

Первая (основная) гармоника обычно определяется с частотой вращения приводного двигателя. В предлагаемой работе первая гармоника связана с полным оборотом цепного контура. В результате спектрального анализа кинематической погрешности цепной передачи, с учетом коэффициента пересчёта 1,5 на фактические значения колебаний цепи.

Первая гармоника с периодом 128 зацеплений и амплитудой 50 мкм характеризует неравномерный износ всей цепи по длине. Неравномерность износа незначительна, так как фактическая амплитуда меньше величины $50/1,5=33$ мкм.

Вторая гармоника с периодом 64 зацепления и амплитудой 76 мкм характеризует неравномерный износ ведущего участка цепи по длине. Неравномерность износа незначительна, так как фактическая амплитуда меньше величины $76/1,5=51$ мкм.

Третья гармоника с периодом 43 зацепления и амплитудой 310 мкм определяет суммарный эксцентриситет ведущей и ведомой звездочек. Фактический эксцентриситет ($310/1,5 = 207$ мкм) не превышает допустимого значения для новой звездочки.

Четвертая гармоника с периодом 32 зацепления и амплитудой 51 мкм обусловлена эксцентриситетом направляющей звездочки. Фактическая амплитуда величиной $51/1,5 = 34$ мкм свидетельствует о практически отсутствующем биении.

Пятая гармоника с периодом 26 зацеплений и амплитудой 55 мкм описывает эксцентриситет направляющей звездочки. Фактическая амплитуда величиной $55/1,5 = 37$ мкм свидетельствует о практически отсутствующем биении.

128-я гармоника с периодом 1 зацепление и амплитудой 258 мкм определяет неплавное зацепление звена с зубом звездочки из-за её граненности. Асинфазность движения ведущего и ведомого шарниров, определяемая величиной $258/1,5 = 172$ мкм, ведущего участка цепи не превышает нормальных значений.

Незначительные амплитуды гармоник №5 ... №127 не имеют физического смысла и определяются погрешностью БПФ из-за замены длительного наблюдения ограниченным во времени фрагментом.

Влияние кинематической погрешности на фазы газораспределения незначительное. Размах колебаний пружины натяжного устройства не превышает 0,7 мм. При радиусе звездочки распределительного вала 800 мм изменение фазового угла не превысит 0,000875 рад или 0,05°.

Литература

1. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник.—М.: Наука. Гл. ред. физ.мат. лит., 1989.—240 с.
2. Корнейчук Ю. А. Износ деталей дизелей 6ДКРН 45/120-7. Морской инженерный сервис, 1991, №2. с. 42-48.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА В РАБОТАЮЩЕМ МОТОРНОМ МАСЛЕ

Надежкин А.В., Безвербный А.В.

(Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского)

Контроль и диагностика судовых дизелей по параметрам продуктов износа в работающем масле является одним из наиболее эффективных методов. Информация о концентрации частиц износа в масле и их распределении по размерам позво-

ляет решать задачи распознавания технического состояния объектов диагностирования (ОД). Обширные научные исследования, проведенные во многих странах мира, показали высокую достоверность определения предполагаемых дефектов по анализу работающих масел двигателей.

Трибодиагностика приобретает все более важное значение, когда осуществляется переход на эксплуатацию судовых дизелей по их техническому состоянию. Проба масла, взятая из работающего двигателя, несет в себе комплексную информацию о работоспособности моторного масла и состоянию его трибосопряжений. Полученная из пробы масла информация о содержании в ней продуктов износа требует принятия адекватного решения о техническом состоянии ОД. Эту информацию несут генерируемые дизелем частицы продуктов износа. Однако при попадании в систему смазки двигателя происходит изменение их информационного потенциала вследствие воздействия средств очистки, расхода масла на угар и других факторов. В результате количество информации о состоянии двигателя изменяется. Причем величина информационных потерь напрямую связана как с физическими характеристиками продуктов износа, их морфологией, так и конструктивными особенностями средств очистки. Поэтому точность постановки диагноза зависит от полноты учета основных искажающих воздействий.

