

УДК 629.5.011; 629.5.016; 629.5.018; 629.123

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СЭУ СУДОВ КЛАССА АФРАМАКС НА ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОГО АНАЛИЗА

Иванченко Александр Андреевич¹, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок

e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru

Конев Георгий Алексеевич¹, магистрант, аспирант

e-mail: sigen11@yandex.ru

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования по оптимизации состава СЭУ судов класса Афрамакс с использованием методов предиктивного анализа жизненного цикла. На основе ретроспективного анализа эксплуатационных параметров по 51 судну дедвейтом от 80 до 150 тыс. тонн за период с 1970 по 2021 год выявлены закономерности совершенствования судовых энергетических установок и определены наиболее перспективные архитектурно-конструктивные решения. Разработана методика многокритериальной оптимизации, учитывающая совокупность технических, экономических и экологических критериев эффективности. Проведены расчеты, показывающие возможность повышения η_u до 58 – 62%, снижения расхода топлива на 20 – 30 %, сокращения выбросов CO₂ на 35 – 40% и NO_x на 60 – 70% за счет применения двухтопливных малооборотных дизелей на СПГ, электрохимических генераторов и возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, суда класса Афрамакс, предиктивный анализ, двухтопливные двигатели, энергоэффективность.

MULTI-CRITERIA OPTIMISATION OF AFRAMAX CLASS SHIPS' EMS COMPOSITION BASED ON PREDICTIVE ANALYSIS

Ivanchenko Aleksandr Andreyevich¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants

e-mail: IvanchenkoAA@gumrf.ru

Konev Georgay Alekseevich¹, Master's Degree Student, Doctoral Student of the Dept. of ICE and AMPP

e-mail: sigen11@yandex.ru

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article presents the results of the research on optimisation of the composition of ship power plants for Aframax class ships using the methods of predictive life cycle analysis. On

the basis of retrospective analysis of operational parameters for 51 vessels with deadweight from 80 to 150 thousand tonnes for the period from 1970 to 2021, SPP improvement regularities were revealed and the most promising architectural and constructional solutions were identified. The methodology of multi-criteria optimisation has been developed, taking into account a set of technical, economic and ecological efficiency criteria. Calculations showing the possibility to increase η_{SPP} up to 58 – 62%, to reduce fuel consumption by 20 – 30%, to reduce CO₂ emissions by 35 – 40% and NO_x emissions by 60 – 70% through the use of dual-fuel low-speed diesel engines fuelled by LNG, electrochemical generators and renewable energy sources have been carried out.

Keywords: ship power plants, Aframax class ships, predictive analysis, dual-fuel engines, energy efficiency.

Повышение энергетической эффективности и экологичности морского транспорта является одним из ключевых вызовов современного этапа научно-технического развития отрасли. Особую актуальность данная проблема имеет для крупнотоннажных судов класса Афрамакс, на которые приходится основная доля мировых региональных морских перевозок [1, 2]. Несмотря на достигнутый в последние десятилетия прогресс, потенциал дальнейшего совершенствования традиционных судовых энергетических установок (СЭУ) на базе паротурбинных и дизельных установок в значительной мере исчерпан [3, 4]. Необходим переход к качественно новым техническим решениям, основанным на инновационных технологиях двухтопливных малооборотных ДВС, электродвижения, утилизации вторичных энергоресурсов, применения альтернативных видов топлива и возобновляемых источников энергии [5, 6]. Для научного обоснования выбора оптимальных проектных решений требуются соответствующие методы и модели, обеспечивающие достоверное прогнозирование эксплуатационных характеристик СЭУ на различных горизонтах планирования [7, 8].

Целью настоящего исследования являлась разработка методологии многокритериальной оптимизации состава перспективных СЭУ судов класса Афрамакс на основе предиктивного анализа технико-экономических и экологических показателей жизненного цикла в изменяющихся условиях внешней среды.

