

нию в производстве новых и модернизации выпускаемых компонентов двигателей;

создании ряда высокомеханизированных специализированных производств компонентов, оказывающих наибольшее влияние на технический уровень и экологические показатели двигателей;

привлечением стратегических партнеров и инвесторов к организации новых производств наиболее важных комплектующих.

4. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОРШНЕВЫХ МАШИН, ОСНАЩЕННЫХ СИСТЕМАМИ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА (СДМ)

Вибродиагностика позволяет комплексно оценить техническое состояние поршневой машины (ПМ) по внешней вибрации корпуса и является эффективным инструментом исследования качества динамических процессов при ее создании, изготовлении, обнаружении зарождающихся дефектов и достижении ими критического уровня в эксплуатации. Наибольшая эффективность достигается при организации мониторинга технического состояния не только ПМ, но и сопряженных с ней механизмов и присоединенных конструкций.

Важнейшими классами ПМ, для которых виброакустическая диагностика позволяет обеспечить их надежную безаварийную эксплуатацию при полном использовании ресурса, заложенного в конструкцию, являются двигатели внутреннего сгорания.

СДМ – система (машина), продуктом которой является текущая информация о техническом состоянии оборудования и его опасности с необходимыми комментариями (прогнозом остаточного ресурса, предписаний на неотложные действия и др.) и заданным риском.

Допустимая ошибка СДМ в сложившихся условиях эксплуатации ПМ с вероятностью внезапных отказов Q и наработкой на отказ T_Q , когда требуется обеспечить наработку не менее T_r с коэффициентом увеличения ресурса k_T и риском пропуска отказа не более r , для экспоненциального закона распределения наработки до отказа

$$\eta = [\ln(1 - r)] / [\ln(1 - r) + \ln(1 - Q)],$$

$$T_r = T_Q^* [\ln(1 - Q)] / [\ln(1 - r)]$$

при $r \ll Q \ll 1$, $\eta = r / Q$, $k_T = 1 / \eta - 1$ (рис. прил. 2).

Применение СДМ создает временную избыточность действий в условиях надвигающегося отказа, что существенно повышает безопасность работы ПМ.

Например, для типичных значений $Q = 20\%$ и $r = 1\%$ допустимая ошибка системы диагностики $\eta \leq 4\%$, при этом интервал между неполадками и аварийными ситуациями возрастает в 24 раза. Эмпирический риск r является также критерием эффективности управления ПМ по минимуму вероятности пропуска отказа для сравнения различных систем и технологий управления с вектором параметров $\{Z\}$: $r = \min Q\{Z_i\}$.

Техническое состояние ПМ, зависящее от режима работы S_0 и уровня накопленных погрешностей изготовления, ремонта и эксплуатации S :

$$S_1 = S_0 + S(t) = S(n_0, p_0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial S}{\partial q_j} \Delta q_j(t),$$

где $S_0 = S(n_0, p_0)$ – составляющая, которая характеризует механизм с минимальными, близкими к нулю, обобщенными технологическими и эксплуатационными погрешностями, который работает в диапазоне名义альных скоростей (n_0) и нагрузочных (p_0) режимов; $\Delta q_i = X_j$ – j -я погрешность механизма, заложенная при изготовлении ($t = 0$), развивающаяся во времени t и определяющая износ или (в общем случае) степень деградации механизма и его старения; $\partial S / \partial q_j$ – чувствительность обобщенной погрешности S к j -й погрешности механизма по соответствующей обобщенной координате q_j . Обобщенная математическая модель системы мониторинга на основе уравнений переменных состояния имеет вид:

$$\{\dot{S}(t)\} = [A]\{S(t)\} + [B]\{U\};$$

$$\{Y(t)\} = [C]\{S(t)\} + [D]\{U\},$$

где $\{S(t)\}$ – вектор функций размерности m , каждая составляющая которого характеризует его обобщенный (совокупный) структурный параметр, подлежащий оценке и характеризующий остаточный парциальный ресурс ПМ по этому обобщенному параметру; носит во времени многомодальный характер в виде суммирования частных погрешностей; $\{\dot{S}(t)\}$ – вектор скорости старения (износа, снижения безаварийности, безопасности, остаточного ресурса), также имеющий многомодальный характер; $\{U\}$ – вектор переменных управления размер-

