

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-138-147

EDN OUDSCU

POSSIBILITY OF USING TRADITIONAL MODERN MARINE DIESEL POWER PLANTS IN AUTONOMOUS SHIPPING

A. P. Petrov, G. E. Zhivljuk

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The subject of this study is the equipment of the marine power plant of autonomous vessels. The degree of readiness of a modern marine power plant for use on autonomous vessels is considered from the point of view of its high degree of reliability. The paper demonstrates the capabilities of the method for constructing a table of operational risk indices and a redundancy risk index using the example of an average vessel intended for coastal shipping in European waters. Based on the presented sample of power plant elements, the operational risk index and the redundancy risk index for the marine equipment are analyzed, and an analysis of the reasons for their importance is given. The main engine and its elements, torque transmission mechanism, auxiliary engines and generator sets, fuel, lubrication, cooling water supply systems, and the air starting system are discussed as examples. In addition, the steering gear and the exhaust system are considered, and the redundancy risk indices (RRRI) are given for the selected equipment. After identifying the weak links of the considered installations, solutions for overcoming the risks that arise are proposed. It is noted that these solutions depend directly on the weak link and may consist of several options. Examples include redundant tuning, searching for alternative ship machinery elements with a lower risk index, or considering actions that allow a certain part to be fully operational. The paper attempts to find a solution for each element of the sample with a high-risk level (RRRI equal to 8, 9, or 10) when components are considered for improving reliability. Components with an average RRRI value of 6 or 7 are also considered. In this case, the implementation of alternative methods for forming a propulsion complex, for example, based on the known principles of electric propulsion, is noted as highly attractive as a way to overcome a large number of problems. It is concluded that no solutions are possible without a comprehensive analysis of financial viability. The conclusions drawn from the results reflect the possible direction of work on the creation of a marine power plant for equipping autonomous vessels.

Keywords: autonomous vessel, autonomous control, possible solutions, mechanical installation, reliability, failures, weak links, indices, risks, severity of consequences.

For citation:

Petrov, Aleksandr P. and G. E. Zhivljuk "Possibility of using traditional modern marine diesel power plants in autonomous shipping." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2024): 138–147. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-138-147.

УДК 621.43.074

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ СОВРЕМЕННЫХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В АВТОНОМНОМ СУДОХОДСТВЕ

А. П. Петров, Г. Е. Живляук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом настоящей работы является анализ систем оборудования судовой энергетической установки автономных судов. Рассмотрена степень готовности современной судовой энергетической установки для применения на автономных судах с точки зрения ее высокой степени надежности. В работе продемон-

стрированы возможности метода построения таблицы индексов рисков эксплуатации и индекса риска снижения избыточности на примере среднестатистического судна, предназначенного для каботажных морских перевозок. На основе представленной выборки элементов энергетической установки выполнен анализ индекса риска эксплуатации и индекса риска снижения избыточности судового оборудования, а также анализ причин, в соответствии с которыми они имеют такое важное значение. В качестве примеров рассмотрены главный двигатель и его элементы, механизм передачи крутящего момента, вспомогательные двигатели и генераторные установки, системы подачи топлива, смазки, охлаждающей воды, а также система воздушного пуска. Кроме того, рассмотрено рулевое устройство и система выпуска отработавших газов, приведены индексы риска снижения избыточности RRR1 выбранного оборудования. После выявления слабых звеньев рассматриваемых установок предложены решения по преодолению возникающих рисков. Отмечается, что эти решения зависят непосредственно от слабого звена и могут состоять из нескольких вариантов. Указано, что примерами могут служить избыточная настройка, поиск альтернативных элементов судового механизма с более низким индексом риска или рассмотрение действий, позволяющих сделать определенную деталь полностью работоспособной. В работе предпринята попытка найти решение для каждого элемента выборки с высоким уровнем риска (RRR1 равно 8, 9 или 10), когда компоненты рассматриваются на предмет повышения надежности. Также рассмотрены компоненты со средним значением RRR1 — 6 или 7. В этом случае отмечается высокая привлекательность реализации альтернативных способов формирования пропульсивного комплекса, например, исходя из известных принципов электродвижения как способа преодоления большого числа проблем. Сделано заключение о том, что любые решения невозможны без всестороннего анализа финансовой жизнеспособности. Выводы, сделанные на основе полученных результатов, отражают возможную направленность работ по созданию судовой энергетической установки для комплектования автономных судов.

