

б) маховик сглаживает крутильные колебания коленчатого вала и снижает инерционные нагрузки на близко расположенные сопряжения.

Дефекты изготовления коренного сопряжения аналогичны шатунным. Дополнительными технологическими причинами неестественного износа являются нарушение балансировки вала, несоосность коленчатого вала и блок-картера. Кроме непосредственно изготовления, эти дефекты могут являться следствием неправильного хранения и транспортировки запасных частей.

Брак эксплуатации коренных сопряжений аналогичен шатунным.

Разрабатываемые производителями технические условия на обслуживание и ремонт опираются на технологию производства двигателя. Такие условия подходят для крупных ремонтных предприятий, имеющих технологию и оборудование, аналогичное производству. Вместе с тем даже на этих предприятиях проводится анализ износов. Например, для определения деформаций шатуна, коленчатого вала, блок-картера требуется специализированное оборудование, не всегда имеющееся в наличии у эксплуатационников и ремонтни-

ков. По характеру износа определяются дефекты и причины появления их в двигателе.

Выводы

При многообразии конструкторских, технологических, эксплуатационных факторов сопряжения и детали кривошипно-шатунного механизма и цилиндропоршневой группы деталей двигателей внутреннего сгорания в соответствии с циклом имеют выраженные закономерности изнашивания. Классификация износов с выделением естественного (нормального) износа и неестественного износа, являющегося следствием несовершенства конструкции и технологии изготовления, брака в изготовлении, нарушения правил (брака) эксплуатации, позволяет выявлять причины преждевременных отказов, что необходимо для минимизации их повторения и совершенствования конструктивных, технологических и эксплуатационных средств повышения надежности двигателей.

Список литературы

1. Коченов В.А. Конструирование и эксплуатация автомобильных двигателей: монография. — Княгинино: Нижегородский ГИЭИ, 2009. — 164 с.

УДК 621.432

Р.А. Зейнетдинов, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДОПУСКОВ НА ДИАГНОСТИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЕЙ

Мощностные, экономические и ресурсные показатели дизелей в условиях рядовой эксплуатации в значительной степени определяются качеством работы топливной аппаратуры (ТА). Изменение технического состояния и отклонение контролируемых параметров топливной системы (ТС) от их номинальных значений обуславливают ухудшение основных показателей дизеля и повышенный износ деталей цилиндропоршневой группы. Это объясняется тем, что характеристика топливоподачи, определяющая внутрицилиндровые процессы дизеля, зависит, главным образом, от значений контролируемых параметров технического состояния (ПТС) ТА.

Основными контролируемыми параметрами форсунки, оказывающими существенное влияние на процесс впрыскивания топлива в цилиндр и изменяющимися в условиях непрерывного притока детерминированного хаоса при эксплуатации, являются: давление начала впрыскивания топлива $P_{впр}$, величина хода иглы $h_{и}$ и эффективное проходное сечение распылителя $\mu_p f_c$ [1].

Следует отметить, что реальные процессы изменения ПТС форсунки имеют вероятностный характер и представляют нестационарную случайную функцию $X(t)$, следовательно, работоспособность ТС изменяется во времени. Подобная ситуация позволяет рассмотреть форсунку как открытую динамическую систему, изменение контролируемых параметров которой можно анализировать как случайный процесс, а его эволюционную диссипацию и временную направленность рассматривать с использованием теорий информации и необратимых процессов. Основная идея заключается в возможности применения положений теории информации для обоснования значений эксплуатационных допусков на регулировочные параметры ТА на основе принципа минимума диссипации при преобразовании тепловой энергии топлива в цилиндре дизеля.

Известно, что одно из главнейших понятий теории информации — понятие об энтропии как мере неопределенности состояния системы. При этом возможны и другие меры разнообразия со-

стояния системы — например, дисперсия, описывающая разброс какой-либо случайной величины относительно математического ожидания. Однако дисперсия определяется распределением данной случайной величины, т. е. функцией исходов, а энтропия в отличие от дисперсии является более общей мерой разнообразия случайной величины, так как в явном виде зависит только от вероятности случайных исходов.

Согласно теории информации в качестве меры априорной неопределенности и хаотичности рассматриваемой случайной (стохастической) величины, целесообразно выбрать дифференциальную (информационную) энтропию [2]:

$$S[x, t_i] = - \int_{x_{\text{доп}}}^{x_{\text{ном}}} p(x, t_i) \ln p(x, t_i) dx, \int p(x, t) dx = 1, \quad (1)$$

где $p(x, t_i)$ — плотность функции распределения диагностического параметра ТС; $x_{\text{ном}}$, $x_{\text{доп}}$ — номинальное и допускаемое значения диагностического параметра.