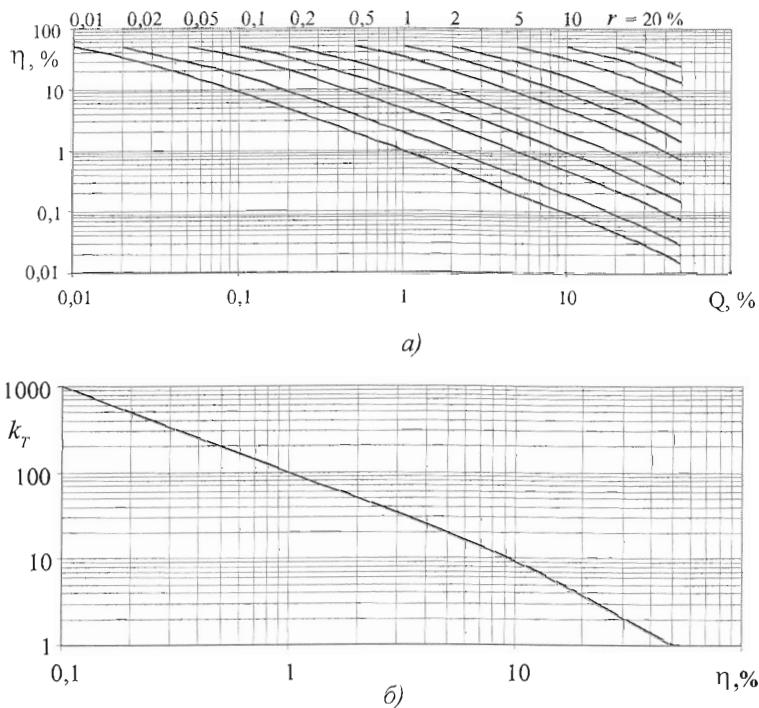


Рис. прил. 2. Параметры системы диагностики и мониторинга:

a – допустимая ошибка η при требуемом риске r и фактической вероятности отказа Q ; *б* – коэффициент увеличения наработки между отказами k_r в зависимости от ошибки диагностирования

ности ($p + k$), включающий переменные задания режима работы ПМ $\{U_p(t)\}$ и человеческий фактор при регулировке и обслуживании ПМ $\{U_k(t)\}$; $\{Y(t)\}$ – вектор диагностических сигналов размерности $n \geq m$, измеряемых системой мониторинга; $[A]$, $[B]$, $[C]$, $[D]$ – матрицы соответственно квадратная системы $[a_{ij}]$, прямоугольная управления $[b_{ij}]$, которая определяет влияние действий человека на состояние ПМ, наблюдения (выхода) $[c_{ij}]$, которая определяет наблюдаемость внутреннего состояния, переходная $[d_{ij}]$, которая определяет влияние на параметры вибрации действий человека по управлению режимом работы и обслуживанию.

Система мониторинга вполне управляема и наблюдаема при совпадении рангов матриц $[A]$ и $[C]$ и отсутствии в последней нулевых столбцов. Размерность вектора $\{S(t)\}$ (матрицы $[A]$), которая определяет степень реальной наблюдаемости состояния ПМ, рекомендуется выбирать исходя из причин и статистики ее отказов. Составляющие $\{S(t)\}$, как правило, недоступны для непосредственного наблюде-

ния и оцениваются по косвенным измерениям. Вектор $\{U\}$ изменяется спорадически при пуске–останове ПМ и техническом обслуживании. Между этими моментами $\{U\} = \text{const}$.