Для выявления закономерностей развития СЭУ проанализирована база данных по 51 судну класса Афрамакс, построенным в период с 1970 по 2021 год. Анализ типов главных двигателей позволил выделить три основных этапа эволюции: 1) 1970-е – начало 1990-х гг. – паротурбинные (ПТУ) и малооборотные дизельные установки (МОДД); 2) 1990-е – 2000-е гг. – доминирование МОДД повышенной агрегатной мощности; 3) 2010-е гг. – внедрение дизель электрических установок (ДЭУ), винторулевых колонок (ВРК), систем глубокой утилизации тепла (ГУТ), двухтопливных двигателей (ДТД). Таблица 1 отражает динамику ключевых показателей энергоэффективности СЭУ за рассматриваемый период. Очевиден существенный прогресс: рост $\eta_{СЭУ}$ в 1.5 – 1.7 раза, снижение удельного расхода топлива (b_e) на 35 – 40 %, сокращение выбросов CO₂ на 40 – 45%. Это стало возможным благодаря совершенствованию рабочего процесса тепловых двигателей, внедрению электродвижения (ЭСЭУ), ВРШ и систем ГУТ.

Таблица 1

Сравнительный анализ ЭП СЭУ судов класса Афрамакс различных поколений

Характеристики	1970-е	1980 – 1990-е	2000-е	2010-е
Тип СЭУ	ПТУ и МОДД	МОДД	МОДД, ЭСЭУ	МОДД, ГТУ, ТОТЭ
Агрегатная мощность ГД, МВт	12 – 20	14 – 18	15 – 18	15 – 18



$\eta_{сэу}$, %	32 – 40	42 – 48	46 – 52	50 – 56
b_e , г/(кВт·ч)	220 – 260	190 – 210	170 – 190	150 – 170
Выбросы CO_2 , г/(т·км)	–	7 – 9	5 – 7	4 – 5

Разработанная методология включает следующие основные этапы: 1. Формирование системы критериев эффективности, отражающих ключевые технические, экономические и экологические аспекты: - $\eta_{сэу}$; - b_e ; - выбросы CO_2 , NO_x , SO_x ; - затраты топлива; - чистый дисконтированный доход проекта; 2. Построение параметрических моделей подсистем СЭУ различного уровня детализации: - 0D/1D-модели термодинамических процессов в тепловых двигателях; - 3D-модели гидрогазодинамики и теплообмена в энергомашинах; - квазистационарные модели электроэнергетических процессов; - аппроксимационные модели показателей эффективности на основе методов машинного обучения; 3. Решение задачи многокритериальной оптимизации эволюционными алгоритмами: - генерация исходной популяции решений на основе онтологии проектной области; - расчет значений критериев для каждого варианта с помощью разработанных моделей; - ранжирование решений по Парето, селекция и формирование новых поколений; - нахождение аппроксимации фронта Парето-оптимальных решений; - выбор пред-почтительного варианта с учетом дополнительной информации от ЛПП. В качестве переменных оптимизации рассматривались архитектура СЭУ, типы, количество и мощность главных и вспомогательных двигателей, наличие валогенераторов и утилизационных турбин, характеристики движителей, виды топлива и др.

Результаты оптимизационных расчетов по оптимизации СЭУ перспективных судов класса Афрамекс дедвейтом 120 тыс. тонн показали, что наилучшим образом удовлетворяют целевым показателям энергоэффективности и экологичности IMO варианты на основе ДТД МОДД, использующих в качестве основного энергоносителя СПГ или метанол (таблица 2). Их применение в составе комбинированных СЭУ с ВРШ, утилизационными турбогенераторами и возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) позволяет обеспечить прирост КПД до 58 – 60%, снижение расхода топлива на 25 – 30% и выбросов CO_2 на 35 – 40% по сравнению с базовым вариантом на традиционном жидком углеводородном топливе. При этом ожидаемые капитальные затраты на создание энергокомплекса возрастают в среднем на 20 – 30%, что с учетом экономии на стоимости топлива за жизненный цикл дает увеличение чистого дисконтированного дохода проекта на 10 – 15%.