Ключевые слова: автономное судно, автономное управление, возможные решения, механическая установка, надежность, отказы, слабые звенья, индексы, риски, тяжесть последствий.

Для цитирования:

Петров А. П. Возможность использования традиционных современных судовых дизельных энергетических установок в автономном судоходстве / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 17. — № 1. — С. 138–147. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-138-147. — EDN OUDSCU.

Введение (Introduction)

По прогнозам специалистов, в ближайшие несколько лет цифровизация и автоматизация станут ключевыми факторами инноваций в области морского транспорта [1]. Такая направленность развития судоходной отрасли неизбежно отразится на подходах к обеспечению надежности оборудования, предназначенного для удаленного управления с минимальной поддержкой людей. Несмотря на большое количество исследований в области автономных систем навигации и управления на морском транспорте оценке необслуживаемых машинных помещений уделено недостаточное внимание. Отчасти это связано с высокой сложностью и многообразием оборудования машинного помещения, бесперебойная работа которого в условиях автономного судна (АС)¹ является залогом его успешного функционирования.

Безотказность традиционной судовой энергетической установки (СЭУ) и ее элементов обеспечивается постоянным контролем за их работой членами машинной команды. Для достижения возможности создания необслуживаемого в течение определенного времени машинного помещения, когда невозможно проведение направленных на обслуживание и устранение неполадок оборудования мероприятий со стороны специалистов машинной команды, необходимо, в первую очередь, выделить те судовые технические средства (СТС), которые проявляют наибольшую вероятность потери работоспособности с учетом возможных последствий их отказа. Такое состояние проблемы побуждает исследователей в своих разработках к созданию различных моделей оценки рисков, связанных с отказом СТС машинного помещения, и в конечном итоге к выработке стратегии обеспечения безотказной их работы.

Для того чтобы морские автономные или дистанционно управляемые надводные суда (МАНС) были эффективны во время безэкипажной эксплуатации, важно, чтобы автоматика машинного помещения самостоятельно управляла, выполняла мониторинг технического состояния

¹ Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. 96 с.

и поддерживала работоспособность всей энергетической установки без вмешательства человека². Автоматизированная механическая установка (АМУ — в трактовке РС³) должна быть достаточно устойчивой, чтобы иметь возможность восстанавливаться после периодических и случайных возмущающих воздействий, сбоев в работе и ухудшения эксплуатационных характеристик. В противном случае системе может потребоваться внеплановое техническое обслуживание или работа ее будет остановлена. Следовательно, АМУ должна обеспечивать свою работу без вмешательства человека и безопасно возвращать судно в порт.

Для моделирования сбоев в необслуживаемых компонентах машинного помещения создается дерево случайных процессов, а иерархический байесовский вывод используется для облегчения прогнозирования неизвестных параметров процесса. Принимая во внимание принцип дублирования наиболее уязвимых СТС как основной принятый метод обеспечения надежности, вероятностная байесовская сеть позволила разработать и оценить зависимость между активными и резервными компонентами, чтобы определить влияние резервных блоков на длительную работоспособность необслуживаемого оборудования. Полученные данные предоставляют полезную информацию для анализа связанных неопределенностей и прогнозирования неблагоприятных событий, которые подвергают риску СТС машинного помещения. Результатом анализа оказывается возможность прогнозирования периода надежной работы АМУ и способности к восстановлению функционирования необслуживаемого машинного отделения. Для демонстрации применения возможностей такого подхода рассматривается реальный пример торгового судна, используемого для каботажных морских перевозок в европейских водах.