Полная косвенная наблюдаемость состояния достигается измерением диагностических сигналов и скоростей их изменения во времени; предельное состояние $\{S_{\text{НДП}}\}$ и опасная скорость его деградации $\{\dot{S}_{\text{НДП}}\}$ с точностью до масштаба совпадают с критическими значениями диагностических признаков и скоростей их изменения; приращение диагностических сигналов (вибропараметров) пропорционально приращению износа, утрате безопасности и уменьшению остаточного ресурса ПМ в целом:

$$\begin{aligned} \{\Delta Y\} &= [C] \{\Delta S\}; & \{\dot{Y}(t)\} &= [C] \{\dot{S}(t)\}; \\ \{Y_{\text{НДП}}\} &= [C] \{S_{\text{НДП}}\}; & \{\dot{Y}_{\text{НДП}}\} &= [C] \{\dot{S}_{\text{НДП}}\}; \\ \{\Delta S\} &= [C]^{-1} \{\Delta Y\}; & \{\dot{S}\} &= [C^{-1}] \{\dot{Y}\}; \\ \{S_{\text{НДП}}\} &= [C]^{-1} \{Y_{\text{НДП}}\}; \\ \{\dot{S}_{\text{НДП}}\} &= [C^{-1}] \{\dot{Y}_{\text{НДП}}\}. \end{aligned}$$

Основной задачей синтеза СДМ является синтез ортогональных диагностических признаков $\{Y_i\}$, отражающих соответствующим образом сформулированные ортогональные классы неисправностей $\{S_i\}$. Это соответствует приведению матрицы наблюдения $[C]$ к диагональной квадратной, устанавливающей регрессионное отношение между диагностическим признаком и соответствующей обобщенной погрешностью, и проблема мониторинга состояния заключается в формировании правильной интерпретации этой обобщенной погрешности с учетом частоты появления классов неисправностей. Например, рост виброскорения корпуса топливного насоса ДВС соответствует росту обобщенной погрешности неисправностей подшипника—кавитация. При этом в 90 % случаев наблюдается неисправность подшипника и лишь в 5...8 % — кавитация. Остальные 2...5 % роста виброскорения имеют другие причины. Наличие такой интерпретации причина — следствие эквивалентно приведению матрицы наблюдения к диагональной квадратной форме и соответствует мониторингу состояния. Отсутствие такой интерпретации соответствует мониторингу параметра (вибрации, температуры и др.). Часто неисправности (разрушение поверхностей трения, ослабление крепления и т.д.) неизмеримы в сильных шкалах (отношения, интервалов). Тогда измеряемые диагностические признаки (вибропараметры) служат мерой этих неисправностей. Техническое состояние ПМ в целом определяется максимальной парциальной составляющей вектора диагностических признаков $Y_{\max}(t)$, наблюданной СДМ по узлам в целом. Опасность состояния ПМ в целом определяется максимальной парциальной составляющей скорости роста вибропараметра $\dot{Y}_{\max}(t)$. Необходимое быстродействие СДМ определяется максимальной скоростью утраты работоспособности и минимальным запасом остаточного ресурса ПМ:

$$F = \frac{1}{T} = \max \left(B \frac{\dot{Y}_{\text{НДП}}}{Y_{\text{НДП}}} \right) = \max \left(B \frac{\dot{Y}_{\text{НДП}}}{Y_{\text{НДП}}} \right).$$

Параметр $B > 1$ характеризует качество алгоритма оценки скорости роста измеряемых диагностических признаков.

В общем случае вибрация описывается следующей матричной системой уравнений:

$$\begin{aligned} [A]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [C]\{q\} &= \{h(q, \dot{q}, t)\} = \\ &= \mu(\{\Gamma(t)\} + \{H(q, \dot{q}, t)\}), \end{aligned}$$

где $[A], [B], [C]$ — квадратные матрицы с постоянными коэффициентами; $\{q\}$ — вектор обобщенных координат; $\{h\}$ — вектор нелинейных параметрических членов $\{H(q, \dot{q}, t)\}$ и внешних возбуждающих сил $\{\Gamma(t)\}$; μ — малый параметр.

