

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-117-132
УДК 629.5.03-8.004

Ю.Н. Мясников¹, В.С. Никитин¹, А.А. Равин², О.В. Хруцкий²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является судовое энергомеханическое оборудование. Цель работы заключается в обосновании информационного обеспечения применения прогрессивной стратегии обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию.

Материалы и методы. Исходными материалами являются научно-техническая информация и результаты экспериментальных исследований и испытаний, посвященных анализу эффективности методов и алгоритмов прогноза изменения технического состояния оборудования на основе мониторинга функциональных характеристик и результатов диагностирования узлов оборудования, лимитирующих его эксплуатационную надежность. Используются личные наработки и многолетний опыт проведения НИОКР в области совершенствования стратегий обслуживания и повышения эксплуатационной надежности судовых технических средств.

Основные результаты. Приведенный сравнительный анализ особенностей и функциональных возможностей нескольких методов прогнозирования изменения технического состояния и оценки остаточного ресурса судового энергомеханического оборудования позволяет обоснованно выбрать области их применения.

Закключение. Показано, что информационной базой применения прогрессивной стратегии обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию является оценка степени эксплуатационных повреждений наиболее нагруженных и ответственных узлов и деталей и прогноз их возможных изменений на предстоящий период эксплуатации оборудования. Сделан вывод о целесообразности системной организации мониторинга параметров, характеризующих качество, надежность и работоспособность оборудования на всех этапах жизненного цикла. Комплексное применение методов технической диагностики и алгоритмов оценки остаточного ресурса оборудования позволяет снизить интенсивность потока отказов и оптимизировать обслуживание оборудования.

Ключевые слова: судовое энергомеханическое оборудование, прогнозирование изменений технического состояния, оценка остаточного ресурса.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-117-132
UDC 629.5.03-8.004

Yu. Myasnikov¹, V. Nikitin¹, A. Ravin², O. Khrutsky²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

PREDICTION METHODS FOR TECHNICAL CONDITION OF SHIPBOARD POWER MACHINERY

Object and purpose of research. This paper studies power generation machinery of ships. The purpose of research is to justify information support of applying an advanced strategy of equipment maintenance based on its actual technical condition.

Materials and methods. Input data for this study are scientific & technical information and experimental results dealing with efficiency analysis of prediction methods and algorithms for technical condition of equipment based on moni-

Для цитирования: Мясников Ю.Н., Никитин В.С., Равин А.А., Хруцкий О.В. Методы прогнозирования технического состояния судового энергетического оборудования. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 117–132.

For citations: Myasnikov Yu., Nikitin V., Ravin A., Khrutsky O. Prediction methods for technical condition of shipboard power machinery. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 117–132 (in Russian).

toring of its performance parameters, as well as on diagnostics of the units that restrict its operational reliability. The study also relies on personal findings of the authors and many years of their R&D experience in improvement of maintenance strategies and operational reliability enhancement for ship equipment.

Main results. This study analyzed specifics and functional capabilities of several methods used to predict technical condition of power & mechanical equipment and assess its residual lifetime, in order to justify selection of their application areas.

Conclusion. It is shown that advanced maintenance strategy for equipment based on its actual technical condition should always rely on damage assessment of its most loaded and important units and parts, as well as on prediction of their possible changes during the forthcoming operation period. The conclusion of the whole study is that monitoring of parameters describing quality, reliability and operability of equipment at all stages of its life cycle must be performed systematically. Integrated application of technical diagnostics methods and residual lifetime assessment algorithms reduces the number of failures and optimizes equipment maintenance.

Keywords: shipboard power machinery, prediction of changes in technical condition, residual lifetime assessment.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Возможность заглянуть в будущее всегда являлась не только абстрактной мечтой человечества, но и предпосылкой эффективного принятия решений в самых разных направлениях практической деятельности [6, 10]. Это в полной мере относится и к организации рационального использования технических объектов [1, 6, 9].

В процессе функционирования энергомеханического оборудования наиболее нагруженные узлы и детали испытывают влияние комплекса разрушающих воздействий, вызывающих постепенную деградацию их технического состояния (усталость материала, износы, эрозия, коррозия и т.п.). Несмотря на постоянное повышение качества схемных и конструктивных решений, а также применение прогрессивных конструкционных материалов и технологий изготовления, пока не удастся обеспечить уровень надежности оборудования, достаточный для эффективной и безотказной эксплуатации на протяжении назначенных ресурсных периодов, без проведения персоналом специальных работ, обеспечивающих поддержание работоспособности оборудования (осмотров, испытаний, освидетельствований, мелких, средних и капитальных ремонтов). Информационной базой для обоснованного планирования таких работ являются оценки и прогнозы изменений технического состояния оборудования, выполняемые не только на стадии его проектирования, но и в процессе эксплуатации [5, 8, 16, 17].

В данной статье предпринята попытка обосновать возможность решения сложной задачи – дать достоверную оценку остаточного ресурса технических объектов, подвергающихся при эксплуатации воздействию сложного комплекса разрушающих факторов. Эта задача решается не только исходя из даты ввода объекта в эксплуа-

тацию, но и путем наблюдения за изменением во времени специальных диагностических параметров, контроля режимов использования оборудования, а также исследования физико-химических процессов, вызывающих деградацию технического состояния наиболее нагруженных и ответственных узлов.

Статистический метод прогнозирования

Statistical prediction method

Собственно прогнозированию этим методом предшествует предварительное формирование массива данных, отражающих фактическую долговечность партии однотипных изделий. Это может быть сделано путем обобщения опыта эксплуатации или специальных испытаний аналогичных изделий на надежность. Далее выполняется статистическая обработка результатов наблюдений: оценка однородности выборки и отбрасывание крайних членов, подбор закона распределения, вычисление основных статистических параметров (математического ожидания, дисперсии, среднеквадратичного отклонения, моментов), построение функций распределения и плотности вероятностей.

Эти функции используются для решения прогнозных задач, которые могут быть сформулированы следующим образом [11]:

- какова вероятность того, что данный агрегат проработает без отказа заданный период времени?
- какой период времени проработает данный агрегат при заданной вероятности безотказной работы?

Для решения первой задачи целесообразно использовать плотность вероятностей (рис. 1) и применить выражения (1).

Для решения второй задачи можно использовать функцию распределения (рис. 2) и выражение (2).

$$P_{A < X < B}^{\text{отк}} = \int_{\Phi}^{\Psi} f(X) dX; \quad (1)$$

$$P_{A < X < B}^{\text{б.отк}} = 1 - P_{A < X < B}^{\text{отк}}. \quad (2)$$

При заданной вероятности безотказной работы оборудования на временном интервале t_1-t_2 нетрудно найти вероятность отказа на этом же интервале:

$$P_{\text{отк}} = 1 - P_{\text{б.отк}}. \quad (3)$$

Из определения функции распределения P_t (это вероятность того, что событие случится ранее момента t) следует, что при $t_1 < t < t_2$

$$P_{\text{отк}} = F(t_2) - F(t_1). \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что наличие функции распределения и совместное использование выражений (3) и (4) позволяет достаточно просто решить поставленную задачу:

- с помощью выражения(2) найти вероятность отказа $P_{\text{отк}}$ на временном интервале $\Delta t = t_1 - t_2$;
- для заданного начала эксплуатационного периода оборудования (например, начала рейса судна) с помощью функции распределения (рис. 2) определить значение $F(t_1)$;
- используя выражение (4), найти значение функции распределения для конца эксплуатационного периода:

$$F(t_2) = F(t_1) + P_{\text{отк}}; \quad (5)$$

- для определенного значения $F(t_2)$ с помощью функции распределения найти время окончания эксплуатационного периода t_2 ;
- искомый временной период с заданной вероятностью безотказной работы:

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (6)$$

Понятно, что ключевым моментом применимости рассмотренного метода является наличие достаточно представительной выборки наблюдений, характеризующих фактическую эксплуатационную надежность оборудования, например, наработки на отказ, а также соответствующего программного обеспечения, предназначенного для статистической

