

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

В.В. Медведев, В.Н. Половинкин (Санкт-Петербург)

Ужесточение требований Международной морской организации к системам управления безопасностью мореплавания, а также, жесткая конкуренция на современном фрахтовом рынке предъявляют высокие требования к надежности судовых энергетических установок (СЭУ), в частности судовых дизелей.

Известно, что наибольший эффект в обеспечении надежности и безопасности достигается при проектировании, когда назначаются режимы эксплуатации, технического обслуживания и выбирается конструктивное исполнение. Если в процессе эксплуатации дизелей режимы и обслуживание можно менять, то вносить изменения в конструкцию практически невозможно. При этом поддержание приемлемого уровня безопасности за счет технического обслуживания и ремонтов требует определенных затрат времени и средств, их уменьшение также достигается повышением надежности. Поэтому решение данной задачи не должно ограничиваться только определением количественных характеристик надежности, важно находить технические решения по повышению надежности и оценивать их эффективность. Важную роль в такой оценке играет прогноз показателей надежности.

Надежность является комплексным понятием, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может оцениваться числовыми показателями безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. У безотказности и долговечности есть общая черта – это свойство объекта сохранять работоспособность. Характеристиками долговечности являются ресурс и срок службы. Ресурс определяет запас работоспособности дизеля, выраженный в часах наработки от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Наибольший интерес для обеспечения безопасности и надежности представляет остаточный ресурс. При изучении потери работоспособности обычно рассматривают такие процессы изменения свойств и состояния материала, как усталостное разрушение, пластическое деформирование, износ, коррозия, адгезия (нарос), фреттинг-коррозия, выкрашивание (питтинг) и т.д. В данном случае выделены примеры, когда ресурс определяется износом, накоплением усталостных повреждений, вибрацией и тепловым состоянием деталей и узлов двигателя. Надежность дизеля зависит от весьма большого числа факторов, характеризующих их конструкцию, условия производства и эксплуатации. Это приводит к тому, что процессы изменения технического состояния и надежности носят случайный характер, а при оценке и анализе показателей надежности необходимо использовать методы теории вероятности.

На перспективность использования имитационного моделирования (ИМ) для прогноза уровня безопасности СЭУ указано в [1]. В [2] выведены методические рекомендации, в которых определено место и алгоритм проведения ИМ применительно к процессу проектирования СЭУ. Этот алгоритм имеет универсальный характер, его можно использовать и для судового дизеля в отдельности. Согласно данному алгоритму, на основании, например, экспертных оценок, необходимо выбрать определяющую величину  $Y$ , наиболее полно и информативно характеризующую состояние каждого элемента «дерева отказов» дизеля, отказ которого не зависит от отказа других элементов. В качестве такой величины может быть рассмотрена долговечность (ресурс) элемента. Обыкновенно эта величина имеет рассеивание и носит случайный характер. В результате  $Y$  представляет собой статистический ряд. Выбирается метод или алгоритм расчета, и рекомендуются закон и параметры распределения  $Y$ . Определяются граничные значения  $y$  для  $Y$ . Следующим этапом при проведении ИМ являются статистические испытания. В их ходе разыгрывается, например, методом Монте-Карло значение случайной величины  $Y$  и производится ее

сравнение с граничным (например, нормативным) значением  $y$ . Если  $Y \geq y$  или  $Y < y$  (в зависимости от особенностей рассматриваемой задачи), то считается, что произошел отказ, или, что испытание прошло успешно. Потом испытания повторяются. Выполнение заданного числа испытаний позволяет получить необходимую статистику для всех указанных выше элементов. На ее основе определяется вероятность

$$P_{\text{отк}} = N_{\text{н.и}} / N_{\text{исп}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{н.и}}$  – число нарушений нормативного уровня;  $N_{\text{исп}}$  – общее число испытаний.

Следует отметить, что, управляя количеством случаев реализации  $N_{\text{исп}}$ , можно получить достоверные результаты и при малом числе отказов. Это позволяет обойти проблему малости величин  $P_{\text{отк}}$ , однако, используемые методы и алгоритмы действий должны быть удобны для организации многочисленных статистических испытаний.

