

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ НА ЗАДАННЫЙ ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ В ДИСЦИПЛИНЕ «ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИКИ»****В. В. Медведев (Санкт-Петербург)**

Дисциплина «Основы надежности и диагностики» входит в цикл специальных дисциплин, читаемых студентам 5-го курса ГМТУ, обучающимся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания». К этому времени студенты изучили циклы базовых дисциплин «Информатика», «Высшая математика», «Теория рабочих процессов», «Динамика ДВС», «Конструирование и расчеты прочности» и вполне свободно ориентируются в этих вопросах. Поэтому появляется возможность на базе указанных дисциплин показать в расчетной работе перспективы решения самой заманчивой задачи диагностики судовых дизелей – прогноза технического состояния на период будущей эксплуатации с его оценкой количественным показателем надежности – вероятностью отказа. Эта задача перспективна с точки зрения перехода к эксплуатации и техническому обслуживанию двигателя по его фактическому состоянию, решения проблемы реновации деталей двигателей и применения формализованного анализа безопасной эксплуатации (Formal Safety Assessment – FSA). Особую значимость в настоящее время она приобретает в связи с появлением нового поколения судовых дизелей – двигателей с электронными системами управления (Intelligent Engine). Эти системы не только решают задачи управления дизелем, контроля и оценки его текущего состояния, но накапливают информацию о прошедшей эксплуатации и, при разработке соответствующего программного обеспечения, могут решать задачу прогноза на грядущий дискретный период эксплуатации, обусловленный продолжительностью рейса, навигации или сроком следующего освидетельствования. Прогноз всегда связан с риском ошибки вследствие возможности воздействия случайных факторов, которые могли не проявиться в прошедшей эксплуатации. И здесь единственным инструментом разрешения этой проблемы является имитационное моделирование. Современный судовой дизель представляет собой сложную систему взаимосвязанных между собой деталей, узлов, агрегатов, механизмов. Отказ каждого из этих элементов может самым непосредственным образом вызывать разнообразные опасные ситуации вплоть до аварийной остановки двигателя. Для определения последствий отказа отдельных элементов ДВС судовой дизель разбивается на составные части. Опыт разбивки двигателя при анализе его надежности, когда отдельно выделяют блок цилиндров, кривошипно-шатунный механизм, головку цилиндра, клапанный механизм, систему охлаждения, систему смазки, топливную систему, систему регулирования и управления, систему пуска, описан в [1]. В результате такого расчленения главный судовой дизель может быть представлен в виде иерархического графа «дерева отказов». В нем все элементы распределены на несколько уровней, высший уровень – это сам дизель. На каждом уровне располагаются элементы, обладающие известной структурной важностью в сценарии нарушения условий работоспособности. На низшем уровне находятся элементы, отказ которых не зависит от надежности других. Связи между элементами разных уровней устанавливаются вероятностными зависимостями на основании логики соподчиненности. Основная идея имитационного моделирования заключается в многократном расчете «дерева отказов». Эта особенность позволяет довольно точно прогнозировать состояние параметров даже в условиях неопределенности или отсутствия исходной информации. При этом для случайных параметров перебираются наиболее вероятные их значения в соответствии с заданными законами распределений. Таким образом, каждый прогон «дерева отказов»

дает одно дискретное число выходного параметра, а многократные прогоны – совокупность чисел, которые описывают случайный процесс изменения выходного параметра. Алгоритм имитационного моделирования в виде блок-схемы приведен на рис. 1.

