch is developed, a schematic diagram of an experimental stand is given. This installation can be used in the study of adaptive hydraulic drives operating under special conditions.

**Keywords.** the change of loading, hydraulic drive, ship's deck hoisting, adaptive control systems, hydraulic system, control device

**Введение.** Характерной особенностью грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна является работа в особых условиях, вызывающих нестационарные динамические нагрузки даже при установившихся режимах работы. На практике установлено, что реальный срок эксплуатации лебедки от заявленного времени наработки на отказ колеблется в пределах 40-80%. Проведенный анализ такого оборудования, показал, что траловые лебедки наиболее подвержены воздействию внешних нагрузок, что может приводить к существенному нарушению работоспособности палубных механизмов или к аварийным отказам. Поэтому дальнейшим направлением работы следует считать оценку и определение степени влияния основных конструктивных и технологических параметров, эксплуатационных факторов на ресурс элементов палубных механизмов, выявление «слабых» элементов, анализ причин отказов и поиск решений по повышению их долговечности [1-4].

Исследования, направленные на повышение надежности грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна предусматривают решение ряда вспомогательных задач, к которым

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

можно отнести определение оптимального вида их привода и разработке адаптивной системы управления.

**Целью исследования** является разработка метода повышения уровня надежности грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна.

**Материалы и методы исследования.** Гидравлические приводы предназначены для передачи силовых воздействий и мощностей с помощью статического давления жидкости. Реализация такой задачи осуществляется посредством гидросистем (рисунок 1), которые имеют широкое применение наряду с механическими, электрическими и пневматическими приводами.

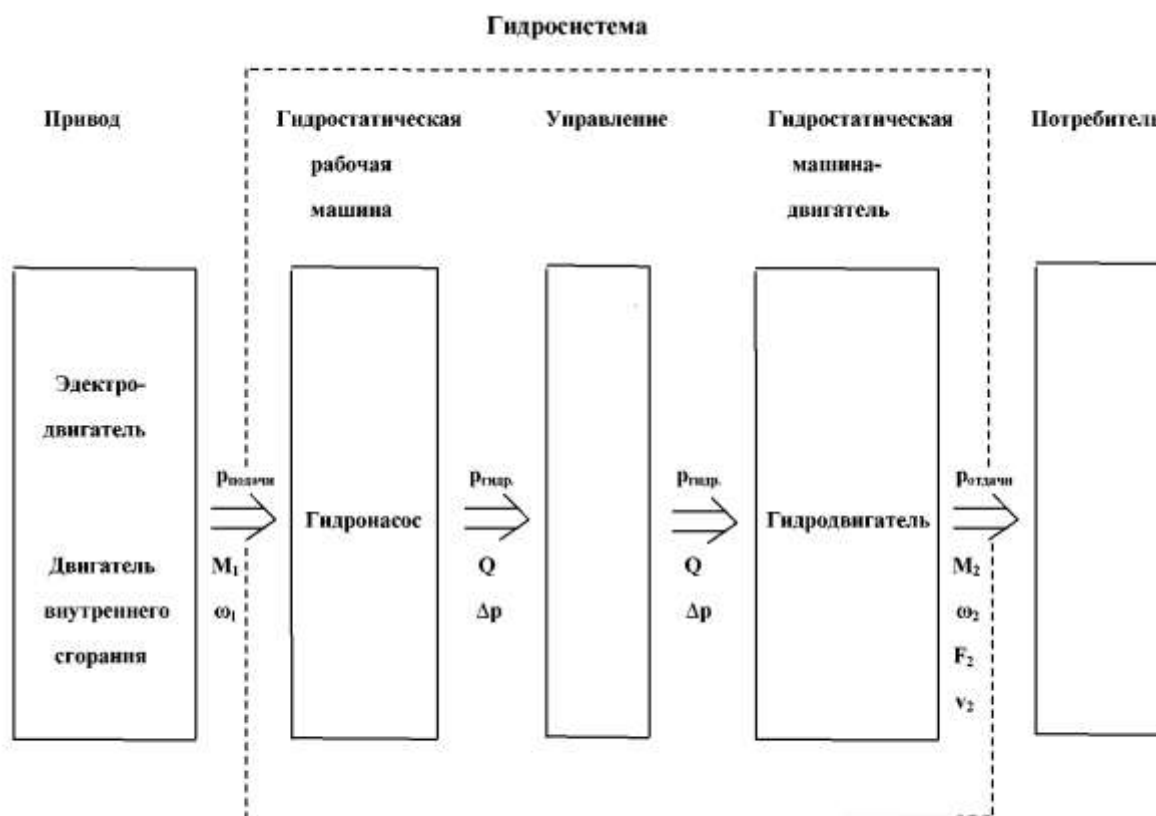


Рисунок 1 – Схематическое изображение гидросистемы

В гидростатической рабочей машине, приводимой в действие двигателем, преобразуется механическая энергия ( $M_1, \omega$ ) в гидравлическую энергию ( $Q, \Delta p$ ). Управление подводит гидравлическую энергию к гидростатической машине-двигателю, при этом отдельные компоненты управления оказывают воздействие на давление, направление и величину объемного расхода. Гидростатическая машина-двигатель преобразует гидравлическую энергию снова в механическую энергию, которая в зависимости от потребности подается к потребителю либо в виде вращательного ( $M_2, \omega_2$ ), либо прямолинейного или осциллирующего ( $F_2, v_2$ ) движения. Сюда относятся также вспомогательные элементы, как, например, трубопроводы, фильтры, теплообменники, гидроаккумуляторы и т.д., которые не изображены на рисунке 1.

Проведенные ранее исследования показали, что гидравлический привод грузоподъемного оборудования имеет более высокие динамические характеристики, чем электрический. Поэтому дальнейшие исследования посвящены гидравлическому приводу.

На первоначальном этапе проектирования гидравлического привода грузоподъемного оборудования следует собрать все данные, касающиеся последовательности движений вместе с указанием потребности в силе и моменте для каждого движения, а также требуемая динамика

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

и собственная частота. Отдельное внимание следует уделить определению контура, критерии которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Критерии для определения контура

		Вид контура		
		Открытый (дрессельно е управление)	Открытый (управление подачей насоса)	Замкнутый/по лузамкнутый (подпиточная система)
Рабочее состояни е	непрерывно		+	+
	периодически	+		
Высокая мощность				+
Рабочее давление	низкое давление (до 160 бар)	+		
	среднее давление (до 250 бар)	+	+	+
	высокое давление (до 450 бар)		+	+
Система	простая	+	+	
	комплексная		+	+
Высокая динамика регулирования		+	+	+
Ограниченные условия для встраивания (масляный резервуар)				+
Вид отвода мощности	Вращательное движение			+
	Линейное движение	+	+	
1) Только для тех случаев, когда в распоряжении более короткие линии для применения в системах с вторичным регулированием				

В связи с этим следует упомянуть, что на практике определение контура зависит от области применения системы и от опыта компетентного проектировщика, поскольку указанные в таблице 1 решения встречаются, как правило, в сочетаниях.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Применительно к системе привода траловой лебедки рыбопромыслового судна наиболее целесообразно применение системы управления посредством сопротивления с регулированием чувствительным к нагрузке и с насосом с регулируемым рабочим объемом [5-7] (рисунок 2).

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

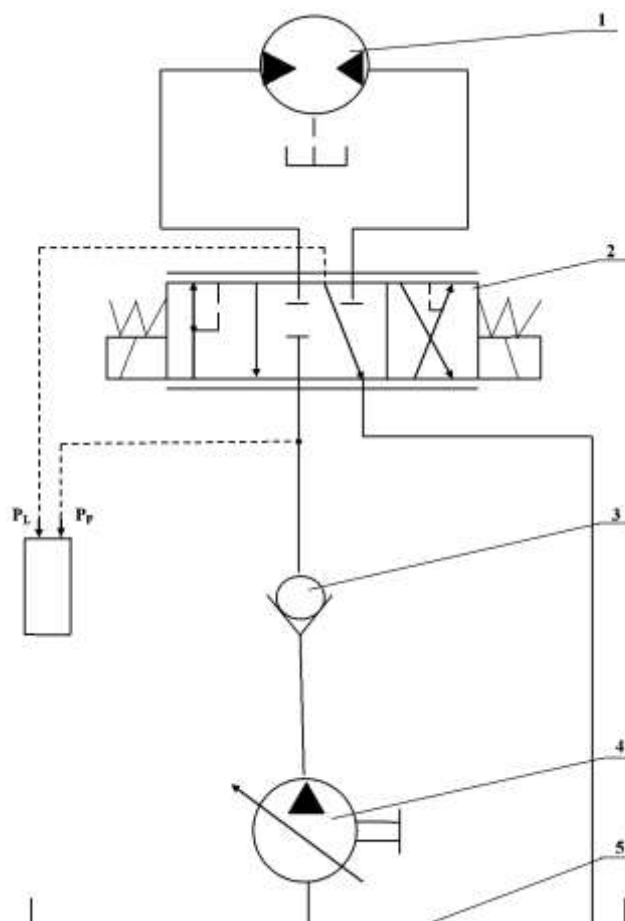


Рисунок 2 – Система управления посредством сопротивления с регулированием чувствительным к нагрузке, и с насосом с регулируемым рабочим объемом (закрытое среднее положение распределителя)

1 – гидромотор, 2 - дросселирующий гидрораспределитель, 3 – обратный клапан без пружины, 4 – регулируемый насос, 5 – бак

С помощью адаптивной системы обратной связи по давлению нагрузки можно согласовывать давление и объемный расход с требованиями потребителя. В распоряжение предоставляется только незначительно большее количество гидравлической мощности, чем это требуется для индивидуальных различных потребителей для экономии энергии. Такое управление работает очень чувствительно к регулировке и почти не зависит от давления нагрузки, что является удобным при обслуживании [8-10].

Для подтверждения целесообразности применения данного метода повышения надежности необходимо провести экспериментальные исследования, позволяющие определить рабочие характеристики исследуемого привода и устройств управления при изменении их параметров, являются одним из необходимых этапов создания новых конструкций гидравлических приводов палубных грузоподъемных устройств.

Целью экспериментальных исследований является выяснение закономерностей которые могут повлиять на изменения параметров гидравлической системы судового грузового подъемного устройства на динамику гидропривода который чувствительный к нагружению, и управляющего устройства; определением адекватности математической модели гидропривода реальным физическим процессам, которые происходят в гидро-механической системе судового грузового подъемного оборудования; установление количественных показателей ошибок которые получены в результате экспериментального и аналитического исследований.

Следующие задачи подлежат решению, в соответствии с поставленной целью, при исследованиях экспериментального характера гидропривода и управляющего устройства:

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

1) изучить влияние, которое оказывает инерционная нагрузка гидропривода и звенья подвижные палубной грузовой лебёдки судовой на динамику переходных неустановившихся процессов запуска гидравлического агрегата приводного;

2) выяснить как на время переходного неустановившегося процесса и его характер влияет изменение объема полостей нагнетающей гидравлической магистрали;

3) выяснить как на динамику переходного неустановившегося процесса пуска гидравлического привода влияет крутильная жесткость барабанного органа:

4) для использования в теоретических исследованиях найти показатель коэффициента податливости гидравлической системы привода барабанного органа судовой лебёдки:

5) определить если ли возможность применения математической модели гидропривода траловой лебёдки, который чувствителен к нагружению, для проведения расчётов на базе анализа по сравнению теоретических и экспериментальных исследований.

Для решения этих задач был собран экспериментальный стенд, имеющий следующие технические характеристики (табл. 2, табл. 3).

Таблица 2 – Технические характеристики экспериментального гидравлического привода, чувствительного к нагрузке

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Номинальный перепад давления на гидромоторе, МПа	15
2	Номинальные затраты, м <sup>3</sup> /с	0,6·10 <sup>-3</sup>
3	Номинальная мощность гидродвигателя, кВт	7
4	Передаточное число передаточного механизма	5,5
5	Габаритные размеры:	
	длина, м	0,7
	диаметр, м	0,5

Таблица 3 – Технические характеристики управляющего устройства

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Проход условный, мм	16
2	Давление (на входе), МПа:	
	номинальное	21
	максимальное	26
	минимальное	1,1
3	Давление перерегулирования (максимальное), МПа	4,5
4	Регулирующий диапазон давления, МПа	3-26
5	Рабочей жидкости расходы, л/мин	
	номинальный	90
	максимальный	110
	минимальный	4
6	Герметичность внутренняя, см <sup>3</sup> /мин, не более	400
7	Величина перерегулирования по давлению (при случайном увеличении издержек), %	3...5

Проведение экспериментальных исследований гидравлического привода траловой лебёдки и устройства управления следует производить в следующей последовательности:

- подготовка стенда для проведения экспериментальных исследований;
- проведение экспериментов;
- определение необходимых зависимостей;
- обработка полученных данных и определение их точности;

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

- представление результатов экспериментальных исследований посредством иллюстративных материалов.

Для подготовки стендов к экспериментальным исследованиям необходимо выполнить следующий комплекс работ:

1) монтаж на станине стенда исследуемого образца гидравлического привода траловой лебёдки, чувствительного к изменению нагрузки, промежуточного вала с установленным на нем зубчатым колесом и ведущим шкивом, нагрузочного устройства с установленным на валу ведущим шкивом;

2) присоединение полостей объектов исследований к гидрологиям насосной станции;

3) проверка функционирования объектов исследований:

- прохождение рабочей жидкости по гидрологиям, предусмотренным схемой;

- характера и величины перемещения выходных звеньев;

- регулирование потока и давления рабочей жидкости. Проверка проводится в два этапа: первый – в начале исследований при минимальном давлении; второй – после проверки герметичности при минимальном и максимальном давлении.

4) проверка прочности, наружной и внутренней герметичности гидросистем;

5) монтаж датчиков давления на изучаемом образце гидравлического привода конвейера, чувствительного к нагрузке, датчиков на измерительной скобе нагрузочного устройства, а также датчика перемещения исходного звена;

6) подготовка измерительно-регистрирующей аппаратуры, вывод необходимых параметров на шлейфовый осциллограф, установка необходимых коэффициентов усиления;

7) настройка гидравлического привода барабана судовой лебёдки, чувствительного к изменению нагрузки, на разные режимы и проведение пробных записей пуска с целью определения наиболее рациональной временной развертки осциллограмм.

За счёт изменения дисков, нагружающих неодинаковым весом, которые крепятся на выходные валы ведомого и ведущего шкивов, и имитируют изменение инерционной нагрузки, определяется, какое оказывают влияние параметры механической системы на динамику гидропривода барабана лебёдки, которая чувствительна к нагружению. Объём полостей нагнетательной магистрали определялся по изменению объёма пружинного гидроаккумулятора. Жесткость крутящей системы определяется по изменению величины элементов связи гибкой. Влияние характера нагрузки механической системы на динамику гидропривода определяется путем подачи усиленных управляемых ступенчатых и трапецеидальных сигналов от специального электрического устройства.