Адекватным подходом для описания сложных кинетических процессов накопления продуктов износа в работающем масле дизельного двигателя является моделирование с использованием кинетических уравнений типа Фоккера-Планка для функций распределения различных типов частиц, в которых учитывается действие детерминированных факторов (дрейфовый вклад) и случайных воздействий (диффузионный вклад) [1].

Рассмотрим основные факторы, определяющие кинетику дисперсного обмена частиц продуктов износа в смазочной системе дизеля. На рис.1 представлена функциональная схема “судовой дизельный двигатель – работающее моторное масло – средства очистки”. Стрелками показано движение масла в системе. Центральным моментом при разработке данной динамической диагностической модели является оценка морфологии генерируемых дизелем частиц продуктов износа, а именно количество частиц продуктов износа, поступающих в систему смазки дизеля в единицу времени $N_{дв}^j$, размер λ и размерное распределение $f_{дв}^j(\lambda, t)$ частиц продуктов износа.

Анализируемая функциональная схема включает в себя два основных типа маслоочистителей: полнопоточные (2) и частичнопоточные (3) агрегаты очистки работающего масла судовых дизелей. Конструктивное исполнение и количество тех и других в настоящей модели не ограничивается.

При анализе динамики поступления в моторное масло продуктов износа дизеля будем описывать их величинами $N^j(t)$, соответствующими общему числу частиц износа j -го вида в момент времени t в объеме масла.

Детальное описание кинетики накопления частиц продуктов износа, имеющее принципиальное значение для диагностики состояния двигателя, предполагает также учет изменения не только общего числа частиц данного диагностического j -го компонента, но и изменения среднего размера $\bar{\lambda}$ этих частиц и среднеквадратичного отклонения (дисперсии) σ . Массообмен в смазочной системе двигателя предполагает учет следующих факторов: работа очистителей (2, 3), непрерывное поступление в картер двигателя частиц продуктов износа из трибосопряжений 4; расход масла на угар, а вместе с тем и вынос частиц в выхлопной коллектор 5 продуктов износа; долив свежего масла в систему смазки.