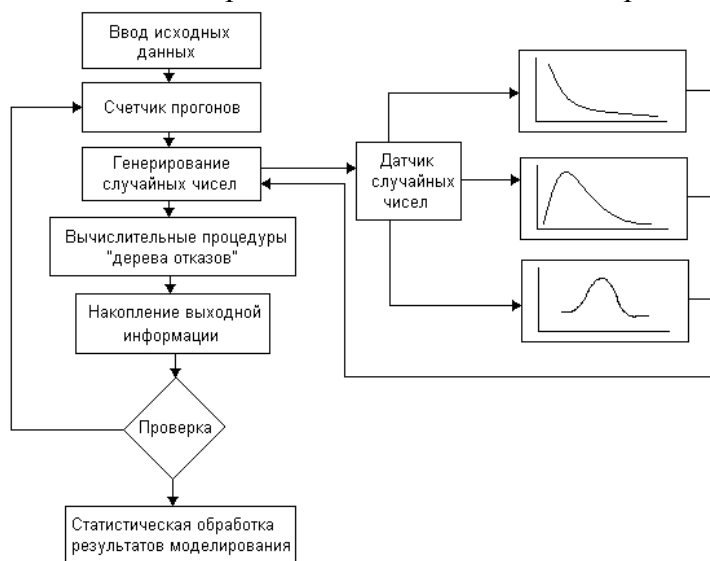


Рис. 1. Блок-схема имитационного моделирования

Основные этапы реализации имитационного моделирования – определение вероятностных законов распределения тех исходных данных, которые по своей физической природе имеют или могут иметь случайные отклонения; генерация случайных чисел с заданными законами распределений; статистическая обработка результатов моделирования. Применительно к рассматриваемой задаче первый этап имитационного моделирования сводится к созданию банка информации об изменении технических свойств во времени каждого элемента «дерева отказов». Другими словами, для каждого элемента задается вероятностный закон изменения и параметры этого закона. Генерация случайных чисел с заданными законами распределений осуществляется с помощью специальных программ. Каждая программа построена так, что сначала случайным образом в интервале от 0 до 1 выбирает любое число (например, генератор Random для алгоритмического языка Turbo Pascal), которое затем приводится к заданному закону. Такие программы созданы для наиболее часто употребительных распределений: экспоненциального, равномерного, нормального, логарифмически нормального, Релея, Вейбулла. Третий этап имитационного моделирования – статистическая обработка результатов вычислений выполняется по схеме, принятой в теории случайных процессов. Естественно, что применительно к судовому дизелю в целом задача является весьма сложной. Поэтому для целей учебного процесса выбрана одна деталь двигателя – коленчатый вал. В рамках решения этой задачи студенту предстоит подготовить исходные данные, отражающие физическую сущность объекта, сформировать «дерево отказов» и выбрать сценарий его работы, обосновать статистические законы распределения случайных величин, выполнить имитационное моделирование и интерпретировать полученные результаты.

Коленчатый вал является важной деталью, его поломка означает вывод дизеля из эксплуатации, возможно с тяжелыми последствиями, как для него самого, так и для объекта, на котором он установлен. Поломки чаще всего происходят вследствие усталостных повреждений, в первую очередь в местах концентрации напряжений, которыми являются галтели рамовых и шатунных шеек, а также масляные отверстия в шатунных шейках. Поскольку накопление повреждений происходит на микроуровне, то оце-

нить их величину и, следовательно, остаточный ресурс с помощью замеров практически невозможно, особенно в условиях эксплуатации. Поэтому особую важность приобретают расчетные методы, которые призваны обеспечить безаварийную работу коленчатых валов за счет обеспечения коэффициентов запаса прочности  $n_{\sigma}$  на уровне не ниже предельно допустимых значений. Применительно к коленчатым валам судовых дизелей МАКО разработано методика М53, которая широко используется морскими квалификационными обществами, в частности – Российским морским регистром судоходства (РС). Суть этой методики заключается в том, что при известной геометрии коленчатого вала дизеля и индикаторной диаграмме рабочего процесса, соответствующей номинальному режиму работы двигателя, определяются коэффициенты запаса прочности  $n_{\sigma}^H$  в галтелях всех шеек и на краях масляных отверстий и сравниваются с предельным значением  $n_{\sigma \min} = 1,15$ . Если коэффициенты получаются не менее указанного значения, то считается, что коленчатый вал должен отработать без поломок назначенный ресурс, указанный в нормативно-технической документации двигателя. Поскольку в рамках выполнения сквозного курсового проектирования, принятого на кафедре судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок, студенты уже определили параметры рабочего цикла проектируемого судового дизеля, рассчитали индикаторную диаграмму и выбрали геометрические размеры коленчатого вала двигателя, то, используя программный комплекс для поверочного расчета коленчатых валов по правилам РС [2], они определяют значения  $n_{\sigma}^H$  и сравнивают их с  $n_{\sigma \min}$ . Однако выполнение указанных выше условий не гарантирует отсутствие поломок валов. Здесь следует отметить два аспекта. Во-первых, двигатель не работает все время на номинальном режиме, следовательно, скорость накопления усталостных повреждений является переменной, что дает возможность продлить срок эксплуатации или повторно использовать вал. При этом для каждого долевого режима текущее значение коэффициента запаса прочности можно определить по формуле

$$n_{\sigma i} = n_{\sigma}^H \frac{A}{A_i},$$

где  $A$ ,  $A_i$  – амплитуды движущей силы на номинальном и долевым режиме соответственно;  $i$  – порядковый номер режима,  $i = 1, 2, \dots, p$  (здесь  $p$  – количество режимов).

Тогда аналитическое описание долговечности детали при использовании гипотезы о линейном характере накопления повреждений выглядит достаточно просто. Суть гипотезы заключается в том, что доля поврежденности при любом уровне нагруженности прямо пропорциональна отношению  $n_{\sigma i} / n_{\sigma \min}$ . Разрушение произойдет, когда сумма этих долей составит единицу. Такая формулировка дает следующую зависимость для долговечности детали

$$t = \frac{t_B}{\sum_{i=1}^p \frac{x_i}{(n_{\sigma i} / n_{\sigma \min})^{m_i}}},$$

где  $x_i$  – доля времени работы двигателя на  $i$ -м режиме,  $\sum_{i=1}^p x_i = 1$ ;  $t_B$  – наработка, соответствующая  $N_B$  циклам нагружения, определяющим точку перелома кривой устало-

сти, в общем случае  $t_b = N_b / (60 n)$ ;  $n$  – номинальная частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $m_1$  – коэффициент наклона ветви кривой усталости.