Для экспериментальной проверки влияния параметров гидросистемы с устройством управления проверяемый параметр в выполняемом эксперименте изменяется, а значения остальных параметров принимаются базовыми.

Экспериментальное оборудование состоит из стенда, содержащего насосную станцию и установленную на раме приводную часть исследуемого объекта, а также комплекс измерительной и регистрирующей аппаратуры.

Для расширения функциональных возможностей насосная станция была модернизирована путем оснащения её панелью с гидроаппаратурой, в которой дополнительно установлены регулятор потока и манометры контроля высокого и низкого давления.

Принципиальная гидрокинематическая схема с датчиками контроля основных параметров на исследуемом объекте показана на рисунке 3, а ее общий вид – на рисунке 4.

В состав разработанной лабораторной установки входит насосная станция и приводная часть исследуемого объекта, установленная на раме, а также измерительная и регистрирующая аппаратура.

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

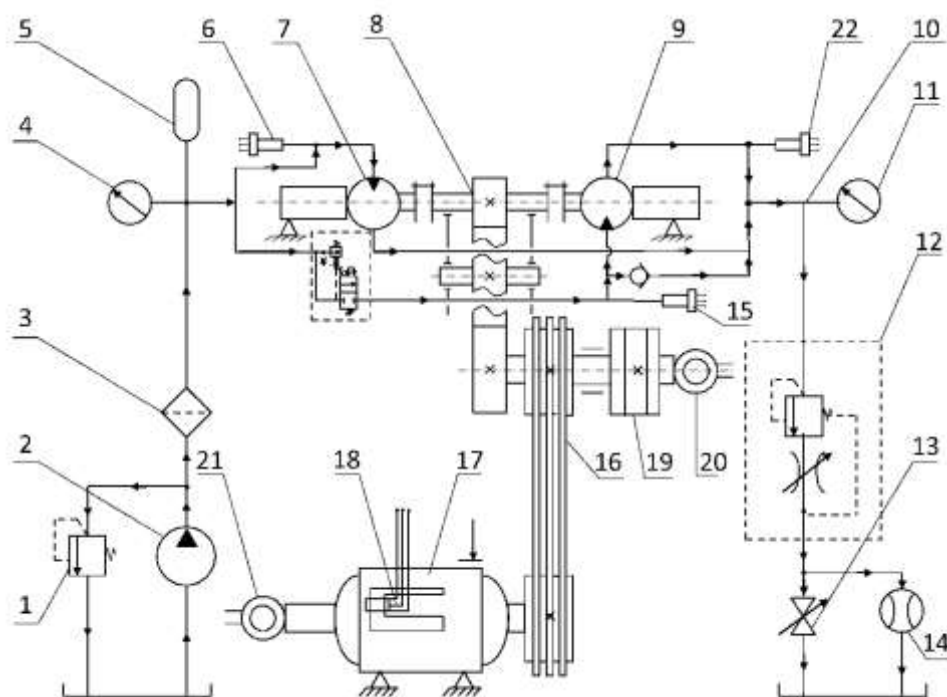


Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда для исследования гидравлического привода судовой лебёдки, чувствительного к изменению нагружения

1 – клапан предохранительный; 2 – насос; 3 – высокого давления фильтр; 4, 11 – манометр; 5 – гидроаккумулятор пружинный; 6, 15, 22 – тензометрический датчик давления; 7, 9 – гидромотор; 8 - приводное устройство; 10 - сливная гидролиния; 12 – регулятор потока; 13 – кран; 14 – расходомер; 16 - клиноременная передача; 17 - нагружающее устройство; 18 - тензометрический датчик крутящего момента; 19 - набор дисков; 20 - промежуточный вал; 21 - вал нагружающего устройства.



Рисунок 4 – Экспериментальный стенд (общий вид) используемый для проведения исследования гидропривода, чувствительного к изменению нагружения

Основные конструктивные параметры и техническая характеристика экспериментальной установки приведены в таблице 4.



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

Таблица 4 – Техническая характеристика и конструктивные параметры экспериментальной установки

Наименование параметра и его обозначение	Единица измерения	Численное значение
Номинальная подача	м <sup>3</sup> /с	0,2·10 <sup>-3</sup>
Номинальное давление	МПа	10
Максимальный объем гидроаккумулятора	м <sup>3</sup>	4·10 <sup>-3</sup>
Передаточные отношения: - передаточного механизма - ремённой передачи	- -	3 2
Масса: - малых дисков - больших дисков	кг кг	8 16
Диаметр: - малых дисков - больших дисков - шкивов	м м м	0,35 0,5 0,3
Количество: - малых дисков - больших дисков - шкивов	шт. шт. шт.	1 1 3

При проведении экспериментальных исследований необходимо измерение следующих параметров:

- давление на выходе и входе гидравлического мотора;
- частоты вращения валов: устройства нагрузочного и промежуточного;
- момент сопротивления движению, который создаётся устройством нагрузочным;
- расход жидкости рабочей, который потребляется гидравлическим агрегатом приводным;
- температура жидкости рабочей.

Для регистрации и измерения указанных параметров в лабораторных условиях применяется следующая аппаратура и приборы: тензометрический усилитель; осциллограф; выпрямители; набор сопротивлений; датчики давления, перемещения, числа оборотов и действующего момента; расходомерная емкость; манометры, термометры.

**Выводы.** С целью повышения уровня надежности грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна целесообразно применение гидравлического привода с системой управления посредством сопротивления с регулированием чувствительным к нагрузке и с насосом с регулируемым рабочим объемом. Такой привод имеет более высокие динамические характеристики и может быть рекомендован для подобного рода устройств.

### Список использованной литературы:

1. *Тё А.М.* Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств. Л. 2014. 86 с.
2. *Башуров Б.П., Скиба А.Н., Чебанов В.С.* Функциональная надежность и контроль технического состояния судовых вспомогательных механизмов: учебное пособие. Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2009. 192 с.
3. *Бабаков И.М.* Теория колебаний. М.: Наука, 1976. 592 с.
4. *Тимошенко С.П.* Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
5. *Нино В. П.* Диагностика технических средств на рыбопромысловых судах в процессе их эксплуатации // Рыб. хоз-во. 2014. № 4. С. 113–115.
6. *Половко А. М., Гуров С. В.* Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с

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

7. Carral J., Carral L., Lamas M., Rodríguez M. J. Fishing grounds' influence on trawler winch design // *Ocean Engineering*. 2015. V. 102. P. 136–145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
8. Ивановская А. В. Принципы моделирования привода судового грузоподъемного оборудования // *Вестник Керченского государственного морского технологического университета*. – 2023. – № 1. – С. 65-72.
9. Ivanovskaya A., Popov V., Bogatyreva E., Bidenko S. Development of complex mathematical model of hydraulic drive, sensitive to the loading variations // *Vibroengineering Procedia*. 2019. V. 25. P. 171–176. DOI: 10.21595/vp.2019.20797.
10. Ивановская А. В., Жуков В. А., Попов В. В. Исследование динамики приводов грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна // *Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова*. 2021. Т. 13. № 6. С. 875–886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.

### References:

1. Tyoh A.M. *Ekspluatatsiya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov, sistem i ustrojstv* [Operation of ship auxiliary mechanisms, systems and devices]. Leningrad, 2014, 86 p. (In Russian).
2. Bashurov B.P., Skiba A.N., Chebanov V.S. *Funktsional'naya nadezhnost' i kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov* [Functional reliability and control of the technical condition of ship'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. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Fluctuations in engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1985, 472 p. (In Russian).
5. Nino V. P. Diagnostika tekhnicheskikh sredstv na rybopromyslovykh sudakh v protsesse ikh ekspluatatsii [Diagnostics of technical means on fishing vessels during their operation]. *Rybnoe khoziaistvo*, 2014, no. 4, pp. 113-115. (In Russian).
6. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006. 704 p. (In Russian).
7. Carral J., Carral L., Lamas M., Rodríguez M. J. Fishing grounds' influence on trawler winch design. *Ocean Engineering*, 2015, vol. 102, pp. 136-145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055. (In English).
8. Ivanovskaya, A.V. *Principy modelirovaniya privoda sudovogo gruzopod'emnogo oborudovaniya* [Principles of modeling the drive of marine lifting equipment]. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. – 2023. – No. 1. – pp. 65-72. (In Russian).
9. Ivanovskaya A., Popov V., Bogatyreva E., Bidenko S. Development of complex mathematical model of hydraulic drive, sensitive to the loading variations. *Vibroengineering Procedia*, 2019, vol. 25, pp. 171-176. DOI: 10.21595/vp.2019.20797. (In English).
10. Ivanovskaia A. V., Zhukov V. A., Popov V. V. Issledovanie dinamiki privodov gruzopod'emnykh ustrojstv rybopromyslovogo sudna [Studying dynamics of drives of load-lifting devices of fishing vessel]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 875-886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886. (In Russian).

### Сведения об авторах / Information about authors

**Попов  
Владимир  
Владимирович**

старший преподаватель кафедры судовых энергетических установок  
Керченский государственный морской технологический университет  
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82  
kamushburun@gmail.com

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

Popov  
Vladimir  
Vladimirovich Senior Lecturer of the Department of of marine power plants  
Kerch State Maritime Technological University  
298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonykydze Str., 82  
kamushburun@gmail.com

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

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

Конюков В.Л., Горбенко А.Н.

**СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УГЛА ОПЕРЕЖЕНИЯ ПОДАЧИ ТОПЛИВА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Аннотация.** В работе выполнен сравнительный анализ основных эксплуатационных параметров судового четырехтактного дизеля при его эксплуатации по винтовой и нагрузочной характеристикам в зависимости от угла опережения подачи топлива. В отличие от нагрузочной характеристики работа дизеля по винтовой характеристике сопровождается снижением частоты вращения при уменьшении мощности, что приводит к увеличению продолжительности цикла. При этом меняется соотношение продолжительности процесса горения цикловой подачи топлива и продолжительности рабочего цикла. В свою очередь, изменение угла опережения подачи топлива меняет параметры воздуха в момент впрыска топлива в цилиндр, что также отражается на скорости его сгорания. Приведенные факторы изменяют характеристики цикла и влияют на показатели экономичности и надежности дизеля. Исследования выполнены расчетно-теоретическим методом, получены количественные и качественные зависимости эксплуатационных параметров от угла опережения подачи топлива для винтовой и нагрузочной характеристик, дана их сравнительная оценка, определены режимы наиболее чувствительные к изменению угла опережения подачи топлива.

**Ключевые слова:** дизель, эксплуатационные параметры, угол опережения подачи топлива, винтовая характеристика, нагрузочная характеристика, тепловая и механическая напряженность.

Konyukov V.L., Gorbenko A.N.

**COMPARISON OF FOUR-STROKE DIESEL PARAMETERS WHEN CHANGING THE FUEL SUPPLY ADVANCE ANGLE UNDER VARIOUS OPERATING CONDITIONS**

**Abstract.** The work carried out the comparative analysis of the main operational parameters of a marine four-stroke diesel engine during its operation according to the propeller and load characteristics depending on the fuel supply advance angle. In contrast to the load characteristic, the diesel engine operation according to the propeller characteristic is accompanied by a decrease in rotation speed with a decrease in power, which leads to an increase in cycle duration. In this case, there is a change in the relationship between the combustion duration of the cyclic fuel supply and the operating cycle duration. In turn, the change in the fuel supply advance angle leads to the change in air parameters at moment of fuel injection into cylinder, which also affects the rate of its combustion. These factors change the cycle characteristics and affect the efficiency and reliability of the diesel engine. The research was carried out using a theoretical calculation method, quantitative and qualitative dependences of operational parameters on the fuel supply advance angle for propeller and load characteristics were obtained, and their comparative assessment was given. The modes most sensitive to changes in the fuel supply advance angle have been determined.

**Keywords:** diesel, operational parameters, fuel supply advance angle, propeller characteristics, load characteristics, thermal and mechanical stress.

**Введение.** Эффективность работы дизеля во многом зависит от качества сгорания топлива, которое определяется моментом его воспламенения и скоростью горения. Реальное сгорание топлива представляет собой сложный термохимический и газодинамический процесс, зависящий от множества факторов [1, 2]. Качество сгорания топлива зависит от его физико-химических свойств и соответствующей настройки топливной аппаратуры. Настройка топливной аппаратуры должна соответствовать технической документации на эксплуатацию

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

дизеля и, в первую очередь, повышать его надежность и экономичность [3, 4, 5]. В то же время на процесс горения топлива и, соответственно, эксплуатационные параметры двигателя влияет состояние воздушного заряда цилиндра [6]. Проведенные исследования влияния настройки топливной аппаратуры, в частности, угла опережения начала подачи топлива на эксплуатационные параметры судового четырехтактного дизеля, работающего по нагрузочной характеристике, выявили существенное изменение ряда основополагающих показателей [7]. Накопленный материал результатов исследований по влиянию особенностей работы элементов топливной аппаратуры на эксплуатационные показатели дизелей оставил открытыми вопросы изменения основных параметров при переходе с нагрузочной характеристики судового высокофорсированного по наддуву дизеля на винтовую характеристику для различных значений угла опережения начала подачи топлива [8, 9].

В отличие от нагрузочной характеристики работа дизеля по винтовой характеристике предполагает снижение частоты вращения с понижением мощности. При этом повышается продолжительность цикла, а время задержки воспламенения и скорость горения топлива изменяются менее интенсивно. Таким образом, воспламенение топлива после начала его впрыска должно происходить за меньший угол поворота коленчатого вала (ПКВ) и полное сгорание топлива будет соответствовать меньшему углу ПКВ. Такое изменение соотношений скорости сгорания топлива и скорости изменения угла ПКВ позволит увеличить степень повышения давления при сгорании и уменьшить степень предварительного расширения, что должно способствовать повышению экономичности дизеля. В то же время более раннее воспламенение топлива по углу ПКВ приводит к повышенным затратам механической энергии процесса сжатия. Для оценки особенностей настройки топливной аппаратуры при работе судового дизеля по винтовой и нагрузочной характеристике необходимы дополнительные исследования.

**Целью работы** является сравнительный анализ влияния угла опережения подачи топлива на эксплуатационные показатели судового четырехтактного высокофорсированного дизеля при работе по винтовой и нагрузочной характеристикам для широкого диапазона нагрузок.