Целью настоящей работы является формирование общих подходов к комплектованию машинных помещений безэкипажных судов на основе методик выявления слабых звеньев традиционных СЭУ посредством решения ряда следующих взаимосвязанных задач:

- создание выборки высокорисковых элементов из детальной разбивки систем и конструкции СЭУ;
- поузловая оценка рисков и потенциальных возможностей автономной работы машинного помещения;
- формирование предложений по совершенствованию высокорисковых узлов;
- поиск альтернативных способов достижения применимости традиционных СЭУ для АС.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Конструкции и комплектации машинных помещений отличаются многообразием [3]. В настоящей работе в качестве примера рассмотрено типичное судно ближнего плавания в европейских водах. Большинство таких судов работает на четырехтактных дизельных двигателях, соединенных с гребным винтом редукторной передачей, находясь исключительно в пределах зоны контроля выбросов (ECA) и используя в основном дистиллятные сорта топлива (судовое дизельное топливо (MDO)). Для дальнейшего анализа принимается судно с СЭУ, включающей один главный двигатель, два вспомогательных дизель-генератора и аварийный дизель-генератор. Работу судна и его энергетической установки поддерживают судовые системы и системы СЭУ. На начальном этапе для разбивки оборудования примем схему, приведенную на рис. 1.

Главный и вспомогательные двигатели, использующие систему пневмоцилиндрового запуска, охлаждаются с помощью трехконтурной водяной системы (высокотемпературная система (НТ), централизованной системы (низкотемпературной) (LT) и системы забортной воды (SW)) (см. *Возникший И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания. Конструкция двигателей: учебник. — В 2 т. — СПб.: Моркнига, 2010. — Т. 1. — 260 с.; т. 2. — 382 с.). Система топливоподготовки СЭУ обеспечивает оптимальные параметры, необходимые для эффективной работы дизельной топливной аппаратуры. Судно оснащено рулевым устройством в корме и носовыми подруливающими устройствами.

² Правила классификации и постройки морских судов. Ч. I: Классификация. СПб.: РМРС, 2024. 259 с.

³ Там же. Ч. XV: Автоматизация. СПб.: РМРС, 2024. 108 с.



Рис. 1. Схема первичной разбивки оборудования [2]

На следующем этапе должна быть выполнена более детальная разбивка с акцентированием внимания на отдельных, наиболее важных и ответственных элементах, приведенных на рис. 2.



Рис. 2. Дополнительная разбивка оборудования СЭУ [2]

Завершающий этап разбивки приведет к многочисленной (не менее 100 элементов) выборке элементов систем и устройств СЭУ. Поэтому рассмотрим в качестве примера часть этих элементов, за исключением тех, которые размещены в основном за пределами машинного отделения. Эти системы будут включать рулевое устройство, балластную, осушительную системы, систему пожаротушения и т. д. Однако поскольку рулевые машины часто являются причиной потери работоспособности судов [3], во внимание принимается рулевое устройство.

В разбивке главного энергетического оборудования необходимо акцентировать внимание на следующих наиболее уязвимых элементах пропульсивной системы: крышка цилиндра, цилиндропоршневая группа, турбокомпрессор, насосы систем двигателя, редуктор, система управления движением, дейдвудное устройство. Рассмотрим более подробно эти элементы.

Крышка цилиндра является одним из самых теплонапряженных элементов конструкции четырехтактного двигателя [4]. Возникающие циклические и регулярные термические напряжения в конструкции совместно с действующими механическими напряжениями приводят к образованию усталостных разрушений в виде трещин. Развитие трещины может привести к проникновению ее в полости охлаждения, что в конечном итоге способно создать аварийную ситуацию, спровоцировав гидроудар с полной потерей работоспособности двигателя. По этой причине крышки цилиндров подвергаются проверке на гидроплотность. Тем не менее не допуская развитие и усугубление аварийной ситуации, наличие незначительных протечек не оказывается критичным и двигатель может продолжать свое функционирование в аварийном режиме с ограничениями развиваемой мощности в течение некоторого непродолжительного периода времени до ремонта.

Поломка деталей цилиндропоршневой группы приводит к катастрофическим последствиям для двигателя с возможным разрушением деталей остова и серьезным повреждением деталей кривошипно-шатунного механизма [5]. Поэтому такие дефекты требуют немедленного останова двигателя.

Полный выход из строя агрегата наддува [6] с катастрофическими последствиями для двигателя представляется маловероятным. Нарушение работы турбокомпрессора для четырехтактного двигателя не следует рассматривать как критическую неисправность, так как оно неизбежно вызовет падение развиваемой мощности, но не приведет к останову двигателя, как в случае двухтактного двигателя, принципиально не способного работать без внешнего источника сжатого воздуха.

