

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА РЕЖИМА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Н.А. Полковникова, кандидат технических наук

А.К. Полковников, кандидат технических наук, доцент

В соответствии с позицией Международной морской организации актуальной научной проблемой является разработка методов уменьшения влияния «человеческого элемента» по управлению судовой энергетической установкой и судна с помощью технических средств поддержки принятия решений. Поэтому важным направлением повышения надёжности и эффективности технической эксплуатации главных судовых двигателей является разработка и внедрение интеллектуальных систем, которые позволяют использовать результаты мониторинга и автоматизировать процедуры решения эксплуатационных задач для информационной поддержки оператора в принятии решений. Для решения комплекса задач технической эксплуатации главных судовых двигателей предложены и научно обоснованы модели, алгоритмы и программные средства, позволяющие на качественно новом уровне использовать резервы фактического технического состояния и оптимизационные методы для выбора режима, предотвращения и прогнозирования отказов.

Ключевые слова: главный судовой двигатель, система поддержки принятия решений, диагностический параметр, эталонные и текущие диагностические модели, предотвращение отказа, прогнозирование отказа.

According to the International Maritime Organization, an urgent scientific problem is development of methods for reducing influence of the “human element” on management of a ship's power plant and ship using technical decision-support tools. Therefore, an important direction of increasing reliability and efficiency of main marine diesel engines' technical operation is development and integration of intelligent systems that allow using monitoring results and automate procedures for solving operational problems for the information support of the operator in making decisions. To solve complex problems of main marine diesel engines technical operation, models, algorithms and software have been proposed and scientifically justified, which make it possible at a qualitatively new level to use reserves of actual technical condition and optimization methods to select operation mode, prevent and forecast failures.

Key words: main marine diesel engine, decision support system, diagnostic parameter, reference and current diagnostic models, failure prevention, failure forecasting.

Обеспечение надёжной работы главных судовых двигателей с учётом их конструктивных и технологических достоинств и недостатков, постоянно меняющихся условий эксплуатации и технического состояния является сложной задачей. Опыт эксплуатации судовых дизелей постоянно подтверждает всевозрастающее влияние «человеческого фактора» на их эксплуатационную надёжность, несмотря на широкое использование систем автоматического управления, аварийно-предупредительной сигнализации и защиты. В соответствии с позицией Международной морской организации (ИМО) актуальной научной проблемой является разработка методов уменьшения влияния «человеческого элемента» по управлению судовой энергетической установкой (СЭУ) и судна с помощью технических средств поддержки принятия решений. Важным направлением повышения надёжности и эффективности технической эксплуатации главных судовых двигателей (ГД) является разработка и внедрение интеллектуальных систем, которые позволяют использовать результаты мониторинга и автоматизировать процедуры решения эксплуатационных задач для информационной поддержки оператора в принятии решений.

В работах [1] – [5] для решения комплекса

задач технической эксплуатации ГД разработаны и научно обоснованы алгоритмы и программные средства, позволяющие на качественно новом уровне использовать резервы фактического технического состояния для предотвращения отказов, прогнозирования технического состояния на основе интеллектуального управления. В настоящей работе показана система поддержки принятия решений (СППР) для следующих задач технической эксплуатации ГД: оценка текущего технического состояния по контролируемым параметрам, назначение допустимого режима ГД с учётом его технического состояния и внешних условий плавания, предотвращение и прогнозирование отказов. Для формализации процедур эволюции данных в базе знаний (БЗ) разработана методика использования стохастических моделей различных типов и уровней: эталонных и текущих (адаптивных), локальных и интегральных, для получения которых требуется база данных (БД) измеряемых параметров, программное обеспечение (ПО) и БД моделей.

Формализация процедур по выбору допустимого режима ГД. Выбор режима полного хода, как правило, производится в соответствии с условием максимального использования построчной мощности ГД и с учётом его

технического состояния для обеспечения заданной скорости судна. Современные системы дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) имеют встроенные программы вывода ГД на режим полного хода (в штатном и ускоренном вариантах). Чтобы не допустить перегрузки ГД при этом используются: 1) механизм ограничения хода сервомотора регулятора частоты вращения в функции от заданной частоты вращения; 2) механизм ограничения хода сервомотора регулятора частоты вращения в функции от давления продувочного воздуха; 3) исполнительный механизм системы ДАУ, замедляющий темп изменения частоты вращения. Эти устройства используются как отдельно, так и совместно в любом сочетании. Однако наличие этих устройств ещё не обеспечивает защиту двигателя от перегрузки. Необходимо тщательно настраивать названные устройства на соответствующую ограничительную характеристику, но даже и в этом случае при задании режима полного хода изменение технического состояния ГД практически не учитывается [5] – [9].

Использование современных информационных технологий позволяет получать обоснованный выбор допустимого режима ГД. Для этого требуется формализация процедуры вывода ГД на заданный режим в виде соответствующего алгоритма. Структурная схема такого алгоритма представлена на рис. 1.

Вывод ГД на режим полного хода производится через ряд неустановившихся режимов и сопровождается практически непрерывным изменением значений контролируемых параметров во времени. При этом по мере увеличения нагрузки один или несколько контролируемых параметров (КП) могут приближаться к своему предельному (ограничительному) значению, но ни один из них не должен выходить за установленный предел:

$$| [КП_j] - КП_j^{\text{факт}} | \geq ([\Delta_j] + \Delta_j)/2, \quad (1)$$

где $[КП_j]$ и $КП_j$ – ограничительное и фактическое значения контролируемых параметров соответственно, $[\Delta_j]$ и Δ_j – доверительные интервалы оценки ограничительных и фактических значений контролируемых параметров соответственно, j – число контролируемых параметров.