**Материалы и методы исследования.** В качестве объекта исследований принят современный судовой высокофорсированный по наддуву четырехтактный дизель 8L58/64 фирмы MAN-B&W [10, 11]. Этот дизель широко используется на морских судах в качестве главного двигателя с электрической или механической передачей энергии движителю. Номинальные характеристики дизеля приведены в работе [7]. Исследования проводились расчетно-теоретическим способом с использованием программы расчета рабочего процесса дизеля «Diesel-K» [12]. В основу алгоритма этой программы положен широко известный теоретический метод анализа рабочего процесса на основе физической сути явлений в цилиндре дизеля, получивший название «метод Гриневецкого-Мазина». Результаты расчета сопоставлялись с результатами тестовых натурных испытаний данного дизеля, на основании чего проводилась настройка программы [11].

Исследования рабочих процессов для винтовой характеристики дизеля проводились в широком диапазоне нагрузок, при которых относительная мощность  $\bar{N}_e = N_e/N_{e0}$  изменялась от 1,0 до 0,25. Для каждого значения относительной мощности выполнялись расчеты при различных углах опережения подачи топлива  $\varphi_{оп}$ , который изменялся в диапазоне -8 до -28 град ПКВ до верхней мертвой точки (ВМТ). Следует отметить, что настроечное значение угла опережения подачи топлива составило  $\varphi_{оп0} = -10,5$  град ПКВ до ВМТ.

Анализ эксплуатационных параметров выполнялся с использованием относительных величин параметров, которые отнесены к номинальному значению и обобщенно определяются соотношениями:

$$\bar{B} = \frac{B}{B_0}, \quad (1)$$

где  $B$  - значение параметра или критерия, соответствующего текущему режиму работы;

$B_0$  – значение параметра или критерия, соответствующего номинальному режиму работы

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

дизеля.

Изменение  $\varphi_{оп}$  меняет параметры рабочего тела по циклу дизеля, что в первую очередь отражается на мощности турбины турбокомпрессора и, соответственно, на давлении наддува. В связи с этим давление наддува определялось методом последовательных приближений с использованием гидравлической характеристики турбины турбокомпрессора, построенной по результатам тестовых испытаний дизеля. Гидравлическая характеристика турбины представляет зависимость степени понижения давления в турбине  $e_T$  от расхода газа  $G_T$  и с достоверностью 0,9893 аппроксимируется выражением

$$e_T = 1,008 G_T + 0,9086. \quad (2)$$

Для проведения сравнительного анализа зависимости отдельных эксплуатационных параметров дизеля от  $\varphi_{оп}$  для нагрузочной характеристики заимствованы из работы [7].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на изменение параметров рабочего тела по циклу дизеля, является давление наддува [1]. Относительное изменение давления наддува  $p_k$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля приведено на рис. 1. В дальнейшем на диаграммах значения  $\varphi_{оп}$  представлены в градусах угла поворота коленчатого вала. Результаты исследований показали, что с увеличением абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  давление наддува снижается, при этом, с уменьшением нагрузки дизеля интенсивность снижения  $p_k$  падает. Для исследованного диапазона  $\varphi_{оп}$  при  $\bar{N}_e=1,0$  уменьшение  $p_k$  составило 10%, а при  $\bar{N}_e=0,5$  соответственно 5%, что характерно и для винтовой и для нагрузочной характеристик. Следует отметить, что изменение нагрузки дизеля вызывает большее изменение  $p_k$  для винтовой характеристики.

Одной из причин снижения  $p_k$  при увеличении абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  является уменьшение мощности турбины  $N_T$  турбокомпрессора. Относительное изменение  $N_T$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля показано на рис. 2. Интенсивность снижения  $N_T$  при повышении абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  уменьшается с понижением  $\bar{N}_e$ , но превышает интенсивность понижения  $p_k$ . Для исследованного диапазона  $\varphi_{оп}$  изменение  $N_T$  составило 19% при  $\bar{N}_e=1,0$  и 8% при  $\bar{N}_e=0,5$  как для винтовой так и для нагрузочной характеристики.

Мощность компрессора пропорциональна мощности турбины, которая расходуется на увеличение давления и расхода воздуха нагнетаемого в цилиндры дизеля. Повышение абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  приводит также к снижению расхода воздуха. На рис.3 представлено относительное изменение  $G$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля. С понижением относительной мощности дизеля интенсивность изменения  $G$  уменьшается.

Повышение абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  вызывает более раннее воспламенение топлива и повышение скорости его сгорания. Таким образом, окончание горения цикловой подачи топлива при этом соответствует меньшему углу поворота коленчатого вала относительно верхней мертвой точки и, соответственно уменьшенному объему камеры сгорания. Сгорание топлива в меньшем объеме приводит к увеличению максимального давления сгорания  $p_z$ . На рис. 4 приведены зависимости относительного изменения  $p_z$  от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля. Повышение абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  для исследованного диапазона вызывает существенное увеличение  $p_z$ , которое при  $\bar{N}_e=1,0$  составило 38% , а при  $\bar{N}_e=0,5$  соответственно 26% для винтовой характеристики и 20% для нагрузочной.

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

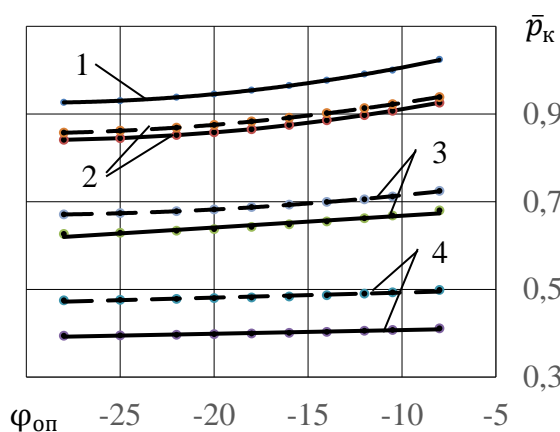


Рисунок 1 – Относительное изменение  $p_k$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$ .  
 ——— - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

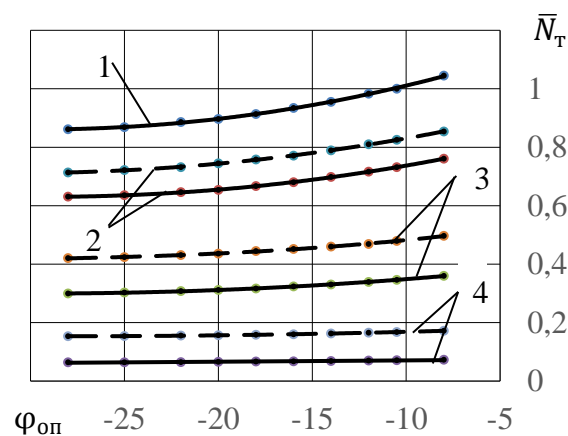


Рисунок 2 – Относительное изменение  $N_T$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$ .  
 ——— - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

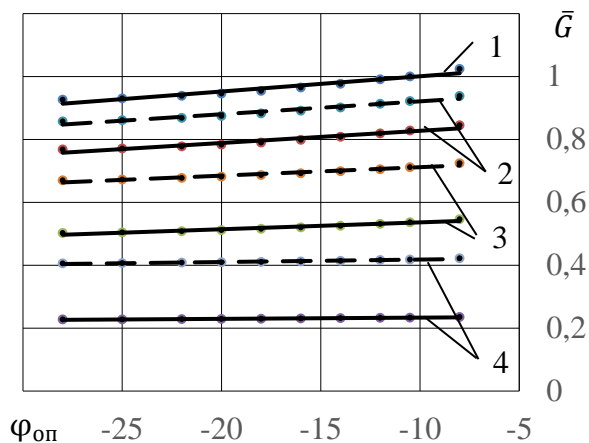


Рисунок 3 – Относительное изменение  $G$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$ .  
 ——— - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

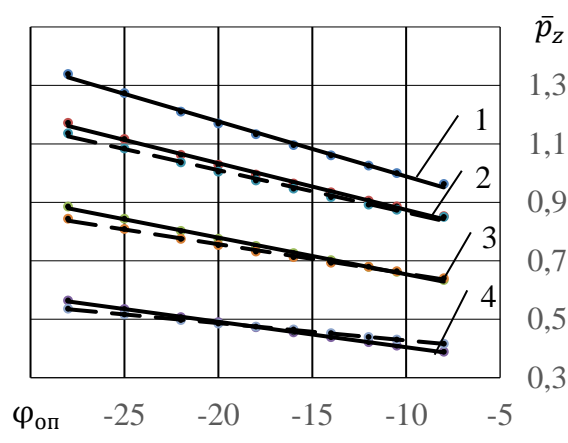


Рисунок 4 – Относительное изменение  $p_z$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$ .  
 ——— - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

Изменение соотношения расходов топлива и воздуха приводит к изменению коэффициента избытка воздуха при горении  $\alpha$ . Зависимости относительного изменения  $\alpha$  от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля и от  $\bar{N}_e$  для различных углов опережения подачи топлива представлены на рис.5 и рис.6. Из рисунков следует, что с увеличением абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  коэффициент избытка воздуха при горении уменьшается. Это соответствует зависимости изменения  $G$  от  $\varphi_{оп}$  (рис.3). В то же время, с уменьшением мощности  $\alpha$  понижается для винтовой характеристики и повышается для нагрузочной характеристики (рис.6). Снижение коэффициента избытка воздуха при горении приводит к повышению температуры газа по циклу дизеля, что негативно отражается на показателях его теплонапряженности, в то время как, повышение  $p_z$  свидетельствует об увеличении механической напряженности дизеля.

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

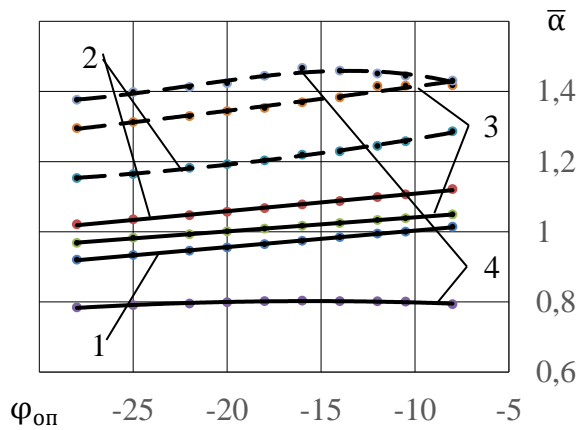


Рисунок 5 – Относительное изменение  $\alpha$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$ .

— - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

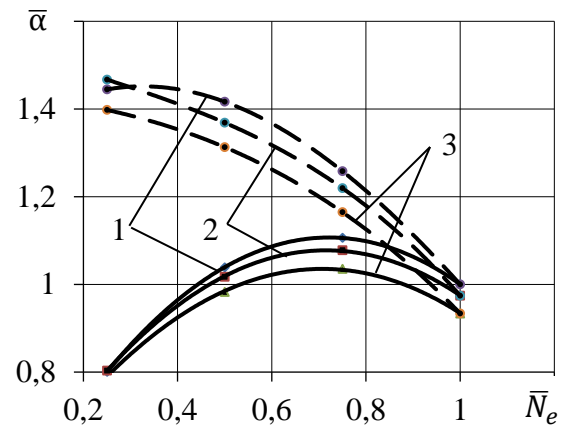


Рисунок 6 – Относительное изменение  $\alpha$  в зависимости от  $\bar{N}_e$  для различных углов опережения подачи топлива: 1- $\varphi_{оп}=-10,5$ ; 2- $\varphi_{оп}=-16$ ; 3- $\varphi_{оп}=-25$ .

— - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

Наиболее доступным параметром, косвенно определяющим тепловое состояние дизеля в целом и по цилиндрам в отдельности, является температура газа за цилиндром. На рис.7 представлены зависимости относительного изменения температуры газа за цилиндром с учетом перемешивания с продувочным воздухом  $T_t$ . Повышение абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  приводит к уменьшению  $T_t$ , что косвенно свидетельствует о снижении тепловой напряженности двигателя как для винтовой, так и для нагрузочной характеристики. Интенсивность изменения  $T_t$  практически не зависит ни от характеристики, ни от нагрузки дизеля и для исследованного диапазона изменения  $\varphi_{оп}$  температура газа за цилиндром при увеличении  $\varphi_{оп}$  снижается приблизительно на 5%. Изменение  $T_t$ , соответствовало характеру изменения температуры газа в конце процесса расширения в цилиндре  $T_b$ , которая также определялась в процессе исследований.

На рис. 8 представлены зависимости относительного изменения максимальной температуры цикла  $T_z$  от  $\varphi_{оп}$  для различной нагрузки дизеля. Здесь с увеличением абсолютного значения  $\varphi_{оп}$  имеет место существенное повышение  $T_z$ , которое для исследованного диапазона  $\varphi_{оп}$  и всех рассмотренных режимов превышает 10%, что соответствует характеру изменения  $\alpha$  (см. рис. 5). На основании такого изменения  $T_z$  можно сделать вывод, что с повышением абсолютного значения  $\varphi_{оп}$  увеличивается теплонапряженность цилиндропоршневой группы. В процессе проведенных исследований вычислялся удельный тепловой поток от газа к охлаждающей жидкости через стенки цилиндра, который с увеличением абсолютного значения  $\varphi_{оп}$  имел тенденцию к увеличению, но это изменение не превышало 5% для всех исследованных режимов.

Различный характер изменения  $T_z$  и  $T_t$  ( $T_b$ ) можно объяснить увеличением удельной работы газа в цилиндре при уменьшении его массы и повышенным теплоотводом в охлаждающую воду.

Повышение абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  приводит к снижению степени сжатия на момент впрыска топлива в цилиндр, в результате чего уменьшается температура воздуха, соответствующая этому моменту, и увеличивается время задержки воспламенения. Исследования показали, что для принятого диапазона повышения абсолютного значения  $\varphi_{оп}$  температура воздуха на момент впрыска топлива снизилась на 20% независимо от нагрузки и эксплуатационной характеристики дизеля. В то же время это сопровождалось существенным увеличением времени задержки воспламенения топлива, которое составило более 100%. Следует отметить, что для винтовой характеристики это увеличение было более интенсивным при снижении относительной мощности дизеля.