Насосы систем двигателя в большинстве конструкций судовых двигателей автономные и имеют электропривод. Как правило, в системах смазки и охлаждения автономные насосы дублированы [7], [8]. В случае навесного исполнения насосов с приводом от коленчатого вала двигателя насосы систем вполне могут быть продублированы автономными. Это означает, что оборудование может рассматриваться как избыточное, т. е. его индекс риска снижения избыточности RRRI [9] уменьшается на единицу. Аналогичные процессы могут быть уместны также для топливной системы, построенной по схеме аккумуляторной электронно-управляемой системы топливоподачи Common Rail, которой оснащено большое количество выпускаемых двигателей.

Нарушения функционирования элементов редукторной передачи повлекут за собой частичную или полную потерю хода судна. Наиболее удобный и надежный способ проверки состояния — контроль температуры и структуры редукторного масла. Если механизм передачи выходит из строя, то на гребной винт больше не может подаваться мощность, что делает последствия выхода из строя очень тяжелыми.

Система управления движением судна является важным элементом пропульсивной системы, оказывая большое влияние на маневренность. Основная нагрузка на систему приходится в акватории порта, и в случае возникновения чрезвычайной ситуации с ней помогут справиться буксиры. Единственным элементом, который невозможно проверить, так как он скрыт внутри механизма, является привод механизма изменения шага винта.

Потеря герметичности дейдвудного устройства способна привести к тяжелым последствиям. Если уплотнение кормовой трубы полностью выйдет из строя, машинное помещение начнет заполняться водой в случае, когда трюмные насосы не справятся с откачкой поступающей воды. Трюмные насосы предназначены для устранения не полностью вышедшего из строя негерметичного уплотнения. Однако уплотнительная крышка кормовой трубы всегда имеет двойную и даже тройную избыточность, что снижает RRRI на два. Таким образом, индексы риска и риска снижения избыточности для пропульсивной системы могут быть представлены в виде табл. 1.

Таблица 1

RRRI для подэлементов пропульсивной системы [9]

Элементы пропульсивной системы	Индекс частоты (FI)			Индекс тяжести (SI)			Индекс риска	Степень резервирования	RRRI
	Проверка	Обслуживание	Ремонт	Ходкость	Маневрирование	Энергетика			
Крышка цилиндра	4	2	1	4	1	1	8	0	8
Цилиндропоршневая группа	1	2	1	5	1	1	7	0	7
Насосы систем	4	2	2	5	1	5	9	1	8
Турбокомпрессор	4	2	1	5	1	1	9	1	8
Редуктор	3	2	1	5	3	1	8	0	8
Система управления движением	4	2	1	1	3	1	8	0	8
Дейдвудное уплотнение	5	3	3	5	3	5	10	2	8
Рулевое устройство	4	2	1	1	3	1	7	0	7

Данные, аналогичные приведенным в табл. 1, касающиеся вспомогательной установки, приведены в табл. 2. Принимая во внимание то, что в состав судовой электростанции включаются по меньшей мере три источника (один из них аварийный дизель-генератор), двойное резервирование снижает RRRI на два. Каждый из двух дизель-генераторных агрегатов должен быть в состоянии обеспечить необходимую для функционирования судна в ходовом режиме мощность, так что можно считать, что резервирование обеспечивается всегда. Кроме того, на борту всех судов установлены аварийные генераторы. Это означает, что при выходе из строя обеих генераторных установок аварийный генератор будет поддерживать работоспособность жизненно важных для судна систем. Большие нагрузки на судовую электростанцию могут возникать в стояночном режиме при совершении грузовых операций, но в таком режиме может задействоваться береговое питание от портовых сетей, поэтому данное обстоятельство не является проблемой.

Таблица 2

RRRI для вспомогательных двигателей и генераторных установок [9]

Элементы дизельного двигателя	Индекс частоты (FI)			Индекс тяжести (SI)			Индекс риска	Степень резервирования	RRRI
	Проверка	Обслуживание	Ремонт	Ходкость	Маневрирование	Энергетика			
Вспомогательный двигатель	4	2	2	1	3	3	7	2	5
Топливный насос	4	2	2	1	1	3	7	2	5
Насос смазочного масла	4	2	2	1	1	3	7	2	5
Насос систем охлаждения	2	2	1	1	1	3	7	2	5
Система воздушного пуска	3	2	2	1	1	3	7	2	5
Генератор	2	1	1	1	1	3	7	2	5

