

УДК 629.5.03:658.58

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК АВТОНОМНЫХ СУДОВ

Кузнецов Артём Сергеевич¹, аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания и автоматизации судовых энергетических установок

e-mail: kuznetcovartem2020@yandex.ru

Иванченко Александр Андреевич¹, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматизации судовых энергетических установок

e-mail: ivanchenkoaa@gumrf.ru

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

Аннотация. Выполнен сравнительный технико-экономический анализ двух стратегий технического обслуживания судовых энергетических установок автономных судов: планово-предупредительной и обслуживания по фактическому техническому состоянию. Стратегия обслуживания по фактическому состоянию реализуется на основе непрерывного мониторинга и предиктивной диагностики оборудования. Расчёт выполнен на горизонте десяти лет в относительных показателях с использованием метода чистой приведённой стоимости. Оценки экономии затрат и снижения внеплановых простоев приняты по данным Министерства энергетики США (FEMP O&M Best Practices Guide) и обзорных публикаций по морскому сектору. Показано, что стратегия обслуживания по фактическому состоянию обеспечивает повышение коэффициента технической готовности и более низкие совокупные приведённые затраты при сроке окупаемости в пределах нескольких лет.

Ключевые слова: автономное судно, морские автономные надводные суда, судовая энергетическая установка, обслуживание по фактическому техническому состоянию, предиктивная диагностика, технико-экономический анализ, чистая приведённая стоимость, надёжность, коэффициент технической готовности.

TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF CONDITION-BASED MAINTENANCE EFFICIENCY FOR POWER PLANTS OF AUTONOMOUS SHIPS

Artyom S. Kuznetsov¹, Postgraduate Student, Department of Internal Combustion Engines and Marine Power Plant Automation

e-mail: kuznetcovartem2020@yandex.ru

Alexander A. Ivanchenko¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Internal Combustion Engines and Marine Power Plant Automation

e-mail: ivanchenkoaa@gumrf.ru

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

Abstract. A comparative techno-economic analysis of two maintenance strategies for marine power plants of autonomous ships is performed: planned preventive maintenance and condition-based maintenance. The condition-based maintenance strategy is implemented through continuous monitoring and predictive diagnostics of equipment. The calculation is carried out over a ten-year horizon in relative terms using the Net Present Value method. Cost-saving and unplanned downtime reduction estimates are taken from the U.S. Department of Energy (FEMP O&M Best Practices Guide) and peer-reviewed reviews on the maritime sector. The condition-based strategy is shown to provide a higher technical availability coefficient and lower total discounted costs with a payback period within several years.

Keywords: autonomous ship, MASS, marine power plant, condition-based maintenance, predictive diagnostics, techno-economic analysis, net present value, reliability, technical availability.

Введение

Развитие технологий автономного судоходства относится к числу ключевых направлений трансформации мировой морской индустрии. На 110-й сессии Комитета по безопасности на море Международной морской организации (MSC 110, июнь 2025 г.) достигнут существенный прогресс в разработке необязательного Кодекса для морских автономных надводных судов (МАНС); принятие документа запланировано на сессию MSC 111 в мае 2026 г. с дальнейшим переходом к обязательной редакции к 2032 г. [1]. В Российской Федерации правовые основы эксплуатации автономных судов закреплены Федеральным законом № 294-ФЗ от 10 июля 2023 г., вступившим в силу с 1 сентября 2024 г., а с 1 июля 2024 г. действуют требования части XVII Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства, вводящие дополнительные знаки символа класса для МАНС [2, 3].

Особое значение в условиях автономной эксплуатации приобретает надёжность судовой энергетической установки (СЭУ), отказ которой в рейсе при отсутствии экипажа на борту не может быть оперативно устранён традиционными методами и способен привести к катастрофическим последствиям. Согласно ежегодному обзору Европейского агентства по безопасности на море (EMSA) 2025 г., за период 2015–2024 гг. отказы оборудования сохраняют значительную долю в структуре морских аварий [4]. Это обстоятельство обосновывает экономическую и техническую целесообразность перехода от регламентного обслуживания к стратегии, основанной на непрерывном мониторинге фактического состояния оборудования.

Целью настоящей работы является сравнительная технико-экономическая оценка двух стратегий технического обслуживания энергетических установок автономных судов — планово-предупредительной и обслуживания по фактическому техническому состоянию — с расчётом ключевых показателей экономической эффективности на горизонте десяти лет в относительных величинах.

1. Постановка задачи и характеристика стратегий обслуживания

Согласно унифицированному требованию Международной ассоциации классификационных обществ UR Z27, обслуживание по фактическому техническому состоянию рассматривается классификационными обществами как самостоятельная стратегия, допустимая в качестве альтернативы регламентному техническому обслуживанию при выполнении ряда условий по непрерывному мониторингу контролируемых параметров [5]. Применительно к энергетическим установкам автономных судов такая стратегия становится не альтернативой, а необходимым элементом



обеспечения требуемого уровня живучести в условиях ограниченных возможностей вмешательства экипажа.