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

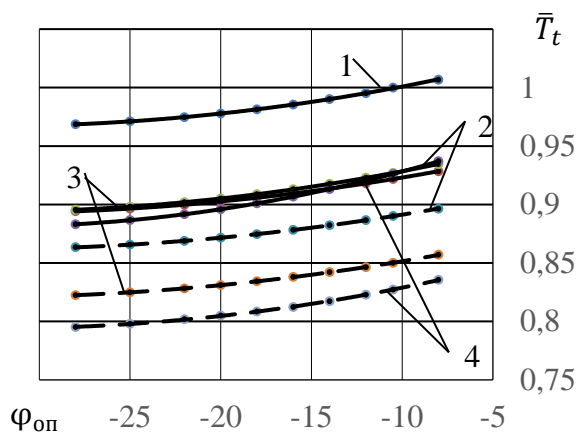


Рисунок 7 – Относительное изменение  $T_t$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$ .  
 ——— - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

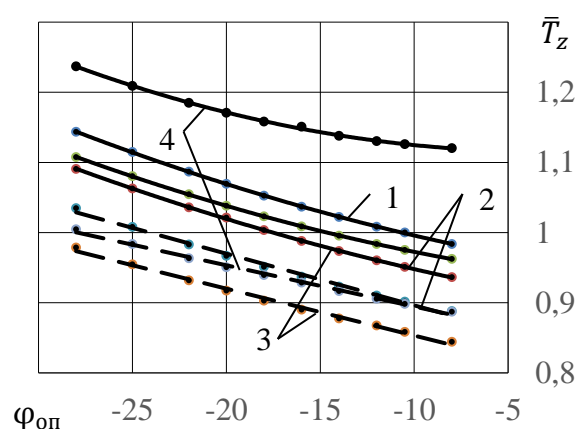


Рисунок 8 – Относительное изменение  $T_z$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$ .  
 ——— - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

С увеличением абсолютного значения  $\varphi_{оп}$  цикловая подача топлива сгорает в меньшем объеме камеры сгорания, что приводит к существенному увеличению степени повышения давления при горении топлива. Это увеличение для винтовой характеристики составило, приблизительно, 300% не зависимо от нагрузки дизеля, а для нагрузочной характеристики этот параметр увеличился в среднем на 250% и с уменьшением нагрузки интенсивность его изменения снизилась.

Изменение условий воспламенения и горения топлива, а также изменение затрат энергии на процесс сжатия рабочего тела влияет на экономичность дизеля. На рис. 9 представлены зависимости относительного изменения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля  $\bar{N}_e$ . Из рисунка следует, что для исследованного диапазона  $\varphi_{оп}$  изменение  $g_e$  составляет от 2% до 5%. С уменьшением нагрузки дизеля интенсивность изменения  $g_e$  повышается. При этом, оптимальное значение  $\varphi_{оп}$ , соответствующее минимальному  $g_e$ , с уменьшением нагрузки двигателя смещается в сторону больших абсолютных значений не зависимо от эксплуатационной характеристики. Оптимальные значения  $\varphi_{оп}$  для нагрузочной характеристики относительно винтовой характеристики смещены в сторону меньших абсолютных значений. На рис. 10 показаны зависимости относительного изменения  $g_e$  от нагрузки дизеля для различных  $\varphi_{оп}$ .

**Выводы.** Анализ результатов проведенных исследований показал, что ряд определяющих эксплуатационных параметров дизеля при изменении  $\varphi_{оп}$  существенно отличаются для винтовой и нагрузочной характеристики. Увеличение абсолютного значения  $\varphi_{оп}$  приводит к уменьшению коэффициента избытка воздуха при горении топлива  $\alpha$ . Для винтовой характеристики интенсивность изменения  $\alpha$  с уменьшением относительной мощности снижается, а для нагрузочной характеристики увеличивается. Уменьшение  $\alpha$  с повышением  $\varphi_{оп}$  может привести к увеличению показателей теплонапряженности двигателя.

Изменение угла опережения подачи топлива отражается на механической напряженности дизеля, что проявляется в изменении максимального давления цикла  $p_z$ . Повышение абсолютной величины  $\varphi_{оп}$  для исследованного диапазона вызывает существенное увеличение  $p_z$ , которое при  $\bar{N}_e=1,0$  составило 38%, а при  $\bar{N}_e=0,5$  соответственно 26% для винтовой характеристики и 20% для нагрузочной. Таким образом, дизель, работающий по винтовой характеристике, имеет большую вероятность перегрузки по механической и тепловой напряженности при увеличении  $\varphi_{оп}$ .

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

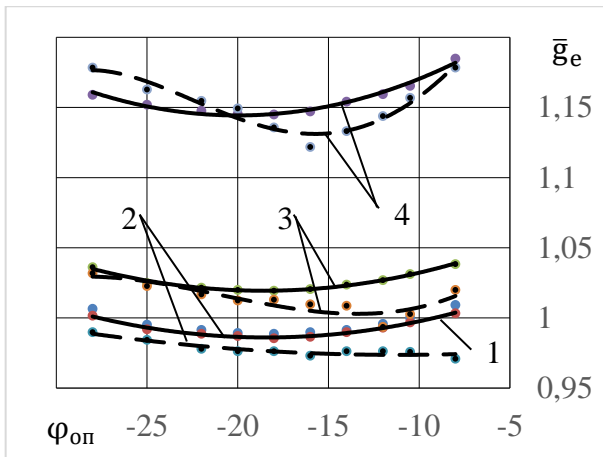


Рисунок 9 – Относительное изменение  $g_e$  в зависимости от  $\varphi_{оп}$  для различной относительной мощности дизеля: 1- $\bar{N}_e=1,0$ ; 2- $\bar{N}_e=0,75$ ; 3- $\bar{N}_e=0,5$ ; 4- $\bar{N}_e=0,25$ .  
 — - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

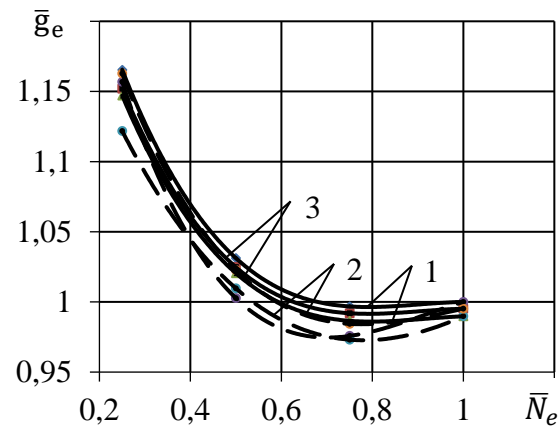


Рисунок 10 – Относительное изменение  $g_e$  в зависимости от  $N_e$  для различных углов опережения подачи топлива: 1- $\varphi_{оп}=-10,5$ ; 2- $\varphi_{оп}=-16$ ; 3- $\varphi_{оп}=-25$ .  
 — - винтовая характеристика;  
 - - - нагрузочная характеристика.

Оптимальное значение  $\varphi_{оп}$ , соответствующее минимальному значению  $g_e$ , с уменьшением нагрузки двигателя смещается в сторону больших абсолютных значений не зависимо от эксплуатационной характеристики. Оптимальные значения  $\varphi_{оп}$  для нагрузочной характеристики относительно винтовой характеристики смещены в сторону меньших абсолютных значений. Исследования показали, что для номинального режима ( $\bar{N}_e=1,0$ ) минимальное значение  $g_e$  соответствует  $\varphi_{оп}=-16$  град. ПКВ. Однако фирмой изготовителем был назначен конструктивный  $\varphi_{оп}=-10,5$  град. ПКВ, что, видимо, вызвано необходимостью снизить механическую напряженность ДВС до приемлемого уровня. При этом  $g_e$  увеличился на 1,1%, но величина  $p_z$  снизилось на 10%, что позволило существенно уменьшить механическую напряженность двигателя.

Результаты работы будут полезны для совершенствования проектирования и эксплуатации судовых дизелей.

### Список использованной литературы:

1. Камкин С.В., Возницкий И.В., Шмелев В.П. Эксплуатация судовых дизелей. М.: Транспорт, 1990. 344 с.
2. Самсонов В.И., Худов Н.И. Двигатели внутреннего сгорания. М.: Транспорт, 1990. 368 с.
3. Королев Н.И. Регулирование судовых дизелей. М.: Транспорт, 1983. 144 с.
4. Кузькин В.Г., Минько А.А. Регулировка дизелей промысловых судов. М.: Агропромиздат, 1988. 255 с.
5. Сероштан О.В. Повышение экономичности тракторного дизеля Д-240 путем оптимизации угла опережения впрыска топлива на частичных нагрузочных режимах: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.00.04 / Олег Валерьевич Сероштан. Великие Луки, 1999. 20 с.
6. Конюков В.Л. Влияние коэффициента избытка воздуха при горении на показатели напряженности двухтактного дизеля в широком диапазоне режимов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. Астрахань, 2020. №3. – С. 54-61. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-54-6.
7. Конюков В.Л., Горбенко А.Н. Влияние настройки топливной аппаратуры судового четырехтактного дизеля на его показатели для различных режимов работы. // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия «Морские технологии». 2023. № 2. С. 48-56. – Режим доступа: <https://www.mtjv.ru>.
8. Bueno A.V., Velásquez J.A., Milanez L.F. Internal combustion engine indicating measurements. In: Applied Measurement Systems. Prof. Zahurul Haq (Ed.), 2012, pp 23-44. Available at:

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

<https://pdfs.semanticscholar.org/1e41/2925077f37d272ab5a3228e50abf36aad10a.pdf> (accessed 01.11.2023).

9. Markov V.A. et al. Regulation of the fuel injection advance angle in a transport diesel engine // Journal of Physics: Conference Series. 2023. 2573 (2023) 012004. pp. 1-13. DOI: 10.1088/1742-6596/2573/1/012004.

10. MAN Energy Solution. *The power of our four-stroke engines and marine systems*. Available at: <https://www.man-es.com/marine/products/four-stroke-engines> (accessed 01.11.2023).

11. *Shop Test Protocol. Marine main engine 8 L 58/64*. – Augsburg: MAN-B&W, 2006. – 27 p.

12. Свидетельство RU2022685277 Российская Федерация. Программа расчета параметров рабочего процесса дизеля с наддувом «Diesel-K»: программа для ЭВМ / А.Н. Горбенко. – Оpubл. 22.12.2022, Бюл. №1.

### References:

1. Kamkin S.V., Voznitsky I.V., Shmelev V.P. *Ekspluatatsiya sudovykh dizelej* [Operation of marine diesel engines]. M., Transport, 1990, 344 p. (In Russian).

2. Samsonov V.I., Khudov N.I. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines]. M., Transport, 1990. 368 p. (In Russian).

3. Korolev N.I. *Regulirovanie sudovykh dizelej* [Regulation of marine diesel engines]. M., Transport, 1983, 144 p. (In Russian).

4. Kuzkin V.G., Minko A.A. *Regulirovka dizelej promyslovykh sudov* [Adjustment of diesel engines of fishing vessels]. M., Agropromizdat, 1988, 255 p. (In Russian).

5. Seroshtan O.V. *Povyshenie ekonomichnosti traktornogo dizelya D-240 putem optimizatsii ugla operezheniya vpryska topliva na chastichnykh nagruzochnykh rezhimakh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Increasing the efficiency of the D-240 tractor diesel engine by optimizing the fuel injection advance angle at partial load modes. Cand. tech. sciences diss. abstr.]. Velikiye Luki, 1999. 20 p. (In Russian).

6. Konyukov V.L. Vliyanie koeffitsienta izbytkha vozduha pri gorenii na pokazateli napryazhennosti dvuhstaktnogo dizelya v shirokom diapazone rezhimov [Analysis of the coefficient of excess air during combustion based on the fall rates of a two-stroke diesel engine in various modes]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser.: Marine engineering and technology], Astrakhan, 2020, no. 3, pp. 54-61. (In Russian). DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-54-63.

7. Konyukov V.L., Gorbenko A.N. Vliyanie nastrojki toplivnoj apparatury sudovogo chetyrekhtaktnogo dizelya na ego pokazateli dlya razlichnykh rezhimov raboty [Influence of setting the fuel equipment of a marine four-stroke diesel engine on its performance in various operating modes]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Morskie tekhnologii»* [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University. Series "Marine Technologies"], Kerch, 2023, no. 2, pp. 48-56. (In Russian). Available at: <https://www.mtjv.ru>.

8. Bueno A.V., Velazquez J.A., Milanés L.F. Internal combustion engine with measurement indication. In the book: *Applied measurement systems*. Prof. Zahurul Haq (ed.), 2012, pp. 23-44. (In English). Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/1e41/2925077f37d272ab5a3228e50abf36aad10a.pdf> (accessed 11/01/2023).

9. Markov V.A. and others. Regulation of the fuel injection advance angle in a transport diesel engine. *Physical Journal: Conference Series*, 2023, 2573 (2023) 012004, pp. 1-13. (In English). DOI: 10.1088/1742-6596/2573/1/012004.

10. MAN energy solution. *The power of our four-stroke engines and marine systems*. (In English). Available at: <https://www.man-es.com/marine/products/four-stroke-engines> (accessed 11/01/2023).

11. Factory test report. Main marine engine 8 L 58/64. Augsburg, MAN-B&W, 2006, 27 p. (In English).

12. Gorbenko A.N. *Programma rascheta parametrov rabocheho processa dizelya s nadduvom «Diesel-K»: programma dlya EVM* [Program for calculating the working process parameters of a

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)  
supercharged diesel engine “Diesel-K”: computer program] Certificate RF RU2022685277, Publ.  
12.22.2022, Bulletin no. 1. (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@gmail.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@gmail.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

Шаратов А.С.

**ОЦЕНКА МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ ГЛАВНОЙ ВИНТО-РУЛЕВОЙ КОЛОНКИ МАНЕВРИРУЮЩЕГО СУДНА ПРИ СТРУЙНОЙ ПОДАЧЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА ЗАСАСЫВАЮЩУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЛОПАСТЕЙ**

**Аннотация.** Условия обтекания главной винто-рулевой колонки маневрирующего судна формируются под влиянием косоного набегания потока. Ухудшение условий работы гребного винта, наблюдающиеся при повороте главной винто-рулевой колонки, приводит к значительному возрастанию механической напряженности элементов главной энергетической установки. В работе выполнен анализ условий обтекания элементов винто-рулевой колонки судна. Выполнено численное моделирование и расчетное определение гидродинамических характеристик гребного винта при косом набегании потока, при малых и значительных углах поворота винто-рулевой колонки, с оценкой параметров дополнительно подаваемой воды. Снижение влияния неравномерности косоного потока на винт, и как следствие, снижение амплитуды момента сопротивления гребного винта способствует ограничению возможной перегрузки главного двигателя по механической напряженности.

**Ключевые слова.** судовой гидромеханический комплекс, главная винто-рулевая колонка, главный двигатель, винтовая характеристика, маневр, система управления пограничным слоем, гидродинамические характеристики гребного винта, момент сопротивления гребного винта.

Sharatov A.S.