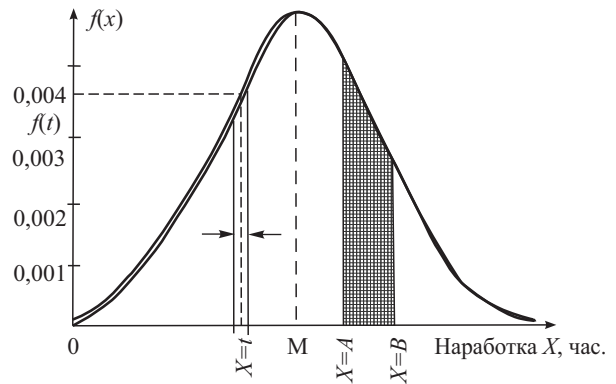


Рис. 1. Плотность вероятностей выборки наблюдений за долговечностью изделия

Fig. 1. Probability density for a set of equipment lifetime observations

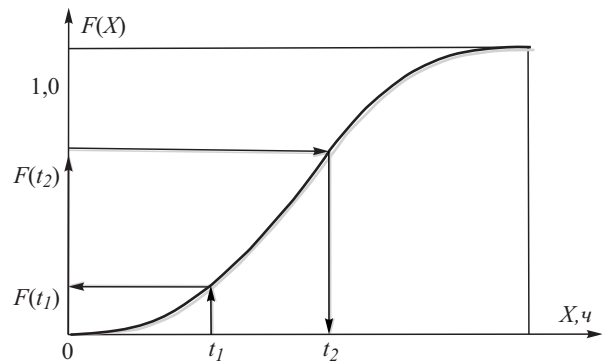


Рис. 2. Применение функции распределения для оценки времени работы изделия с заданной вероятностью безотказности

Fig. 2. Application of distribution function in assessment of equipment operation time with pre-set probability of trouble-free operation

обработки этой выборки с целью определения вида и параметров распределения. Результаты, как показано выше, могут быть использованы для статистических оценок надежности (например, прогнозирования долговечности) соответствующего оборудования в процессе эксплуатации.

Вместе с тем следует особо заметить, что статистический метод прогнозирования достаточно эффективен в тех случаях, когда анализируемое изделие выпускается в массовом количестве и служит сравнительно недолго, благодаря чему возможно в приемлемые сроки накопить представительную выборку статистических данных об отказах оборудования. Для большинства видов судостроительного оборудования характерны мелкосерийное (а иногда и уникальное) производство и длительные сроки службы. В связи с этим статистические данные

в основном оказываются либо недостаточно представительными, либо сильно устаревшими: к моменту завершения сбора статистических данных наблюдаемое оборудование уже выработало большую часть своего ресурса и подлежит замене, а для новых типов оборудования статистические данные по устаревшему оборудованию оказываются малоприменимыми. Кроме того, вероятностный характер прогнозов, отягощенных, как правило, существенной дисперсией из-за значимых для судового оборудования коэффициентов вариации ресурса, ограничивает область применения этих методов оценками групповых осредненных эксплуатационных показателей долговечности оборудования (например, парка однотипных изделий). Таким образом, этим методом сложно получить достоверный индивидуальный прогноз изменений технического состояния конкретного механизма или агрегата.

Экстраполяционный метод прогнозирования

Extrapolation-based prediction method

В основе метода лежит обработка результатов мониторинга диагностического параметра, характеризующего техническое состояние контролируемого узла [4, 13, 15].

Реализация этого метода предусматривает последовательное выполнение ряда этапов:

- выбор главного диагностического параметра, в наибольшей степени характеризующего техническое состояние объекта и его работоспособность;
- организация измерений этого параметра через заданные временные интервалы Δt и накопление результатов в процессе эксплуатации контролируемого объекта;
- сглаживание полученной последовательности результатов измерений – временного ряда $y(t)$ с целью подавления влияния случайных отклонений параметра, не связанных с изменением технического состояния объекта;
- аппроксимация сглаженного временного ряда, т.е. формирование его аналитического описания с помощью функции $Y(t)$, аргументом которой является время;
- экстраполяция аппроксимирующей функции на предстоящий период эксплуатации с целью прогнозирования интервала времени до наступления предельного состояния (остаточного ресурса) объекта;
- корректировка аппроксимирующей функции и уточнение прогноза по мере накопления ре-

зультатов измерения определяющего параметра.

В течение времени T формирование ряда наблюдений может происходить путем периодических измерений контролируемого параметра Y через интервалы времени Δt . В этом случае количество результатов измерений $n = T/\Delta t$. Обычно достаточно иметь объем выборки $n = 10-15$ (условие $\Delta t = \text{const}$ не является обязательным).

Как правило, полученный таким образом временной ряд $y(t)$, представленный множеством пар $\{y_i; t_i\}$ при $i = 1, 2, \dots, n$, имеет на плоскости (y, t) существенный разброс точек, обусловленный неучтенными изменениями режимов и условий эксплуатации объекта, а также случайными погрешностями измерений. Это обстоятельство существенно затрудняет выдвижение гипотезы о подходящем типе аппроксимирующей функции (функции тренда) $Y(t)$. В таких ситуациях целесообразно использовать сглаживающие операторы: обобщенные усреднения, специальные сглаживающие производные, а также приведенные ниже k -кратные I - и L -интегралы [33, 34]:

$$I[y(t)] = \left[\int_{t_1}^{t_2} y(t) dt \right]_k; \quad (7)$$

$$L[y(t)] = \left[\int_{t_1}^{t_2} y(t) dt + ty(t) \right]_k, \quad (8)$$

где t_1 и t_2 – соответственно, время начала и конца периода накопления измеренных значений параметра y .

Выполнение операции последовательного интегрального сглаживания временного ряда обеспечивает получение двух дополнительных множеств: $\{x_i; t_i\}$ и $\{z_i; t_i\}$, где x_i и z_i – результаты применения, соответственно, I - или L -операторов. Дополнительные множества позволяют принять к рассмотрению фазовые плоскости $(y-x)$ и $(y-z)$, на которых будут располагаться точки, соответственно, с координатами y_i, x_i и y_i, z_i . Во многих случаях расположение точек в фазовых плоскостях можно достаточно точно описать линейной зависимостью

$$y(t) = a_0 + a_1 I[y(t)]_k \quad (9)$$

или

$$y(t) = a_0 + a_1 L[y(t)]_k, \quad (10)$$

где коэффициенты a_0 и a_1 вычисляются методом наименьших квадратов.