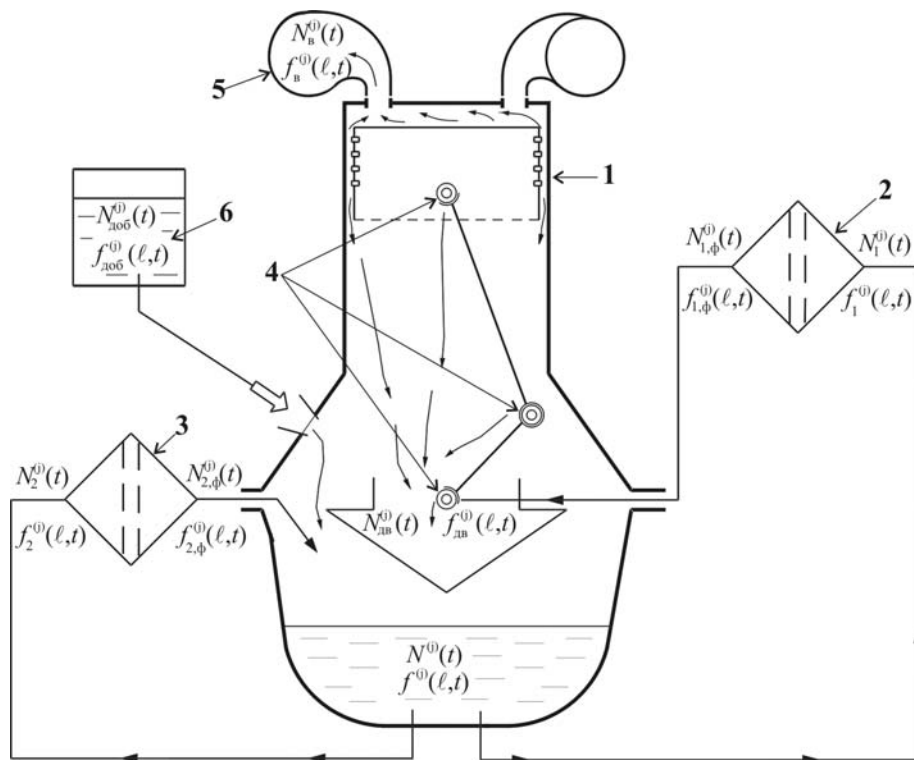


Рис. 1. Функциональная схема работы смазочной системы: 1 – двигатель; 2 – полнопоточный фильтр; 3 – центробежный очиститель; 4 – трибосопряжения; 5 – выхлопной коллектор; 6 – цистерна запаса свежего масла.

Множественность факторов, влияющих на дисперсный и химический состав образующихся частиц износа, приводит к правомерности допущения о стохастичности процесса массообмена продуктов износа в смазочной системе двигателя.

Пусть величина $\Delta N^j(\lambda, t_i) = N^j(t_i) \cdot f^j(\lambda, t_i) \Delta \lambda$ описывает число частиц j -го вида с характерными линейными размерами λ в интервале $|\lambda - \lambda'| \leq \Delta \lambda$ в момент времени t_i . Здесь $f^j(\lambda, t)$ – функция распределения частиц j -го вида с размером λ , имеющая смысл плотности вероятности, подчиняющаяся требованию нормировки $\int_0^\infty f^j(\lambda, t) d\lambda = 1$ и характеризующая, в частности, средний линейный размер

$\bar{\lambda}^j(t) = \int_0^\infty \lambda \cdot f^j(\lambda, t) d\lambda$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma^j(t) = \sqrt{\int_0^\infty (\lambda - \bar{\lambda})^2 \cdot f^j(\lambda, t) d\lambda}$ (второй центральный момент функции распределения) частиц данного типа в момент времени t .

В работе [1] при учете нормировки на функции распределения и в пренебрежении пространственными градиентами концентраций загрязнения в системе маслоподготовки получена самосогласованная система кинетических уравнений на $N^j(t)$, описывающих динамику общего числа продуктов износа j -го типа:

$$\frac{\partial N^j(t)}{\partial t} = - \left(N_y^j(t) + \sum_k N_k^j(t) \right) + N_{дв}^j(t) + N_{дол}^j(t) + \sum_{k, \phi} N_{k, \phi}^j(t), \quad (1)$$

и систему кинетических уравнений на функции распределения

$$N^j(t) \cdot \frac{\partial f^j(\lambda, t)}{\partial t} = N_{дв}^j(t) \cdot (f_{дв}^j(\lambda, t) - f^j(\lambda, t)) + N_{дол}^j(t) \cdot (f_{дол}^j(\lambda, t) - f^j(\lambda, t)) + \sum_{k, \phi} N_{k, \phi}^j(t) \cdot (f_{k, \phi}^j(\lambda, t) - f^j(\lambda, t)) \quad (2)$$

где N_y^j – числа частиц продуктов износа, удаленные за единицу времени из системы смазки с угаром, $N_k^j = n^j \cdot Q_k$ – скорости поступления частиц j -го типа в k -й фильтр, $n^j = N^j/V$ – концентрация частиц в системе, Q_k – пропускная способность

k-го агрегата очистки ($\text{м}^3/\text{ч}$). Слагаемые в правой части (2) описывают процессы поступления в систему смазки частиц продуктов износа из трибосопряжений двигателя, из маслоочистителей, за счет долива масла. Здесь аналогично $N_{k,\phi}^j = n^j \cdot Q_{k,\phi}$ – скорости поступления частиц j-го типа из k-го фильтра. Отметим, что в слагаемых, описывающих приход частиц в продуктов износа в масляную систему, учтен качественно иной характер функций распределения, отличных от $f^j(\lambda)$.