**ESTIMATION OF THE MOMENT OF RESISTANCE OF THE DUCT PROPELLER OF THE SCREW-STEERING COLUMN DURING THE JET SUPPLY OF ADDITIONAL WATER TO THE COOLING SURFACE OF THE BLADES**

**Abstract.** The flow conditions of the main propeller-steering column of a maneuvering vessel are formed under the influence of an oblique flow. The deterioration of the working conditions of the propeller, observed when turning the main screw-steering column, leads to a significant increase in the mechanical tension of the elements of the main power plant. The paper analyzes the flow conditions of the elements of the ship's helical steering column. Numerical modeling and computational determination of the hydrodynamic characteristics of the propeller during oblique flow, at small and significant angles of rotation of the screw-steering column, with an assessment of the parameters of the additionally supplied water, was performed. Reducing the influence of the unevenness of the oblique flow on the propeller, and as a result, reducing the amplitude of the moment of resistance of the propeller helps to limit the possible overload of the main engine by mechanical tension.

**Keywords.** ship's hydro-mechanical complex, main screw-steering column, main engine, screw characteristic, maneuver, boundary layer control system, hydrodynamic characteristics of the propeller, the moment of resistance of the propeller.

**Введение.** Главные винто-рулевые колонки (ГВРК) в 21 веке получили значительное распространение на морских и речных судах. Высокие показатели маневренности судна, удобство работы с высокооборотными (ВОД) и среднеоборотными (СОД) двигателями являются конкурентными составляющими данного типа движителей. Российский сегмент представлен движительно-рулевыми комплексами мощностью 1,2-20 МВт (Центр судоремонта "Звездочка", компания "Русэлпром — Морские системы", Промышленная группа "КОНАР", НПО «Винт») [1].

Расчеты движителей ГВРК, как правило, выполняются в прямом набегающем потоке и практически не отличаются от расчетов классических движителей – гребных винтов. При

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

этом, как отмечается в работах [2-6], отличие режима работы комплекса при отклонении элементов ГВРК из диаметральной плоскости судна приводит к значительному изменению параметров набегающего потока. При изменении условий обтекания гребного винта, по внешним или внутренним факторам эксплуатации, наблюдается отклонение винтовой характеристики главного двигателя от проектных значений. Это приводит к изменению тепловой и механической напряженности ГД и может привести к его перегрузки.

На рисунке 1 показано типовое проектное решение, применяемое при компоновке комплекса с главной винто-рулевой колонкой.

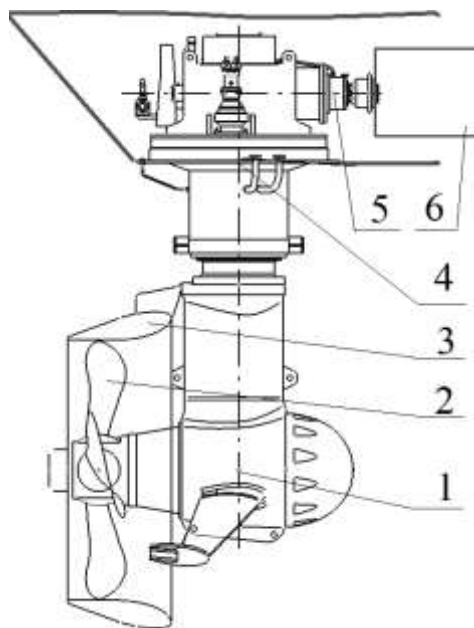


Рисунок 1 – Компоновка движительно-рулевого комплекса судна:

- 1 – редуктор рулевой колонки; 2 – гребной винт; 3 – винтовая насадка; 4 – упорный подшипник; 5 – валопровод; 6 – главный двигатель

Как отмечается в публикациях [1-3] и рекламных проспектах фирм-изготовителей [1], подобная компоновка движительно-рулевого комплекса (см. рис. 1) обладает преимуществом по сравнению с прямой передачей мощности на винт [7-8]. Возможность регулирования вектора тяги положительно оценивается при маневрировании судна. Увеличение объема грузовых помещений за счет уменьшения объема машинного отделения и снижение строительной стоимости позволяют повысить рентабельность перевозок.

В эксплуатации, при отклонении ГВРК из диаметральной плоскости (возникновения косога набегающего потока) наблюдаются отклонения условий эксплуатации от проектных условий [5,9]. Данная проблема имеет малое существенное освещение в публикациях, при этом отмечается отсутствие информации по влиянию скоса потока на винтовую характеристику главного двигателя [10].

В научных исследованиях [5,7-10] отмечается недостаточное внимание к изменению режима работы ГД и его характеристик при возникновении скоса потока, по причине влияния течения, изменении направления набегающего потока, отклонения условий эксплуатации от проектных (расчетных).

Запрос практики – совершенствование технической эксплуатации главных двигателей, работающих на главную поворотную винто-рулевую колонку с ВФШ.

**Целью исследования** является оценка величины и амплитуды момента сопротивления гребного винта при отклонении главной винто-рулевой колонки из положения, параллельного диаметральной плоскости судна.

**Материалы и методы исследования.** В статье рассматривается пропульсивная система

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

морского судна с высокооборотным или среднеоборотным двигателем, работающим на винт фиксированного шага ГВРК. Редукторный агрегат, находящийся в теле колонки, обеспечивает понижение частоты вращения до значений, соответствующих запасу по кавитации, параллельно увеличивая допустимый момент сопротивления, для преодоления на валу гребного винта.

На рисунке 2 показана расчетная схема движительно-рулевого комплекса.

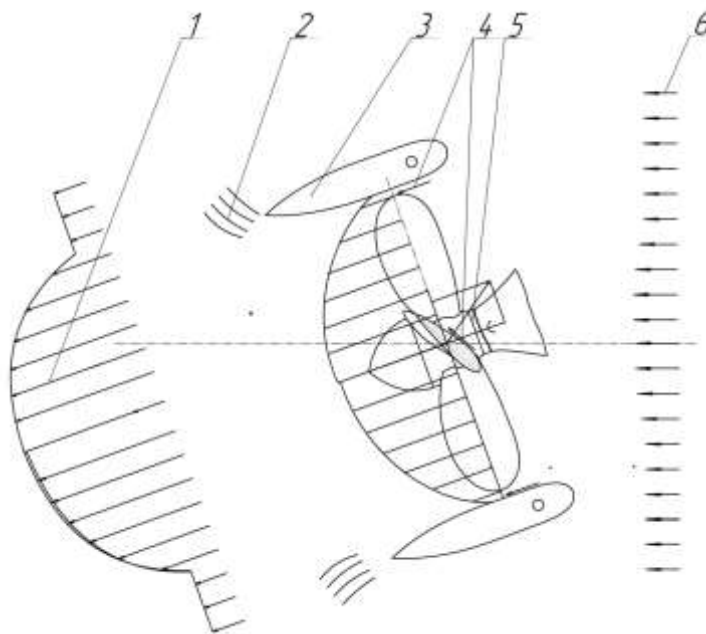


Рисунок 2 – Расчетная схема движительно-рулевого комплекса ГВРК в косом набегающем потоке с насадкой:

- 1 – результирующий поток; 2 – подсосывание потока; 3 – насадка винто-рулевого комплекса; 4 – струйное воздействие дополнительно подаваемой воды; 5 – движитель; 6 – набегающий поток

Согласно расчетной схеме (рис. 2) сформулирована задача для расчетного исследования главной винто-рулевой колонки в комплексе вычислительной гидродинамики – рассчитать гидродинамические параметры гребного винта с учетом влияния корпуса редуктора, попутного потока и засасывания.

В качестве объекта исследования выбрана серия винто-рулевых колонок фирмы Schottel SRP, техническая документация которой содержит достаточно материалов и расчетных программ, позволяющих достаточно точно оценить характеристики применяемых гребных винтов для ВРК с насадками.

Дополнительная струйная подача жидкости на засасывающую поверхность лопастей гребного винта способствует повышению КПД движителя [11] за счет увеличения подъемной силы профиля, снижения концевых и индукционных потерь. Расчетная схема численного моделирования поворотной винтовой колонки методом конечных объемов в программном комплексе соответствует работе [11].

В программном комплексе Flowvision 2.56 выполнен расчет гидродинамических параметров обтекания винта в насадке и струйной подачи жидкости на лопасти по методике, предложенной в работе [13].

### **1 Анализ условий работы главного двигателя на полноповоротную винто-рулевою колонку с винтом фиксированного шага**

Режим работы главного двигателя определяется потребителем (винтовая характеристика). Режим работы описывается характерным уравнением вида [25]

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

$$N_B = c_3 M_B n_B$$

где  $N_B$  – мощность, подводимая к гребному винту (кВт);

$n_B$  – частота вращения гребного винта ( $c^{-1}$ );

$M_B$  – момент сопротивления вращению гребного винта.

Момент сопротивления гребного винта в насадке, работающего в затенении корпуса, оценивается зависимостью вида

$$M_B = (1-t) \kappa \rho n_B^2 D^5 \int_{\frac{r_{ст}}{R}}^1 \frac{z}{8} C_y \frac{b \cdot r}{D \cdot R} \left( \frac{V(1-\bar{\Psi})}{D \cdot n_B} \right)^2 \sin \beta_i (1 + \varepsilon \cdot \operatorname{ctg} \beta_i) d \left( \frac{r}{R} \right)$$

где  $t$  – коэффициент засасывания;

$\kappa$  – коэффициент влияния насадки;

$\rho$  – плотность жидкости ( $кг/м^3$ );

$n_B$  – частота вращения гребного винта,  $c^{-1}$ ;

$D$  – диаметр гребного винта, м;

$r_{ст}$  – радиус ступицы гребного винта;

$R$  – радиус гребного винта;

$z$  – число лопастей;

$C_y$  – коэффициент подъемной силы профиля лопасти;

$b$  – хорда профиля лопасти гребного винта, м;

$r$  – радиус цилиндрической поверхности, отсекающей элемент лопасти;

$V$  – скорость судна, м/с;

$\bar{\Psi}$  – коэффициент попутного потока;

$\beta_i$  – угол индуктивной поступи;

$\varepsilon$  – обратное качество профиля.

Типовая проектная задача (по применению насадки гребного винта, учета попутного потока и засасывания) имеет достаточно точную расчетную методику, которая подтверждается многочисленными опытами и экспериментальными испытаниями. В том числе имеется накопленная база результатов по работе главного дизельного двигателя на ВФШ и ВРШ, реализованная в винтовых нагрузочных характеристиках двигателя и ходовых характеристиках судна [7 - 9].

Эволюция движительно-винтового комплекса в ГВРК, особенно при компоновке с СОД и ВОД, ставит перед проектантами задачу постоянной работы винта в косом набегающем потоке. В работах [10, 11] поднимался вопрос влияния рулевого устройства на винтовые характеристики двигателя и влияние струйной механизации на параметры плоскости. Задача измерения сопротивления насадки и ее подъемной силы при косом набегающем потоке недостаточно изучена и является целью численного моделирования, выполняемой при конкретных условиях.

### 2 Влияние насадки гребного винта

Поворотные насадки позволяют существенно расширить условия работы гребного винта в том числе, в режимах заднего хода, обеспечив благоприятные режимы работы. При этом представляет интерес влияние насадки гребного винта ГВРК на такие факторы, как попутный поток, затенение гребного винта корпусом, а также создание дополнительных усилий на корпусе судна.

Эффективность движительно-рулевого комплекса с насадкой прямо пропорциональна коэффициенту нагрузки винта  $\sigma$ . При этом насадка может быть применена для снижения потерь, сопровождающих работу движительно-рулевого комплекса без существенного



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

прироста тяги комплекса [12]. При малых значениях коэффициента нагрузки ( $\sigma < 1,5$ ) эффективность насадки ниже дополнительно вносимого профильного сопротивления. Показатель нагрузки винта  $\sigma > 2,5$  – подтверждает целесообразность применения насадки.

Несмотря на то, что для крупных транспортных судов насадка ГВРК позволяет повысить пропульсивный КПД на 4-5%, применение таких движительно-рулевых комплексов ограничено возникновением интенсивных вибраций и значительных нестационарных сил на лопастях, передаваемых на корпус.

Значительная неравномерность потока в месте установки движителя требует выравнивания поля скоростей за счет осесимметричных насадок, при этом существует запрос практики создания насадок с изменяемыми углами атаки в зависимости от режима работы гребного винта и положения насадки относительно прямого набегания потока (диаметральной плоскости судна).

На рисунке 3 показаны результаты расчетного исследования момента сопротивления ГВРК при различных углах поворота насадки, совмещенные с данными, полученными в расчетной программе HYDRA LT.

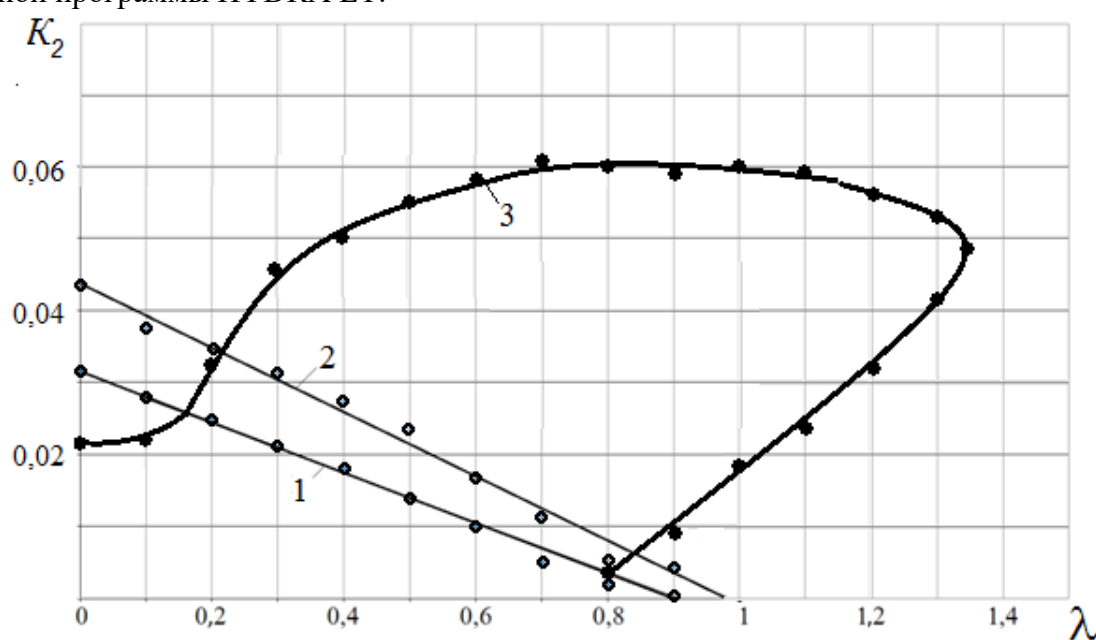


Рисунок 3 – Результаты расчетного исследования коэффициента момента: для расположенного в диаметральной плоскости судна открытого гребного винта (1), винта в насадке (2) и ГВРК при вращении в диапазоне  $0^\circ - 180^\circ$  (3)

Результаты расчетного исследования, представленные на рисунке 3, подтверждают существенное влияние отклонения движителя винто-рулевой колонки из диаметральной плоскости судна на его момент сопротивления. Данные, полученные в результате расчетного исследования, подтверждаются результатами работы других авторов [5] и могут быть использованы для оценки сил, действующих на элементы ГВРК при повороте оси винта относительно диаметральной плоскости судна.