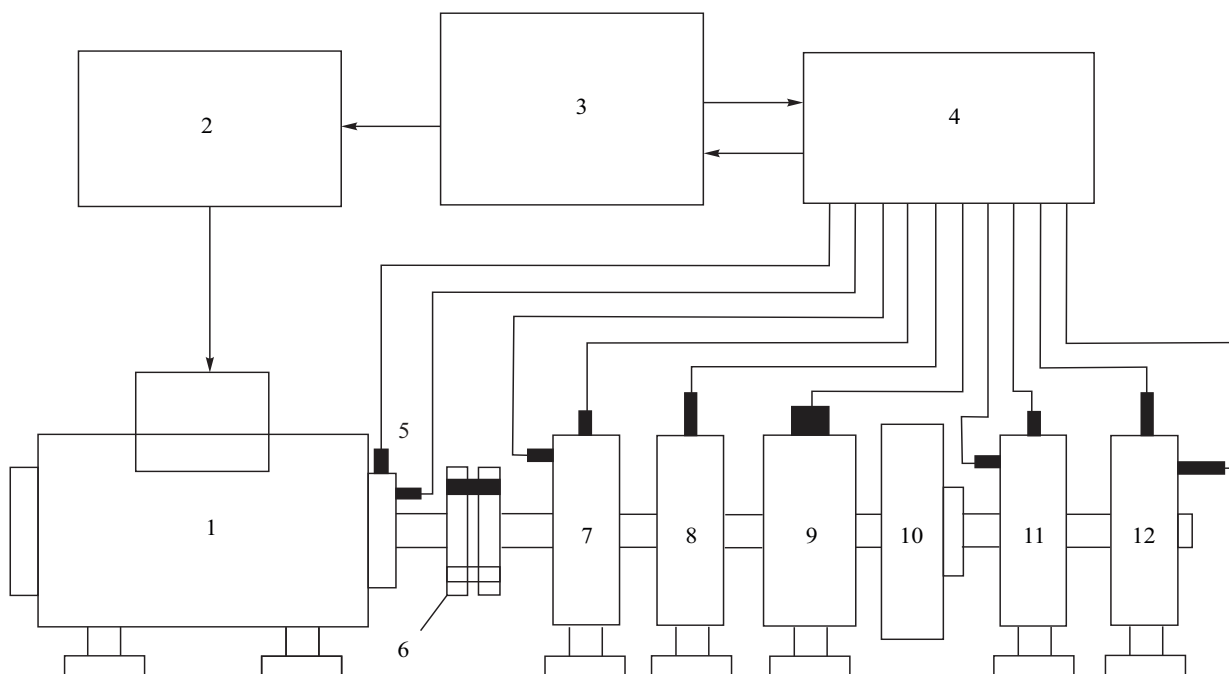


Рис. 3. Схема стенда AP7000 для виброиспытаний подшипников: 1 – электродвигатель; 2 – преобразователь частоты; 3 – блок управления; 4 – блок АЦП; 5 – вибродатчики; 6 – упругая муфта; 7 – опора с подшипником; 8, 9 – кронштейны с вихретоковыми датчиками; 10 – съемный маховик; 11 – кронштейн для закрепления вибродатчиков; 12 – кронштейн для закрепления вихретоковых датчиков фазы и биения

Fig. 3. Layout of AR7000 test rig for vibration tests of bearings: 1 – motor; 2 – frequency converter; 3 – control unit; 4 – ADC unit; 5 – vibration sensors; 6 – elastic coupling; 7 – support with bearing; 8, 9 – brackets with eddy current probes; 10 – removable flywheel; 11 – bracket for installation of vibration sensors; 12 – bracket for installation of eddy current probes for phase and beating

Зависимости (9) и (10) являются интегральными уравнениями, решения которых имеют при $k = 1$, соответственно, следующий вид:

$$Y(t) = a_0 \exp(a_1 t) \quad (11)$$

или

$$Y(t) = a_0 / (1 - a_1 t)^2. \quad (12)$$

Полученные выражения можно использовать в качестве аппроксимирующих функций. Их коэффициенты имеют следующий физический смысл:

a_0 – величина начального дефекта, выполняющего роль инициатора процесса деградации работоспособности объекта;

a_1 – параметр тренда, характеризующий интенсивность процесса.

При известном допустимом значении контролируемого параметра можно с помощью аппроксимирующей функции вычислить момент наступления предельного состояния объекта (разумеется, если в прогнозируемом периоде сохраняется неизменным параметр тренда a_1).

В тех случаях, когда расположение точек на фазовой плоскости может быть описано несколькими аппроксимирующими функциями, выбирают ту из них, которая имеет наибольшее значение коэффициента парной корреляции ρ при наименьшем значении среднеквадратичного отклонения σ аппроксимирующей функции. В качестве граничного значения коэффициента корреляции, ниже которого аппроксимирующая функция не рассматривается, можно принять $\rho = 0,707$ [40]. Данному значению соответствует равенство мощностей измеряемого сигнала и случайных погрешностей (шума).

Пример применения экстраполяционного метода для прогнозирования технического состояния подшипников

Объектом мониторинга являлись подшипники качения и скольжения с начальными дефектами – выбоинами на контактной поверхности [4, 7, 13,

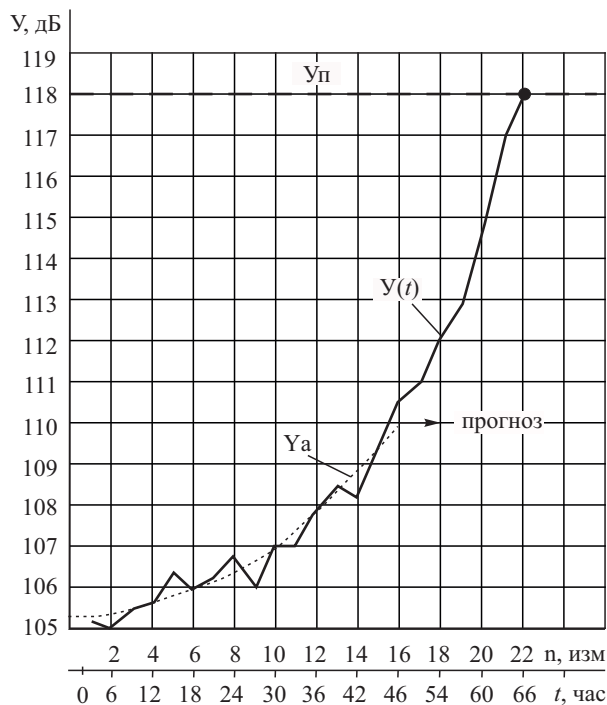


Рис. 4. Результаты вибромониторинга и прогнозирования состояния подшипника

Fig. 4. Results of vibration monitoring and technical condition prediction for bearing

15]. Испытания проводились на стенде AP7000 (рис. 3). Контролируемым параметром являлся уровень виброскорости на заранее определенной, характерной для испытываемого подшипника частоте. Параметр регистрировался ежесуточно портативным вибронализатором. Режим нагружения подшипников задавался частотой вращения, радиальными и осевыми усилиями на подшипниках. Кроме того, конструкция стенда обеспечивала нагружение подшипников в условиях перекоса и дисбаланса валов.

В результате анализа полученного временного ряда была выбрана аппроксимирующая функция (13) с коэффициентом корреляции $\rho = 0,9675$:

$$Y_a(t) = B \cdot ch(\sqrt{A \cdot t}), \quad (13)$$

где $B = 105,25$ дБ; $A = 0,0000391$ 1/ч.

Временной ряд $y(t)$ и аппроксимирующая функция Y_a показаны на рис. 4.

Экстраполяция аппроксимирующей функции позволила спрогнозировать дату наступления предельного состояния подшипника. Ошибка прогноза (запаздывание) составила 4 %.

Пример экстраполяционного прогнозирования состояния нагнетательного клапана поршневого компрессора

Аналогичная методика была применена для прогнозирования состояния нагнетательного клапана поршневого компрессора [13]. На рис. 5 приведена аналоговая запись максимальных значений виброускорения, которая получена с помощью акселерометра, установленного на клапане.

В качестве основания прогноза взят временной интервал до 28 мая. Согласно аналоговой записи, первое измерение было выполнено 15 мая, последнее – 23 июня. Видно, что 17 и 18 июня наблюдалось максимальное значение виброускорения, равное 122 м/с^2 . Обработка данных временного ряда с числом наблюдений $n = 13$ показала, что для целей прогнозирования наиболее подходит тренд-функция вида

$$Y(t) = a_0 / (1 - a_1 t)^2, \quad (14)$$

где $a_0 = 38,642$; $a_1 = 0,029$.

Тренд-функция (14) была выбрана автоматически как имеющая наибольшее значение коэффициента корреляции (0,9384) из числа конкурирующих тренд-функций. Прогнозируемый день достижения сигналом виброускорения НДП-уровня должен был наступить 15 июня, т.е. погрешность прогноза составила 2 дня в сторону опережения. Ряд других примеров экстраполяционного прогнозирования приведен в [13].

Отметим сравнительную простоту реализации рассмотренного алгоритма прогнозирования, который не требует анализа физико-химических процессов, вызывающих деградацию технического состояния объекта, и рассматривает изменение во времени только одного диагностического параметра. Однако нельзя не отметить и его существенный недостаток – непригодность к мониторингу многорежимных объектов. А между тем, режим работы объекта в моменты очередных замеров диагностического параметра может значительно влиять на результаты измерений.