Амплитудно-частотный спектр колебаний определяется спектром возбуждающих сил $\Gamma(\omega)$, который существенно расширяется при деградации механизма вследствие роста нелинейных эффектов (удар, ограничение движения) и параметрического возбуждения из-за случайных изменений жесткости $[C(t)]$, вызванных, в частности, ослаблением крепления различных частей. Возбуждаемый частотный состав вибросигнала проявляется через виброскорение $\{A\} = \{\ddot{q}\}$, виброскорость $\{v\} = \{\dot{q}\}$ и виброперемещение $\{S\} = \{q\}$. Таким образом, использование при вибромониторинге всех трех вибропараметров позволяет наблюдать в спектре колебаний всех частот, возбуждаемых в механизме по виброперемещению $S(\omega)$ и виброскорению $A(\omega)$.

Система вибропараметров A, v, S ортогональна для случайных процессов зарождения и развития неисправностей и отражает разные классы неисправностей. Для них так же, как и для их огибающих, порождаемых импульсными (ударными) и параметрическими процессами возбуждения колебаний справедливо единообразное представление в виде смеси шумовых и периодических составляющих (ШПС). Сигналы в различных участках спектра целесообразно представить разложением по характерным блокам ШПС на три группы диагностических признаков: $Z(\omega)$ — дискретные, частоты которых кратны частоте вращения, — поршневые (плунжерные, лопаточные, зубцовые частоты, порождаемые рабочим процессом) и обратные гармоники (отклонение от баланса, нарушение центровок, износ); $\pi(\omega)$ — дискретные, частоты которых пропорциональны частоте вращения, но связаны с ней дробными коэффициентами, например подшипниковые частоты; $H(\omega)$ — частотные, независимые от частоты вращения, прочие составляющие и непрерывная компонента спектра, заполняющие промежутки между дискретными составляющими первых двух групп.

Обобщенная диагностическая модель спектра вибросигнала (ВС) ШПС имеет вид: $G(\omega) = Z(\omega) + \pi(\omega) + H(\omega)$. Для диагностирования ПМ необходимо выделить и измерить энергетические характеристики составляющих

ШПС. Модель ШПС в рекуррентном виде во временной и частотной областях следующая:

$$\begin{aligned} H_n(t) &= P_{n+1}(t) + H_{n+1}(t); \\ H_n(\omega) &= P_{n+1}(\omega) + H_{n+1}(\omega), \quad 0 \leq n \leq m, \end{aligned}$$

где $P(\omega) = \sum_{k=1}^N P_k^2 \delta(\omega - k\omega_p)$ — наиболее высокочастотная на каждом этапе селекции периодическая составляющая; P_k , $k\omega_p$ — амплитуда и частота k -й гармоники периодической составляющей; N — число гармоник; m — число учитываемых периодических компонент.

Полагая (без ограничения общности), что на каждом шаге селекции периодическая составляющая, измеряемая СДМ, практически совпадает с $P_{n+1}(\omega)$ при настройке на ее гармоники, получим, что обобщенная модель порождает почти ортогональные между собой (мера Линнера, равная квадрату коэффициента корреляции, меньше 0,1, что определяет угол больше 80° между векторами признаков) шумовые и периодические составляющие H_i , P_i , $0 \leq i \leq m$:

при $\omega = k\omega_p$

$$P_{n+1}(k\omega_p) > H_{n+1}(k\omega_p) \ll H;$$

при $\omega \neq k\omega_p$

$$P_{n+1}(\omega) = 0; \quad H_{n+1}(\omega) > 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{PH} \int_0^\infty P(\omega) H(\omega) d\omega &= \\ &= \frac{1}{PH} \sum_{k=1}^N P_k^2 H(k\omega_p) \ll 1. \end{aligned}$$

Случай $n = 0$ соответствует диагностике по исходным параметрам вибрации, составляющим полную группу и удовлетворяющим принципу информационной полноты (π -принцип). Обобщенная диагностическая модель ШПС ВС инвариантна к существующим типам ПМ и лежит на основе аддитивных СДМ с функционально неопределенной структурой.

