

## ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ИЗНАШИВАНИЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ УЗЛОВ СУДОВЫХ ДВС

И.В. Ильина, Е.Н. Климов, д.т.н., проф., А.С. Кобелева;  
Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций

При создании и эксплуатации судовых ДВС представляет интерес исследование процессов расходования ресурса основных узлов при различных режимах работы. Результаты выполненных исследований позволяют с системных позиций подойти к их обобщению.

Процесс изнашивания деталей как функция наработки в общем виде представлен в виде структурной схемы, обычно используемой при анализе динамических систем. Все многообразие узлов трения с учетом обратных связей в схеме представлено тремя характерными группами.

На основе характерных физических закономерностей получены обобщенные математические модели динамики изнашивания, позволяющие получить статические и динамические характеристики изнашивания узлов трения.

Ориентация на изучение процессов при поиске путей повышения качества выпускаемой продукции является одной из наиболее существенных новых рекомендаций, внесенных в содержание международного стандарта ИСО 9000–2001 [1]. Процессный подход включен в число восьми основных принципов менеджмента качества.

При создании и эксплуатации судовых ДВС представляют интерес процессы расходования ресурса основных узлов, а также расходования топлива и смазочного масла при различных режимах работы.

Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований процессов изнашивания основных узлов различных судовых ДВС позволяют с системных позиций подойти к их обобщению. Процесс изнашивания как функция наработки  $S(\tau)$  в общем виде представлен в виде структурной схемы (рис. 1), обычно используемой при анализе динамических систем.

На схеме показаны две естественные обратные связи, отражающие влияние износа на дальнейший ход процесса изнашивания. Параметрическая обратная связь через изменение степени прилегания (ИСП) возникает вследствие макро- и микроприработки сопрягаемых поверхностей и увеличения площади их прилегания. Силовая

обратная связь через изменение дополнительной нормальной силы (ИДС) в узле трения определяется возможным изменением ее значения нормальной силы в узле трения по мере увеличения износа.

Анализ характера влияния износа на дополнительную нормальную силу в различных узлах трения судовых ДВС показал, что все многообразие узлов можно разделить на три характерные группы. К первой группе относятся узлы, в которых с увеличением износа происходит увеличение дополнительной нормальной силы, соответственно возрастают давление на поверхности трения, интенсивность и скорость изнашивания. Здесь имеет место положительная обратная связь. Примером узлов этой группы являются динамично нагруженные подшипники скольжения, у которых в процессе работы происходит перекладка зазора, сопровождающаяся соударением деталей и дополнительным износом.

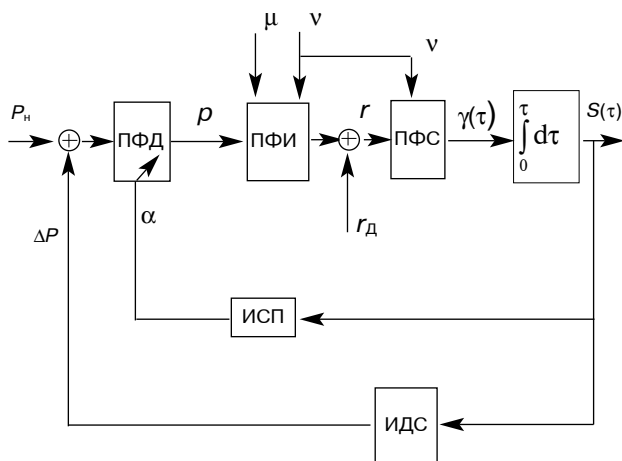


Рис. 1. Структурная схема процесса изнашивания узлов трения скольжения судовых ДВС:

ПФС, ПФИ, ПФД — процессы формирования соответственно скорости изнашивания  $\gamma$ , интенсивности изнашивания  $r$  и давления на поверхности трения  $p$ ; ИСП, ИДС — процессы изменения соответственно степени прилегания  $\alpha$  трущихся поверхностей и дополнительной нормальной силы  $\Delta P$  в узле трения;  $P_n$  — начальное значение нормальной силы, приложенной к узлу трения;  $r_d$  — дополнительная интенсивность изнашивания, связанная с возможным повышением концентрации абразивных частиц в смазочном масле;  $\mu$  — динамическая вязкость смазки на поверхности трения;  $\nu$  — скорость относительного перемещения трущихся поверхностей

К узлам второй группы относятся те, в которых влияние силовой обратной связи незначительно; ими можно пренебречь. Такие узлы можно назвать узлами трения с нулевой обратной связью. Примерами таких узлов являются спокойно нагруженные подшипники скольжения и другие сопряжения.

В узлах третьей группы по мере увеличения износа нормальная сила уменьшается, т. е. наблюдается отрицательная силовая обратная связь. Уменьшение нормальной силы может происходить по различным причинам, одна из них — уменьшение упругости изнашиваемых элементов. Примером узла третьей группы может служить сопряжение типа втулка цилиндра—поршневое кольцо.