Возможные в этой связи методические погрешности могут быть в определенной степени компенсированы применением корректирующих алгоритмов со сглаживанием временного ряда методом Эйлера и нелинейными диагностическими моделями, полученными экспериментальным путем [13]. Возможно использование и принципиально другой

методики прогнозирования, ориентированной именно на контроль режимов работы механизма и связанных с ними уровней нагружения наиболее ответственных узлов и деталей.

Причинно-следственный метод прогнозирования

Cause-and-effect prediction method

Слабым местом всех экстраполяционных методов является априорное предположение о том, что характер накопления эксплуатационных повреждений контролируемого узла в прогнозируемый период будет таким же, как и в период формирования временного ряда. Понятно, что одним из важных условий корректности такого предположения является неизменность условий и режимов эксплуатации объекта.

Если прямое измерение диагностического параметра во время эксплуатации объекта невозможно, а также в тех случаях, когда планируется изменение графика режимов объекта на прогнозируемом периоде, есть смысл обратиться к методикам прогнозирования, допускающим возможность учета влияния переменных режимов на интенсивность накопления эксплуатационных повреждений. Именно эта концепция лежит в основе причинно-следственного метода (термин предложен авторами), который можно считать антиподом экстраполяционного, поскольку он предусматривает регистрацию индивидуальной истории нагружений, т.е. не следствий, а причин, определяющих темп накопления эксплуатационных повреждений оборудования [2, 11, 13, 18].

Теоретическая основа метода – гипотеза линейного суммирования повреждений. Предполагается, что каждому уровню нагружения оборудования соответствует свой темп расходования ресурса, а накопление эксплуатационных повреждений многорежимного оборудования подчиняется принципу суперпозиции, т.е. можно подсчитать расходование ресурса на отдельных режимах эксплуатации и затем их сложить (рис. 6).

Соответствующий алгоритм может быть реализован в штатной системе контроля параметров и в автономных приборах – счетчиках наработки ресурса и регистраторах эксплуатационных нагружений [18].

Достоинства метода: детерминированный характер прогноза, возможность оценки темпов расходования ресурса многорежимных объектов и минимизации количества контролируемых параметров за счет использования комплексных характеристик.

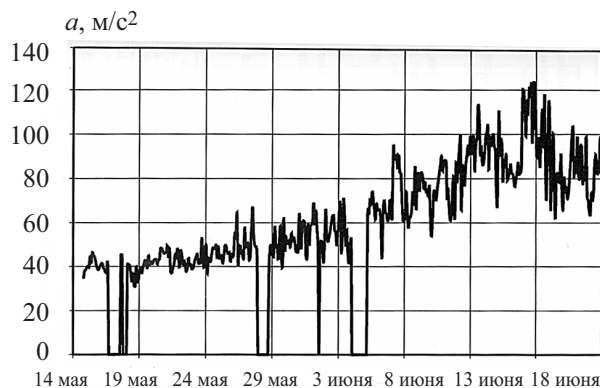


Рис. 5. Результаты вибромониторинга клапана компрессора

Fig. 5. Vibration monitoring results for compressor valve

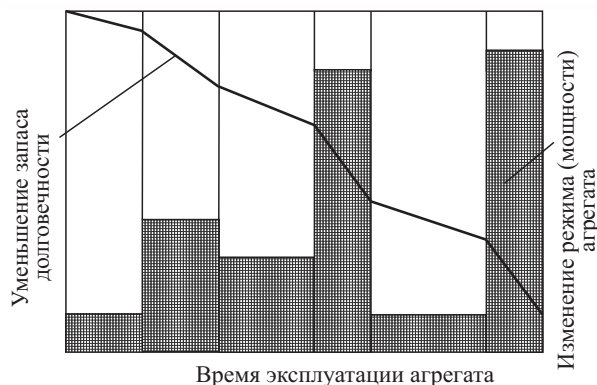


Рис. 6. Влияние режима работы агрегата на интенсивность расходования запаса долговечности

Fig. 6. Effect of operational conditions upon wear of equipment

Правда, при этом следует иметь в виду и определенные условия применимости метода:

- для его использования необходимо располагать предельными характеристиками долговечности оборудования, получение которых расчетно-экспериментальным путем является трудоемкой и дорогостоящей задачей;
- регистрацию нагружений необходимо вести с момента начала эксплуатации объекта, поэтому эффективное использование метода возможно для вновь устанавливаемого оборудования;
- метод не является универсальным, поскольку далеко не для всех видов эксплуатационных разрушающих процессов доказана возможность корректного применения линейного суммирования повреждений.

Тем не менее ориентация метода на контроль, прежде всего, режимов использования оборудования как основного фактора, определяющего интенсивность процессов эксплуатационного повреждения наиболее напряженных узлов и деталей, создает определенные предпосылки для его успешного применения в качестве информационной базы для индивидуального прогноза долговечности и упреждающего обслуживания оборудования, особенно в тех случаях, когда периодическое измерение и экстраполяция диагностических параметров, характеризующих фактическое техническое состояние оборудования, по тем или иным причинам невозможно или нецелесообразно.

Реализация метода предусматривает последовательное выполнение ряда этапов:

- анализ физико-химических процессов, вызывающих во время эксплуатации объекта деградацию его технического состояния, и выделение режимных параметров, определяющих интенсивность этой деградации;
- экспериментальное определение регрессионной математической модели, связывающей темп накопления эксплуатационных повреждений с режимными параметрами;
- задание предполагаемого на прогнозируемый период графика изменения во времени режимов эксплуатации объекта;
- вычисление с помощью регрессионной модели накоплений эксплуатационных повреждений на каждом из планируемых режимов и оценка суммарного повреждения в течение прогнозного периода;
- оценка остаточного ресурса путем сопоставления вычисленного и предельно допустимого изменений технического состояния.

Конкретные методики применения этого метода существенным образом зависят от конструктивных особенностей контролируемого объекта, условий его эксплуатации и режимов использования, характера эксплуатационных нагрузок и типичных



Рис. 7. Коррозия медного трубопровода забортной воды

Fig. 7. Corrosion of sea water copper piping

разрушающих процессов, интенсивность которых лимитирует долговечность наиболее ответственных и нагруженных узлов, возможности непосредственного контроля или косвенного определения интенсивности эксплуатационных нагрузений и других специфических особенностей контролируемого оборудования.

Пример прогнозирования состояния и остаточного ресурса судовых трубопроводов

Основным разрушающим процессом судовых трубопроводов забортной воды является химическая и электрохимическая коррозия внутренней поверхности труб в результате их длительного контакта с потоком морской воды [12] (рис. 7).

Повышенная агрессивность морской воды связана с наличием в ней ионов хлора и растворенного кислорода, вызывающих химическую коррозию металла. Высокая электропроводность морской воды способствует развитию электрохимической коррозии. Основными факторами, влияющими на интенсивность коррозии, являются температура воды и скорость потока воды в трубопроводе [19]. Характер влияния этих факторов на скорость коррозии исследовался на экспериментальной установке (рис. 8).

Исследования проводились для ряда конструкционных материалов, которые применяются в судостроении для изготовления деталей систем охлаждения, контактирующих с морской водой:

- медно-никелевый сплав – МНЖ5-1 (ГОСТ 492-73);
- медь – МЗР (ГОСТ 859-78).

Методика проведения эксперимента предусматривала изменение в соответствии с центрально-композиционным планом основных факторов, определяющих интенсивность коррозии (температуры воды и скорости потока) и мониторинг процесса путем периодического взвешивания образцов. Обработка полученных результатов согласно рекомендациям теории планирования экспериментов позволила получить следующее выражение для регрессионной модели процесса коррозии меди в морской воде:

$$Y = 1,25 + 0,258X_1 + 0,24X_2 + 0,012X_1 \cdot X_2 - 0,008X_1^2 - 0,7X_2^2, \quad (15)$$

где Y – относительное значение интенсивности коррозии; $X_1 = (V-3,5)/2,5$ – относительное значение скорости потока; $X_2 = (t - 55)/34$ – относительное значение температуры воды.