Вычисленная по формуле (1) информационная энтропия объекта является мерой неопределенности его технического состояния. Чем больше неопределенность значений контролируемого параметра, т. е. выше разброс, тем больше энтропия информации.

Основные функциональные параметры форсунки при эксплуатации подвергаются диагностированию, и путем их контроля определяется техническое состояние системы. Если воспользоваться понятием теории множеств и принять $X_{\text{доп}}$, $X_{\text{пр}}$ соответственно за допускаемое и предельное значения параметра ТА, то можно рассматривать область работоспособности топливной системы (ТС) как множество исправных состояний $S_i^{\text{н}}$, если в момент контроля T_i значения диагностического параметра $X_i > X_{\text{доп}}$. Если любое значение параметра X_i вышло за границу исправного состояния $S_i^{\text{н}}$ и находится в области восстановления $S^{\text{в}}$, определяемой значениями $X_{\text{пр}} < X_i < X_{\text{доп}}$, то система требует восстановления по выбранному параметру. Выход значения X_i за границу множества $S_i^{\text{н}}$, определяемой значениями $X_i < X_{\text{пр}}$, означает, что произошел отказ и система находится в состоянии $S_i^{\text{о}}$, требующем устранения его последствий [3].

Исходя из этого, вероятность нахождения топливной системы в одной из трех состояний (исправленном, восстановленном и отказавшем) определяется выражениями:

$$\begin{aligned} P_{\text{ui}} &= P_i[X(t_i) > X_{\text{доп}}] = F_i(+\infty) - F_i(X_{\text{доп}}) = 1 - F_i(X_{\text{доп}}), \\ P_{\text{bi}} &= P_i[X_{\text{ном}} > X(t_i) > X_{\text{доп}}] = F_i(X_{\text{доп}}) - F_i(X_{\text{пр}}), \quad (2) \\ P_{\text{oi}} &= P_i[X(t_i) < X_{\text{пр}}] = F_i(X_{\text{пр}}) - F_i(0), \end{aligned}$$

где $F_i(X_{\text{д}})$, $F_i(X_{\text{пр}})$ — функция распределения соответственно допустимых $X_{\text{д}}$ и предельных $X_{\text{пр}}$ значений i -го параметра.

В первый с начала эксплуатации момент контроля $t_{1к}$ вероятность нахождения ТА в одном из состояний ($P_{\text{и}}$ — исправном, $P_{\text{в}}$ — требующем восстановления, $P_{\text{о}}$ — требующем устранения отказа) определяется зависимостью

$$P_{\text{и(в,о)}}^1 = \left[\sqrt{2\pi} \sigma_x(t_i) \right]^{-1} \times \int_{X_{\text{доп}}(X_{\text{пр}}, 0)}^{+\infty(X_{\text{доп}}, X_{\text{пр}})} \exp\left\{-\left[x_i - m_x(t_i)\right]^2\right\} / 2\sigma_x(t_i) dx, \quad (3)$$

где $m_x(t_i)$ и $\sigma_x(t_i)$ — математическое ожидание и дисперсия контролируемого параметра ТА в момент диагностирования t_i .

При втором и последующих диагностировании вероятности нахождения ТА в исправном состоянии $P_{\text{и}}$ и в состоянии, требующем восстановления $P_{\text{в}}$, можно определить из условной вероятности событий:

$$\begin{aligned} P_{\text{ui}}^n &= P\left\{x(t_i) > \frac{x_{\text{д}}}{x(t_{i-1})} > x_{\text{д}}\right\} = \frac{P\left\{x(t_i) > x_{\text{д}}\right\}}{P\left\{x(t_{i-1}) > x_{\text{д}}\right\}}, \quad (4) \\ P_{\text{vi}}^n &= P\left\{x(t_i) < \frac{x_{\text{д}}}{x(t_i)} > x_{\text{д}}\right\} = \frac{P\left\{x(t_i) < x_{\text{д}}\right\}}{P\left\{x(t_{i-1}) > x_{\text{д}}\right\}}. \end{aligned}$$

По результатам контроля диагностических параметров ТА подвергается техническому обслуживанию и ремонту с восстановлением ее исправного состояния. В результате этих «компенсационных» работ уровень неопределенности ПТС форсунки уменьшается в количественной форме, что отразится на снижении энтропии изделия. При этом восстановлению подвергаются те форсунки, у которых контролируемый параметр находится в одном из состояний: требующем восстановления или устранения отказа.