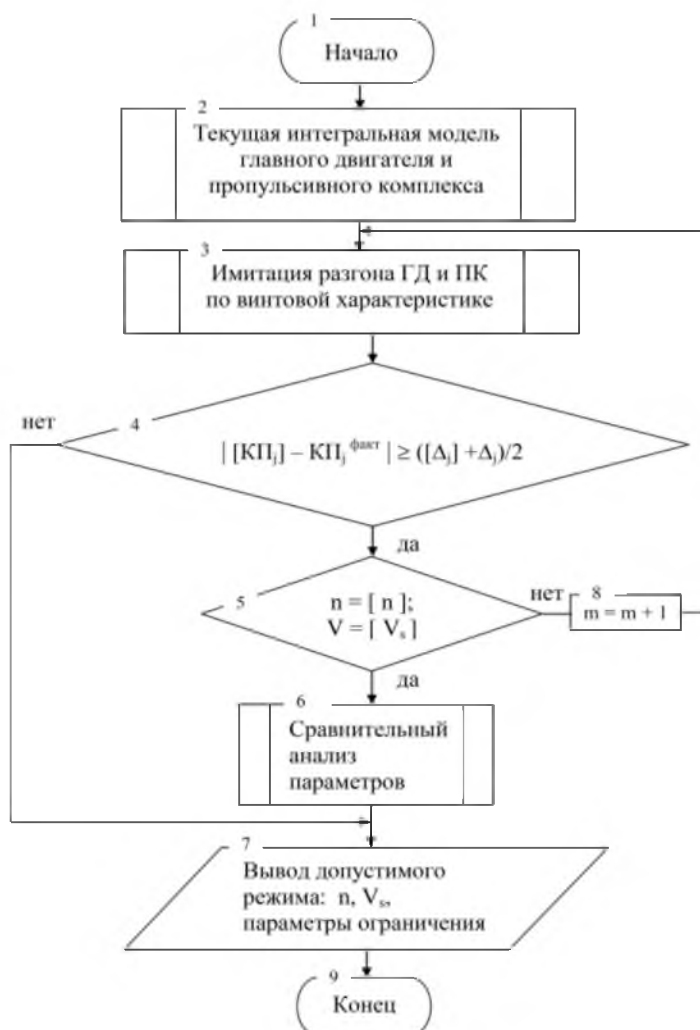


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма определения предельно допустимого режима главного судового двигателя

Использование доверительных интервалов ограничительных и фактических значений контролируемых параметров объясняется необходимостью учёта погрешностей их определения во избежание случайной перегрузки двигателя. При постепенном ухудшении технического состояния двигателя и пропульсивного комплекса выполнение условия сохранения плановой скорости судна $V_s = idem$ будет достигаться при всё больших значениях нагрузки и сближении контролируемых параметров с ограничительными. Поэтому безотказность работы дизеля при прочих равных условиях будет обеспечиваться только в случае снижения его мощности и потери скорости судна

На рис. 2 и 3 представлены результаты реализации предложенной формализованной процедуры вывода ГД 6S50MC (6ДКРН50/191) танкера «Тамбов» на режим полного хода с помощью СППР. В результате имитации набора частоты вращения ГД на экран монитора выдаётся сообщение о достижении заданной скорости судна

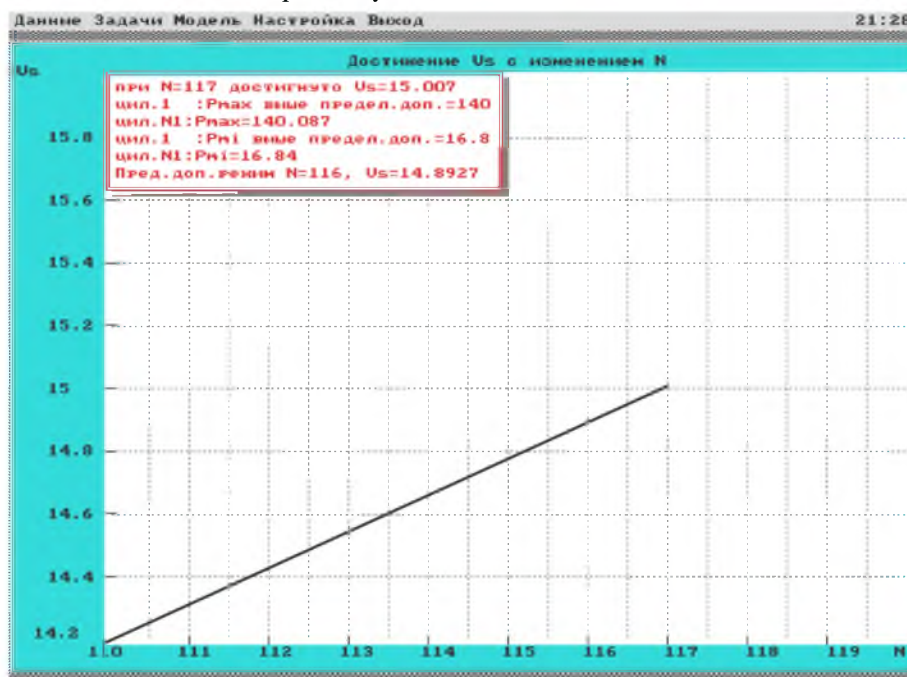


Рисунок 2 – Вид экрана монитора при определении предельно допустимой скорости танкера «Тамбов»

Наряду с задачей выбора режима ГД при условии максимального использования построечной мощности в условиях эксплуатации приходится задавать режимы экономичного хода по минимуму эксплуатационных расходов, определяющую часть которых составляют затраты на топливо и масло. Решение этой оптимизационной задачи также существенно облегчается возможностью имитировать с помощью ИМД предполагаемые режимы.

Формализация процедур по предотвращению и прогнозированию отказов. Для

или о выходе диагностического параметра за ограничительное значение. На рис. 2 имитация разгона судна по интегральной модели двигателя (ИМД) ограничена средним индикаторным давлением и максимальным давлением сгорания первого цилиндра.

На рис. 3 вывод ГД на режим полного хода ограничен по давлению продувочного воздуха и среднему индикаторному давлению первого цилиндра.

Получение таких протоколов (распечаток) позволяет обосновать выбор допустимого режима эксплуатации ГД и скорость полного хода судна в данных условиях эксплуатации. Необходимо отметить, что достигнутый уровень нагрузки ГД ниже предела, заданного заводской стендовой ограничительной характеристикой, что свидетельствует о необходимости их корректировки применительно к условиям эксплуатации конкретного судна.

предотвращения отказов ГД традиционно применяется аварийно-предупредительная сигнализация (АПС), предупреждающая обслуживающий персонал о достижении контролируемым параметром предельно допустимой величины. Главные судовые дизели имеют автоматическую защиту по контролируемым параметрам, при достижении аварийных значений которых дизель автоматически останавливается («shut down») или переводится на режим малого хода («slow down»). Для своевременного предотвращения отказа необходимо обоснованно выбрать величину

уставки контролируемого параметра (КП), а статистическая обработка измеренных значений параметров позволяет снизить влияние случайных (одиночных) выходов контролируемого параметра за уставку [10] – [13].