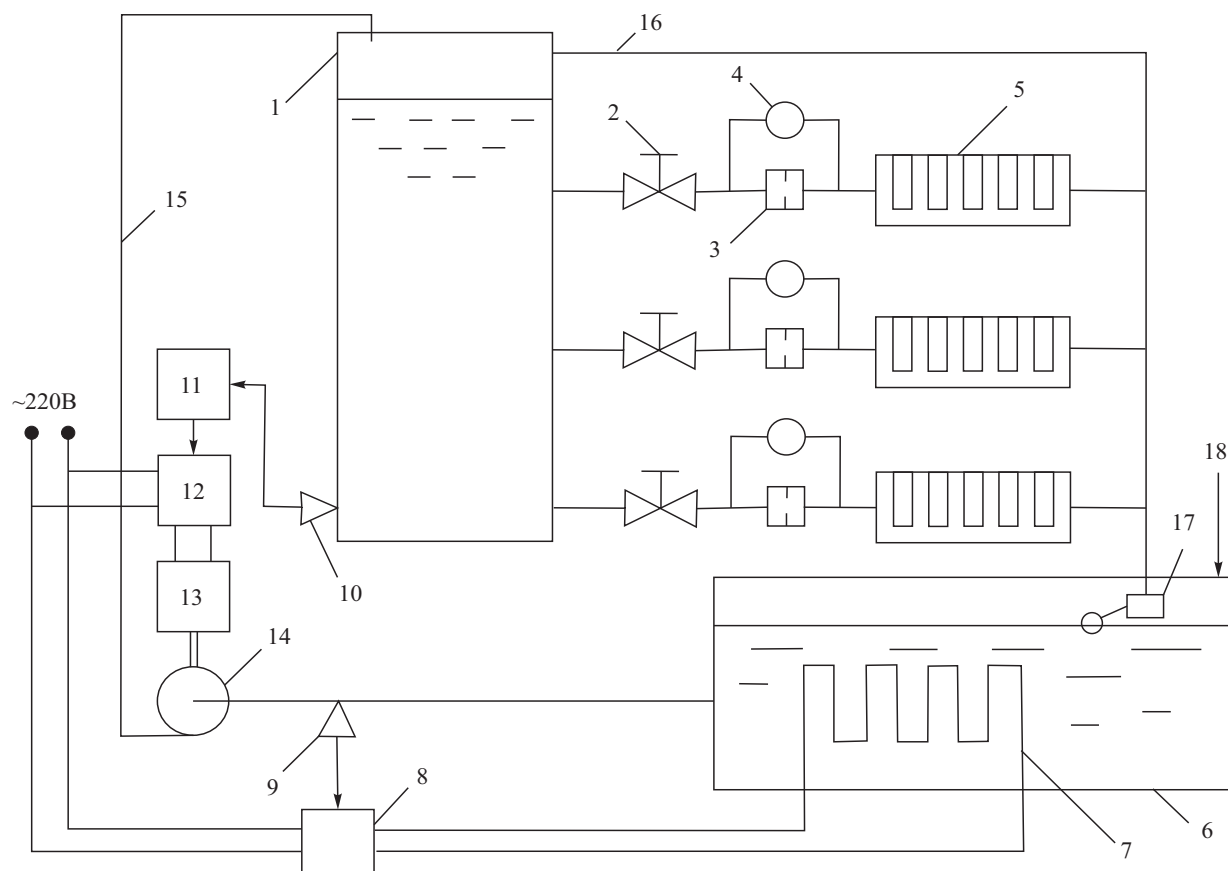


Рис. 8. Схема стендовой установки для коррозионных испытаний: 1 – расходная цистерна; 2 – дроссельный клапан; 3 – дроссельная шайба; 4 – дифманометр; 5 – кассета с образцами; 6 – цистерна запаса; 7 – электронагреватель; 8 – регулятор температуры; 9 – датчик температуры (термометр сопротивления); 10 – датчик давления; 11 – регулятор давления; 12 – преобразователь частоты тока; 13 – асинхронный электродвигатель центробежного насоса; 14 – центробежный насос; 15 – напорный трубопровод; 16 – сливной трубопровод; 17 – запорный поплавковый клапан; 18 – трубопровод для пополнения запаса воды

Fig. 8. Scheme of the bench installation for corrosion tests: 1 – feed tank; 2 – throttle valve; 3 – throttle washer; 4 – differential pressure gauge; 5 – sample cassette; 6 – stock tank; 7 – electric heater; 8 – temperature regulator; 9 – temperature sensor (resistance thermometer); 10 – pressure sensor; 11 – pressure regulator; 12 – current frequency converter; 13 – asynchronous electric motor of a centrifugal pump; 14 – centrifugal pump; 15 – pressure pipe; 16 – drain pipe; 17 – closing float valve; 18 – pipeline to replenish water

Полученная регрессионная модель может быть использована для многорежимного прогнозирования степени коррозионных повреждений трубопровода во время эксплуатации судна при различных сочетаниях рассмотренных режимных факторов (скорости и температуры морской воды). Для этого на каждом из режимов достаточно вычислить с помощью модели (15) скорость коррозии и, умножив ее на запланированную длительность режима, получить прогнозируемую степень износа трубопровода на данном режиме. Просуммировав предполагаемые степени износа на всех ожидаемых режимах, можно оценить итоговую степень износа (рис. 9).

Праксеологический метод прогнозирования

Praxeological prediction method

В работе [3] выдвинута гипотеза долговечности двигателя (и дизеля в частности), в соответствии с которой имеется тесная корреляционная связь между запасом долговечности двигателя, заложенным в процессе его проектирования и изготовления, и количеством работы, которое он может совершить за время эксплуатации (рис. 10).

Иными словами, в качестве показателя израсходованного ресурса может рассматриваться регистрация полезной работы, совершенной двигателем

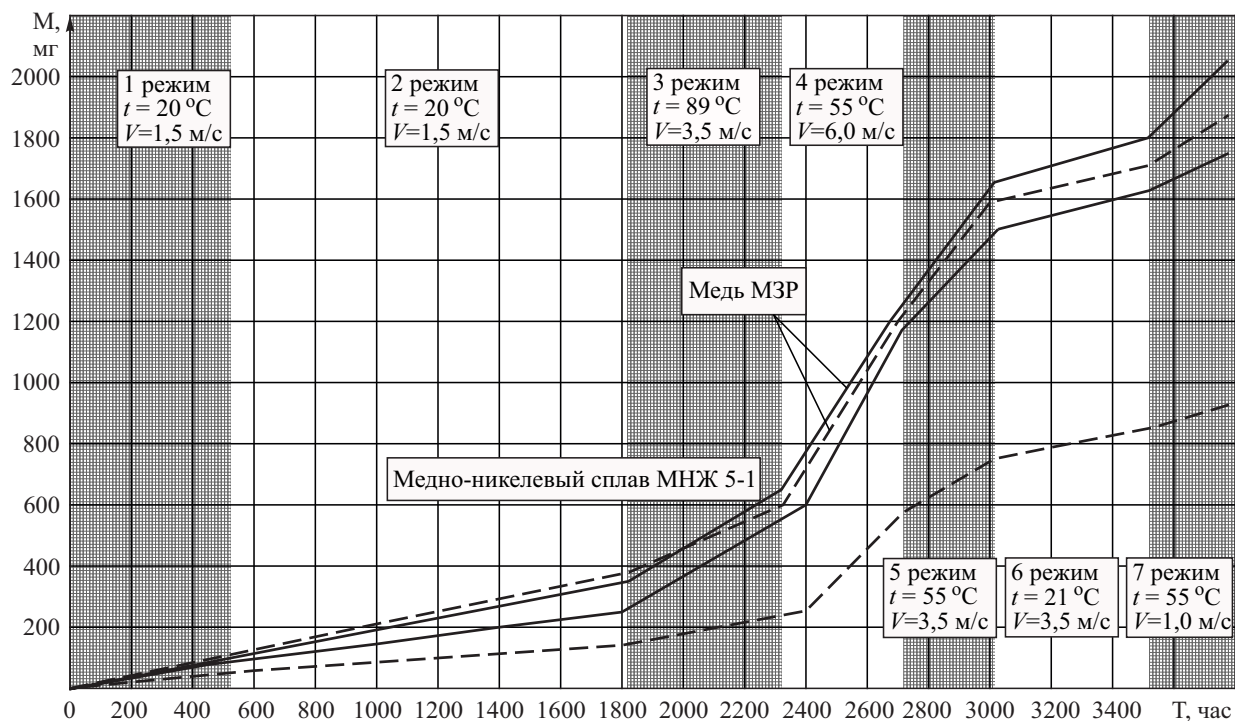


Рис. 9. Результаты длительных коррозионных испытаний на спецификационных режимах меди МЗР и сплава МНЖ 5-1 (сплошные линии – прогноз, штриховые линии – экспериментальные данные)