Из данных табл. 1 и 2 следует, что существует восемь элементов повышенной опасности. В первую очередь, рассмотрим возможные решения для элементов с высоким уровнем риска. Крышка цилиндра является единственным элементом двигателя повышенной опасности с индексом RRRI, равным восьми, и этот элемент дизельного двигателя невозможно исключить из конструкции. При этом существует способ минимизации последствий возможного развития возникшей аварийной ситуации для того, чтобы трещина или иная причина потеря плотности цилиндра не повлекла за собой вывод двигателя из эксплуатации. Этот способ состоит в дистанционном отключении подачи топлива и прекращении тепловыделения в цилиндре, тем самым обеспечивается значительное снижение уровня возникающих термических и механических напряжений в детали. Такое решение возможно в том случае, когда в конструкции дизельной топливоподающей системы используется система электронного управления впрыском.

Аналогичное решение об отключении цилиндра может применяться в случае выявленного начального разрушения деталей ЦПГ, однако оно может оказаться в ряде случаев недостаточным и мало результативным. Для предотвращения дальнейшего развития и разрешения подобной аварийной ситуации потребуются прекращение движения поршня в цилиндре, что нельзя обеспечить без вмешательства обслуживающего персонала, а, следовательно, проведение такого мероприятия в необслуживаемом машинном помещении АС невозможно.

Еще одним компонентом повышенной опасности в составе пропульсивной установки является редуктор. При выходе из строя этого высокорискованного звена вся пропульсивная установка теряет работоспособность. Единственный способ сделать редукторную передачу избыточной и понизить индекс RRRI — установить дополнительный аналогичный главный двигатель с аналогичным редуктором, т. е. перейти на двухдвигательную двухвальную силовую установку. Однако такое решение избыточности повлечет за собой существенные инвестиционные затраты, вызванные

необходимостью изменения компоновки всего энергетического оборудования, т. е. изменение проекта судна, поэтому такое решение требует глубокого экономического анализа целесообразности.

Другим достаточно эффективным решением рассматриваемой проблемы оказывается изменение принципа электродвижения [10]. Использование в составе судовой энергетической установки нескольких главных дизель-генераторных агрегатов, как это принято при осуществлении данного принципа, существенно повышает надежность установки на основе резервирования. Более того, применение электродвижения позволяет решить дополнительно и одновременно ряд проблем надежности технических средств из состава пропульсивной установки. Так, использование системы АВВ под торговой маркой Azipod предоставляет возможность исключить из рассмотрения рулевые машины, поскольку маневрирование, а также управление судном производится путем изменения азимутальных положений нескольких движителей. Кроме того, при использовании системы отпадают проблемы, связанные с возможными неисправностями дейдвудного устройства, поскольку выход гребного вала осуществляется из погруженной в воду гондолы, и прорыв уплотнения приводит к затоплению только одного двигателя, не вызывая полной потери движения и не ухудшая катастрофически ходовые качества судна. Необходимо отметить, что достаточно схожих результатов можно достичь при использовании нескольких крыльчатых движителей на судне, которые активно продвигает на рынке компания АВВ под торговой маркой Dynafin для мощностей до 4 МВт на один движитель.

В качестве решения проблем, связанных с дейдвудным устройством, помимо перехода на аzipоды, можно рассматривать установку второго комплекта уплотнения с организацией герметичного пространства между ними. Эту проблему также можно решить, установив трюмные насосы, которые обладают достаточной производительностью, чтобы откачать то количество воды, которое может попасть внутрь через разрушенное уплотнение. Для этого потребуется оборудование специальных колодцев, которые способны собирать и удерживать прорывающуюся через разрушенные уплотнения воду. Также можно рассмотреть задействование в составе пропульсивной системы механических аналогов аzipодов — винторулевых колонок, фланец крепления которых находится выше ватерлинии. Это позволит избежать проблемы, поскольку затопление оказывается физически невозможным, однако такое решение может иметь ограничение, поскольку винторулевые колонки в современном судостроении применяются на судах с небольшим водоизмещением и судах вспомогательного флота.