В качестве примера, подтверждающего возможность реализации предложенного алгоритма предотвращения и прогнозирования отказа, могут быть использованы результаты экспериментальных исследований по термометрированию деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), проведённых на двигателе 8ZD72/48 траулера «Азов». В процессе натурных испытаний работа ГД осуществлялась по нагрузочной характеристике ($n_n = 214 \text{ мин}^{-1}$; винт регулируемого шага), в качестве основного ограничительного параметра нагрузки двигателя использовалась температура выпускных газов ($t_g \leq 375 \text{ }^\circ\text{C}$).

Контроль температур головки и тронка

поршня выполнялся с помощью бесконтактного устройства: один терморезистор был установлен за первым поршневым кольцом, второй – над приработочным пояском тронка. Также на глубине 5 мм от поверхности нагрева были установлены термопары для регистрации температуры днища крышки и втулки цилиндров в районе первого поршневого кольца, когда поршень находится в ВМТ. В результате математической обработки термограмм (рис. 4) получены аналитические зависимости нарастания температур деталей ЦПГ за время промыслового рейса (табл. 1).

Адекватность моделей определялась коэффициентом множественной детерминации R^2 . После дифференцирования полученных уравнений определялась скорость нарастания температуры деталей ЦПГ в процессе эксплуатации, которая оказалась наибольшей у головки поршня.

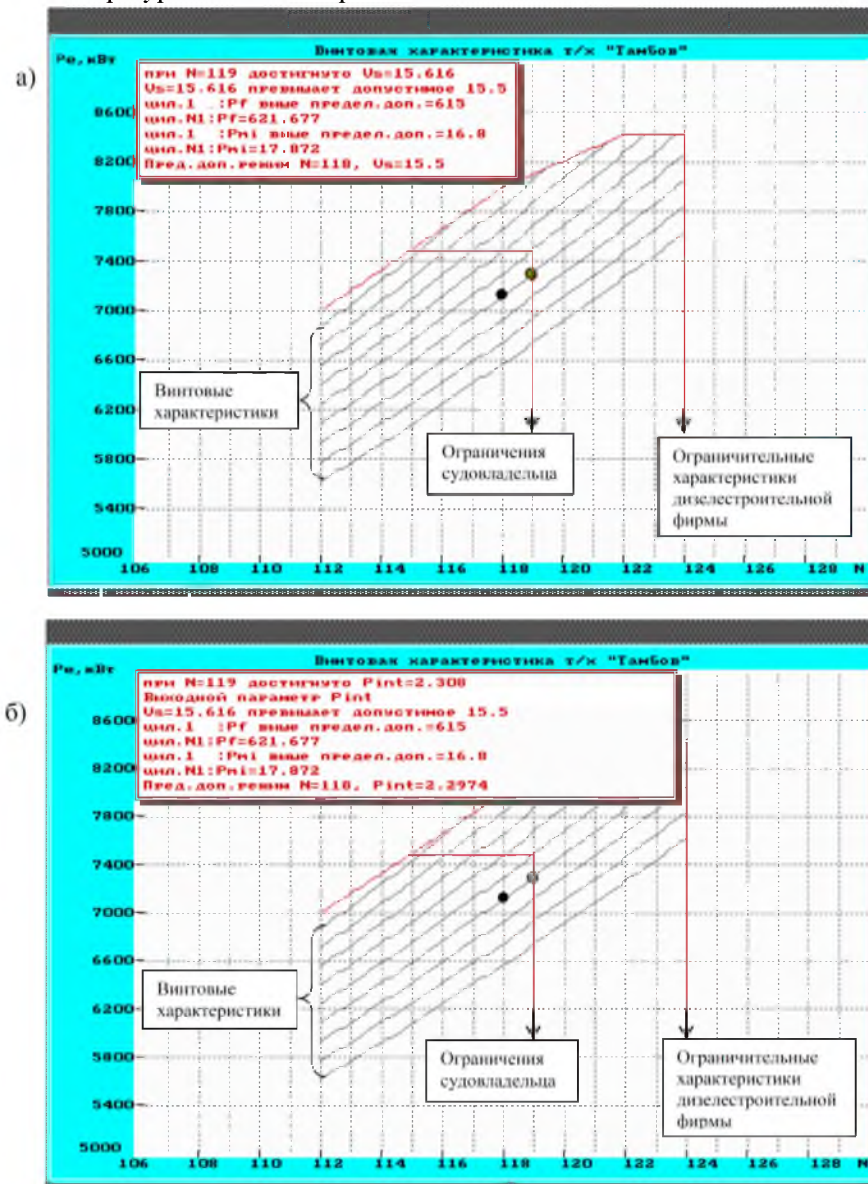


Рисунок 3 – Вид экрана монитора при определении допустимого режима ГД с ограничением:

а) скорости судна; б) среднего индикаторного давления первого цилиндра

Таблица 1 – Результаты математической обработки термограмм деталей ЦПГ ГД 8ZD72/48 (8ЧН48/72) за время промыслового рейса траулера «Азов»

№ пп	Наименование детали	Аналитическая зависимость изменения температуры (x от 800 до 2900 ч)	R ²	Скорость изменения °С/тыс. ч
1	Крышка цилиндров	$t_{кр} = 180,143 + 7,477 \cdot 10^{-3} \cdot x$	0,946	0,01
2	Втулка цилиндров	$t_{вт} = 124,437 + 0,01 \cdot x$	0,972	0,01
3	Тронк поршня	$t_{n2} = 104,171 + 0,012 \cdot x$	0,973	0,012
4	Головка поршня	$t_{n1} = 162,673 + 0,043 \cdot x - 5,826 \cdot 10^{-6} \cdot x^2$	0,959	0,034