Fig. 9. Results of long-term corrosion tests in specified conditions: copper M3R and alloy MNZh5-1 (solid lines – prediction, dotted lines – test data)

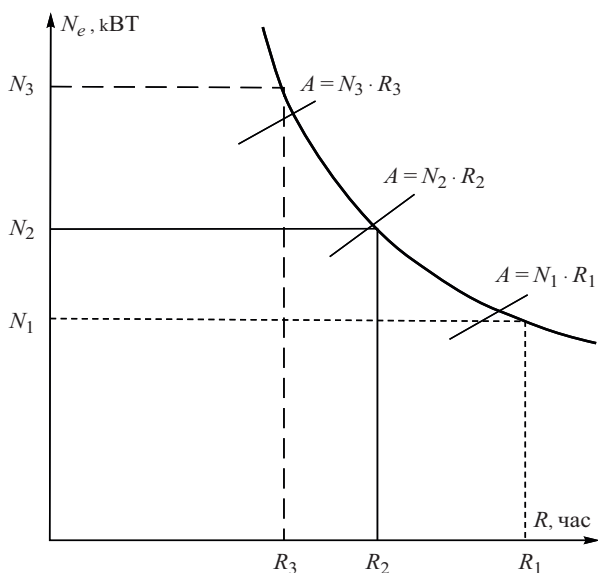


Рис. 10. Графическая иллюстрация праксеологической концепции долговечности двигателя

Fig. 10. Praxeological concept of engine lifetime: graphic illustration

за наблюдаемый период эксплуатации. Такая концепция согласуется с принципами оценки полезности тех или иных объектов, которые рассматриваются таким научным направлением, как *праксеология* [13]. Применительно к судовому дизелю корректность такого методического подхода может быть обоснована путем выделения двух основных групп эксплуатационных повреждений.

К первой группе относятся такие неисправности, как трещины и поломки деталей. В ряде случаев они могут быть вызваны краткосрочными силовыми перегрузками на фоне изначально имевшихся дефектов конструкционных материалов и нарушения технологии изготовления деталей. Снижение вероятности возникновения таких неисправностей требует, прежде всего, повышения технологической культуры производства, совершенствования заводских методов и средств контроля качества продукции, а также исключения режимов эксплуатации судовой энергетической установки, связанных с перегрузками главного двигателя. Данные неисправности носят внезапный характер, до факта поломки они никак себя не проявляют и не обнаруживаются.

ваются штатной системой централизованного контроля параметров, поэтому применение какой-то стратегии мониторинга этих случайных процессов во время эксплуатации с целью оценки их влияния на долговечность дизеля затруднительно.

Другой характерной причиной таких отказов является накопление усталости металла при длительном воздействии переменных силовых и температурных напряжений, обусловленных циклическим принципом действия дизеля. Этот процесс носит постепенный, растянутый во времени характер, что открывает определенные перспективы для его мониторинга. Непосредственный контроль во время эксплуатации повреждений внутренней структуры конструкционных материалов без разборки дизеля и использования специальных методов интроскопии невозможен, однако косвенная оценка интенсивности этих процессов может быть обеспечена путем регистрации истории эксплуатационных нагружений соответствующих деталей. Понятно, что технически нельзя организовать индивидуальный контроль эксплуатационных нагрузок каждой детали: требуется применение обобщенного показателя, характеризующего условия накопления усталостных повреждений узлов дизеля.

При выборе такого показателя можно исходить из того, что степень развития усталости металла при циклическом изменении температурных и силовых нагрузок определяется амплитудой и количеством этих циклов. В первом приближении предположим, что амплитуда циклических деформаций силовых деталей дизеля пропорциональна моменту на валу дизеля и каждый цикл нагружения «съедает» пропорциональную его амплитуде долю запаса долговечности деталей дизеля, повреждаемых в результате усталости конструкционного материала. Накопленное количество таких циклов определяется произведением частоты вращения дизеля на время его работы на данном режиме. Отсюда следует, что произведение вращающего момента M_i на частоту вращения n_i и время работы на данном режиме t_i можно рассматривать в качестве обобщенного показателя накопленных усталостных повреждений конструкционных материалов силовых деталей дизеля. Это же произведение определяет и работу A_i , совершенную двигателем за рассматриваемый временной промежуток:

$$M_i \cdot n_i \cdot t_i = N_i \cdot t_i = A_i, \quad (16)$$

где N_i – мощность дизеля.

Ко второй группе эксплуатационных повреждений дизеля можно отнести износы узлов трения.

Для некоторых из них известны частные методики контроля интенсивности износных процессов и оценки фактической величины износа (зазоров), однако их использование для комплексной оценки фактической наработки и остаточного ресурса дизеля в целом довольно затруднительно ввиду возможной «конкуренности прогнозов». Да и трудно себе представить диагностическую систему, в состав которой входит столь значительное количество разнородных измерительных трактов.

Типичной причиной ускоренных износов является нарушение качества смазки трущихся деталей в результате неисправностей элементов циркуляционной масляной системы или ухудшения качества самого масла (загрязнения, обводнения, расслоения, изменения вязкости и т.п.). Определенное влияние на интенсивность износа деталей цилиндропоршневой группы оказывают сорт, качество и вязкость топлива [9, 16]. При поддержании нормального технического состояния масляной системы, своевременных очистках и доливах свежего масла, обеспечении нормативной сортности и химико-физических показателей топлива износные процессы имеют постепенный характер, растянутый во времени. Их интенсивность определяется уровнем силового взаимодействия и скоростью относительного перемещения трущихся деталей. Уровень силового взаимодействия является функцией момента, развиваемого на валу дизеля, а скорость относительного перемещения деталей определяется частотой вращения. Таким образом, накопленная величина износа будет пропорциональна моменту на валу дизеля и накопленному пути трения, который, в свою очередь, пропорционален произведению частоты вращения на время работы дизеля на рассматриваемом режиме.

Для получения обобщенной оценки накопленного износа трущихся деталей домножим момент на произведение частоты вращения и времени работы дизеля на данном режиме и в результате получим то же самое выражение (16). Это означает, что работа, совершенная за время функционирования двигателя на рассматриваемом режиме, может являться показателем не только усталостных, но и износных повреждений деталей (к такому же выражению можно прийти, анализируя зависимость износа от контактного напряжения и пути трения).

