

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В. В. Медведев, В. Н. Половинкин, Д. С. Семионичев (Санкт-Петербург)

К настоящему времени в отечественной практике созданы комплексные инструменты для оценки остаточного ресурса судовых энергетических установок (СЭУ), рассматриваемых в качестве единого комплекса элементов с использованием современных математических моделей, соответствующих международным стандартам качества, требованиям Международной конвенции по охране человеческой жизни на море СОЛАС-74 и, в частности, положениям раздела 8 Конвенции – Международного кодекса по управлению безопасностью, резолюциям и руководствам Кодекса безопасности мореплавания Международной морской организации.

В частности разработаны имитационные модели, позволяющие оценивать надежность и безопасность СЭУ на этапах ее проектирования [1], возможность дальнейшей эксплуатации СЭУ, имеющих наработку с определением остаточного ресурса механизмов и возможностью выбора наиболее эффективных и экономичных путей для его повышения в процессе ремонта и модернизации с использованием метода формализованной оценки безопасности (ФОБ – Formal Safety Assessment – FSA) [2].

Для выполнения прогноза риска можно использовать имитационное моделирование (ИМ). Оно позволяет экспериментировать с аналитически-вероятностной моделью, проигрывая различные ситуации и упрощая принятия решения. Это в полной мере соответствует философии ФОБ, согласно которой необходимо управлять риском путем сопоставления различных вариантов. Для каждого из них производится оценка затрат и выгод и, таким образом, принимается оптимальное решение для снижения риска возникновения опасных ситуаций.

В настоящее время ИМ нашло широкое применение в разных отраслях хозяйственной деятельности. Этому способствует как хорошо разработанная теоретическая база, изложенная, например, в работах [3]-[4], так и наличие большого спектра программного обеспечения имитации в виде мощных продуктов ИМ, таких как Agena, AutoMod, AnyLogic, Extend, GPSS World и других.

Следует отметить следующее обстоятельство. С одной стороны есть мощные программные средства для осуществления ИМ, но они облегчают только сам процесс испытаний и не касаются самой трудоемкой задачи сбора исходной информации, ее интерпретации, формализации и адекватного соотношения с конкретным объектом. При этом освоение таких программных сред требует значительных усилий (о чем косвенно можно судить по обилию учебной литературы, обучающих семинаров и т.п.), а использоваться они будут весьма ограничено. С другой стороны, существуют программные продукты типа CARA и RCM-Tool, разработанные MARINTEK, которые представляют собой систему автоматизированного построения дерева отказов применительно к судну и его СЭУ. Но они не используют ИМ, например, на основе статистических испытаний, что существенно ограничивает возможность их использования, особенно при большой неопределенности исходных данных, возникающей при проектировании и эксплуатации судна или его СЭУ. Остаются также вопросы, связанные с доступностью этих программных продуктов и возможностью их освоения достаточно широким кругом специалистов. Между тем, СЭУ является специфическим объектом обеспечения надежности и безопасности для которого возможность использования процедуры ИМ требует более подробного обоснования. Организация ИМ для конкретного технического изделия предполагает индивидуальный подход к оценке безопасности каждого объекта. Это часто приводит к необходимости проведения специ-

альных разработок, в частности, созданию на основе оригинальных моделей и алгоритмов с использованием известного математического аппарата достаточно универсальных программных продуктов на основе языков программирования высокого уровня. Приведем некоторые примеры.

В работе [5] рассматривалась возможность использования ИМ при анализе рисков при техническом обслуживании и ремонте СЭУ. Попытка создания имитационной модели для выбора рационального варианта СЭУ поискового судна приведена в [6]. ИМ динамики элементов и систем судового энергетического оборудования рассматривалось в [7]. В работах [8] и [9] ИМ использовано для обоснования нагрузки судовой электростанции, что дает особенно ощутимый результат при проектировании судов и установок, не имеющих аналогов, с большим числом мощных электропотребителей. В работах [10] и [11] ИМ использовалось для определения нагрузок, действующих на судовой валопровод. При рассмотрении проблемы разработки базы знаний ДВС для проектирования систем газообмена и двигателя в целом в работе [12] представлены требования, в частности, к системе ИМ.

В [13] описаны примеры и общий подход к выполнению ИМ с использованием статистических испытаний методом Монте-Карло для прогноза остаточного ресурса деталей и узлов дизелей, подверженных износу и усталостному накоплению повреждений, уровней вибрации и шума судовых дизелей, а также теплового состояния деталей двигателя. Приведенные в этой работе примеры реализованы в ряде программных продуктов в среде программирования Borland Delphi.

Особо следует отметить работу [2]. В ней ИМ использовано для оценки риска дальнейшей эксплуатации СЭУ, имеющих наработку. В частности создана уточненная математическая модель отказов элементов СЭУ, базирующая на физических законах и учитывающая закономерности протекающих в СЭУ процессов. Она реализована в программном комплексе на языке программирования Object Pascal в среде Delphi 10 Lite, передача результатов расчета осуществляется в режиме реального времени с использованием COM-технологии в таблицы Excel (пакет программ Microsoft Office 97–2003).