* в качестве аргумента (x) используется время наработки двигателя в часах

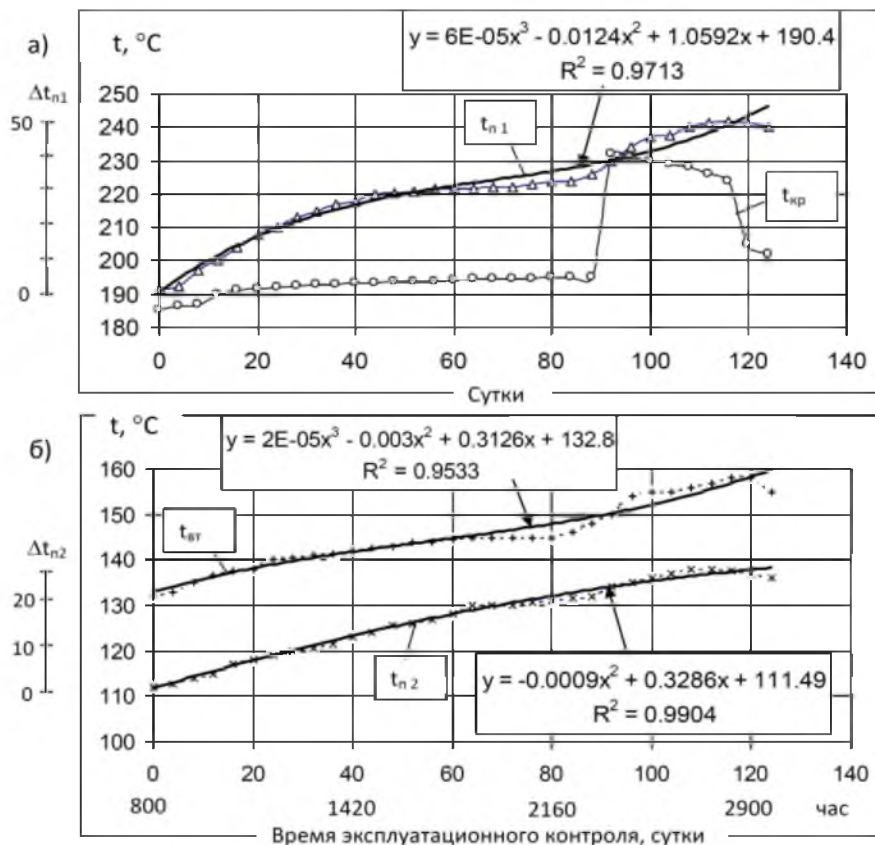


Рисунок 4 – Результаты математической обработки термограмм деталей ЦПГ двигателя 8ZD72/48: t_{n1} и t_{n2} – головка и тронк поршня, $t_{кр}$ и $t_{вт}$ – крышка и втулка цилиндров

Статистический анализ показывает, что к характерным отказам деталей ЦПГ относятся: трещины днищ цилиндрических крышек, трещины втулок, залегание и поломка поршневых колец, заклинивание крылаток в полости масляного охлаждения головок поршней, прогорание головок поршней. Места расположения дефектов и их характер указывают на высокий уровень теплонапряжённости деталей ЦПГ и, особенно, головок поршней [14] – [16].

Для количественной оценки изменения теплонапряжённости деталей ЦПГ в процессе эксплуатации рекомендуется совместное использование следующих диагностических критериев Δt_1 и Δt_2 :

$$\Delta t_1 = t_{факт} - t_{расч} \quad (2)$$

$$\Delta t_2 = t_{расч} - t_{эт}, \quad (3)$$

где $t_{факт}$ и $t_{расч}$ – фактическое и расчётное по математической модели для соответствующего периода наработки значения температур деталей ЦПГ (расчёт по моделям табл. 1), $t_{эт}$ – эталонное значение температуры.

Если тренд первого критерия $\Delta t_1 = f(\tau)$ предназначен для своевременного распознавания внезапного отказа ЦПГ, то второй $\Delta t_2 = f(\tau)$ – для контроля и прогнозирования постепенного отказа.

Скачкообразное повышение температуры крышки цилиндров (рис. 3 а) связано с введением в систему охлаждения двигателя антикоррозионной присадки с грубым нарушением технологии. Оно показывает, что этот параметр оказался наиболее чувствительным к перераспределению

теплопотоков между деталями ЦПГ. Приведённый пример по характеру изменения диагностического параметра соответствует внезапному отказу, поэтому в таких случаях система автоматизированной поддержки принятия решений должна обеспечивать включение АПС. Плавное (монотонное) нарастание температуры деталей ЦПГ на всех четырёх термограммах связано с постепенным ухудшением технического состояния двигателя. В этом случае, модель тренда $\Delta t_2 = f(\tau)$ по каждому диагностическому параметру будет иметь такое же математическое описание (табл. 1), что и сам параметр, а началом отсчёта тренда будет эталонное значение соответствующей температуры.

В алгоритмах распознавания внезапного отказа и прогнозирования постепенного могут использоваться аналитические зависимости деталей ЦПГ, аргументом в которых является календарное время эксплуатации в сутках. Такие модели представлены на рис. 3. Таким образом, использованные диагностические критерии Δt_1 и Δt_2 хорошо оценивают ухудшение технического состояния ЦПГ в процессе эксплуатации и отражают влияние эксплуатационных факторов на уровень тепловой напряжённости.

Если контролируемый параметр зависит от режима работы двигателя в алгоритме предотвращения отказа необходимо предусматривать сравнение каждого очередного значения контролируемого параметра с расчётным по текущей модели. Фактически это означает переход от систем АПС к системам технического диагностирования и СППР, а контролируемый параметр приобретает новое качество и становится диагностическим (ДП).

Так как текущая модель в каждый момент времени остаётся адекватной объекту диагностического контроля, то отличие фактического значения ДП^Ф от расчётного в пределах погрешностей можно считать признаком нормальной работы. Если же разница $|ДП^Ф - ДП^Р|$ больше погрешности оценки этих величин и растёт от замера к замеру, т.е.

$$|ДП_{i-1}^Ф - ДП_{i-1}^Р| < |ДП_i^Ф - ДП_i^Р| < |ДП_{i+1}^Ф - ДП_{i+1}^Р|, \quad (4)$$

то такое нарастающее рассогласование модели с объектом диагностирования должно рассматриваться как признак возникающей неисправности задолго до того, как ДП^Ф превысит уставку.

За эталонное значение диагностического параметра принимается его фактическое значение, полученное при хорошем техническом состоянии ГД, а за количественную характеристику изменения (ухудшения) технического состояния принято отклонение $\Delta ДП_i$ наблюдаемого фактического

значения ДП^Ф от эталонного ДП^{ЭТ}

$$\Delta ДП_i = ДП_i^ЭТ - ДП_i^Ф \quad (5)$$

Величина отклонения $\Delta ДП_i$ проверяется на значимость по отношению к погрешности ϵ и в процессе эксплуатации ГД производится накопление выборки $\Delta ДП_i$ достаточного объёма m . Аппроксимация данного временного ряда регрессионным полиномом позволяет получить модель тренда диагностического параметра.

Реализация алгоритма прогнозирования отказа предполагает выполнение следующих условий: процесс изменения технического состояния объекта происходит монотонно, модель тренда диагностического параметра должна допускать удовлетворительную по точности экстраполяцию, должно быть известно предельное значение диагностического параметра [ДП]. После вычисления по модели прогнозируемого значения

ДП^{ПР}_{i+1} и сравнения с предельным [ДП] производится оценка остаточного ресурса. Следует заметить, что чем больше значение ДП^{ПР}_{i+1} приближается к ограничительному [ДП], тем меньше плечо и погрешность экстраполяции. Схема алгоритма прогнозирования отказа при зависимости диагностического параметра от режима работы ГД представлена на рис. 5.