Принципиальную роль при таком подходе играют дополнительные кинетические уравнения на функции распределений частиц продуктов износа, поступающих из двигателя ($f_{\text{дв}}^j(\lambda)$), из средств очистки ($f_{k,\phi}^j(\lambda)$) и за счет долива масла ($f_{\text{дол}}^j(\lambda)$), необходимые для замыкания системы уравнений (1)-(2). Конкретные модели кинетических уравнений на $f_{\text{дв}}^j(\lambda)$, описывающие состояние дисперсной фазы продуктов износа, поступающих из трущихся сопряжений дизеля в картер, представлены в работе [2].

Кинетические уравнения (1)-(2) представляют главный интерес для диагностики работы двигателя, поскольку они описывают, в частности, изменение со временем среднего размера $\bar{\lambda}^j(t)$ и дисперсии $\sigma^j(t)$ частиц продуктов износа, что позволяет в последующем оценить по состоянию дисперсной фазы продуктов износа состояние самого двигателя. Нами проведен анализ этих уравнений, имеющих нелинейный характер относительно функций распределения, и разработан алгоритм численного моделирования временной динамики частиц продуктов износа. В частности, получены стационарные решения общего числа и функции распределения для частиц продуктов износа j-го типа:

$$N_{\text{ст}}^j = N_{\text{ст}}^j (1 - K) / (v_{\text{в}} / V) \quad (3)$$

$$f_{\text{ст}}^j(\lambda) = \frac{(v_{\text{в}} / V) \cdot f_{\text{дв}}^j(\lambda)}{(1 - K) \cdot \left(v_{\text{в}} / V + \sum_k \left(Q_k \phi_k^j(\lambda) \right) / (V \cdot \rho_{\text{м}}) \right)} \quad (4)$$

Здесь коэффициент K рассчитывается по формуле

$$K = \sum_k \frac{Q_k}{V \cdot \rho_{\text{м}}} \cdot \int_0^{\infty} d\lambda \frac{\phi_k^j \cdot f_{\text{дв}}^j(\lambda)}{v_{\text{в}} / V + \sum_m \left(Q_m \phi_m^j(\lambda) \right) / (V \cdot \rho_{\text{м}})},$$

где $\rho_{\text{м}}$ – плотность масла, $v_{\text{в}}$ – объем выгорающего за единицу времени масла, $\phi_k^j(\lambda)$ – характерная для k-го фильтра заданная функция отсева отдельной частицы j-го типа с линейным размером λ (фракционная функция отсева).

Из определения K видно, что этот коэффициент может принимать значения лишь в интервале от 0 до 1, а по своему смыслу он определяет общую долю удаляемых всеми фильтрами частиц загрязнения в сравнении с долей частиц, удаляемых из системы смазки за счет угара масла. Как правило, в типичных двигателях его величина составляет $K \approx 0,9 - 0,99$. Соответственно, стационарное размерное распределение (4) демонстрирует существенно нелинейный характер влияния средств очистки на итоговый дисперсный состав продуктов износа.

При анализе временной динамики выхода числа частиц и распределения дисперсной фазы на стационарный режим может быть получено только численное решение, поскольку (1)-(2) является системой интегро-дифференциальных нелинейных уравнений. С помощью развитого нами метода, основанного на дискретизации функций от λ на решетке $\{\lambda_n\}$, $n = 1, \dots, N$ (где общее число точек составляло $N \sim 500$), анализ этой системы можно свести к анализу системы $(N+2)$ обыкновенных дифференциальных уравнений.

На рис. 2 представлена динамика числа частиц и функции распределения для нормального режима работы некоторого условного двигателя, для которого приняты следующие параметры: $N_{\text{дв}}^j = 2,17 \cdot 10^9$ частиц/час, функция распределения $f_{\text{дв}}^j$ задается распределением Вейбулла-Гнеденко со средним размером частиц загрязнения $\bar{\lambda}^j = 2$ мкм и дисперсией $\sigma^j = 1,1$ мкм. На рис. 3 рассмотрен аварийный режим работы двигателя: $N_{\text{дв}}^j = 3,7 \cdot 10^9$ частиц/час, $\bar{\lambda}^j = 20$ мкм, $\sigma^j = 5$ мкм. В модели рассмотрен вариант залповых добавлений масла в систему в объеме $0,1 V_0$ в моменты времени, когда общий уровень масла падает за счет непрерывного угара масла до критического значения $V_{\text{крит}} = 0,9 V_0$.