Сравнительный анализ выполнен для двух стратегий технического обслуживания:

— планово-предупредительная стратегия: ремонтные операции выполняются с фиксированной периодичностью по наработке в соответствии с требованиями УТ МАКО UR Z18 [6]; принимается в качестве базы для сравнения;

— стратегия обслуживания по фактическому техническому состоянию: ремонтные воздействия назначаются по результатам непрерывного мониторинга и предиктивной диагностики ключевых элементов СЭУ, реализуемой по схеме УТ МАКО UR Z27 [5].

В качестве объекта исследования принято полуавтономное судно с двумя главными среднеоборотными дизель-генераторами суммарной электрической мощностью 4 МВт и одним вспомогательным дизель-генератором мощностью 800 кВт, имеющее знак символа класса SAS-RCC по требованиям РС [3]. Срок эксплуатации, принимаемый для расчётов, составляет 10 лет; коэффициент дисконтирования принят равным 12 % годовых, что соответствует среднему уровню стоимости капитала в российской судоходной отрасли.

2. Методика оценки затрат и выгод от внедрения стратегии обслуживания по фактическому состоянию

Совокупные приведённые затраты на внедрение и эксплуатацию стратегии обслуживания по фактическому состоянию на горизонте T лет определяются как сумма капитальных (CAPEX) и операционных (OPEX) затрат, дисконтированных к моменту оценки:

$$C_{total} = CAPEX + \sum_{t=1}^T OPEX_t / (1 + r)^t, \quad (1)$$

где CAPEX — капитальные затраты на оборудование, монтаж и пуско-наладку системы предиктивной диагностики; $OPEX_t$ — операционные затраты в год t ; r — ставка дисконтирования; T — горизонт планирования.

Структура CAPEX для системы мониторинга СЭУ автономного судна включает четыре основных группы затрат: комплект датчиков (вибрационных, температурных, давления, контроля параметров масла); вычислительные модули обработки данных в составе бортовой системы автоматизации; программное обеспечение предиктивной аналитики; работы по интеграции с существующими системами и пуско-наладку. Структура OPEX включает расходы на спутниковый канал передачи данных с борта на береговой центр, лицензионные отчисления за использование аналитической платформы, поверку и калибровку датчиков, повышение квалификации персонала.

Экономические выгоды от перехода к стратегии обслуживания по фактическому состоянию формируются из четырёх основных составляющих: B_1 — сокращение прямых эксплуатационных издержек простоя за счёт снижения числа внеплановых отказов; B_2 — экономия на регламентных операциях технического обслуживания, выполнение которых становится избыточным при наличии достоверной диагностической информации; B_3 — продление фактического ресурса критических узлов вследствие своевременного выявления ранних стадий деградации; B_4 — снижение страховых выплат и косвенных потерь, связанных с авариями. Совокупная приведённая выгода рассчитывается как:

$$B_{total} = \sum_{t=1}^T (B_{1,t} + B_{2,t} + B_{3,t} + B_{4,t}) / (1 + r)^t. \quad (2)$$



3. Исходные данные для расчёта

Количественные оценки эффектов от внедрения стратегии обслуживания по фактическому состоянию приняты по результатам опубликованных исследований. Ключевым эталонным источником является руководство Министерства энергетики США «Operations & Maintenance Best Practices Guide», подготовленное Pacific Northwest National Laboratory в рамках Federal Energy Management Program [7]. Согласно данным указанного руководства, переход от планово-предупредительной к стратегии предиктивного обслуживания обеспечивает снижение совокупных эксплуатационных затрат на 8–12 % и сокращение числа внеплановых отказов на 35–45 %; ожидаемое увеличение коэффициента технической готовности составляет до 30 % [7, гл. 5].

Применительно к морскому сектору сопоставимые оценки приведены в обзорной статье Velasco-Gallego и др. (Journal of Marine Science and Engineering, 2025): внедрение методов предиктивной диагностики на судах позволяет снизить операционные затраты на техническое обслуживание до 45 % по сравнению с традиционными стратегиями [8]. В работе Cheliotis и др. (Ocean Engineering, 2020) для систем диагностики на основе методов машинного обучения зафиксирован рост коэффициента технической готовности судов с 92–94 % до 96–98 % [9]. Эти данные подтверждаются также практикой эксплуатации сервисов удалённого мониторинга Wärtsilä Online и MAN PrimeServ, отчёты по которым доступны в открытых источниках производителей.

Для целей настоящего расчёта приняты консервативные значения экономических эффектов из указанных диапазонов: снижение внеплановых простоев на 35 %, экономия на регламентных операциях технического обслуживания — 10 %, продление ресурса узлов в среднем на 15 %, снижение страховых издержек — 10 %. Капитальные затраты на внедрение системы мониторинга оценены ориентировочно в 8–10 % от стоимости планово-предупредительного цикла за 10 лет (соответствует данным [7, табл. 5.4] для энергетического оборудования сопоставимого класса).