При втором и последующих диагностировании вероятности нахождения ТА в исправном состоянии $P_{\text{и}}$ и в состоянии, требующем восстановления, $P_{\text{в}}$ определяются из условной вероятности событий, а снижение энтропии объекта после диагностирования в фиксированном диапазоне изменения контролируемого параметра можно выразить через условную энтропию:

$$S\left[x(t_i) < x_{\text{доп}} / x(t_{i-1}) > x_{\text{доп}}\right] = \int_{x_{\text{доп}}}^{x_{\text{ном}}} \int_0^{x_{\text{доп}}} p(x_{i-1}, t_{i-1}, x_i, t_i) \ln p(x_{i-1} / x_i) dx_{i-1} dx_i. \quad (5)$$

Информационная энтропия системы, характеризующая исправное состояние после второго и последующих восстановлений параметра $P_{\text{впр}}$, определяется разностью безусловной и условной энтропий, т. е.

$$S_{исп}(t_i) = S\left(\frac{x}{t}\right) - S\left[x(t_i) < \frac{x_{доп}}{x(t_{i-1})} > x_{доп}\right] \geq 0. \quad (6)$$

Энтропийный вклад восстановительных операций после каждого технического диагностирования, зависящий от величины допускаемого значения контролируемого параметра и времени диагностирования системы, можно выразить следующим образом:

$$S(X_i, t_i) = S_{вос}^{пер}(t_i) = \int_{x_{i-1}} \int_{x_i} p(x_{i-1}(t_{i-1}), x_i(t_i)) \ln \frac{p(x_{i-1}, x_i)}{p(x_{i-1})p(x_i)} dx_{i-1} dx_i \geq 0. \quad (7)$$

Таким образом, в условиях реальной эксплуатации обычно выполняется следующее неравенство:

$$S_{вос}^{пер}(t_0) < S_{вос}^{пер}\left(\frac{x}{t_1}\right) < S_{вос}^{пер}\left(\frac{x}{t_1, t_2}\right) < \dots < S_{вос}^{пер}\left(\frac{x}{t_1 \dots t_i}\right). \quad (8)$$

Это неравенство можно интерпретировать как уменьшение степени упорядоченности при статистическом описании процесса изменения контролируемого параметра ТС, а разность энтропии может служить мерой оценки степени неопределенности выделенных состояний. При этом статистически неустойчивое состояние ТА есть результат неравновесного процесса роста энтропии, который подчиняется принципу максимума производства энтропии.

Меру неопределенности случайных состояний дискретных конструктивных параметров эффективного проходного сечения $\mu_{рфс}$ и хода иглы распылителя $h_{и}$ также можно выразить через энтропию. Однако между параметрами $\mu_{рфс}$ и $h_{и}$ существует определенная корреляционная взаимосвязь, следовательно, для оценки количества информации этих статистически зависимых параметров может быть использована условная энтропия.

Условная энтропия состояния, требующего восстановления величины эффективного проходного сечения распылителя y_i относительно величины хода иглы z_i в момент времени t_i имеет вид

$$S(Y_i, t_i) = S_{вос}^{кон}\left(\frac{y}{z}\right) = - \int_y \int_z p(z_i, y_i) \ln p\left(\frac{y_i}{z_i}\right) dy_i dz_i. \quad (9)$$

Для рассматриваемого случая

$$p(z_i, y_i) = p(z_i)p(y_i/z_i). \quad (10)$$

Таким образом, статистические свойства энтропии позволяют получить представление о возможности ее использования для математического описания случайных процессов изменения контролируемых параметров форсунки при эксплуатации. При этом среднюю неопределенность состояния форсунки можно определить как сумму энтропии

всех этих параметров. Следовательно, комплексное влияние процессов дестабилизации конструктивно-регулирующих параметров ТА на характеристику топливоподачи, можно рассмотреть через полную информационную энтропию форсунки, представляя ее в виде суммы энтропий распределения вероятностей конструктивно-регулирующих параметров как статически несвязанных между собой, т. е.

$$S_{\Sigma}(D_i, t_i) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(x_i, y_j) \ln p(x_i, y_j) = S(X_i, t_i) + S(Y_i, t_i). \quad (11)$$

Чем больше отклонения конструктивно-регулирующих параметров от номинальных значений, тем больше информационная энтропия ТА. Это означает, что процессы эволюции диссипативных процессов в топливной системе направлены в сторону максимума энтропии.