В этом случае оценка изменения технического состояния $\Delta ДП^{ТС}$ также определяется как разность фактического ДП^Ф и эталонного ДП^{ЭТ} значений диагностического параметра. Однако в связи с большим многообразием эксплуатационных режимов ГД величина $\Delta ДП^{ТС}$ при переходе от режима к режиму может отличаться, что приведёт к увеличению дисперсии временного ряда $\Delta ДП^{ТС} = f(t)$ и, как следствие, к увеличению погрешностей прогноза. Поэтому при определении $\Delta ДП^{ТС}$ необходимо использовать не фактические значения диагностического параметра ДП^Ф, а расчётное по текущей модели и приведённое к одному и тому же режиму. В качестве такого режима естественно выбрать прогнозируемый эксплуатационный режим работы ГД ДП^{ПР}, тогда в общем случае

$$\Delta ДП_i^{ТС} = ДП_i^{ПР} - ДП_i^ЭТ \quad (6)$$

Предложенный алгоритм прогнозирования отказа был реализован в СППР «Дизель эксперт». В результате оператор получает на экране монитора таблицы и графики сравнения фактических, эталонных и расчётных по текущим моделям диагностических параметров в процессе эксплуата-

ции, что обеспечивает информационную поддержку при принятии решений. На экран монитора выводятся графики изменения следующих параметров: максимальное давление топлива (p_f), среднее индикаторное давление (p_{mi}), максимальное давление сгорания (p_{max}), температура выпускных газов (t_g), угол подачи топлива (G).

По результатам испытаний СППР «Дизель эксперт» на танкере «Гамбов» с ГД 6S50MC в условиях эксплуатации по анализу трендов диагностических параметров были выявлены такие неисправно-

сти, как: перегрузка цилиндра, прогорание выпускного клапана, трещина всасывающего клапана топливного насоса высокого давления (ТНВД), а также сделан вывод о необходимости регулировки угла начала подачи топлива во втором цилиндре и замене форсунок в пятом цилиндре.

Ниже рассмотрен пример использования алгоритма прогнозирования отказа при анализе развития трещины всасывающего клапана ТНВД цилиндра № 6 ГД 6S50MC танкера «Гамбов» в условиях эксплуатации.

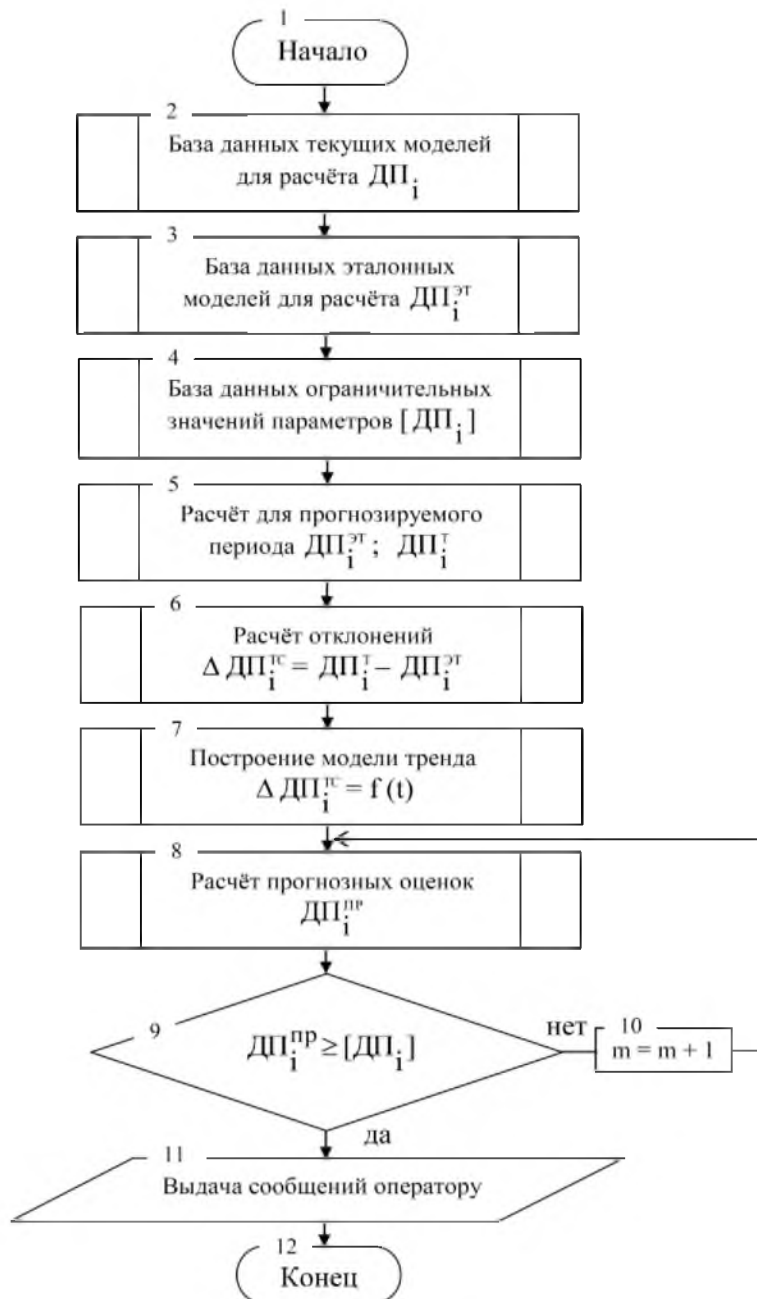


Рисунок 5 – Структурная схема алгоритма прогнозирования отказа (диагностический параметр зависит от режима)

При индицировании ГД при работе на топливе (плотность $\rho_{15} = 0,9882 \text{ г/см}^3$, вязкость 318 сСт при 50 °С) никаких признаков неисправностей топливной аппаратуры обнаружено не

было. Однако впоследствии в связи с производственной необходимостью ГД был переведён на использование маловязкой топливной смеси и при следующем индицировании (через 20 суток)

было выявлено снижение уровня максимального давления топлива (p_f) на всех цилиндрах, но более значительное снижение p_f было отмечено на цилиндре № 6. На рис. 6 показан вид экрана монитора при сравнении фактического и эталонного значений максимального давления впрыска топлива после ТНВД № 6 при выявлении неисправности топливной аппаратуры. При этом другие параметры рабочего процесса цилиндра № 6 находились в допустимых пределах.