**Прогнозирование остаточной долговечности деталей по критерию износа.**

В зависимости от характера износа принято различать несколько видов изнашивания, среди них особенно выделяют механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое изнашивание. Несмотря на различный механизм упомянутых видов изнашивания, износ от них может быть описан одинаковыми временными функциями. Если величина износа деталей за период приработки не превышает величины допуска на их изготовление, то зависимость износа деталей от времени можно представить в следующем виде

$$I(t) = a t^\beta. \quad (2)$$

Коэффициенты  $a$  и  $\beta$  в формуле (2) уточняются на основании данных о характере нагружения, условий эксплуатации двигателя, качества обслуживания и ремонта. Естественно, эти коэффициенты являются случайными аргументами, зависящими не только от предыстории эксплуатационного периода, но и факторов, которые могут оказывать своё влияние в будущем.

В соответствии с приведённой формулой для износа, зависимость для определения ресурса пары трения запишется в виде

$$t = (I_{\text{з.пр}} / a)^{1/\beta}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{з.пр}}$  – предельный зазор сопряжения.

С учётом зависимости (3) остаточный ресурс пары трения составит

$$T = t - t_0, \quad (4)$$

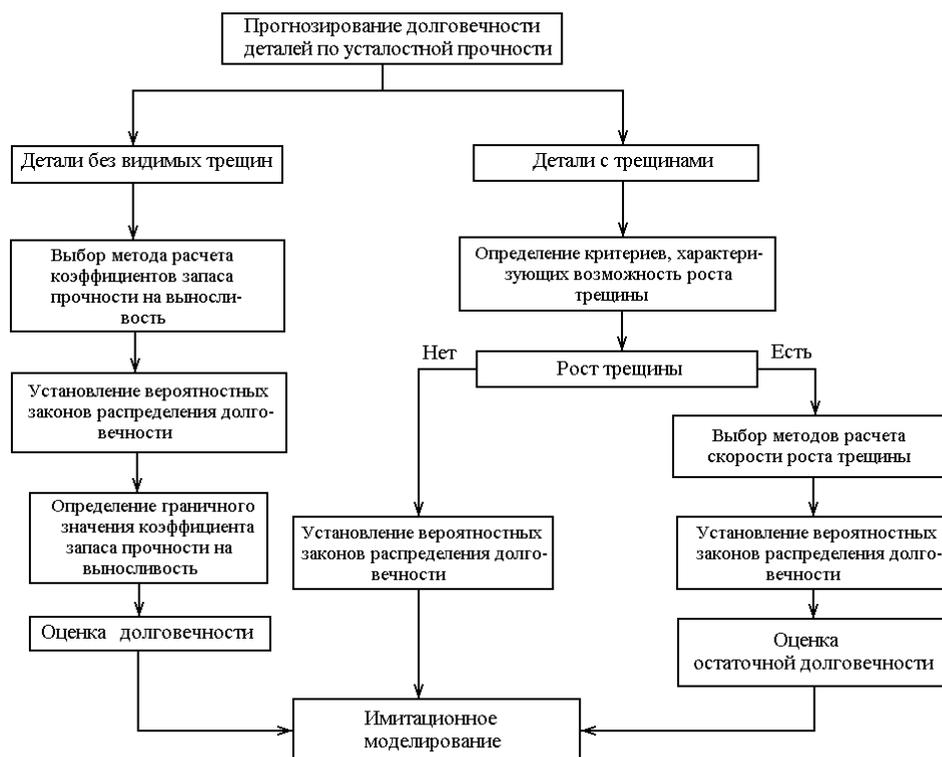
где  $t_0$  – наработка на момент начала выполнения ИМ.

Собственно здесь и происходит переход к вычислению вероятности отказа за некоторый период времени  $t_{\text{н}}$  будущей эксплуатации на основе  $N_{\text{исп}}$  статистических испытаний. Если  $t_{\text{н}} < T$ , то считается, что произошел отказ и происходит суммирование неудачных испытаний  $N_{\text{н.и}}$ . Потом испытания повторяются и по формуле (1) находится  $P_{\text{отк}}$  для данной детали. Данный алгоритм реализован в вычислительном комплексе «Программа расчета остаточного ресурса и вероятности безотказной работы судового дизеля на заданный период эксплуатации». Вычислительный комплекс выполнен в среде программирования Borland Delphi и позволяет определять остаточный ресурс деталей и узлов дизеля по износам и усталостной прочности для наиболее часто употребляемых

законов распределения (с учетом примеров программ из [3]): экспоненциального, гамма-процентного, нормального, логарифмически нормального и Вейбулла.