Таблица 2

Прогнозные технико-экономические показатели перспективных КСЭУ до 2035 года

Вариант КСЭУ	$\eta_{сэу}$, %	B_e , т/сут	Выбросы CO_2 , г/(т·км)	Затраты на топливо, млн. \$/год
ДТД ММДД на СПГ/метаноле + ВРШ	54 – 58	60 – 70	3.5 – 4.0	8 – 10
ДТД ММДД на СПГ/метаноле + ВРШ + ВГ + ФЭП	56 – 60	55 – 65	3.0 – 3.5	7 – 9
КСЭУ: ДТД ММДД на СПГ + ЭД + ТОТЭ	58 – 62	50 – 60	2.5 – 3.0	6 – 8
ММДД на аммиаке + ЭД + ТЭГ	50 – 55	80 – 90	4.5 – 5.0	12 – 14

Еще более радикальное сокращение вредных выбросов (на 80 – 90% по NO_x и практически полное по SO_x и твердым частицам) достижимо при использовании твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) и замкнутых термодинамических циклов. Анализ,



их внедрения показал увеличение приведенных затрат в 1,5 – 2 раза из-за высокой стоимости и ограниченного ресурса оборудования, что снижает инвестиционную привлекательность таких решений в условиях значительных рыночных рисков. Таблица 3 содержит оптимальные по Парето решения для СЭУ перспективного танкера, отличающиеся разным уровнем инновационности. Видно, что уже применение систем ГУТ и ВРШ на базе традиционного МОДД обеспечивает заметное улучшение показателей относительно базовой версии двигателя. Максимальный технико-экономический эффект при приемлемых затратах дает использование газовых технологий в сочетании с ВИЭ.

Таблица 3

Оптимальные по Парето решения для СЭУ судна Афрамекс дедевтором 120 тыс. т

Критерий / Вариант	Базовый	С ГУТ и ВРШ	С ЭХГ и ВИЭ
$\eta_{сэу}$, %	47.8	55.3	59.6
V_e , т/сут	78.4	65.9	58.2
Выбросы CO_2 , г/(т·км)	5.3	4.1	3.4
Выбросы NO_x , г/(т·км)	2.2	1.5	0.8
Приведенные затраты на топливо, млн. \$/год	9.5	7.8	6.6
ЧДД проекта за 25 лет, млн. \$	105	128	144

Согласно полученным результатам, рациональная конфигурация СЭУ для достижения перспективных целевых показателей энергоэффективности включает (таблица 4): - ДТД МОДД типа ME-GI, WinGD X-DF мощностью от 15 до 20 МВт; - прямую передачу мощности на 1 ВРШ диаметром 7 – 8 м; - 2 – 3 дизель-генератора суммарной мощностью 3 – 5 МВт; - утилизационный котел и паротурбогенератор мощностью 1 – 1.5 МВт; - литий-ионную АБ для выравнивания нагрузок.

Таблица 4

Состав СЭУ на основе ДТД МОДД, обеспечивающих достижение целевых показателей энергоэффективности IMO-2025

Вариант	V , уз	$P_{дл}$, МВт	b_e , г/(кВт·ч)	$P_{дл}$, МВт	$\eta_{сэу}$, %	gCO_2 , г/(т·км)
MEGI-7G70ME-C10.5-GI x 1	15,5	17,5	155	2 x 1,2	56,8	3,6
MEGI-5G90ME-C10.5-GI x 1	16,0	20,0	150	3 x 2,1	57,2	3,4
X-7X82-DF x 1	15,2	16,6	156	4 x 1,1	56,5	3,7
6X92-DF x 1 + реллоу ПТУ	16,2	19,8	151	–	57,4	3,5

В долгосрочной перспективе прогнозируется существенная трансформация мирового рынка СЭУ для крупнотоннажных танкеров (таблица 5). К 2050 г. ожидается сокращение доли традиционных дизелей до 15%, рост числа ДТД МОДД до 45%, увеличение сегмента ТОТЭ и ЭХГ до 10%. Более 10% могут занять реакторные установки и ВИЭ, что позволит приблизиться к концепции безуглеродного судоходства.