В этом случае для количественной оценки изменения технического состояния топливной аппаратуры был использован диагностический критерий:

$$\Delta p_f = p_f^{э\tau} - p_f^ф, \quad (7)$$

где $p_f^{э\tau}$ – расчётное по эталонной модели давление топлива в топливопроводе высокого давления, $p_f^ф$ – фактическое (измеренное) давление топлива в топливопроводе высокого давления.

Эталонная модель топливоподачи определялась по результатам статистической обработки эксплуатационных данных

$$p_f^{э\tau} = 995,7293 \cdot \rho + 1,4307 \cdot \text{ИТН} + 7,4102 \cdot n - 1333,1226 \quad (8)$$

Наличие эталонной модели (8) для шестого цилиндра и контроль давления в топливопроводе позволили получить кривую тренда $\Delta p_f(\tau)$ (рис. 7).

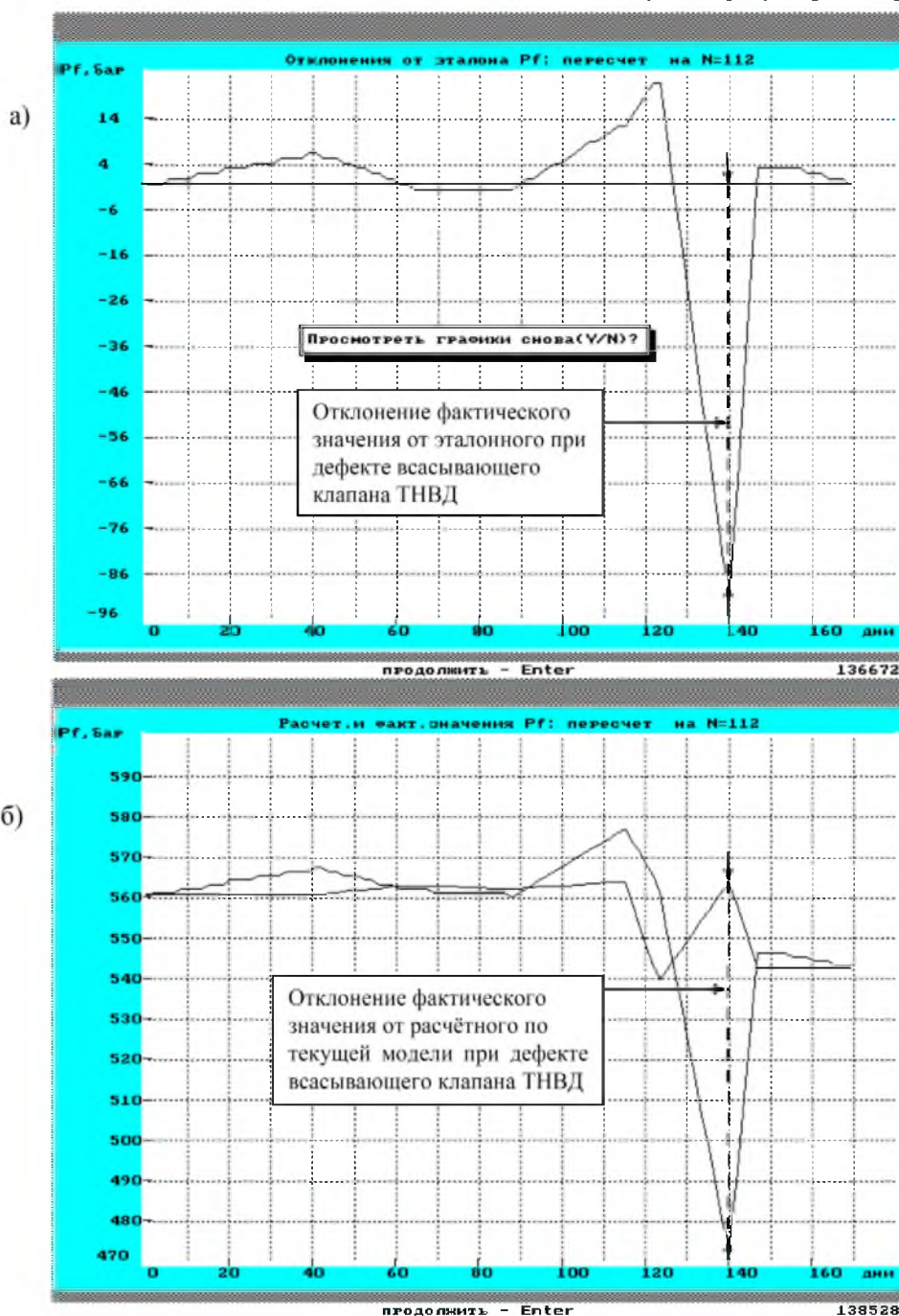


Рисунок 6 – Вид экрана монитора при сравнении фактического и эталонного значений максимального давления впрыска топлива после ТНВД № 6

Анализ характера изменения тренда показывает, что тренд нарастал из-за роста трещины всасывающего клапана ТНВД № 6, но лишь через 6 месяцев значение Δp_r достигло предельной величины. Это привело к резкому снижению параметров рабочего процесса (рис. 8 а). После разборки и осмотра ТНВД № 6 была обнаружена трещина всасывающего клапана. Характер изменения тренда

свидетельствует о постепенном развитии трещины и, как только она достигла критических размеров – снизились показатели рабочего процесса.

Из-за отсутствия запаса всасывающий клапан попытались восстановить путём заварки и механической обработки (рис. 8 б). Впоследствии всасывающий клапан был заменён.