**Прогнозирование остаточной долговечности деталей по критерию усталостной прочности.** Разрушение твёрдых тел представляет довольно сложный процесс, который зависит от многих факторов. Весь этот длительный процесс условно делят на несколько периодов, характеризующихся наличием или отсутствием видимых трещин.

Переход от оценки остаточной долговечности к процедуре ИМ требует выполнения некоторой последовательности действий. На рис. 1 представлена укрупненная блок-схема алгоритма определения долговечности деталей судовых двигателей по усталостной прочности и перехода к ИМ.



**Рис. 1. Укрупненная блок-схема алгоритма оценки долговечности деталей судовых ДВС по усталостной прочности**

Следует отметить особую значимость расчетных оценок для деталей судовых ДВС, работающих на усталость. Дело в том, что такие детали, например остов, шатун или коленчатый вал (КВ), практически не доступны в настоящее время для методов безразборной диагностики. Их отказ практически фатален для дизеля и СЭУ в целом.

**Определение остаточной долговечности деталей судовых ДВС до образования видимых трещин.** Известно, что характеристики сопротивления материала усталости являются случайными величинами. Их разброс объясняется различиями в микроструктуре и свойствах поверхностного слоя, которые в свою очередь связаны со случайными вариациями металлургических, термических и механических факторов. Напряжения, действующие в деталях ДВС, также имеют случайную природу вследствие нестабильности параметров рабочего процесса за счет колебаний цикловой подачи топлива, степени сжатия, частоты вращения и т.д. В этих условиях оправдан прогноз и оценка риска с учетом рассеивания указанных характеристик. В [4] было показано, как можно использовать ИМ для прогноза и оценки ресурса КВ судовых дизелей.

**Оценка долговечности детали с трещиной.** Природа появления трещины может быть не только усталостной. В процессе изготовления деталей неизбежны дефекты

структуры материала (раковины, пустоты, вкрапления других материалов), которые по их влиянию на прочность эквивалентны усталостным трещинам. Трещины также могут быть следствием конструкторских и технологических просчетов. Практика показывает, что возможны ситуации, когда дефектные (по трещинам) детали нельзя заменить, ввиду их временной пространственной недоступности, или для старых двигателей, – они редки, и, вследствие этого, весьма дороги. Поэтому, существует достаточно примеров эксплуатации двигателей с деталями, например остова, имеющими трещины. В этом случае, конструктор, который обеспечивает весь жизненный цикл двигателя от проекта до утилизации, обязан и может предусмотреть рекомендации для безопасной эксплуатации двигателя и в такой ситуации. ИМ здесь незаменимо. Оно позволяет оценить надежность и безопасность для разных деталей и дать рекомендации по режимам и продолжительности их эксплуатации.

Согласно схеме на рис.1 возможны два случая. Первый, когда под действием нагрузки трещина продолжает рост и определена остаточная долговечность  $N$  (в циклах нагружения) этой детали. Второй, когда трещина расти не будет и можно двигатель эксплуатировать до следующего освидетельствования без устранения трещины в детали.

Рассмотрено применение прогноза и оценки риска к этим случаям. Для первого отмечено, что долговечность  $N$ , это только математическое ожидание, относительно которого действительное значение  $N_d$  может отклоняться как в большую, так и в меньшую сторону и довольно значительно. Это отклонение характеризуется законом распределения со своими параметрами. Следовательно, при наработке детали  $N_0$ , воздействие случайных факторов приводит к тому, что остаточный ресурс  $N_{ост} = N_d - N_0$  также является случайной величиной и может не превышать заданный (будущий) период эксплуатации  $N_n$ . Решается задача нахождения вероятности отказа  $P$  детали с трещиной на заданный период эксплуатации  $N_n$ . Решение основано на проведении  $N_{исп}$  статистических испытаний, в результате которых определяется сколько раз ( $N_{н.и}$ ) заданный период эксплуатации  $N_n$  оказался больше остаточного ресурса, определенного с заданным значением коэффициента вариации  $V$ . Далее вероятность отказа находится по формуле (1).