Динамическая модель состояния и вибрации ПМ в жизненном цикле с учетом человеческого фактора устанавливает экспоненциальную форму связи между диагностическими признаками, структурными параметрами и остаточным ресурсом:

$$\{\dot{Y}\} = [a] e^{[a]^T} \{Y_0\}; \quad \{\dot{S}\} = [C]^{-1} [a] e^{[a]^T} \{Y_0\}.$$

Важнейшим методическим этапом является выбор рациональных условий диагностирования.

Оценка объема выборки и ошибки распознавания. При виброакустической диагностике каждый диагностический признак порождается соответствующей моделью. Пусть n — число математических моделей, каждая из которых порождает диагностический признак с ошибкой q_i . Вероятность того, что из N исследуемых ПМ m будет опознано неправильно, согласно формуле Бернулли $P_m^l = C_N^m q_i^m p_i^{N-m}$ ($i = 1, 2, \dots, n$, $p_i = 1 - q_i$). Среди n диагностических признаков (моделей) лучшим будет тот j -й, который обладает наименьшей ошибкой распознавания q_j . Необходимый объем выборки для заданной среднеквадратической ошибки $\varepsilon = \sigma(p_i)/p_i$ оценки неизвестной вероятности \hat{p} биноминального распределения и ожидаемое значение этой вероятности p_i

$$\begin{aligned} \sigma(\hat{p}) &= p \sqrt{\frac{1-p}{n-2}}; \quad \hat{p} = \frac{n-1}{N-1}; \quad n = N - m \\ M(N) &= n/p; \quad \sigma(N) = \sqrt{\frac{n(1-p)}{p}}. \end{aligned}$$

После преобразования получим $N \geq \frac{1-p}{\varepsilon^2 p} + \frac{2}{p} \geq \frac{k}{\varepsilon} + 4$, $k = 1, 2, \dots$.

Исследования проводятся до появления n событий с предполагаемой вероятностью p , после чего неизвестные вероятности, среднее число опытов $M(N)$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma(N)$ оцениваются по приведенным формулам. При малых ошибках распознавания возможны ситуации, когда при заданном объеме обучающей выборки N нет ни одного ошибочно опознанного объекта ($m = 0$). Тогда сравнение диагностических признаков можно проводить на основе какой-либо меры расстояния между их распределениями для каждого класса состояния ПМ. В качестве простой меры расстояния можно использовать модифицированный критерий Фишера $r = (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) / (\sigma_2 + \sigma_1)$, $\bar{x}_2 > \bar{x}_1$, где \bar{x}_1 , σ_1 — среднее значение и среднеквадратическое отклонение значений диагностического признака для класса Ω_1 ; \bar{x}_2 , σ_2 — то же для Ω_2 . Чем больше расстояние r_i , тем меньше ошибка распознавания технического состояния с помощью i -го диагностического признака.

После сравнения r_i для различных диагностических признаков в качестве наилучшего выбирается тот, для которого расстояние $r_m = \max_{i \in J} r_i$, где $J = \{1, \dots, n\}$.

Выбор места установки вибропреобразователя и цепей предварительной обработки сигнала.

Основными требованиями, которые предъявляются к месту установки датчика, являются следующие: высокая информативность, простота установки и снятия, повторяемость результатов при перестановках. Место установки датчика должно выбираться как можно ближе к диагностируемым узлам и находиться в зоне действия максимальных суммарных сил.

Из-за сложности корпуса места установки датчиков не совпадают с этой зоной, что снижает достоверность результатов диагностики. Поэтому выбирают несколько мест с последующим экспериментальным выбором наилучшего. Множество трактов прохождения сигнала равно произведению числа мест d установки датчиков на число цепей предварительной обработки $l = \{1, 2, \dots, L\}$. Определяя для каждого элемента этого множества ошибку распознавания q_{ij} или расстояние r_{ij} , можно выявить рациональное место установки вибропреобразователя, цепь предварительной обработки сигнала и диагностический признак.

Выбор режима работы ПМ, при котором ошибки диагностирования минимальные. Эта задача решается при функционировании ПМ в некотором диапазоне рабочих скоростей и нагрузок методами теории планирования экстремальных экспериментов. При этом количественными факторами являются параметры режима (частота вращения и др.).