В [1] отмечено, что важным этапом в подготовке ИМ является разработка «дерева отказов» или «дерева событий». Практика создания «дерева событий» для СЭУ современного судна отражена в работе [14]. Исследованные варианты состава СЭУ представлены на рис. 1. Эти варианты охватывают более 99,5% от общего количества СЭУ самоходных судов. Здесь показаны СЭУ морских судов с главными малооборотными двигателями (МОД) с прямой передачей на винт регулируемого (ВРШ) (рис. 1, а) и фиксированного (ВФШ) (рис. 1, б) шага. Для речных судов характерны СЭУ со среднеоборотными (СОД) и высокооборотными (ВОД) дизелями, работающими через редукторную передачу (РП) на ВРШ (рис. 1, в) или через реверс-редукторную передачу (РРП) на ВФШ (рис. 1, г). В настоящее время при проектировании СЭУ большое распространение получает применение винто-рулевых колонок (ВРК) различных конструктивных исполнений (рис. 1, д).

Рассмотрим на примере СЭУ четырех судов результаты использования указанных выше разработок для прогноза на заданный период эксплуатации таких характеристик надежности и безопасности как вероятность отказа и остаточный ресурс.

Так выполнено исследование СЭУ судна проекта 1077U для перевозки генерального груза. Для нее, на основании данных двух дефектаций пропульсивной установки и главных двигателей типа 8Z280-ET (8ЧН28/36) мощностью 1765 кВт, изготовленных в 1990 году Amagasaki Yanmar Diesel Engine Corporation, определены законы и параметры распределения ресурсов исследованных элементов (табл.1) и выполнено 100000 статистических испытаний. Установлено, что вероятность возникновения отказа не превысила предварительно заданной предельной вероятности 2,5% для единичного отказа и 0,00001% для наступления одновременного (в промежутке менее 100 часов)

отказа пропульсивных установок правого и левого борта. СЭУ была допущена к эксплуатации в течение 4000 часов без проведения дополнительного ремонта. Отказов элементов СЭУ в течение указанного периода не наступило.

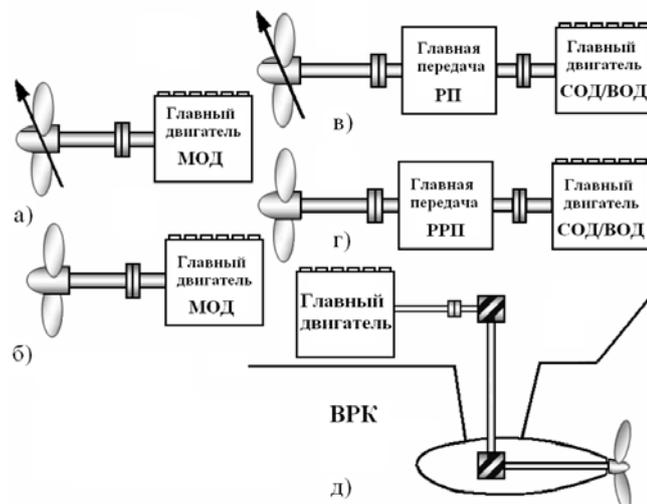


Рисунок 1. Исследованные варианты состава СЭУ

Таблица 1

Исходные данные для расчета СЭУ судна проекта 1077U

Параметр	Закон распределения	Коэффициент вариации
Высота камеры сгорания	Нормальный	0,75
Зазор между поршнем и втулкой	Нормальный	0,78
Высота поршневого кольца	Нормальный	0,62
Зазор по высоте между поршневым кольцом и канавкой	Нормальный	0,84
Зазор в головном соединении	Нормальный	0,75
Зазор в шатунном подшипнике	Нормальный	0,60
Зазор в рамовом подшипнике	Нормальный	0,50
Зазор между стержнем впускного клапана и направляющей	Нормальный	0,54
Зазор между стержнем выпускного клапана и направляющей	Нормальный	0,64
Зазор в подшипниках коромысла газораспределительного механизма	Нормальный	0,45
Износ цилиндрических втулок	Нормальный	0,51
Зазор в дейдвудном устройстве		
Носовой	Нормальный	0,57
Кормовой	Нормальный	0,57
Кронштейн	Нормальный	0,57
Дейдвудное уплотнение, износ	Нормальный	0,51
Дейдвудное уплотнение, потеря упругих свойств	Нормальный	0,51
Реверс-редукторная передача	Вейбулла	0,40
ВФШ (4 лопасти, цельнолитой), поломка	Равномерное, вероятность 0,1%	
ВФШ, усталостное разрушение	Вейбулла	0,81

В докладе представлены результаты ИМ на основании данных двух дефектоскопий (через двухлетний период эксплуатации) втулок цилиндров двух главных (для судна проекта 405М) и трех вспомогательных (для рефрижераторного судна проекта 13476) двигателей типа ЧН25/34. В частности определена вероятность превышения допустимого износа втулок двигателей в течение следующих 20000 часов эксплуатации для главных двигателей и 5000, 10000 и 15000 часов эксплуатации для вспомогательных. Указано, что полученный результат соответствует статистическим данным об отказах втулок цилиндров судовых двигателей типа ЧН25/34, эксплуатируемых на судах Дальневосточного бассейна.