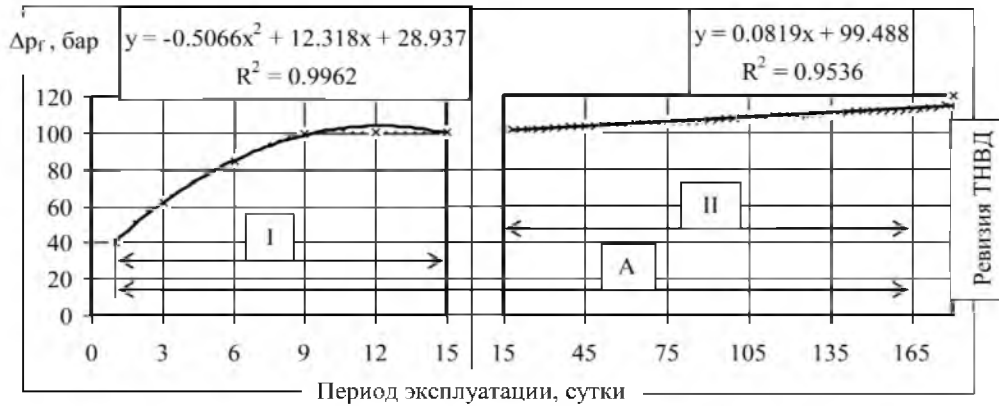


Рисунок 7 – Кривая тренда при развитии трещины всасывающего клапана ТНВД I, II – участки резкого и плавного нарастания Δp_r ; А – параметры рабочего процесса на допустимом уровне

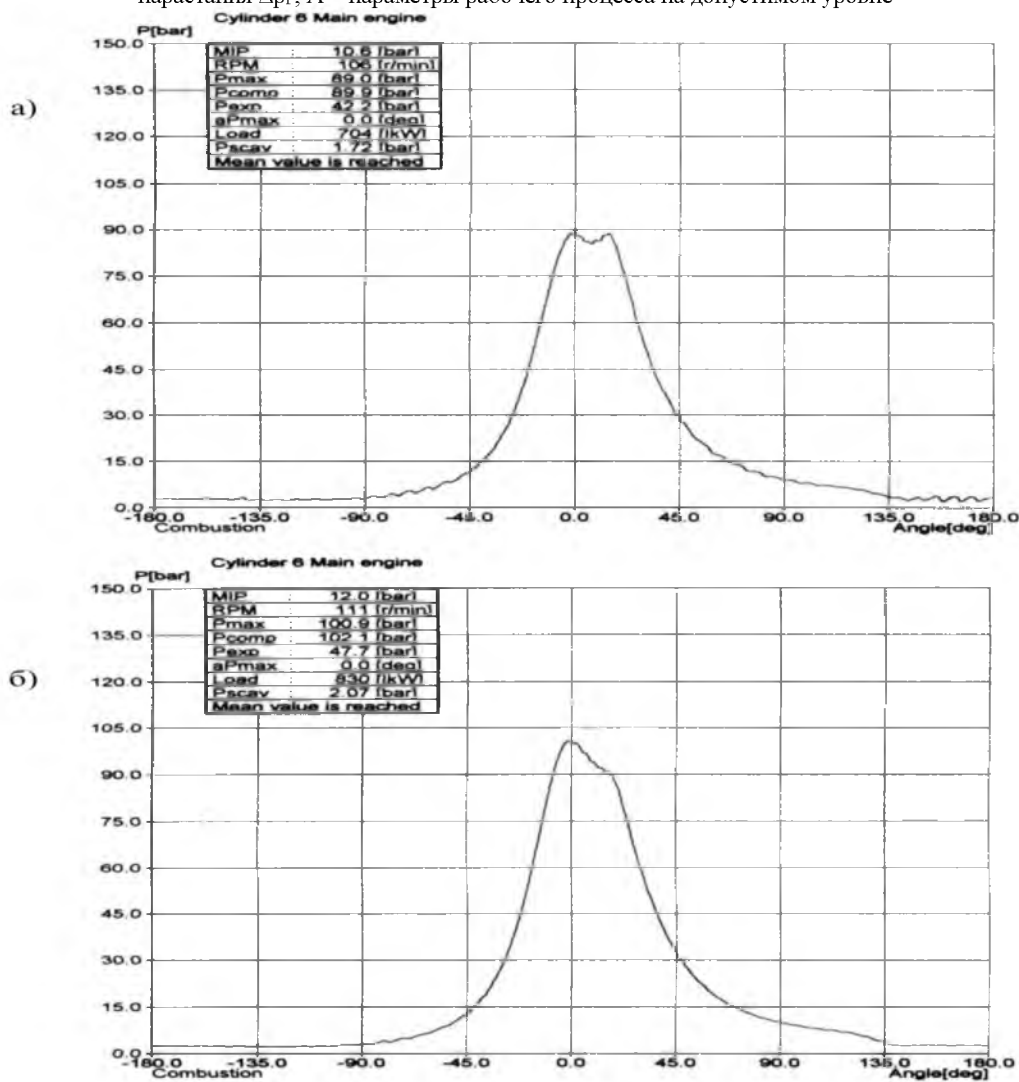


Рисунок 8 – Результаты индицирования: а) при выявлении трещины всасывающего клапана ТНВД № 6; б) после восстановления всасывающего клапана

Заключение. В соответствии с позицией Международной морской организации актуальной научной проблемой является разработка методов уменьшения влияния «человеческого элемента» по управлению СЭУ и судна с помощью технических средств поддержки принятия решений. Важным направлением повышения надёжности и эффективности технической эксплуатации главных судовых двигателей является разработка и внедрение интеллектуальных систем, которые позволяют использовать результаты мониторинга и автоматизировать процедуры решения эксплуатационных задач для информационной поддержки оператора в принятии решений. В статье представлена разработка СППР для главного двигателя 6S50MC танкера «Тамбов». Результаты эксплуатационных испытаний показали, что разработанные алгоритмы, эталонные и текущие модели, программное обеспечение позволяют в интерактивном режиме обеспечить оператора информационной поддержкой при решении следующих основных задач технической эксплуатации ГД крупнотоннажных судов:

- оценка текущего технического состояния и идентификация неисправностей по контролируемым параметрам;

- выбор режима работы ГД с учётом его технического состояния и условий плавания;

- предотвращение и прогнозирование отказов;

Оператор как управляющее звено оценивает полученный результат и принимает окончательное решение.