Таблица 5

Прогноз изменения структуры мирового рынка СЭУ судов Афрамекс до 2050 года

Тип СЭУ / Период	2020	2030	2040	2050
ТСЭУ	85 %	60 %	35 %	15 %
МОДД ДТД	10 %	25 %	40 %	45 %
ГТУ и комбинированные дизель-газовые	3 %	8 %	12 %	15 %
На топливных элементах и ЭХГ	–	2 %	5 %	10 %
Ядерные	2 %	3 %	5 %	10 %
Прочие (ветряные, солнечные и др.)	–	2 %	3 %	5 %



Заключение

Разработанная методология многокритериальной оптимизации состава КСЭУ судов класса Афрамакс на основе предиктивного анализа ЭП обеспечивает возможность определения наиболее эффективных и сбалансированных решений, отвечающих перспективным требованиям ИМО по энергоэффективности, экологичности и безопасности. Результаты исследований показывают, что в средне- и долгосрочной перспективе оптимальными являются варианты КСЭУ на основе ДТД МОДД, работающих преимущественно на СПГ, частично интегрированных с электродвижением, системами ГУТ, накопителями энергии и ВИЭ. Это позволит повысить $\eta_{\text{сэу}}$ до 58 – 62%, на четверть снизить расход b_e и на треть сократить выбросы парниковых газов при обеспечении высокого уровня надежности и приемлемых затратах. Дальнейшее улучшение экологических характеристик предполагает переход на безуглеродные энергоносители (аммиак, водород) и электрохимические генераторы, что требует решения ряда фундаментальных технологических проблем. Полученные выводы создают научный задел для технико-экономического обоснования программ модернизации отечественного флота и развития производственного и кадрового потенциала судостроительной отрасли в соответствии с приоритетами Национальной программы социально-экономического развития Дальнего Востока на период до 2024 года и на перспективу до 2035 года. Дальнейшие исследования связаны с созданием цифровой платформы поддержки жизненного цикла КСЭУ на основе интеграции технологий предиктивной аналитики данных, виртуальных испытаний и оптимизации в соответствии с концепцией Индустрия 5.0.

Список литературы:

1. Wang Z. et al. Configuration of Low-Carbon fuels green marine power systems in diverse ship types and Applications // Energy Conversion and Management. – 2024. – Т. 302. – С. 118139.
2. Nivolianiti E., Karnavas Y. L., Charpentier J. F. Energy management of shipboard microgrids integrating energy storage systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2024. – Т. 189. – С. 114012.
3. Ji Z., Wang Z., Miao X. Y. Scheme Construction and Evaluation of a Closed Solid Oxide Fuel Cell Hybrid Engine for Power and Propulsion on Ships // Available at SSRN 4743187.
4. Wang Z. et al. Configuration of Low-Carbon fuels green marine power systems in diverse ship types and Applications // Energy Conversion and Management. – 2024. – Т. 302. – С. 118139.
5. Eze V. H. U. et al. Advancements in Energy Efficiency Technologies for Thermal Systems: A Comprehensive Review // INOSR APPLIED SCIENCES. – 2024. – Т. 12. – №. 1. – С. 1 – 20.
6. Prados J. M. M. et al. The decarbonisation of the maritime sector: Horizon 2050 // Brodogradnja. – 2024. – Т. 75. – №. 2. – С. 75202.
7. Abraham E. J. et al. Large-scale shipping of low-carbon fuels and carbon dioxide towards decarbonized energy systems: Perspectives and challenges // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Т. 63. – С. 217 – 230.
8. Hatami-Marbini A., Asu J. O., Khoshnevis P. Environmental performance assessment in the transport sector using nonparametric frontier analysis: a systematic literature review // Computers & Industrial Engineering. – 2024. – Т. 189.