Для многорежимного двигателя совместное применение праксеологического подхода и гипотезы линейного суммирования эксплуатационных повреждений означает реализацию двух принципов:

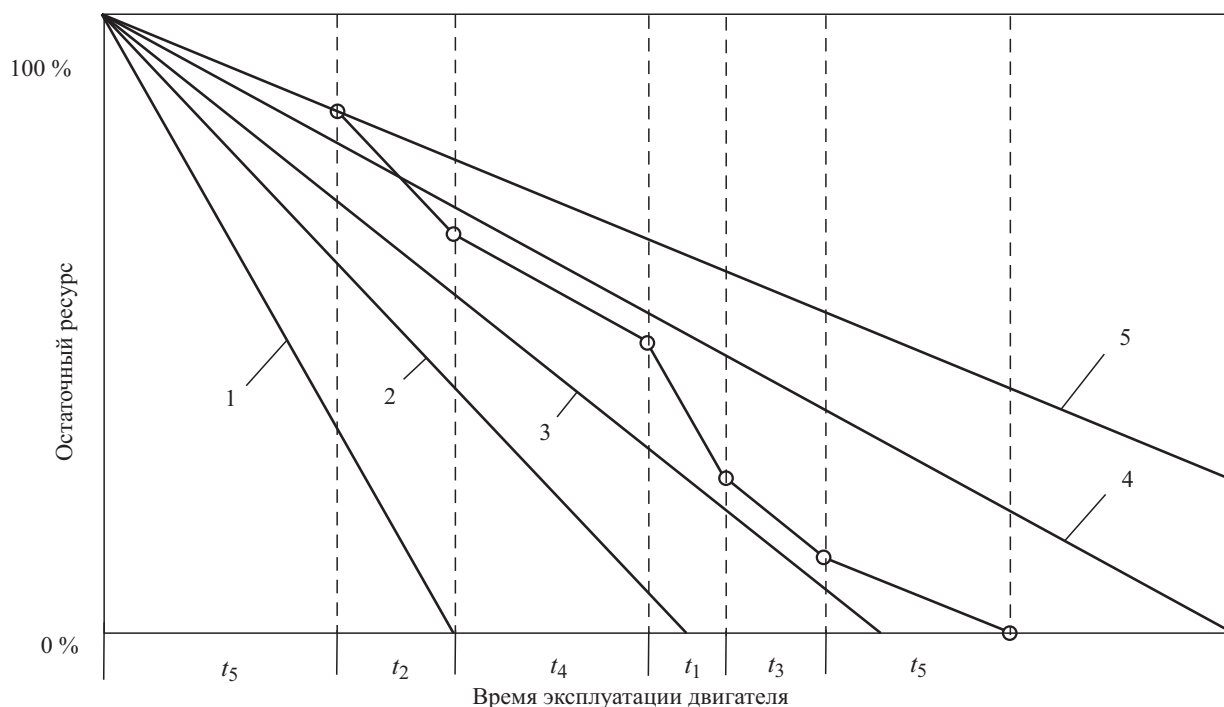


Рис. 11. Расходование запаса долговечности двигателя: 1–5 – темпы расходования ресурса на различных мощностях ($N_1 > N_2 > N_3 > N_4 > N_5$); t_1 – t_5 – длительности работы двигателя на соответствующих режимах

Fig. 11. Engine wear: 1–5 – wearing rates at different power levels ($N_1 > N_2 > N_3 > N_4 > N_5$); t_1 – t_5 – engine operation times in corresponding modes

- интенсивность расходования запаса долговечности на каждом режиме пропорциональна мощности;
- накопленное уменьшение запаса долговечности $\Delta R_{\text{ст.р.}}$ определяется суммированием частичных его уменьшений ΔR_i на зарегистрированных стационарных режимах:

$$\Delta R_{\text{ст.р.}} = \sum_{i=1}^n \Delta R_i. \quad (17)$$

Графическая иллюстрация указанных принципов представлена на рис. 11.

Системный метод прогнозирования технического состояния оборудования

System prediction method for technical condition of equipment

Сравнительный анализ специфических особенностей применения экстраполяционного и причинно-следственного методов прогнозирования позволяет сделать вывод о том, что рассмотренные мето-

ды имеют свои достоинства, недостатки и, соответственно, свои области применения.

Несомненным достоинством *экстраполяционного метода* является то, что для его применения не требуется предварительное исследование качественных и количественных характеристик физико-химических процессов деградации технического состояния объекта. Метод рассчитан на минимальное число контролируемых параметров объекта. Недостаток состоит в том, что для формирования прогноза нужен период предварительного наблюдения за объектом, в течение которого производится формирование временного ряда. Метод эффективен только при монотонном изменении во времени контролируемого диагностического параметра. Отсутствие контроля условий эксплуатации ограничивает возможность корректного применения экстраполяционного метода только для однорежимных объектов или объектов, у которых частота изменения режимов существенно выше частоты замеров параметра, благодаря чему влияние режима удается ослабить применением интегрального сглаживания временного ряда.

Типизация элементов оборудования и процессов деградации их технического состояния

Types of equipment elements and their deterioration processes

Элемент	Эксплуатационные воздействия	Процессы деградации состояния элементов оборудования
Пара трения скольжения	Триботехнический износ	Уменьшение толщины антифрикционных покрытий, увеличение зазоров
Пара трения качения	Усталостный износ	Наклеп, усталостное выкрашивание контактных поверхностей, хрупкое разрушение
Упругие элементы, силовые оболочки	Циклическое воздействие напряжений, деформаций и температур	Малоцикловая и многоцикловая усталость, трещинообразование, разрушение
Изолирующие оболочки (стенки труб и емкостей), детали механизмов	Контактное взаимодействие с химически агрессивными и абразивными средами, кавитация	Коррозия, эрозия, ухудшение качества поверхности, искажение формы, уменьшение толщины и запаса прочности
Статически нагруженные силовые элементы	Длительное статическое воздействие напряжений и высоких температур	Пластическая деформация (ползучесть), релаксация
Детали из неметаллических материалов	Длительное хранение, воздействие повышенных температур	Старение (ухудшение упруго-пластических свойств)

Как показано выше, этот недостаток можно в значительной степени компенсировать за счет модернизации алгоритма однопараметрического прогнозирования и применения специальных методик, предусматривающих использование регрессионных диагностических моделей.

Причинно-следственный метод пригоден для объектов с любым характером изменения режимов, и для его использования не требуется предварительный период накопления данных во время эксплуатации объекта. Однако обязательным условием применимости метода является выполнение предварительных исследований разрушающего процесса с целью получения зависимости интенсивности этого процесса от условий эксплуатации объекта.

Обобщая особенности рассмотренных методов, следует отметить, что наряду с отмеченными выше достоинствами они имеют и ряд недостатков. Главными из них являются относительно высокая дисперсия прогнозов (особенно средне- и долгосрочных), отсутствие универсальности, т.е. возможности эффективного использования для широкой номенклатуры оборудования и всего спектра эксплуатационных условий, а также отсутствие приемлемого по стоимости и трудоемкости способа получения исходных характеристик долговечности.

Эволюция методологии решения прогнозных задач в метеорологии, медицине, демографии и других областях свидетельствует о том, что кардинальным направлением повышения достоверно-

сти прогнозов является переход от частных методик к системной организации прогнозирования [13].

Основные принципы системного подхода:

- наблюдаемый объект рассматривается в виде системы, состоящей из типовых элементов (сборочных единиц), которые обладают свойством универсальности для всего многообразия оборудования;
- наблюдаемый объект рассматривается в качестве элемента системы более высокого уровня, причем поведение системы описывается многофакторной динамической моделью, отражающей деградацию технического состояния элементов во времени.

Реализация первого принципа требует, прежде всего, типизации элементов судового энергетического оборудования и соответствующих процессов деградации их технического состояния в процессе эксплуатации и последующей разработки типовых методик прогнозирования (таблица).

Реализация второго принципа предполагает комплексную организацию контроля состояния наиболее нагруженных элементов энергетического оборудования, лимитирующих его долговечность, на всех этапах жизненного цикла энергетических установок (рис. 12).

Из таблицы и рис. 12 следует, что системный подход позволяет:

- унифицировать состав типовых элементов оборудования и соответствующих методик определения характеристик их долговечности;



Рис. 12. Обобщенный алгоритм системного прогнозирования

Fig. 12. Generalized algorithm of system predictions

- повысить адекватность модели на базовом временном интервале и достоверность прогнозирования за счет корректирующей информации, получаемой в результате выходного контроля на производстве, регистрации эксплуатационных режимов и физических признаков деградации состояния, а также диагностирования оборудования во время его эксплуатации.