На основе характерных физических закономерностей для указанных групп узлов трения скольжения судовых ДВС в работе [2] получены обобщенные математические модели динамики изнашивания. Для узлов первой группы такая модель имеет вид

$$\bar{\gamma}_1 = R_1 e^{\bar{\tau}_1}, \quad (1)$$

где  $\bar{\gamma}_1 = \gamma_1/\gamma_{1Б}$ ;  $\bar{\tau}_1 = \tau_1/T_1$ ;  $R_1 = R_{1Т}R_{1Н}R_{1С}$ ;  $\gamma_{1Б}$  — скорость изнашивания в базовом (номинальном) режиме работы;  $\tau_1$  — наработка узла;  $T_1$  — постоянная времени изнашивания;  $R_{1Т}$ ,  $R_{1Н}$ ,  $R_{1С}$  — комплексные параметры, учитывающие влияние на скорость изнашивания теплового, нагрузочного и скоростного режимов работы узла.

Для узлов второй группы

$$\bar{\gamma}_2 = R_2, \quad (2)$$

где  $R_2 = R_{2Т}R_{2Н}R_{2С}$ .

Для узлов третьей группы

$$\bar{\gamma}_3 = R_3 e^{-\bar{\tau}_3}, \quad (3)$$

где  $R_3 = R_{3Т}R_{3Н}R_{3С}$ ;  $\bar{\tau}_3 = \tau_3/T_3$ .

Приведенные зависимости позволяют:

➤ выполнить анализ динамики и прогнозирование изменения технического состояния интересующих узлов трения при заданных режимах работы;

➤ провести анализ влияния на характеристики изнашивания сочетаний режимных параметров в статической постановке;

➤ построить так называемые универсальные характеристики изнашивания.

Например, характер изменения скорости изнашивания узлов первой группы при постоянном тепловом режиме и работе двигателя по винтовой характеристике (используется подстрочный индекс 1В) на спокойной глубокой воде описывается зависимостью

$$\bar{\gamma}_{1В} = R_{1В} e^{\bar{\tau}_1 (\bar{n}_1)^3}, \quad (4)$$

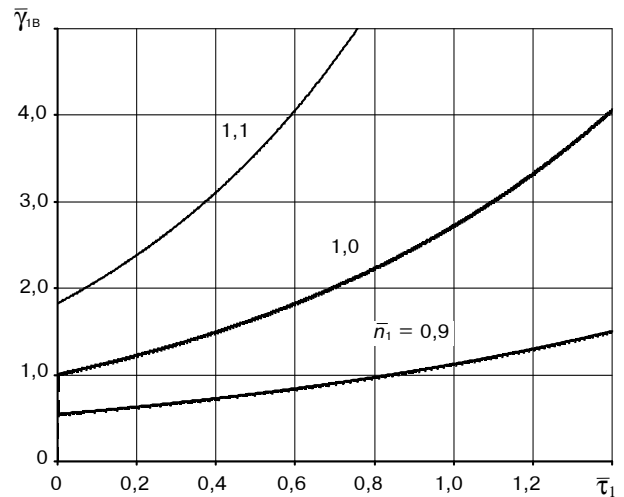


Рис. 2. Характер изменения скорости изнашивания узлов первой группы при работе двигателя по винтовой характеристике

где  $R_{1В} = Q_1 \bar{n}_1 + Q_2 (\bar{n}_1)^2 + Q_3 (\bar{n}_1)^3$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  — комплексные коэффициенты,  $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1$ ;  $\bar{n}_1$  — относительная частота вращения вала.

Соответствующие характеристики приведены на рис. 2 при  $Q_1 = 8,7$ ;  $Q_2 = -20,7$ ;  $Q_3 = 13,0$ .

Коэффициенты уравнения (4) зависят от большого числа параметров, достоверная расчетная оценка которых для конкретного двигателя невозможна. В связи с этим определение коэффициентов здесь и в дальнейшем рекомендуется выполнять методами идентификации на основе экспериментальных данных, полученных в условиях эксплуатации.

Универсальные характеристики изнашивания в общем случае могут быть получены в виде зависимости при  $\bar{\tau} = 0$  относительного момента сопротивления на валу двигателя  $\bar{M}_C$  от параметров теплового  $\bar{\mu}$  и скоростного  $n$  режимов, а также скорости изнашивания  $\bar{\gamma}$ .

Главные двигатели судов смешанного река-море плавания работают при различных сочетаниях частоты вращения вала и момента сопротивления за счет переменных условий работы гребных винтов на мелководных участках.

Для этого случая при постоянном тепловом режиме ( $\bar{\mu} = 1$ ) получена зависимость вида

$$\bar{\gamma}_1 = n [G_1 + G_2 \bar{M}_C + G_3 \bar{n} + G_4 (\bar{n})^2], \quad (5)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$  — комплексные коэффициенты;  $G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = 1$ .