Известно, что отклонения конструктивно-регулирующих параметров ТС приводят к постепенному нарушению процесса впрыскивания топлива, что обуславливается увеличением диссипации введенной теплоты, и продуцированием энтропии на основе роста необратимости внутрицилиндровых процессов. При этом вероятность нахождения теплового потока (тепловыделения) в цилиндре в j -м состоянии, соответствующем i -му техническому состоянию ТС, может быть определена по величине обесцененной теплоты в необратимых процессах при изменении ПТС форсунки $\Delta G_i = T_i \Delta S_i$ — при постоянстве цикловой подачи топлива. Здесь величина ΔS_i учитывает полное производство энтропии в процессах смесеобразования и тепловыделения из-за отклонения контролируемых параметров ТА от их номинальных значений.

Условная вероятность нахождения тепловой энергии в цилиндре в j -м состоянии, соответствующем i -му состоянию конструктивно-регулирующих параметров ТА, имеет вид

$$p(g_j/D_i) = \frac{\sum \Delta G_j}{\chi Hug_{и}} = \frac{\sum T_j \Delta S_j}{\chi Hug_{и}}, \quad (12)$$

где χ — коэффициент выделения теплоты при сгорании цикловой дозы топлива; Hu — низшая теплота сгорания 1 кг жидкого топлива; $g_{и}$ — цикловая подача топлива; $\sum_n T_i \Delta S_i$ — суммарная обесцененная энергия (теплота) из-за отклонения ПТС топливной системы.

В этом случае условная энтропия тепловыделения (энтропия приемника информации) относительно информационной энтропии форсунки (энтропия источника) может быть представлена в виде

$$S(Z_i, t_i) = - \sum_k p(g_j/D_i) \ln p(g_j/D_i), \quad (13)$$

Величина разности энтропии $S(Z_i, t_i) - S(Z_0, t_0)$ есть количественный показатель, характеризующий степень увеличения диссипации тепловой энергии в динамической системе при отклонении ПТС топливной системы. Основными источниками необратимости термодинамических процессов, степень продуцирования энтропии которых зависит от технического состояния ТС, являются процессы впрыскивания, тепломассопереноса, сгорания топлива и т. д. При этом в качестве управляющего параметра можно принять давление начала впрыскивания топлива, так как оно существенно влияет на величину разности энтропии.

Если рассмотреть диссипацию теплоты при сгорании топлива из-за отклонения ПТС топливной системы, то принимая процесс горения стационарным, производство энтропии можем представить в виде [4]:

$$dS_{гор} = -\frac{1}{T_r} \frac{H_u}{l_0} \nu dt, \quad (14)$$

где H_u — низшая теплота сгорания топлива, l_0 — стехиометрический коэффициент; ν — скорость реакции; T_r — текущая температура газа.

Второй множитель ν связан с формой кривой выгорания топливовоздушной смеси, является суммарной характеристикой процесса горения. Кривую выгорания или молекулярную скорость сгорания топлива можно выразить следующим образом:

$$\nu = \frac{1}{V} \frac{g_u}{\mu_T} \frac{dx}{d\tau}, \quad (15)$$

где x — закон сгорания; g_u — количество топлива, впрынутое в цилиндр за один цикл; μ_T — молекулярная масса топлива; V — текущий объем.

При оценке характеристик тепловыделения используют кривые активного тепловыделения $x_i = f_1(\varphi)$ и скорости активного тепловыделения $dx/d\varphi = f_2(\varphi)$. В этой связи для описания всего процесса сгорания можно использовать уравнение сгорания Вибе в следующем виде:

$$x = 1 - \exp \left[-6,908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right], \quad (16)$$

где φ — текущий угол поворота коленчатого вала от начала процесса сгорания; φ_z — условная продолжительность сгорания по углу поворота коленчатого вала; m — показатель характеристики сгорания.

Относительная скорость тепловыделения такова:

$$\frac{dx}{dt} = 6,908 \frac{m+1}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^m \exp \left[-6,809 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right]. \quad (17)$$

Изменение параметров m и φ_z в зависимости от эксплуатационных режимов работы двигателя

и конструктивно-регулирующих параметров форсунок p_ϕ и $\mu_p f_c$ имеет вид [5]:

$$m = m_n \left(\frac{n}{n_n} \right)^a \left(\frac{\mu f_n}{\mu_n f_n} \right)^b \left(\frac{p_{\phi n}}{p_\phi} \right)^c; \\ \varphi_z = \varphi_{zn} \left(\frac{\alpha_n}{\alpha} \right)^d \left(\frac{n}{n_n} \right)^e \left(\frac{p_{\phi n}}{p_\phi} \right)^f \left(\frac{\mu f_n}{\mu_n f_n} \right)^g, \quad (18)$$

где $m_n, \varphi_{zn}, \alpha_n, n_n, p_{\phi n}, \mu_n f_n$ — исходные (номинальные) значения параметров процесса сгорания, коэффициента избытка воздуха, частоты вращения коленчатого вала, давления начала впрыскивания топлива, эффективно-го проходного сечения распылителя; $m_n, \varphi_{zn}, \alpha_n, n_n, p_{\phi n}, \mu_n f_n$ — соответственно текущие значения параметров; a, b, c, d, e, f, g — коэффициенты влияния.