Важно обратить внимание на то, что использование винторулевых колонок, систем Azipod и Dynafin устраняют проблемы достижения приемлемых рисков системы управления движением автономного судна, поскольку ход назад в данной компоновке пропульсивной установки обеспечивается не реверсированием двигателя, а самим движителем. Также в целях снижения рисков системы управления движением автономного судна возможен переход на нереверсируемые двигатели в комбинации с винтом регулируемого шага или задействования реверс-редукторных агрегатов, но такие решения сопряжены с дополнительными рисками применяемых систем.

Элементом с высокой степенью риска, на который необходимо обратить внимание, является турбокомпрессор. Современный дизельный двигатель трудно представить без системы свободного газотурбинного наддува, позволяющей существенно увеличить мощность двигателя и повысить его эффективный КПД. Турбинная часть турбокомпрессора подвержена воздействию высоких температур, что обуславливает проблемы со смазкой и высокими термическими напряжениями как подвижных, так и корпусных деталей. Проточные части турбины агрегата наддува подвержены облитерации твердыми частицами и несгоревшими углеводородами, находящимися в отработавших газах, вызывая разбалансировку системы. Высокая частота вращения ротора турбокомпрессора и указанные факторы существенно сокращают ресурсы работы агрегата наддува по сравнению с ресурсами поршневого двигателя. Поэтому несмотря на то, что работа системы наддува в четырехтактном двигателе не столь критична, выход ее из строя может иметь тяжелые последствия для двигателя, что предопределяет высокий индекс риска. Непосредственное резервирование системы наддува окажется крайне затруднительно ввиду специфики происходящих в ней

газодинамических процессов. При этом в случае аварийного состояния системы можно предусмотреть комбинированную систему наддува с автономным механическим нагнетателем воздуха, как это сделано на всех двухтактных двигателях для поддержания работоспособности на режимах малой мощности.

В представленной выборке вспомогательная энергетическая установка содержит элементы среднего риска. Не всегда оправдано рассматривать такие риски как допустимые, в этой связи уместно рассмотреть возможные решения для этих элементов. В отношении вспомогательных двигателей решения должны быть аналогичные главному двигателю, однако дублирование в данном случае можно исключить из рассмотрения исходя из того, что судовая электростанция включает как минимум два источника (не принимая во внимание аварийный), а, следовательно, резервирование уже заложено в конструкцию. В отличие от главных вспомогательные двигатели имеют в большинстве случаев навесные насосы смазки и охлаждения, приводимые в движение от коленчатого вала. Переход на автономные насосы с электроприводом может быть разумным и надежным решением, а их резервирование, которое в данном случае оказывается бесперебойным, дополнительно повысит надежность систем. В случае использования электронно-управляемых систем топливоподачи Common Rail такое решение возможно также для топливного насоса высокого давления.

Системы запуска вспомогательного двигателя вызывают особую обеспокоенность на фоне систем запуска главного двигателя в связи с тем, что количество запусков дизель-генераторных агрегатов, работающих в автоматическом режиме, многократно превышает количество запусков главного двигателя. Отказ системы одного из двигателей способен повлечь перегрузку работающего агрегата и, как следствие, отключение судовой электростанции. Приемлемым решением в данном случае является дублирование системы запуска за счет использования электро- или гидростартерной системы, как это делается в ряде случаев для аварийного дизель-генератора. При этом важно отметить, что системы стартерного запуска применяются для сравнительно малых размерностей двигателей и это решение может оказаться крайне затруднительным в ряде случаев для агрегатов большой мощности. Единственным опасным механизмом рулевого устройства является привод рулевого устройства, поскольку отказ всех остальных его элементов менее опасен. Привод считается средством средней степени опасности, поскольку без него невозможно управлять рулем, что существенно затрудняет маневрирование.

Рассмотренные на основе предложенной выборки отдельные проблемы слабых звеньев систем и устройств оборудования машинного помещения демонстрируют малую часть задач, которые необходимо решить на пути создания высоконадежных необслуживаемых энергетических установок автономных судов. Как следует из предложенного анализа, решение проблем организации машинных помещений АС может быть достигнуто с использованием различных технических методов, выбор которых должен быть основан, в первую очередь, на анализе экономической целесообразности (в том числе принятия допустимых рисков). Рассмотрение этих аспектов проблемы может служить предметом отдельного исследования.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Готовность к применению современных СЭУ для АС является ограниченной ввиду их высоких рисков безэкипажной технической эксплуатации.
2. Метод разбивки и детализации систем энергетической установки с построением таблицы рисков является действенным инструментом для определения слабых звеньев систем АС. Однако в данном случае возникает проблема отсутствия надежных и доступных статистических баз, без создания которых применение методики оказывается крайне затруднительным.
3. Резервирование следует рассматриваться как одно из наиболее эффективных решений для элементов как высокого, так и среднего риска. При этом существует ряд технологий, способных обеспечить снижение индекса риска без использования дублирования агрегатов систем энергетической установки.