Проблема заключается в достоверности и полноте данных о режимах работы двигателя. Для дизелей с электронными системами управления фиксация режимов работы дизеля (в частности, значений  $t_p$ ,  $A_i$  и  $x_i$ ) – штатная задача. Значит, величину долговечности коленчатых валов для таких двигателей можно определять достаточно просто. Значения  $t_p$ ,  $A_i$  и  $x_i$  задаются преподавателем или выбираются студентами в зависимости от типа объекта, для которого предназначен двигатель.

Второй аспект более сложный. Следует отметить, что долговечность  $t$ , это только математическое ожидание, относительно которого действительное значение  $t_d$  может отклоняться как в большую, так и в меньшую сторону и довольно значительно. Это отклонение характеризуется законом распределения со своими параметрами. Некоторым студентам может быть поставлена задача определения по заданной выборке значений долговечности коленчатых валов закона и параметров распределения  $t$ . Для коленчатых валов судовых дизелей чаще подходит нормальный закон распределения, а коэффициент вариации может принимать значения  $V = 0,3 \dots 0,7$ . Следовательно, воздействие случайных факторов приводит к тому, что остаточный ресурс  $t_{ост} = t_d - t_p$ , также является случайной величиной и может не превышать заданный (будущий) период эксплуатации  $t_{зад}$ . Таким образом, насущной становится задача нахождения вероятности отказа  $P$  коленчатого вала на заданный период эксплуатации  $t_{зад}$ . Решение этой задачи основано на проведении  $N_{исп.}$  статистических испытаний в результате которых определяется сколько раз ( $N_{н.и.}$ ) заданный период эксплуатации  $t_{зад}$  оказался больше остаточного ресурса, определенного с выбранным значением  $V$ . Тогда вероятность отказа

$$P = \frac{N_{н.и.}}{N_{исп.}}$$

Поскольку  $t_{зад}$  коленчатого вала является одновременно периодом эксплуатации для всех элементов вала, а вследствие особенностей нагружения каждая галтель и масляное отверстие имеют свое значение  $t_{ост}$ , то и вероятность отказа этих элементов  $P_i$  будет разной. Следовательно, для определения  $P$  необходимо использовать логические связи указанных элементов на основе представленного на рис. 2 «дерева отказов». В зависимости от особенности конструкции двигателя студентам предлагается уточнить и обосновывать структуру своего «дерева отказов». Поскольку отказ любого элемента является отказом всего коленчатого вала (и двигателя в целом), то реализуется «жесткий сценарий» имитации будущей эксплуатации и справедливо выражение

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{эi}),$$

$n$  – количество элементов «дерева отказов»;  $P_{эi}$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента.

Для выполнения расчетов студенты используют возможности программного комплекса «Программа расчета вероятности безотказной работы судового двигателя на заданный период эксплуатации» [3].

Полученное значение  $P$  сравнивается с допустимым для планируемого срока будущей эксплуатации значением вероятности отказа  $P_d$ . Если  $P < P_d$ , то можно принимать решение о допустимости эксплуатации коленчатого вала на данном или другом

двигателе, так как риск такой эксплуатации является приемлемым. Естественно, что чем больше планируемый срок эксплуатации, тем выше значение  $P_d$ . Определение этого значения является отдельной задачей, поэтому  $P_d$  задается преподавателем.

Следует отметить, что описанная методика достаточно легко реализуется с помощью современных вычислительных средств и дает возможность связать оценку риска с количественным показателем, учитывающим индивидуальные особенности конструкции и эксплуатации коленчатого вала конкретного дизеля и последствия воздействий случайных факторов. Для двигателей с электронными системами управления эта методика, реализованная в соответствующем программном обеспечении, позволяет осуществлять постоянный прогноз на грядущий период эксплуатации, например на планируемый рейс судна.



Рис. 2. Структурная схема «дерева отказов»

### Выводы

1. Появление судовых дизелей с электронными системами управления позволит постепенно перейти к эксплуатации и техническому обслуживанию двигателя по его фактическому состоянию, решить проблему реновации деталей двигателей и применения формализованного анализа безопасной эксплуатации. В решении этих задач можно широко использовать имитационное моделирование.

2. При подготовке будущих специалистов уже сейчас имеется возможность получить практический опыт имитационного моделирования с использованием знаний по базовым дисциплинам, позволяющий отследить взаимосвязь параметров рабочего процесса, особенностей конструкции и режимов эксплуатации судового дизеля (на примере коленчатого вала) с прогнозом и оценкой его технического состояния.

### Литература

1. Румб В. К., Медведев В. В., Семионичев С. Р. Основы надежности и диагностики судовых ДВС. Учебное пособие. СПб.: СПбГМТУ, 2005.
2. Румб В. К., Медведев В. В., Столяров С. П. Поверочный расчет коленчатых валов по Правилам Российского морского регистра судоходства на персональной ЭВМ: Метод. указания. СПб.: ИЦ СПбГМТУ, 2001.
3. Медведев В. В., Столяров С. П. Определение вероятности безотказной работы судового дизеля на заданный период эксплуатации на основе имитационных испытаний. Метод. указания. СПб.: ИЦ СПбГМТУ, 2006.