Во втором случае последовательность действий несколько иная. Из расчетов известны пороговый коэффициент интенсивности напряжений  $K_{min}$  и фактическое значение коэффициента интенсивности напряжений  $K$ . Эти величины можно также рассматривать как математические ожидания значений соответствующих коэффициентов. Тогда в каждом статистическом испытании значения коэффициентов интенсивности разыгрываются отдельно и сравниваются между собой. Отказ наступает если, в процессе испытаний, значение превышает значение  $K_{min}$ . Далее подсчитывается число отказов  $N_{н.и}$  и определяется вероятность отказа.

В докладе приведены примеры расчетов для кривошипной головки шатуна и опорного бурта блока цилиндров с трещиной.

**Прогнозирование уровней вибрации и шума дизеля.** Выполнение процедуры ИМ при обеспечении надежности и безопасности дизеля по уровням вибрации и шума потребовало проведения отдельного подробного исследования [5].

В докладе описаны результаты разработки универсального метода прогноза и оценки риска при назначении мест и объемов применения вибродемпфирующих покрытий (ВДП), который базируется на законе сохранения энергии. Замечено, что предложенный универсальный метод расчета динамически связанных конструкций с высо-

ким демпфированием, позволяет обсчитывать конструкции, образованные как плоскими, так и оребренными перекрытиями.

Отмечено, что принципиально возможно на базе исследованного метода прогнозировать эффект от применения ВДП на несущем остовах судового энергетического оборудования, например, дизеля.

**Прогнозирование теплового состояния деталей дизеля.** В докладе изложены основные положения универсального метода выбора варианта конструкции деталей и узлов дизеля на основе прогноза и оценки риска превышения, вследствие влияния случайных факторов, предельных значений температур и/или их градиентов.

В докладе приведен пример использования ИМ для сравнительной оценки теплового состояния деталей двигателя. В результате моделирования установлено, что одна из конструкций обеспечивает большую устойчивость теплового состояния детали к влиянию технологических отклонений и существенно уменьшает риск появления отказа из-за технологических отклонений геометрии внутреннего тракта охлаждения.

В процессе проектирования постоянно возникает проблема многовариантности решений, различных по характеристикам и стоимости. В этой ситуации возрастает роль технико-экономических обоснований, обеспечивающих выбор варианта, наиболее предпочтительного по принятому критерию экономической эффективности [6]. В докладе приведены основные результаты разработки методики оценки технико-экономической эффективности предлагаемых технических решений, с учетом показателей надежности и безопасности дизеля. Особенностью данной методики является использование в методике величины вероятности отказов определенной в результате ИМ износов, усталостных (термоусталостных) изменений свойств материала деталей, повышенной вибрации и термических напряжений.

#### **Выводы**

Использование ИМ позволяет перейти от детерминированного прогноза остаточного ресурса к вероятностной его оценке, что является исходной информацией для принятия мотивированных решений для повышения надежности и безопасности судовых дизелей. Наибольший эффект может быть достигнут при организации долгосрочного обслуживания для обеспечения надлежащего уровня надежности и безопасности с использованием методов диагностирования и ИМ.

#### **Литература**

1. **Медведев В.В.** Использование прогноза и оценки рисков при проектировании судовых энергетических установок и их элементов // Судостроение. – 2008. – №6.
2. **Медведев В.В.** Методические рекомендации по прогнозу и оценке рисков при проектировании судовых энергетических установок и их элементов // Судостроение. – 2009. – №2.
3. **Шеннон Р. Дж.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978.
4. **Медведев В.В.** Использование имитационного моделирования для прогнозирования вероятности отказа коленчатых валов судовых дизелей на заданный период эксплуатации в дисциплине «Основы надежности и диагностики» // Материалы Третьей Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». – СПб, 2007. – Т. II.
5. **Медведев В.В., Половинкин В.Н.** Расчетная оценка эффекта от применения вибродемпфирующих покрытий и перспективы ее использования для повышения надежности и безопасности судовых дизелей // Морской вестник. – 2009. – №4.
6. **Медведев В.В., Половинкин В.Н.** Оценка экономической эффективности мероприятий по обеспечению надежности и безопасности СЭУ // Судостроение. – 2010. – №4.