4. Сравнительный расчёт стратегий

Результаты сводного расчёта в относительных показателях (за базу принята планово-предупредительная стратегия) представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнительная технико-экономическая оценка стратегий обслуживания энергетической установки автономного судна (горизонт 10 лет)

Показатель	Планово-предупредительная стратегия (база)	Обслуживание по фактическому техническому состоянию
Капитальные затраты, отн. ед. [7]	1,00	1,08
Среднегодовые затраты на ТО, отн. ед. [7, 8]	1,00	0,90
Среднегодовые потери от внеплановых простоев, отн. ед. [7, 9]	1,00	0,65
Коэффициент технической готовности, % [9]	93,4	97,1
Совокупные приведённые затраты за 10 лет, отн. ед.	1,00	0,82
Чистая приведённая стоимость относительно базы, отн. ед.	0	+0,18
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	—	≈ 3



Анализ полученных данных показывает, что стратегия обслуживания по фактическому техническому состоянию обеспечивает повышение коэффициента технической готовности с 93,4 % до 97,1 %, что для автономного судна имеет принципиальное значение. Суммарные приведённые затраты за 10 лет сокращаются примерно на 18 % относительно планово-предупредительной стратегии. Срок окупаемости капитальных вложений в систему мониторинга и предиктивной диагностики составляет около трёх лет, после чего стратегия обеспечивает устойчивое снижение операционных издержек на всём оставшемся жизненном цикле судна.

Дополнительный эффект от внедрения системы предиктивной диагностики связан с возможностью интеграции получаемых данных в процедуры формализованной оценки безопасности ИМО [10]. Данные мониторинга позволяют уточнять оценки вероятностей отказов на этапе количественного анализа рисков, что повышает обоснованность управленческих решений по обеспечению безопасности эксплуатации СЭУ автономного судна.

Заключение

Выполненная сравнительная технико-экономическая оценка двух стратегий технического обслуживания энергетических установок автономных судов показала, что обслуживание по фактическому техническому состоянию обеспечивает наибольший экономический эффект на горизонте 10 лет при коэффициенте технической готовности 97,1 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к энергетическим установкам автономных судов с учётом ограниченных возможностей вмешательства экипажа. Оценки экономических эффектов основаны на публикациях Министерства энергетики США и рецензируемых научных работах по морскому сектору. Срок окупаемости капитальных вложений в систему предиктивной диагностики составляет около трёх лет для рассмотренного полуавтономного судна и сокращается с ростом уровня автономности и интенсивности эксплуатации судна.

Полученные результаты подтверждают обоснованность приоритета стратегии обслуживания по фактическому техническому состоянию при проектировании новых автономных и полуавтономных судов и могут быть использованы при формировании комплекса мер по управлению рисками в рамках процедуры формализованной оценки безопасности на этапе анализа затрат и выгод.

Список литературы

1. IMO Maritime Safety Committee. Outcome of the 110th session (MSC 110), 18–27 June 2025. – London: IMO, 2025. – URL: <https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/msc-110th-session.aspx> (дата обращения: 06.05.2026).
2. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 10.07.2023 № 294-ФЗ (ред. от 26.02.2024) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2023. – № 29. – Ст. 5301. – Вступил в силу с 01.09.2024.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна. – Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2024. – Действуют с 01.07.2024.



4. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2025. – Lisbon : European Maritime Safety Agency (EMSA), 2025. – URL: <https://www.emsa.europa.eu/publications/annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents.html> (дата обращения: 06.05.2026).
5. IACS Unified Requirement UR Z27. Condition Based Maintenance Surveys. – International Association of Classification Societies, 2024. – URL: <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements> (дата обращения: 06.05.2026).
6. IACS Unified Requirement UR Z18. Periodical Survey of Machinery. – International Association of Classification Societies, 2023. – URL: <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements> (дата обращения: 06.05.2026).
7. Sullivan G.P., Pugh R., Melendez A.P., Hunt W.D. Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency. Release 3.0. – Richland (WA, USA) : Pacific Northwest National Laboratory ; U.S. Department of Energy, Federal Energy Management Program, August 2010. – 321 p. – URL: https://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/om_3.pdf (дата обращения: 06.05.2026).
8. Velasco-Gallego C., De Maya B.N., Molina C.M., Lazakis I., Mateo N.C. Towards Predictive Maintenance in the Maritime Industry: A Component-Based Overview // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13, No. 3. – Art. 425. – DOI: 10.3390/jmse13030425.
9. Cheliotis M., Lazakis I., Theotokatos G. Machine learning and data-driven fault detection for ship systems operations // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 216. – Art. 107968. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107968.
10. Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process : MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2. – London : International Maritime Organization, 2018. – 75 p.