Также была произведена оценка безопасной работы главного двигателя правого борта типа 6ЧН40/46 исследовательского судна проекта 12883. Двигатель мощностью 2576 кВт был построен в 1989 году, изготовитель – «Русский Дизель», заводской номер 185. Нарботка с предыдущей дефектации составила 5764 часа. По результатам дефектации определены законы и параметры распределения ресурсов исследованных элементов (табл.2) и на основании ИМ проведена оценка вероятности возникновения отказов на период 5000 и 8000 часов. По результатам расчетов были сделаны выводы о том, что уровень безопасности недостаточен для допуска дизеля к эксплуатации в течение 8000 часов без осуществления ремонта.

Таблица 2

Исходные данные для расчета главного двигателя судна проекта 12883

Параметр	Закон распределения	Коэффициент вариации
Зазор в шатунном подшипнике	Нормальный	0,60
Зазор в рамовом подшипнике	Нормальный	0,50
Износ шатунной шейки	Нормальный	0,61
Зазор по высоте между поршневым кольцом и канавкой	Нормальный	0,75
Зазор в замке кольца	Нормальный	0,84
Высота поршневой канавки	Нормальный	0,65
Износ цилиндровых втулок	Нормальный	0,42
Подшипники распределительного вала, износ	Нормальный	0,56

С помощью программного комплекса произведена оценка затрат/выгод при различных вариантах управления рисками и по результатам оценки была даны рекомендации по осуществлению ремонта через 4000 часов эксплуатации.

В качестве наиболее вероятных объектов, потенциально требующих замены определены втулки 4, 5 и 6 цилиндра. С учетом остаточного ресурса втулок, равного около 4000 часов было рекомендовано продолжить эксплуатацию двигателя в течение этого периода с последующей оценкой технического состояния.

Для проверки выполненного прогноза и оценки правильности сделанных выводов двигатель был допущен к эксплуатации, а после 4850 часов разобран и в третий раз отдефектован. По результатам измерений были заменены втулки 4 и 6 цилиндра (превышение допустимой овальности) и втулка 5 цилиндра (превышение допустимого износа). Остальных неисправностей среди проанализированных с использованием ИМ элементов выявлено не было.

Выводы

- с использованием ИМ удастся количественно оценить надежность работы каждого элемента СЭУ в течение исследуемого периода времени;
- наличие результатов предыдущей дефектации позволяет значительно повысить точность вычислений за счет учета фактической скорости изнашивания деталей с учетом условий эксплуатации;
- результаты расчета позволяют проанализировать надежность оборудования и сравнить полученную величину риска возникновения отказа с величиной приемлемого риска в соответствии с рекомендациями ФОБ.

Выполнение прогноза остаточного ресурса СЭУ и ее элементов в вероятностной трактовке требует значительных усилий по получению исходной информации, получаемой в настоящее время по результатам дефектаций. Этот недостаток может быть устранен в будущем с развитием электронных систем управления СЭУ и систем хранения информации типа «черный ящик».

Литература

1. **Медведев В.В.** Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013.
2. **Семионичев Д.С.** Управление техническим состоянием судовой энергетической установки на основе метода формализованной оценки безопасности: автореф. дис. ... к-та техн. наук. – СПб.: СПГУВК, 2010.
3. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1968.
4. **Шеннон Р. Дж.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978.
5. **Никитин А.М.** Совершенствование технического обслуживания и ремонта судовых энергетических установок на основе анализа рисков: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2007.
6. **Колесников А.И.** Имитационная модель для выбора рационального варианта СЭУ поискового судна // Судовая энергетика: сб. науч. тр. ЛКИ. – Л. 1990.
7. **Ерышев В.С.** Имитационное моделирование динамики элементов и систем судового энергетического оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1988.
8. **Карандашов Ю.С.** Математическое моделирование электрических нагрузок судовых электростанций // Судостроение. – 2004. – №2.
9. **Хоанг Д.Т.** Повышение эффективности имитационного моделирования нагрузок судовых электростанций: автореф. дис. ... к-та техн. наук. – СПб.: СПбГМТУ, 2010.
10. **Кондратьев И.А.** Имитационное моделирование ледовых нагрузок на валопроводы транспортных судов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1987.
11. **Нгуен Д.Т.** Учет случайных факторов при расчете крутильных колебаний валопроводов судовых дизельных установок методом главных координат: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2004.
12. **Еникеев Р.Д.** База знаний для проектирования ДВС // Двигателестроение. 2007. № 1.
13. **Медведев В.В., Половинкин В.Н.** Использование имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых дизелей // Труды Международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС 2011». – СПб, 2011.
14. **Медведев В.В., Семионичев Д.С.** Практика создания дерева событий для СЭУ современного судна при разработке и реализации ее формализованной модели безопасности // Морской вестник. – 2011. – №1(1).