Заключение

Conclusion

Актуальность выбора эффективных методов прогнозирования и совершенствования методик их применения обоснована тем, что обеспечение достоверных прогнозов изменений технического состояния и оценки остаточного ресурса судового энергетического оборудования в процессе эксплуатации является необходимым условием обоснованного планирования и оптимизации обслуживания оборудования, а также снижения вероятности внезапных отказов и аварий.

Выполненный сравнительный анализ функциональных возможностей нескольких фактографиче-

ских методов прогнозирования позволил оценить их достоинства и недостатки и определить рациональные области применения.

Библиографический список

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
2. Глушков С.П., Штельмах С.В., Глушков С.С. Прогнозирование остаточного ресурса коленчатых валов судовых дизелей // Судостроение. 2008. № 6. С. 55.
3. Кромин Ю.В. Метод расчета израсходованного и остаточного индивидуального ресурсов дизелей в зависимости от особенностей эксплуатации на конкретном объекте // Двигателестроение. 1996. № 3–4. С. 48–53.
4. Максимова М.А. Прогнозирование работоспособности подшипниковых узлов на основе обработки данных временного ряда контролируемых параметров // Морские интеллектуальные технологии. 2010. № 3(9). С. 42–47.
5. Медведев В.В., Семиничев Д.С. Принципы применения электронных систем управления и систем диагностирования для прогноза технического состояния и оценки рисков // Судостроение. 2009. № 4. С. 41–43.

6. Мясников Ю.Н., Равин А.А., Хорошев В.Г. Методология форсайта на примере развития энергетики // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 77(361). С. 6–18.
7. Нахимович Е.В., Погодаев Л.И. Моделирование процесса изнашивания и прогнозирование долговечности опор качения. СПб.: Изд-во ГТУ, 2002.
8. Погодаев Л.И., Голубев Н.Ф. Теория и практика прогнозирования износостойкости и долговечности материалов и деталей машин. СПб.: Изд. СПГУВК, 1997.
9. Половинкин В.Н., Лянной Б.К. Комплексный анализ отказов и направления повышения эксплуатационной надежности судовых и корабельных дизелей // Двигателестроение. 1996. № 3–4. С. 54–57.
10. Прогностика. Терминология. М.: Наука, 1990.
11. Равин А.А. Методы прогнозирования технического состояния судового энергомеханического оборудования // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2000. Вып. 9(293). С. 162–173.
12. Равин А.А. Экспериментальные исследования коррозии судовых трубопроводов в морской воде // Морские интеллектуальные технологии. 2012. № 1 (15). С. 25–28.
13. Равин А.А., Хруцкий О.В., Максимова М.А. Сравнительный анализ двух методов прогнозирования технического состояния оборудования // Морской вестник. 2013. Спецвыпуск № 1(10). С. 34–37.
14. Rogov S.N., Sobolev L.G., Khrutskii O.V. О некоторых методах сглаживания и идентификации экспериментальных трендов // Автоматика и телемеханика. 2005. № 5. С. 134–145.
15. Румб В.К., Медведев В.В., Серов А.В., Хижняк А.А. Применение методики формализованной оценки безопасности для определения остаточного ресурса главного судового дизеля // Судостроение. 2005. № 5. С. 42–46.
16. Соловьев В.Н., Трусова Г.И. О прогнозировании индивидуального ресурса оборудования судовых энергетических установок // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2000. Вып. 9(293). С. 174–185.
17. Шканов О.В. Контроль выработанной части и остатка ресурса двигателей // Двигателестроение. 1996. № 3–4. С. 63–65.
- tions // *Dvigatolestroyeniye (Engine building)*. 1996, No. 3–4, P. 48–53 (in Russian).
4. Maximova M. The functionality prediction of the bearing units on the basis of the time-series data processing of the controlled parameter // *Marine Intellectual Technologies*. 2010. No. 3(9). P. 42–47 (in Russian).
5. Medvedev V., Semionichev D. Principles of employment of electronic control and diagnosis systems for prediction of technical state and risk assessment // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2009. No. 4. P. 41–43 (in Russian).
6. Myasnikov Yu., Ravin A., Horoshev V. Power industry development: methodology of foresight // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Issue 77 (361). P. 6–18 (in Russian).
7. Nakhimovich Ye., Pogodaev L. Wear simulation and lifetime prediction for rolling-contact bearings. SPb.: State Technical University publishing house, 2002 (in Russian).
8. Pogodaev L., Golubev N. Lifetime and wear resistance prediction for materials and machine parts: theory and practice. SPb.: St. Petersburg State University of Waterway Communications publishing house, 1997 (in Russian).
9. Polovinkin V., Lyannoy B. Complex analysis of failures and raising the reliability of marine diesels // *Dvigatolestroyeniye (Engine building)*. 1996. No. 3–4. P. 54–57 (in Russian).
10. Prognostics. Terminology. M.: Nauka, 1990 (in Russian).
11. Ravin A. Prediction methods for technical condition of marine power-generating machinery // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2000. Issue 9(293). P. 162–173 (in Russian).
12. Ravin A. Experimental research of corrosion of ship's pipelines in seawater. // *Marine Intellectual Technologies*. 2012. No. 1(15). P. 25–28 (in Russian).
13. Ravin A., Khrutsky O., Maksimova M. Comparative analysis of two methods of predicting the technical condition of the equipment // *Morskoy vestnik*. 2013. Special Issue No. 1(10). P. 34–37 (in Russian).
14. Rogov S., Sobolev L., Khrutskii O. On Some Methods of Smoothing and Identification of the Experimental Trends // *Avtomatika i telemekhanika (Automation and Remote Control)*. 2005. No. 5. P. 134–145 (in Russian).
15. Rumb V., Medvediev V., Serov A., Khizhnyak A. Application of formalized safety procedure to determine the residual service life of the main marine diesel // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2005. No. 5. P. 42–46 (in Russian).
16. Solovyev V., Trusova G. On individual lifetime prediction for equipment of marine power plants // Transactions of A. Ravin. Prediction methods for technical condition of marine power-generating machinery // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2000. Issue 9 (293). P. 162–173 (in Russian).

References

1. Bolotin V. Lifetime prediction for machinery and structures. M.: Mashinostroyeniye, 1984 (in Russian).
2. Glushkov S.P., Shtelmakh S., Glushkov S.S. Forecasting of residual life of marine diesels crankshafts // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2008. No. 6. P. 55 (in Russian).
3. Kromin Yu. Calculation method of service and residual individual life of diesels depending on operating condi-

17. *Shkanov O.* Control of depleted & residual engine life // *Dvigatelistroyeniye (Engine building)*. 1996. No. 3–4. P. 63–65 (in Russian).

ул. Лоцманская, 3. Тел.: +7 (921) 420-34-45. E-mail: obx47@mail.ru.

Сведения об авторах

Мясников Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-64-08. E-mail: yu.myasnikov@yandex.ru.

Никитин Владимир Семенович, д.т.н., профессор, генеральный директор ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-46-07. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Равин Александр Александрович, д.т.н., профессор СПбГМТУ. Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Тел.: +7 (921) 975-71-71. E-mail: ravinlki@mail.ru.

Хруцкий Олег Валентинович, д.т.н., профессор СПбГМТУ. Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург,

About the authors

Yuri N. Myasnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Principal Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 748-64-08. E-mail: yu.myasnikov@yandex.ru.

Vladimir S. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director General, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-46-07. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Alexander A. Ravin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, State Marine Technical University of St. Petersburg. Address: ul. Lotsmanskaya 3, St. Petersburg, 190008, Russia. Tel.: +7 (921) 975-71-71. E-mail: ravinlki@mail.ru.

Oleg V. Khrutsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, State Marine Technical University of St. Petersburg. Address: ul. Lotsmanskaya 3, St. Petersburg, 190008, Russia. Tel.: +7 (921) 420-34-45. E-mail: obx47@mail.ru.

Поступила / Received: 08.06.18
Принята в печать / Accepted: 06.11.18
© Коллектив авторов, 2018