Вышеприведенная формула (14) с использованием выражений (17) и (18) позволяет определить величину продуцируемой энтропии в цилиндре в процессе сгорания топлива при отклонении ее конструктивно-регулирующих параметров форсунки от номинальных их значений.

Информационную полноту всех вышеуказанных процессов в момент времени t_i можно характеризовать полной взаимной информационной энтропией, которая определяет общую неопределенность параметров источника и приемника информации:

$$\sum_i S(D_i, Z_i) = S(D_i, t_i) + S[(Z_i/D_i), t_i], \quad (19)$$

где $S(D_i, t_i)$ — полная информационная энтропия состояния форсунки, требующего восстановления конструктивно-регулирующих параметров в момент времени t_i ; $S[(Z_i/D_i), t_i]$ — условная энтропия нахождения тепловой энергии в цилиндре в j -м состоянии, соответствующем i -му состоянию конструктивно-регулирующих параметров форсунки.

Из уравнения (17) следует, что с течением времени контролируемые параметры ТС стремятся ко все большему разбросу, обеспечивая, тем самым, эволюционную разнообразию результатов тепловой энергии в цилиндре. Чем меньше взаимная энтропия, тем теснее связь между состоянием ТА и характеристиками тепловыделения в двигателе.

В случае рассмотрения параметра $P_{впр}$ как контролируемого, его управляющее воздействие на изменение полной взаимной энтропии можно оценить при различных значениях данного параметра или допусках. Снижение величины отклонения данного параметра от номинального значения обеспечивает рост блокирования диссипации тепловой энергии в цилиндре двигателя, следовательно, — снижение удельного расхода топлива. Однако это обусловлено увеличением числа восстановительных операций, следовательно, — вероятности состояния, требующего восстановления. Последнее уже приводит к росту энтропийного вклада восста-

новительных операций при каждом техническом диагностировании.

Для расчета оптимальной величины эксплуатационного допуска на контролируемый параметр ТА на основе принципа минимального роста взаимной энтропии системы можно предложить целевую функцию, учитывающую комплексное влияние конструктивно-регулирующих параметров форсунки на диссипацию тепловой энергии в двигателе:

$$L_i = C_b S(D_i t_i) + C_T S\left[\left(\frac{Z_i}{D_i}\right), t_i\right] + C_o S_{\text{отк}} \rightarrow \min, \quad (20)$$

где C_b , C_o — приведенные затраты на восстановление и устранение последствий отказа форсунок; C_T — приведенные издержки, связанные с увеличением удельного расхода топлива из-за неоптимальности давления начала впрыскивания форсунками; S_o — информационная энтропия топливной системы, характеризующая состояние отказа.

Таким образом, важной задачей процессов топливоподачи, смесеобразования и сгорания топлива в двигателе является выявление условий, которые обеспечивают минимальное производство энтропии, что связано при всех возможных эксплуатационных состояниях форсунки с минимизацией ее информационной энтропии. При комплексном

рассмотрении влияния конструктивно-регулирующих параметров форсунки на диссипацию тепловой энергии в двигателе необходимо определить доминирующий управляющий параметр. Далее используя «принцип компенсации» энтропии, можно установить оптимальное значение эксплуатационного допуска на выбранный управляющий параметр, который обеспечивает минимальное производство энтропии в рассматриваемых взаимодействующих системах.

Список литературы

1. Трусов В.И., Дмитриенко В.П. Форсунки авто-тракторных дизелей. — М.: Машиностроение, 1977. — 168 с.
2. Яглом А.М., Яглом И.М. Вероятность и информация. — Изд. 4-е. — М.: КомКнига, 2006. — 512 с.
3. Николаенко А.В., Зейнетдинов Р.А. Модели технического обслуживания топливной системы дизелей Раба-Ман // Улучшение эффективных экологических и ресурсных показателей энергетических установок сельскохозяйственных тракторов и автомобилей: сб. науч. трудов СПбГАУ. — СПб., 1995. — С. 64–73.
4. Лернер М.С. Горение и экология. — М.: МГП «Контекст», 1992. — 332 с.
5. Романов В.А. Повышение безотказности форсированных дизелей путем стабилизации характеристик форсунок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Барнаул, 2006. — 18 с.