### 3 Оценка продольной силы движителя при изменении условий работы гребного винта путем установки винтовой насадки и струйной подачи дополнительной воды на лопасти

Конструкция ВРК позволяет более качественно реализовать способ управления характеристиками элементов ВРК, заключающиеся в подаче дополнительной воды с избыточной скоростью на элементы винта и насадку движительно-рулевого комплекса.

На рисунке 4 представлены результаты численного моделирования работы движительно-рулевого комплекса с гребным винтом в направляющей насадке при скосе потока и подаче дополнительной воды на лопасти гребного винта.

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

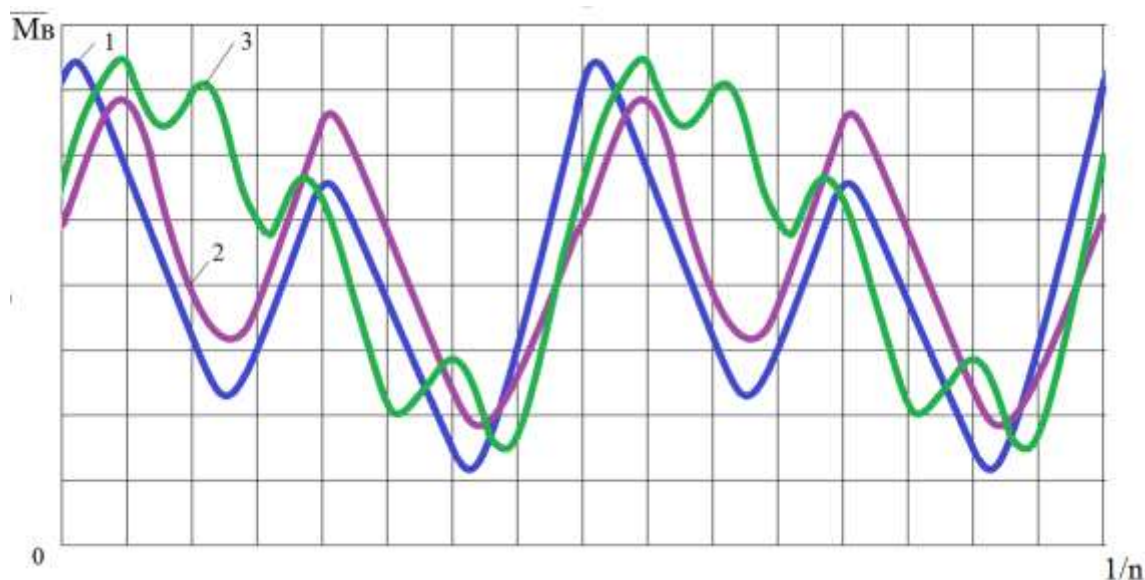


Рисунок 4 – Относительное изменение момента сопротивления (Мв) движителя главной винто-рулевой колонки при отклонении на угол  $\delta = 30^\circ$  из диаметральной плоскости судна:

1 – открытый гребной винт (1), гребной винт в насадке (2), гребной винт в насадке, работающий при струйной подаче дополнительной воды на лопасти (3)

Анализ относительного изменения момента сопротивления гребного винта при струйной подаче дополнительной воды на лопасти (рис.4) подтверждает возможность ограничения колебания нагрузки на главный двигатель, что в совокупности с относительным увеличением упора на 10–12% [11], позволяет понизить тепловую и механическую напряженность при работе вблизи швартовной характеристики.

**Выводы.** Выполненное в работе расчетное исследование и численное моделирование условий работы ГВРК позволили оценить ее гидродинамические характеристики и особенности применения:

– при изменении положения винта относительно набегающего потока существенно изменяются коэффициент момента. При этом существует возможность перегрузки главного двигателя по моментным и средним показателям.

– струйная подача дополнительной воды на лопасти гребного винта в насадке позволяет ограничить относительное изменение момента сопротивления гребного винта, при дополнительном приросте тяги движительно-рулевого комплекса [10] при отклонении ГВРК из диаметральной плоскости судна.

Анализ относительного изменения момента сопротивления гребного винта показал статистическое снижение момента сопротивления в области малых нагрузок на 27%. Статистический анализ данных демонстрирует сохранение среднего показателя момента сопротивления при сравнении гребных винтов в насадке и ГВРК с дополнительной подачей воды на лопасти. Максимальные показатели момента сопротивления ГВРК со струйной подачей дополнительной воды на лопасти незначительно (до 1%) превышают параметры открытых гребных винтов, работающих в косом потоке.

В целом задача подачи дополнительной воды на лопасти гребного винта ГВРК должна решаться с учетом факторов эксплуатации и особенностей взаимовлияния элементов судового гидромеханического комплекса.

### Список использованной литературы:

1. Составят ли российские ВРК конкуренцию AZIPOD и прочим PODам? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.korabel.ru/news/comments/sostavyat\\_li\\_rossiyskie\\_vrk\\_konkurenciyu\\_azipod\\_i\\_prochim\\_podam.html](https://www.korabel.ru/news/comments/sostavyat_li_rossiyskie_vrk_konkurenciyu_azipod_i_prochim_podam.html) (дата обращения: 12.09.2023).

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

2. Кеслер А.А. Конструктивные типы и анализ эффективности движительно-рулевого комплекса грузовых судов смешанного (река-море) плавания // Научные проблемы водного транспорта, 2014. № 40. С. 94-102.
3. Вишневецкий Л. И. и др. Проектирование пропульсивного комплекса судна ограниченного района плавания на базе современных методов вычислительной гидродинамики // Судостроение, 2006. №. 2. С. 27-31.
4. Колесник Д. В. Влияние скоса потока на гидродинамические характеристики судовых винторулевых колонок // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник, 2016. Вып. 15.—Одесса: ОНМА, 2006. С. 32
5. Егорова Е. Ю., Тимошин Ю. С. О расчете сил и моментов, действующих на винт в косом потоке // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика АН Крылова, 2011. №. 59. С.101-108.
6. Яковлев А. Ю. Численное моделирование и проектирование новых типов движителей // Труды Крыловского государственного научного центра, 2019. №. 1 (387). С. 32-50.
7. Яковлев А. Ю., Васильев Ю. М. Метод расчета экстренного торможения судна с помощью нескольких движителей различных типов // Труды ЦНИИ им. акад. АН Крылова, 2015. №. 90. С. 27-38.
8. Яковлев А. Ю. Метод расчета тянущей винто-рулевой колонки и его использование для решения практических задач // Морские интеллектуальные технологии, 2018. №. 4-1. С. 83-89.
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. Шаратов, А. С. Горбенко А. Н., Шмелев С. Х. Управление винтовой характеристикой главного двигателя путем струйной подачи дополнительной воды на перо руля при маневрировании судна // Эксплуатация морского транспорта, 2022. № 2(103). С.106-117. DOI 10.34046/aumsuomt103/22.
11. 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.
12. Осовский Д.И., Шаратов А.С. Влияние ограниченного пространства на результаты численного и экспериментального исследования гребного винта с дополнительным струйным воздействием воды на лопасти // Научные проблемы водного транспорта, 2019. №58. С.40-54.

### References:

1. Sostavyat li rossijskie VRK konkurenciyu AZIPOD i prochim PODam? [Elektronnyj resurs]. — Rezhim dostupa: [https://www.korabel.ru/news/comments/sostavyat\\_li\\_rossiyskie\\_vrk\\_konkurenciyu\\_azipod\\_i\\_prochim\\_podam.html](https://www.korabel.ru/news/comments/sostavyat_li_rossiyskie_vrk_konkurenciyu_azipod_i_prochim_podam.html) (data obrashcheniya: 12.09.2023). (In Russian)
2. Kesler A.A. Konstruktivnye tipy i analiz effektivnosti dvizhitel'no-rulevogo kompleksa gruzovyh sudov smeshannogo (reka-more) plavaniya [Constructive types and efficiency analysis of propulsion-steering complex of river-sea going vessels] *Nauchnye problemy vodnogo transporta* [Russian Journal of Water Transport], 2014. № 40. pp. 94-102. (In Russian)
3. Vishnevskij L. I. i dr. Proektirovanie propul'sivnogo kompleksa sudna ogranichen-nogo rajona plavaniya na baze sovremennyh metodov vychislitel'noj gidrodinamiki [Designing of propulsion complex for limited sailing area vessel on the basis of modern methods of calculative hydrodynamics] *Sudostroenie* [Shipbuilding], 2006. №. 2. pp. 27-31. (In Russian)
4. Kolesnik D. V. Vliyanie skosa potoka na gidrodinamicheskie harakteristiki sudovyh vintorulevykh kolonok [The effect of the flow slope on the hydrodynamic characteristics of ship's propeller columns] *Sudovye energeticheskie ustanovki: nauchno-tekhnicheskij sbornik* [Marine power plants: scientific and technical collection], 2016. Vyp. 15.—Odessa: ONMA, 2006. pp. 32 (In Russian)
5. Egorova E. YU. Timoshin YU. S. O raschete sil i momentov dejstvuyushchih na vint v kosom potoke [On the calculation of forces and moments acting on a screw in an oblique flow] *Trudy Central'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. akademika AN Krylova* [Proceedings of the Central Research Institute named after academician A.N. Krylov], 2011. №. 59. pp.101-108. (In Russian)

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

Russian)

6. Yakovlev A. Yu. Chislennoe modelirovanie i proektirovanie novyh tipov dvizhitelej [Numerical simulation and design of new propulsor types] *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra* [Transactions of the krylov state research centre], 2019. №. 1 (387). pp. 32-50. (In Russian)
7. Yakovlev A. Yu., Vasil'ev Yu. M. Metod rascheta ekstremnogo tormozheniya sudna s pomoshch'yu neskol'kih dvizhitelej razlichnyh tipov [Crash-stop calculation method for a ship with several different propulsors]. *Trudy CNII im. akad. AN Krylova* [Transactions of the krylov state research centre], 2015. №. 90. pp. 27-38. (In Russian)
8. Yakovlev A. Yu. Metod rascheta tyanushchej vinto-rulevoj kolonki i ego ispol'zovanie dlya resheniya prakticheskikh zadach [Calculation method of podded propulsor characteristics and its application for the practical tasks]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine intellectual technologies], 2018. №. 4-1. pp. 83-89. (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. SHaratov A. S. Gorbenko A. N. SHmelev S. KH. Upravlenie vintovoj harakteristikoj glavnogo dvigatelya putem strujnoj podachi dopolnitel'noj vody na pero rulya pri manevrirovanii sudna [Control of the power curves of the main engine by jet supply of additional water to the rudder foil during ship maneuvering] *Ekspluatsiya morskogo transporta*. [Operation of marine transport]. 2022. № 2(103). pp.106-117. DOI 10.34046/aumsuomt103/22. (In Russian)
11. 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] *Ekspluatsiya morskogo transporta*. [Operation of marine transport]. 2023. No. 2(107). pp. 223-232. (In Russian)
12. Osovskij D.I. SHaratov A.S. Vliyanie ogranichenogo prostranstva na rezul'taty chislennogo i eksperimental'nogo issledovaniya grebnogo vinta s dopolnitel'nym struj-nym vozdejstviem vody na lopasti [The influence of limited space on results of a computational and pilot study of the propeller with additional jet impact of water on blades] *Nauchnye problemy vodnogo transporta* [Russian Journal of Water Transport], 2019. №58. pp.40-54. (In Russian)

### Сведения об авторах / Information about authors

<b>Шаратов Алексей Сергеевич</b>	канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок, Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 relicts@yandex.ru
Sharatov 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

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 656.61.052-049.5:004.896

Святский В.В.

### АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ПОДКИЛЬЕВОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СУДНОМ СТЕСНЕННЫХ АКВАТОРИЙ

**Аннотация.** Данная работа направлена на разработку автоматизированной системы для расчета запаса глубины по килем (УКС) при прохождении судном стесненных акваторий, на основе современных методов и положений компаний, занимающихся морскими перевозками. Смоделирован расчет для прохода Керчь-Еникальского канала, на основе существующих и хорошо зарекомендовавших методов расчета УКС разработана программа, которая позволила автоматизировать весь процесс оценки УКС, что приведет к сокращению влияния человеческого фактора на эти расчеты. Эта система не только сократит время, затрачиваемое на расчеты, но и повысит точность и надежность получаемых результатов. Автоматизация процесса оценки УКС упростит и ускорит процесс принятия решений капитаном по обеспечению безопасности судоходства и предотвращению потенциальных аварийных ситуаций при прохождении судном стесненных акваторий.

**Ключевые слова:** навигация, навигационная безопасность, запас глубины под килем

Sviatskii V.V.

### AUTOMATION OF CALCULATIONS OF UNDER KEEL SPACE WHEN PASSING A SHIP IN CONFINED WATER AREAS

**Abstract.** This research work is aimed at the development of an automated system for calculating the UKC (depth to keel) when a ship passes through confined waters, based on modern methods and regulations of maritime transportation companies. The calculation for the Kerch-Yenikalsky channel passage was simulated, based on existing and well-proven methods of UKC calculation, a program was developed, which allowed to automate the whole process of UKC estimation, which will lead to reduction of human factor influence on these calculations. This system will not only reduce the time spent on the calculations, but will also improve the accuracy and reliability of the results obtained. The automation of the UKC assessment process will simplify and speed up the decision-making process of the master to ensure the safety of navigation and prevent potential accidents when the vessel passes through confined waters.

**Keywords:** navigation, navigation safety, under keel clearance

**Введение.** По данным большинства специализированных исследований посадка на мель является самым частым видом аварий современных судов (около 30%), в то время как пожары и столкновения судов имеют показатели по 20%.

Одной из причин посадки судов на мель или касаний ими грунта указана недооценка осадки судна на мелководье и при волнении. При этом отмечено, что явление проседания судна на мелководье известно давно, а его учет на каждом конкретном судне должен учитываться по предельным величинам в наиболее неблагоприятных условиях со всеми добавочными факторами [1]. Одним из таких факторов является скорость. Судоводитель должен выбирать безопасную скорость с учетом всех возможных факторов [2].

Глубина под килем важнейший параметр, определяющий навигационную безопасность. В любой точке нахождения судна фактическая глубина моря должна быть больше динамической осадки судна. Контроль глубины по маршруту плавания судна является одним из важнейших элементов навигационной безопасности плавания [3].