После преобразования выражения (5) получаем:

$$\bar{M}_C = [\bar{\gamma} (\bar{n})^{-1} - G_1 - G_3 \bar{n} - G_4 (\bar{n})^2] / G_2. \quad (6)$$

На рис. 3 в качестве примера показана универсальная характеристика изнашивания узла второй группы, построенная при следующих значениях коэффициентов:  $G_1 = 5,80$ ;  $G_2 = 0,92$ ;  $G_3 = -10,10$ ;  $G_4 = 4,38$ . Указанные значения

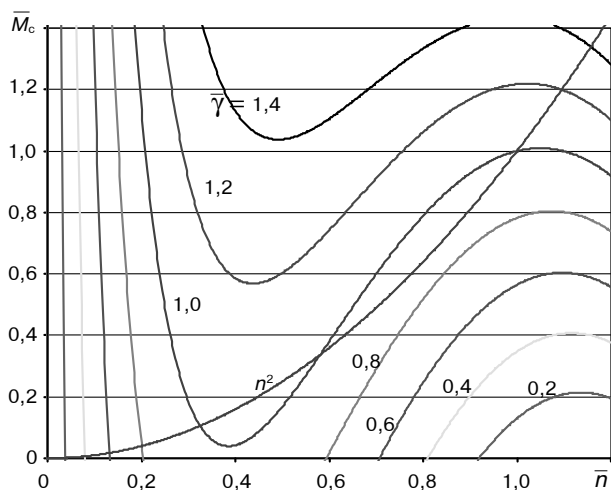


Рис. 3. Пример универсальной характеристики изнашивания узла второй группы

получены путем обработки методом наименьших квадратов результатов измерения износов в судовых условиях. Здесь же показана винтовая характеристика при плавании судна на глубокой спокойной воде.

Анализ семейства характеристик показывает, что низкие относительные скорости изнашивания ( $\bar{\gamma} < 1$ ) наблюдаются при малых относительных значениях  $\bar{n}$  и практически любых относительных значениях  $\bar{M}_C$ , а также при частотах, близких к номинальным ( $\bar{n} = 1$ ) и неполной нагрузке двигателя  $\bar{M}_C < 1$ .

Аналогичным путем получена универсальная характеристика изнашивания узлов третьей группы в виде

$$\bar{M}_C = \left[ \bar{\gamma} (\bar{n})^{-1} - F_1 - F_3 \bar{n} \right] / F_2, \quad (7)$$

где  $F_1, F_2, F_3$  — комплексные коэффициенты,  $F_1 + F_2 + F_3 = 1$ .

На рис. 4 показан пример такой характеристики, построенной при  $F_1 = 2,61$ ;  $F_2 = 0,89$ ;  $F_3 = -2,50$ , а также приведена винтовая характеристика.

#### Выводы

Обобщенные модели процессов изнашивания узлов трения судовых ДВС, построенные в безразмерных переменных, позволяют выявить статические и динамические (по наработке) закономерности, характерные для основных уз-

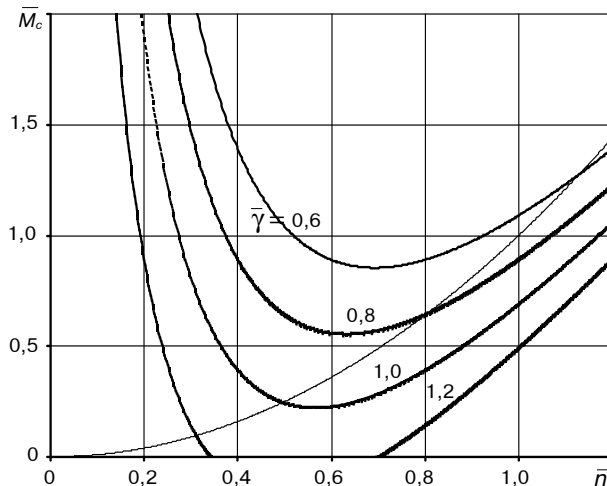


Рис. 4. Пример универсальной характеристики изнашивания узла третьей группы

лов различных марок ДВС. Износные характеристики наиболее совершенных в этом смысле ДВС могут быть использованы в качестве своеобразных эталонов при доводке новых и совершенствовании ДВС, находящихся в эксплуатации.

Статические универсальные характеристики позволяют обнаружить проблемные по скорости изнашивания узлы области сочетаний режимных параметров работы двигателя.

Динамические характеристики дают возможность прогнозировать изменения скорости изнашивания и износа, а также производить оценки остаточного ресурса при заданном сочетании режимных параметров. В случае нестабильных режимов работы двигателя прогнозирование можно осуществить путем организации компьютерного имитационного моделирования. В этом случае для каждого нестабильного режима необходимо построить на основе данных, полученных в условиях эксплуатации, совместные гистограммы типа «режимы работы—продолжительности работы двигателя в этих режимах».

#### Литература

1. ГОСТ Р ИСО 9000 — 2001. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. — М. : Издательство стандартов, 2001. — 32 с.
2. Климов Е.Н. Управление техническим состоянием судовой техники. — М. : Транспорт, 1985. — 199 с.