4. Использование принципов электродвижения может оказаться весьма привлекательной перспективой для энергетических установок АС. Такое решение способно исключить многие риски и слабые звенья в пропульсивной установке и системах СЭУ, понижая индекс RRRI.

5. Внедрение систем Azipod и Dynafin, а также винторулевых колонок одновременно позволяют избежать рисков, создаваемых рулевыми машинами, дейдвудными устройствами и системой управления движением судна. При этом применение таких решений потенциально связано с возникновением рисков, специфических для этих систем.

6. Любые решения для элементов систем АС должны приниматься на основе обоснованных рисков с обязательным учетом экономических аспектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы беспилотных технологий на водном транспорте: сб. докладов национальной науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — 108 с.

2. Watson D. G. M. Practical ship design. Elsevier ocean engineering book series volume 1/ D. G. M. Watson // Elsevier, 2002. — P. 566.

3. Final Report Summary — MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks). 2024 [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting>. (дата обращения 05.10.2024).

4. ISO 7967–1:2005. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 1: Structure and external covers. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-1:ed-2:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).

5. ISO 7967–3:2022. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 3: Valves, camshaft drives and actuating mechanisms. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:7967:-3:ed-3:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).

6. ISO 7967–4:2005. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 4: Pressure charging and air/exhaust gas ducting systems. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-4:ed-2:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).

7. ISO 7967–10:2022 Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 6: Lubricating systems. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-6:ed-3:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).

8. ISO 7967–4:2010. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 5: Cooling systems. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-5:ed-3:v1:en>. (дата обращения: 10.08.2024).

9. Петров А. П. Оценка рисков эксплуатации энергетических установок безэкипажных судов / А. П. Петров, И. И. Костылев, Г. Е. Живлюк // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 1–1(63). — С. 110–122. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.013. — EDN ADWTCZ.

10. Nuchturee C. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships — A review / C. Nuchturee, T. Li, H. Xia // Renewable and Sustainable Energy Reviews — 2020. — Vol. 134. — Pp. 110145. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110145.

REFERENCES

1. *Perspektivy bespilotnykh tekhnologij na vodnom transporte*. Sb. dokladov nacional'noj nauch.-prakt. konf. SPb.: Izd-vo. GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018.

2. Watson David G. M. *Practical ship design*. Elsevier ocean engineering book series volume 1. Elsevier, 2002.

3. Final Report Summary — MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks). 2024 Web. 05 Oct. 2024 <<https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting>>.

4. ISO 7967–1:2005. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 1: Structure and external covers. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-1:ed-2:v1:en>>.

5. ISO 7967–3:2022. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 3: Valves, camshaft drives and actuating mechanisms. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:7967:-3:ed-3:v1:en>>.
6. ISO 7967–4:2005. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 4: Pressure charging and air/exhaust gas ducting systems. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-4:ed-2:v1:en>>.
7. ISO 7967–10:2022 Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 6: Lubricating systems. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-6:ed-3:v1:en>>.
8. ISO 7967–4:2010. Reciprocating internal combustion engines — Vocabulary of components and systems — Part 5: Cooling systems. Web. 10 Aug. 2024 <<https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:7967:-5:ed-3:v1:en>>.
9. Petrov, A. P., I. I. Kostylev and G. E. Zhivlyuk “Otsenka riskov ekspluatatsii energeticheskikh ustanovok bezekipazhnykh sudov.” *Morskie intellektualnye tekhnologii* 1–1(63) (2024): 110–122. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.013.
10. Nuchturee, Chalermkiat, Tie Li, and Hongpu Xia. “Energy Efficiency of Integrated Electric Propulsion for Ships — A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134 (2020): 110145. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110145.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru
Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov, Aleksandr P. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru
Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2024 г.
Received: Nov. 15, 2024.