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

Расчет запаса глубины под килем является одним из критически важных параметров, определяющих безопасность судоходства, особенно в узкостях и на мелководье. Автоматизация этого процесса позволит повысить безопасность плавания современных судов в сложных условиях.

**Цель работы.** Автоматизировать расчет запаса глубины под килем на основе современных методов и положений компаний, занимающихся морскими перевозками; изучить параметры, которые определяют величину запаса воды под килем. Основное внимание следует уделить факторам, которые учитываются на практике при расчете запаса глубины, а также рекомендациям и стандартам, прописанным в положениях компаний по этим расчетам.

**Материалы и методы исследования.** При изучении района со стесненными условиями плавания и подходов к портам подробно изучают навигационно-гидрографические условия и их влияние на допустимую осадку и скорость судна при прохождении им наиболее мелководных участков.

В районах с ограниченными глубинами необходимо проводить расчеты минимального запаса глубины под килем. На практике сейчас возможно применение различных способов расчета минимального запаса глубины под килем, но, как правило, формы расчета и отчетности разрабатываются каждой судоходной компанией по-своему.

Наличие достаточного запаса воды под килем в районах стесненного плавания кардинально зависит от выбранного пути следования. Поэтому при выборе и прокладке курсов надо исходить из принципа выбора кратчайшего и безопасного пути с соблюдением существующих правил плавания и юридических норм международного морского права. Надо обязательно учитывать рекомендации хорошей морской практики: избегать посадки на мель и касания грунта, не допускать столкновения, нарушения правил плавания и по возможности достигать экономичности рейса [4, 5]. Таким образом, при выборе маршрута перехода учитываются: международно-правовые требования, местные правила и рекомендации навигационных пособий, сложившуюся систему судоходства в данном районе.

При выборе курсов в стесненных водах всегда необходимо рассчитывать на худшие условия плавания, иметь запасной вариант для нормальных условий плавания, состояния моря и погоды. При выборе и прокладке пути судна в стесненных условиях плавания необходимо учитывать скорость судна на переходе. Применительно к учету запаса воды под килем надо учитывать критическую скорость, гидродинамические факторы, величину проседания на мелководье, сохранение управляемости и т.п. [6].

Планирование безопасного перехода направлено на обеспечение эффективной и безопасной эксплуатации судна различных районах и условиях плавания.

Рассмотрим, как запас глубины под килем учитывают на практике в судоходных компаниях

Прежде, чем прибыть в порт, выйти из порта, поменять причал или пройти через районы, где глубина моря менее двух ожидаемых осадок судна, должна быть проведена точная оценка максимальной осадки судна

Факторы, учитываемые при этой оценке должны включать:

1) расчет средней осадки, дифферента и крена, а, следовательно, и максимальной статической осадки. Везде, где возможно, эти расчеты должны быть подтверждены измерением фактических осадок;

2) поправку на плотность воды (если плотность известна). Если судно будет следовать в солоноватой воде неизвестной плотности, то ее плотность должна быть принята равной 1.000;

3) влияние движения судна (килевая качка, бортовая качка, вызванный крен и вертикальные колебания) для ожидаемых морских условий и погодны.

Увеличение в осадке измеряется по формуле:

$$Z_0 = \frac{B}{2} \tan \theta, \quad (1)$$

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

где  $B$  - ширина судна, м;  $\theta$  - угол крена (суммарный от статического и динамического крена), град.

Например, судно с шириной 32 м, качкой 10 градусов, увеличивает свою осадку на 2.8 м [7].

4) оценка влияния проседания на мелководье (при запланированной скорости относительно воды) в районах мелководья. Все суда должны иметь на борту информацию о проседании на мелководье, определенную для данного судна или для типа судов.

Если информации о проседании на мелководье нет на судне, то Капитан должен немедленно проинформировать и запросить Компанию о предоставлении необходимой информации:

- уменьшение скорости снизит явление увеличения проседания судна на ходу, а для критических участков перехода может возникнуть необходимость определения максимальной допустимой скорости;

- запланированная скорость судна относительно воды должна быть оценена с учетом скорости относительно грунта, влияния речного/приливного течения/постоянного течения и любых ограничений, налагаемых запрещенным диапазоном скоростей главного двигателя;

5) проседание на мелководье увеличивается при прохождении другого судна в канале, потому что эффективная ширина канала уменьшается;

б) оценка проседания на мелководье при входе, транзитном проходе или выходе из шлюзов, или узких проходов, где имеются ограничения по ширине и глубине судоходных вод [8].

Динамический запас глубины под килем будет получен при вычитании максимальной полученной осадки судна из ожидаемой лимитирующей глубины.

Капитан должен оценить – достаточен ли запас глубины под килем для безопасного плавания судна, принимая во внимание ожидаемую интенсивность движения и маневренные характеристики судна на мелководье.

Капитан должен обеспечить, чтобы судно всегда было на плаву (на ходу, на якоре или на швартовах).

Запас глубины под килем, должен быть рассчитан и заполнен для открытого моря, естественных и искусственных проливов, в стеснённых водах (у причала и на подходах) для каждого рейса. Результаты расчёта также вносятся в форму «План перехода» (в столбец «УКС»).

Капитан несет ответственность за безопасный заход судна в порт и выход судна из порта.

Бдительность должна соблюдаться при определении безопасной осадки судна при погрузке. Прежде чем давать окончательное согласие на принятие груза, капитану следует учесть последствия минимального запаса глубин под килем. Судно должно всегда удерживать безопасный запас глубины под килем и всегда находиться в безопасности на плаву.

Запас глубины под килем определяется расстоянием от киля судна до морского дна, при этом допустимы исключения.

Безопасный запас глубины под килем должен постоянно поддерживаться, и капитан несет ответственность за безопасный проход судна

В случае возникновения каких-либо сомнений, капитану следует обратиться к назначенному лицу, который, в свою очередь, проинструктирует капитана о дальнейших действиях.

Местная ассоциация лоцманов или портовые власти могут предоставить более точную информацию касательно действительной глубины воды для прохода судна в порт. Эта информация должна быть подтверждена непосредственно перед заходом в порт или выходом из порта, особенно когда запас глубины под килем минимальный.

Во время прохода запланированного участка при определении максимально безопасной осадки судна и при погрузке должны учитываться следующие факторы:

- глубины, нанесенные на карты, на выход из порта погрузки;

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

- глубины, нанесенные на карты, на вход в порт назначения;
- информация от местных лоцманов или портовых властей в обоих портах;
- прогноз погоды и условия окружающей среды в обоих портах, прогнозируемая высота прилива, приливоотливной период, уровень и степени прилива, влияние моря и зыби;
- точность в определении и подсчете осадки судна, включая запас на прогиб и оседание;
- увеличение осадки судна из-за крена или дифферента, в частности, для широких судов;
- изменение плотности воды;
- устойчивость морского дна / состояние песочных волн;
- просадка, профиль канала, особенно в узких каналах, где мелководье может повлиять на скорость и управляемость судна при удержании требуемого курса.

Запас глубины под килем должен всегда учитываться при планировании рейса применительно к районам плавания.

Если осадка судна близка к максимальной осадке в порту или у причала, судно не должно иметь крена, оно должно быть на ровном киле.

О любом разногласии, возникшем в связи с решением капитана касательно ограничения приема груза в целях безопасного плавания судна, должно быть сообщено судовладельцу и Компании. Решение в отношении безопасной осадки судна при погрузке принимается капитаном.

Капитан должен обсудить с лоцманом запланированный проход, включая предполагаемый запас глубины под килем, и внести соответствующие записи в судовой журнал.

Капитан в обязательном порядке должен связаться с Офисом (НЛК) и получить разрешение на следование с меньшим запасом под днищем, чем рекомендовано Компанией, после того как будет проведен анализ рисков.

Каждая компания может регламентировать свои требования. Рассмотрим средние параметры:

*В открытых водах, в открытом море/ океане:* минимальный запас глубины под килем не менее 40% от максимально возможной осадки (но не менее 3 м) рекомендуется для нормального управления судном при учете факторов, перечисленных выше.

*В естественных проливах (проходах и каналах):* запас глубины должен быть не менее 15% от максимальной осадки.

*В стесненных водах:*

- судно с летней осадкой менее 10 м, запас глубины под килем у причала, на монобуге =0,3 м, 10% осадки на подходах;
- судно с летней осадкой 10-17 м, запас глубины под килем у причала, на монобуге =0,6 м, 10% осадки на подходах;
- судно с летней осадкой более 17 м, запас глубины под килем у причала, на монобуге =0,9 м, 10% осадки на подходах.

*В искусственных проливах:* запас глубины должен соответствовать местным правилам. Для переменных факторов, указанных выше, допустимы исключения.

В большинстве случаев фрахтователи при определении рейсового задания устанавливают количество груза на определенную осадку, исходя из наименьшего запаса глубины под килем.

При наличии соответствующих местных правил, постановлений, распоряжений и случайных факторов, капитан может принять решение о выполнении или невыполнении данного рейсового задания. Принимая решение, капитан должен согласовать все условия с соответствующими властями или терминалами [9].

В случае возникновения каких-либо сомнений, капитану следует обратиться к назначенному лицу.

Обязательные требования должны выполняться, к примеру, судами, которые следуют по акватории порта «Ростов-на-Дону», где предусмотрен лимитированный запас глубины под



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

килем 0,2 м, или по акватории порта «Азов», где предусмотрен лимитированный запас глубины под килем 0,3 м.

Компания предоставляет свои суда фрахтователям только для рейсов между безопасными портами, участками, доками, причалами и подводными линиями. Допущение известных или вероятных воздействий просадки кормой подразумевается в рейсовых инструкциях судна [10].

Если Компания полагает, что запас глубины под килем будет недостаточным, то соответствующие действия, по улучшению ситуации, будут обсуждены с капитаном.

При определённых обстоятельствах, у некоторых причалов в известных портах, Компания может продекларировать, при согласии капитана, и использовать уменьшенное значение запаса глубины под килем.

Компания проинформирует фрахтователей и других, заинтересованных в этом лиц о любых ограничениях на планируемые действия.

В случае, если судно следует в открытом море, в проливах, в узкостях-стесненных водах, но согласно сверки с навигационной картой и, учитывая оценку погодных, приливо-отливных явлений, течений и эффекта просадки судна, оказывается, что глубина составляет более 2-х (двух), но менее 5-ти (пяти) осадок судна, тогда расчет запаса воды под килем (днищем) судна производится путем вычитания осадки из глубины. Полученный результат заносится в соответствующий столбец в Плане Перехода.

В случае, если судно следует в открытом море, в проливах, в узкостях-стесненных водах, но согласно сверки с навигационной картой и, учитывая оценку погодных, приливо-отливных явлений, течений и эффекта просадки судна, оказывается, что глубина составляет более 5-ти (пяти) осадок судна, тогда расчет и учет запаса воды под килем (днищем) судна проводить не требуется.

На современных судах используют различные формы и способы представления информации о запасе воды под килем судна или «УКС». Приведем несколько примеров. В работах [4], [6], [9], [10], [11], [12] приведены примеры расчета запаса глубины на различных транспортных судах. По промысловым судам такие примеры содержит публикация [13].

На основе существующих и хорошо зарекомендовавших методов расчета УКС, разработаем программу, которая позволит автоматизировать весь процесс оценки УКС, как следствие снизит влияние человеческого фактора.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Программу для поддержки принятия решений создадим в Microsoft Excel на примере прохода Керчь-Еникальского канала.

Керчь-Еникальский канал (КЕК) построен в Керченском проливе для обеспечения безопасного судоходства. Ширина канала 120 метров. По каналу могут проходить суда с осадкой до 8 метров [14]. Проход судов через Керченский пролив осуществляется под наблюдением опытных лоцманов, которые знакомы с местными условиями плавания. В Керченском проливе действуют ограничения скорости. Суда с осадкой до 5 метров могут проходить КЕК со скоростью до 12 узлов, а суда с осадкой более 5 со скоростью до 10 узлов, чтобы гарантировать безопасность и избежать возможных аварий [15].

В первую очередь необходимо создать форму, в которую будут вноситься исходные данные, такие как длина, ширина, осадка носом и кормой, водоизмещение при текущей осадке и скорость. Также необходимы текущие данные рейса, для формирования отчета (дата, порт отхода и прихода, координаты места, для которого выполняется расчет).

Далее необходимо конкретизировать параметры акватории: в выпадающем списке выбрать тип акватории (открытая вода, стесненная акватория или фарватер), так как для каждого типа свои ограничения по УКС; глубина; высота прилива; креновой запас (по формуле 1); ширина фарватера (рис.1). Креновой запас считается вручную, так как параметр крена необходимо использовать актуальный.

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

Length:	115,20	Длина
Breadth:	15,60	Ширина
Forward draft:	4,50	Осадка носом
Aft draft:	4,50	Осадка кормой
Displacement:	6000,00	Водоизмещение при текущей осадке
Transit speed	12,00	Скорость
<b>Voyage data</b>		
Date	28.02.2024	Дата
Voyage from:	TEMRYUK	рейс из
to:	NOVOROSSIYSK	в
Position of calculated place:	45°18,55' N / 36°34,06'	Расположение обсчитываемого места
Type of waters	Fairways	Тип вод
Depth:	8,00	Глубина
ETA	28.02.2024	Расчетное время прибытия
Tide	0,00	Высота прилива
Draft increasement due to wave	0,10	Изменение осадки из-за волнения
Fairway width:	120,00	Ширина форватера

Рисунок 1 – Форма входных данных

Далее автоматически формируется отчет, в котором отображаются все введенные данные пользователя, график на котором отображены УКС носом и кормой, УКС в соответствии с требованиями компании, дно, а также проседание носом и кормой (рис. 2). Для наглядности все параметры на графике отображаются разными линиями. На основании расчетов выводится максимально допустимая скорость для данной акватории и параметр УКС в соответствии с требованиями компании, а также в комментариях указывается на основании чего пропитан этот лимит УКС.