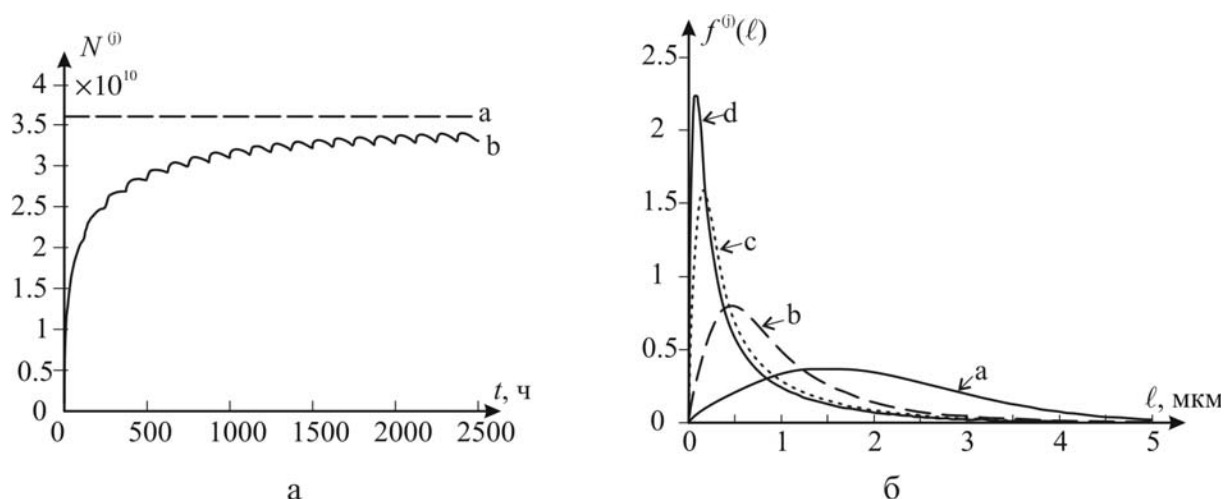


Рис. 2. а: временная динамика общего числа частиц загрязнения j -го типа при нормальном режиме работы (а – стационарное значение, б – зависимость $N^j(t)$); б) функция распределения частиц $f^j(\lambda, t)$ в различные моменты времени (а – $t = 0$ ч; б – при $t = 50$ ч; с – при $t = 500$ ч; d – при $t = 5000$ ч)