Литература

1. Астреин В.В., Кондратьев С.И., Хекерт Е.В. Алгоритм самоорганизации групп судов для предупреждения столкновений // Эксплуатация морского транспорта. – 2016. – №2. – С. 45-50.
2. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Принципы построения системы информационной поддержки для принятия решений в аварийных ситуациях // Морские интеллектуальные технологии. – 2009. – №1(3). – С. 48-56.
3. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем (часть 1) // Эксплуатация морского транспорта. – 2017. – № 2 (83). – С. 114-122.
4. Полковникова Н.А., Полковников А.К. Гибридная экспертная система на основе вероятностно-детерминированных моделей для главного судового двигателя // Эксплуатация морского транспорта. – 2016, № 2(79). – С. 78-87.
5. Полковникова Н.А., Полковников А.К. Модели и

- алгоритмы системы поддержки принятия решений для главного судового двигателя // Эксплуатация морского транспорта. – 2018. – №3 (88). – С. 86-102.
- 6. Каретников В.В., Пащенко И.В., Соколов А.И. Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации. // Вестник Гос. университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 3. – С. 619-627.
- 7. Малиновский М.А., Фока А.А., Ролинский В.И., Вахрамеев Ю.З. Обеспечение надёжности судовых дизелей. – Одесса. ФЕНКС, 2003. – 150 с.
- 8. Суворов П.С. Управление режимами работы главных судовых дизелей. – Одесса: ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.
- 9. Захаров Г.В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. – М.: ТрансЛит, 2009. – 256 с.
- 10. Живлюк Г. Е., Петров А.П. Эксплуатационные особенности систем топливоподачи Common Rail судовых двигателей // Вестник Гос. университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2018. – Т. 10. – № 1. – С. 201-220.
- 11. Соловьёв А. В. Принципы формирования компьютерной модели диагностирования технического состояния судовой энергетической установки // Вестник Гос. университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2018. – №1(47). – С. 238-251.
- 12. Бигус Г.А. Диагностика технических устройств / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, И.А. Быстрова, Д.И. Галкин. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 615 с.
- 13. Равин А.А., Хруцкий О.В. Прогнозирование технического состояния оборудования: монография – Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. – 141 с.
- 14. Медведев В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надёжности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013. – 352 с.
- 15. Голоскоков К.П., Чиркова М.Ю. Разработка модели выбора технических средств судовых информационных систем // Вестник Гос. университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 3. – С. 645-654.
- 16. Гаврилов В.В., Мащенко В.Ю. Принципы построения иерархического комплекса систем диагностирования судового дизеля // Вестник Гос. университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 3 (37). – С. 155-166.

REFERENCES

1. Astrein V.V., Kondrat'ev S.I., Khekert E.V. Algorithm samoorganizatsii grupp sudov dlya preduprezhdeniya stolknoveniy. Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2016. – №2. – S. 45-50.

2. Skorokhodov D.A., Starichenkov A.L. Printsipy postroeniya sistemy informatsionnoy podderzhki dlya prinyatiya resheniy v avariynyykh situatsiyakh. Morskoe intellektual'nye tekhnologii, 2009, №1(3). – S. 48-56.
3. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Khekert E.V. Osnovnye printsipy modelirovaniya i informatsionnoy podderzhki protsessov upravleniya ekspluatatsiey sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (chast' 1). Ekspluatatsiya morskogo transporta. Gos. morskoy universitet im. admirala F.F. Ushakova, Novorossiysk. – 2017. – № 2 (83). – S. 114-122.
4. Polkovnikova N.A., Polkovnikov A.K. Gibridnaya ekspertnaya sistema na osnove veroyatnostno-determinirovannykh modeley dlya glavnogo sudovogo dvigatelya // Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2016, № 2(79). – S. 78-87.
5. Polkovnikova N.A., Polkovnikov A.K. Modeli i algoritmy sistemy podderzhki prinyatiya resheniy dlya glavnogo sudovogo dvigatelya. Ekspluatatsiya morskogo transporta. – 2018. – №3 (88). – S. 86-102.
6. Karetnikov V.V., Pashchenko I.V., Sokolov A.I. Perspektivy vnedreniya bezekipazhnogo sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh Rossiyskoy Federatsii. Vestnik Gos. universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, SPb. – 2017. T. 9. – № 3. – S. 619-627.
7. Malinovskiy M.A., Foka A.A., Rolinskiy V.I., Vakhrameev Yu.Z. Obespechenie nadezhnosti sudovykh dizeley. – Odessa. FENIKS, 2003. – 150 s.
8. Suvorov P.S. Upravlenie rezhimami raboty glavnykh sudovykh dizeley. – Odessa: LATSTAR, 2000. – 238 s.
9. Zakharov G.V. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudovykh dizel'nykh ustanovok. M.: TransLit, 2009. – 256 s.
10. Zhivlyuk G. E., Petrov A.P. Ekspluatatsionnye osobennosti sistem toplivopodachi Common Rail sudovykh dvigateley. Vestnik Gos. universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, SPb. – 2018. – T. 10. – № 1. – S. 201-220.
11. Solov'ev A. V. Printsipy formirovaniya komp'yuternoy modeli diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya sudovoy energeticheskoy ustanovki. Vestnik Gos. universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, SPb. – 2018. – №1(47). – S. 238-251.
12. Bigus G.A. Diagnostika tekhnicheskikh ustroystv / G.A. Bigus, Yu.F. Daniev, I.A. Bystrova, D.I. Galkin – M.: izd. MGTU im. N.E. Baumana, 2014. – 615 s.
13. Ravin A.A., Khrutskiy O.V. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya: monografiya – Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. – 141 s.
14. Medvedev V.V. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya dlya obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok: monografiya. – SPb.: Strata, 2013. – 352 s.
15. Goloskokov K.P., Chirkova M.Yu. Razrabotka modeli vybora tekhnicheskikh sredstv sudovykh informatsionnykh system. Vestnik Gos. universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, SPb. – 2017. T. 9. – № 3. – S. 645-654.
16. Gavrilov V.V., Mashchenko V.Yu. Printsipy postroeniya ierarkhicheskogo kompleksa sistem diagnostirovaniya sudovogo dizelya. Vestnik Gos. universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, SPb. – 2016. – № 3 (37). – S. 155-166.

УДК 53.091; 629.5

DOI: 10.34046/aumsuomt92/27

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ВАЛОПРОВОДОВ МОРСКИХ СУДОВ МОБИЛЬНЫМИ СТАНКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ШАГОВОГО ПРИВОДА

Е.Н. Сюсюка, кандидат технических наук

В статье предлагается обоснование использования малогабаритных мобильных станков и способа вращения валов при обработке, а так же использование в качестве привода подачи электрогидравлический шаговый привод.

Ключевые слова: гребной вал, валопровод, дефекты, токарная обработка, мобильный станок, базирование станка.

The article proposes a justification for the use of small-sized mobile machines and the method of shaft rotation during processing, and the use of an electrohydraulic stepper drive as a feed drive.

Key words: propeller shaft, shaft, defects, turning, mobile machine, machine basing.

Как известно, в процессе эксплуатации в валопроводах морских и речных судов возникают усталостные трещины, язвенная коррозия и другие дефекты, отрицательно влияющие на надеж-

ность и срок эксплуатации этих важных и динамически нагружаемых деталей судов. [2] Для своевременного обнаружения зарождающихся трещин производят магнитную, ультразвуковую и другие виды дефектоскопии. Затем в случае