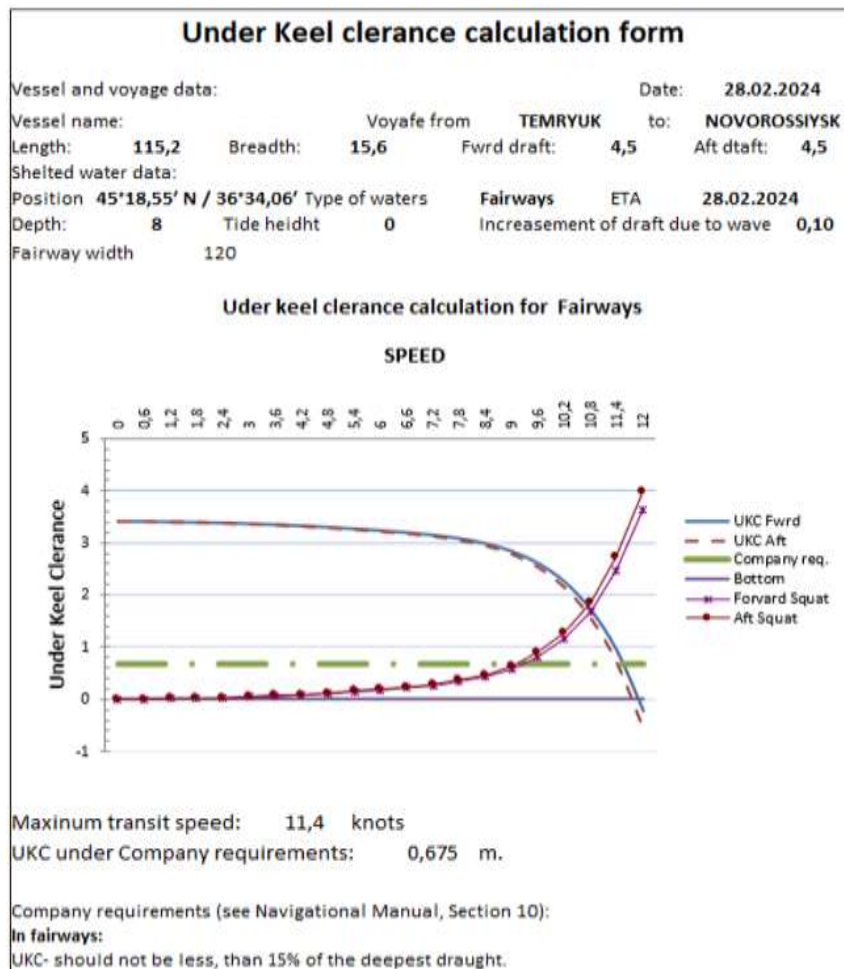


Рисунок 2 – Отчет запаса глубины под килем

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

Как видим на графике максимальная рекомендованная скорость 11,4, но даже при этой скорости судно проседает достаточно сильно, так что лучше придерживаться скорости 10 узлов. Более подробные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов

Скорость	UKC Fwrd	UKC Aft	Fwrd Squat	Aft Squat
0	3,3969	3,3969	0,0000	0,0000
0.6	3,3969	3,3969	0,0030	0,0030
1.2	3,3898	3,3898	0,0102	0,0102
1.8	3,3799	3,3799	0,0201	0,0201
2.4	3,3672	3,3672	0,0328	0,0328
3	3,3508	3,3508	0,0491	0,0491
3.6	3,3305	3,3305	0,0695	0,0695
4.2	3,3058	3,3058	0,0941	0,0941
4.8	3,2772	3,2772	0,1228	0,1228
5.4	3,2446	3,2446	0,1554	0,1554
6	3,2078	3,2078	0,1923	0,1923
6.6	3,1649	3,1649	0,2351	0,2351
7.2	3,1116	3,1116	0,2884	0,2884
7.8	3,0391	3,0391	0,3609	0,3609
8.4	2,9345	2,9327	0,4673	0,4673
9	2,7698	2,7698	0,6302	0,6302
9.6	2,5199	2,5170	0,8929	0,8830
10.2	2,2449	2,1281	1,1551	1,2719
10.8	1,7104	1,5402	1,6896	1,8598
11.4	0,9210	0,6713	2,4789	2,7287
12	-0,2193	-0,5840	36193	3,9839

В Керченском проливе проходит множество судов, которые соответствуют минимальным требованиям для прохода. Выполним просчет для основных типов судов, которые проходят через пролив (табл. 2).

Таблица 2 – Расчет для разных типов судов

Тип судна	Длина	Ширина	Осадка	Рек. UKC	Макс. Скорость	Проседание
Танкер	140	17	4,1	0,615	12	1,2469
Генерально грузовое	90	16	4,5	0,675	9,6	2,5792
Генерально грузовое	107,4	16,7	3,8	0,570	12	1,8451
Танкер	180	32	7	1,05	7,8	0,3140
Генерально грузовое	139	16	3	0,45	12	0,8770
Генерально грузовое	123	16,75	4,3	0,645	12	1,7866
Контейнеровоз	99	17	3,8	0,570	12	2,0680
Газовоз	97	12	5,2	0,780	10,2	1,8578
Генерально грузовое	119	13,4	4,5	0,675	12	2,4685
Генерально грузовое	199,89	23,7	7	1,05	7,2	0,2735

Как видим, в таблице 2, более крупным судам рекомендуется снизить скорость, программа согласно требованиям компании, рекомендованный запас под килем, а также с какой максимальной скоростью с учетом проседания можно проходить пролив.

**Выводы.** В результате проведенных исследований был произведен анализ практики учета проседания судна при проходе стесненной акватории. Существующие методы расчета

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

динамической осадки судна с учетом проседания предполагают учет большого количества внешних факторов. Поэтому для уменьшения влияния человеческого фактора и, тем самым, повышения безопасности при прохождении стесненной акватории был разработан алгоритм расчета динамического проседания судна, а также реализация этого алгоритма в электронных таблицах Microsoft Excel с использованием встроенного языка программирования Visual Basic. В качестве примера была рассчитана максимальная допустимая скорость для основных типов судов, которые проходят по Керчь-Еникальскому каналу.

#### Список использованной литературы:

1. *Иванов Б.Е., Черненко А.М.* Оценка степени безопасности плавания по фарватеру // Морской вестник. 2006. № 2. С.72-73.
2. *Ермаков С. В., Малинин Н.Ж.* Анализ методики оценки навигационной безопасности судна при плавании по фарватеру // Балтийский морской форум. 2021. С. 39-44.
3. *Ершов А.А., Михневич А.В.* Использование характеристик маневрирования для обеспечения безопасности движения судов в узкостях // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала СО Макарова. 2018. Т. 10. №. 5. С. 897-910.
4. *Л. Р. Аксютин [и др.]* Справочник капитана дальнего плавания: справочное издание / ред. Г. Г. Ермолаев. Москва: Транспорт, 1988. 248 с.
5. *Святский В.В.* Содержательная модель задачи обеспечения навигационной безопасности на морских путях // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: «Морские технологии». 2023. № 1. С. 76-84. URL: <https://mtjv.ru/evt-vps-i-g/svyatskij-v-v-soderzhatelnaya-model-zadachi-obespecheniya-navigaczionnoj-bezopasnosti-na-morskih-putyah> (дата обращения: 23.10.2023).
6. *Песков Ю.А. и др.* Навигация. Москва: Лань, 1996. 512 с.
7. *Снопков В.И. и др.* Безопасность мореплавания. Москва: Транспорт, 1994. 247 с.
8. *Снопков В. И.* Управление судном. Санкт-Петербург: Професионал, 2004. 536 с.
9. *Баскин А.С.* Расчет проходной осадки при плавании на мелководье // Мор. трансп. Сер.: Безопасность мореплавания. Экспресс-информация Мортехинформреклама. 1984. Вып. 5 (165). С. 13 - 18.
10. *Васьков А., Мироненко А.* Сопоставление методов оценки динамического проседания судна // Эксплуатация морского транспорта. 2021. №. 2. С. 78-86. DOI: <https://doi.org/10.34046/aumsuomt99/12> (дата обращения: 29.02.2024).
11. *Васьков А.С., Мамаев К.П., Скорородов С.В.* Сравнительный анализ методов определения скоростного запаса глубины при движении судна на мелководье. - Новороссийск: НВИМУ, 1989. - 61 с. - Рус. - Деп. в Мортехин-формреклама, № 959 - мф.
12. *Воробьев Ю.Л., Соколов В.Т., Журавицкий Т.Д., Коханов Э.В., Кубачев Н.А., Лабин А.И.* К вопросу о навигационных запасах глубины под килем судна при плавании в каналах и на мелководье // Мор. трансп. Сер.: Судовождение и связь. Экспресс - информация Мортехинформреклама, 1986. Вып. 9(194). С. 1 - 18.
13. *Иванов А. А., Пазынич Г.И.* Эффективный способ современного определения запаса воды под килем для промысловых судов при плавании на мелководье // Практическая подготовка в морском образовании: Сборник трудов региональной научно-практической конференции, Керчь, 16–17 ноября 2017 года / под общей редакцией Е.П. Масюткина. Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2017. С. 122-137.
14. *Ивановский А.Н., Ивановский Н.В.* Оценка безопасной ширины полосы движения судна при прохождении через Керчь-Еникальский канал // Молодой ученый. 2019. № 28 (266). С. 39-41. URL: <https://moluch.ru/archive/266/61594/> (дата обращения: 14.11.2023).
15. *Святский В. В.* (2023). Применение модели Эрланга для моделирования процесса пограничного контроля судов, следующих через Керчь-Еникальский канал // Научные проблемы водного транспорта. (77). 229-238. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.435>

References:

1. Ivanov B.E. Ocenka stepeni bezopasnosti plavaniya po farvateru [Estimation of safety degree of navigation along the fairway]. *Morskoj vestnik* [Marine Bulletin], 2006, № 2. pp.72-73. (In Russian).
2. Ermakov S.V., Malinin N.J. Analiz metodiki ocenki navigacionnoj bezopasnosti sudna pri plavanii po farvateru [Analysis of the methodology of a ship navigational safety assessment when navigating along the fairway]. *Baltijskij morskoy forum* [Baltic Marine Forum]. 2021, pp. 39-44. (In Russian).
3. Ershov A. A., Mikhnevich A.V. Ispol'zovanie xarakteristik manevrirovaniya dlya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya sudov v uzkostyax [The use of maneuvering characteristics to ensure the safety of ship traffic in the narrows]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiralov SO Makarova* [Bulletin of the State University of Sea and River Fleet named after Admiral SO Makarov]. 2018, T. 10, №. 5, pp 897-910. (In Russian).
4. Aksyutin L.R. et al. *Spravochnik kapitana dal'nego plavaniya* [Handbook of the long-distance navigation captain] Moscow, Transport, 1988, 248 p. (In Russian).
5. Svyatskiy V. V. Soderzhatel'naya model' zadachi obespecheniya navigacionnoj bezopasnosti na morskix putyax [Content model of the task of providing navigation safety on the sea routes]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo texnologicheskogo universiteta. Seriya: «Morskie texnologii»* [Bulletin of Kerch State Marine Technological University. Series: "Marine technologies"]. 2023, №1. Cpp. 76-84. (In Russian).
6. Peskov Yu.A. et al. *Navigatsiya* [Navigation]. Moscow, Lan, 1996, 512 p. (In Russian).
7. Snopkov V.I. et al. *Bezopasnost' moreplavaniya* [Safety of navigation]. Moscow, Transport, 1994, 247p. (In Russian).
8. Snopkov V.I. *Upravlenie sudnom* [Ship management] St. Petersburg, Professional, 2004, 536 p. (In Russian).
9. Baskin A.C. Raschet proxodnoj osadki pri plavanii na melkovod'e [Calculation of the through draft when sailing in shallow water]. *Mor. transp. Ser.: Bezopasnost' moreplavaniya. E'kspress-informatsiya Mortekhinformreklama* [Marine Transp. Ser.: Safety of Navigation. Express-informatsiya Mortekhinformreklama], 1984, Vyp. 5 (165), pp. 13 - 18. (In Russian).
10. Vaskov A., Mironenko A. Sopostavlenie metodov ocenki dinamicheskogo prosedaniya sudna [Comparison of the methods of the dynamic ship subsidence estimation]. *E'kspluatatsiya morskogo transporta* [Marine transport operation]. 2021, №.2. pp. 78-86. (In Russian).
11. Vaskov A.S., Mamaev K.P., Skorokhodov S.V. [Comparative analysis of methods of definition of speed reserve of depth at movement of a vessel on shallow water]. - Novorossiysk: NVIMU, 1989. - 61 c. - Russ. - Dep. to Mortekhin-formreklama, No. 959 - mf. (In Russian).
12. Vorobyev Y.L., Sokolov V.T., Zhuravitsky T.D., Kokhanov E.V., Kubachev H.A., Labin A.I. K voprosu o navigacionny`x zapasax glubiny` pod kilem sudna pri plavanii v kanalax i na melkovod'e [To the question of navigational depth reserves under the keel of a ship when navigating in channels and shallow water]. *Mor. transp. Ser.: Sudovozhdenie i svyaz`. E'kspress - informatsiya Mortekhinformreklama* [Marine Transp. Ser.: Shipping and Communication/ Express - information Mortekhinformreklama]. 1986, Vyp. 9(194), pp. 1-18. (In Russian).
13. Ivanov A.A., Pazynich G.I. E'ffektivny`j sposob sovremennogo opredeleniya zapasa vody` pod kilem dlya promy`slovy`x sudov pri plavanii na melkovod'e [Effective method of modern determination of water reserve under the keel for fishing vessels when navigating in shallow water]. *Prakticheskaya podgotovka v morskoy obrazovanii: Sbornik trudov regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, Kerch`, 16–17 noyabrya 2017 goda / pod obshhej redakciej E.P. Masyutkina. Kerch`: FGBOU VO «Kerchenskij gosudarstvenny`j morskoy texnologicheskij universitet»* [Practical training in maritime education : Proceedings of the regional scientific-practical conference, Kerch, November 16-17, 2017 / Under the general editorship of E. P. Masyutkin. Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University"]. 2017, pp. 122-13. (In Russian).
14. Ivanovskiy A.N., Ivanovskiy N.V. Ocenka bezopasnoj shiriny` polosy` dvizheniya sudna pri proxozhdenii cherez Kerch`-Enikal'skiy kanal [Estimation of the safe width of the ship lane when passing through the Kerch-Yenikal Canal]. *Molodoj ucheny`j* [Young scientist]. 2019. № 28 (266). pp. 39-41. (In Russian).

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

15. Svyatsky V. V. *Primenenie modeli E`rlanga dlya modelirovaniya processa pogranichnogo kontrolya sudov, sleduyushhix cherez Kerch`-Enikal'skiy kanal* [Application of Erlang's model for modeling the process of border control of vessels traveling through the Kerch-Yenikal Canal]. *Nauchny`e problemy` vodnogo transporta* [Scientific problems of water transportation], (77), 229-238. (In Russian).

#### Сведения об авторах / Information about authors

<b>Святский Виталий Владимирович</b>	преподаватель кафедры Судовождения и промышленного рыболовства «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, vetal-s25-009@mail.ru
Sviatskii Vitalii Vladimirovich	Lecturer of the Department of Navigation and Industrial Fishing, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: vetal-s25-009@mail.ru