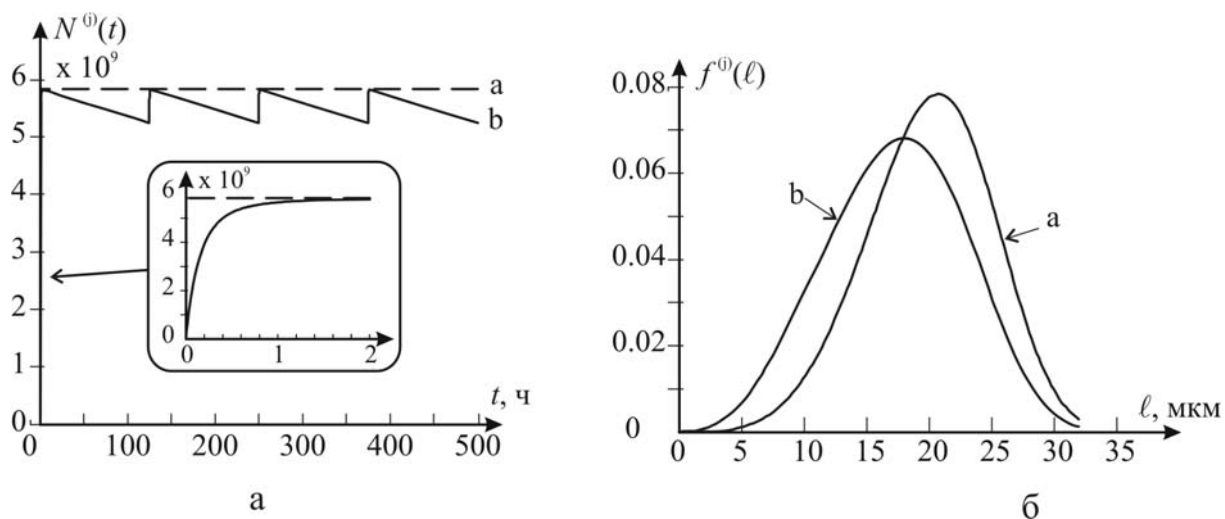


Рис. 3. а: временная динамика $N^j(t)$ при аварийном режиме работы (а – стационарное значение), во вкладыше показана динамика $N^j(t)$ за малые времена; б: $f^j(\lambda, t)$ при $t = 0$ ч (а) и при $t = 5$ ч (б)

Отметим, что в настоящее время при анализе проб работающего масла дизелей в основном ограничиваются измерением массовых концентраций продуктов износа с использованием методов эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. Определение дисперсного состава частиц продуктов износа, например методом феррографии, в практике технической эксплуатации дизельных двигателей пока не получило широкого распространения, т.к. является сложной и дорогостоя-

щей процедурой. Разработанные математические модели позволяют трансформировать общее число частиц продуктов износа j -го типа $N^j(t)$ в массовую концентрацию C^j j -ого химического элемента в работающем моторном масле. При этом, как показано в работах [3, 4], для расчета этих величин необходимо учитывать фрактальный характер размерной параметризации для частиц изнашивания. Фрактальная формализация распространяется на форму частиц износа и их размерное распределение. В общем случае для всей совокупности частиц износа выражение имеет вид [3, 4]:

$$n_i \approx dN/d\lambda \approx D_p / \lambda^{D_p+1}$$

где N – общее число частиц износа; D_p – фрактальная размерность диаметрального распределения частиц износа; λ – приведенный диаметр частицы износа.

Численные решения самосогласованная система кинетических уравнений (1) на $N^j(t)$, описывающих динамику общего числа продуктов износа j -го типа позволяют получить научно-обоснованные нормы порогового значения массовой концентрации продуктов износа дизельных двигателей, с учетом особенностей их систем очистки, конструкции, уровня форсировки. Тем самым достигается высокая устойчивость достоверности диагностирования технического состояния дизельных двигателей от возмущающих эксплуатационных факторов.

Литература:

1. Надежкин А.В., Безвербный А.В. Имитационная диагностическая модель кинетики накопления в системе смазки судового дизеля частиц продуктов износа // Транспортное дело, 2006.– №7.– С.100-105
2. Кича Г.П., А.В. Надежкин, Б.Н. Перминов. Имитационное моделирование смазки трибосопряжений и изнашивания основных деталей ДВС // Транспортное дело, 2004. – № 2. – С. 51–53.
3. Дроздов Ю.Н. Нелинейная динамика изнашивания и частицы износа // Вестник машиностроения, 2003.– №10.– С. 34-40
4. Ким В.А., Кургачев Р.В. Фрактальная параметризация процесса изнашивания // Трение и износ, 2002.– Т.23, №5.– С. 471-476.

МЕТОДОЛОГИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ (СТРО) ПРИ АЛГОРИТМИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЕЙ

А.А.Обозов, (ЗАО УК «Брянский машиностроительный завод», БГТУ)

Ранее уже вводился ряд понятий СТРО в прикладном аспекте задач технической диагностики [1,2], однако автор считает целесообразным кратко напомнить о некоторых ключевых понятиях СТРО, которые лежат в основе этой теории [3, 4] и могут быть успешно использованы при решении задач технической диагностики дизелей:

- Классы технического состояния *в векторном пространстве структурных параметров* объекта диагностирования (при геометрической интерпретации) занимают определенные компактные области.
- Классы технического состояния определенные в векторном пространстве структурных параметров отображаются на *векторное пространство диагностических параметров*, в котором также занимают определенные компактные области.