Техническое состояние машины является пассивным фактором. Вместе с тем этому качественному фактору не может быть присвоено дробное значение, как этого требует величина "звездного" плеча в ортогональных и ротатабельных планах второго порядка. Поэтому целесообразно определять регрессионные уравнения, связывающие диагностический признак y_s с параметрами режима x_1, \dots, x_k для каждого состояния машины: $y_{s1} = f_{s1}(x_1, \dots, x_k)$; $y_{s2} = f_{s2}(x_1, \dots, x_k)$, где $S = nL$ — порядковый номер диагностического признака; f_{s1}, f_{s2} — функции регрессии для исправных и неисправных машин; k — число варьируемых параметров режима. Функции регрессии могут определяться как для каждой машины в отдельности, например при длительных испытаниях, так и для всей обучающей выборки, содержащей Ω_1 исправных и Ω_2 неисправных машин. Затем вычисляется расстояние между поверхностями регрессии: $r_s = (y_{s2} - y_{s1}) / (\sigma_{s1} + \sigma_{s2})$, где σ_{s1}, σ_{s2} — эмпирические средние квадратические отклонения. Дифференцируя это уравнение по незави-

симым переменным x_1, \dots, x_k и приравнивая частные производные к нулю, можно получить значения параметров режима $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0}$, соответствующие минимальным ошибкам диагностирования. Более целесообразно определить не один оптимальный режим, а область рациональных для диагностики режимов, в которой ошибки не превышают некоторой допустимой величины

$$q_{\text{доп}} = \Phi(-r_{\text{доп}}):$$

$$F_s(x_1, \dots, x_k) = f_{s2}(x_1, \dots, x_k) - f_{s1}(x_1, \dots, x_k) - r_{s \text{ доп}}(\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) = 0,$$

независимо от остальных при ошибках диагностики, не превышающих $q_{\text{доп}}$.

Если диагностирование проводится только на фиксированных, заранее заданных режимах, то выбор оптимального режима осуществляется перебором диагностических процедур $T = nLK$. Для каждой t -й процедуры определяются ошибка или расстояние между распределениями $r_t, r_{t \text{ max}}$ и соответствующие оптимальные режим, датчик, цепь предварительной обработки сигнала и диагностический признак (математическая модель).

Выбор рациональных условий диагностики при наличии нескольких классов неисправности. В практике диагностирования часто возникает задача диагностики различных неисправностей машины. В этом случае имеем $J = LK$ условий диагностики и диагностических признаков, отражающих W классов неисправности машин. Определяя ошибки q_{wj} или расстояния r_{wj} для соответствующих классов неисправностей $w = \{1, 2, \dots, W\}$ для каждого условия $j = \{1, 2, \dots, J\}$, получают совокупность чисел r_{wj} , которую можно рассматривать как случайный вектор $\bar{r}_j = \{r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{wj}\}$. Применяя к \bar{r}_j ранговый метод, можно получить совокупность взвешенных рангов R_j . Весовые коэффициенты β_i отражают наличие диагностических признаков. В простейшем случае выбирают $\beta_1 = \dots = \beta_w = 1/W$. Максимальный ранг $R_m = \max R_j, j \in J$ соответствует рациональным условиям диагностирования и близким к минимальным в каждом классе эмпирическим ошибкам $q_{w \min}$.

Принцип построения СДМ. Принцип инвариантности и коллективного распознавания регламентирует выбор и селекцию ортогональных коллективных диагностических признаков, которые инвариантны к конструкции машины и форме связи с параметрами ее техни-

ческого состояния. Принцип информационной полноты (π -принцип) обеспечивает выбор ортогональных статистических признаков, снижающих вероятность пропуска отказа. Принцип достаточности регламентирует выбор минимального числа датчиков вторичных процессов, сопровождающих работу машины, которые обеспечивают наблюдаемость технического состояния прежде всего путем расширения полосы частот. Принцип структурной гибкости и программируемости обеспечивает реализацию оптимальной параллельно-последовательной структуры распределенных СДМ, исходя из критериев необходимого быстродействия при минимальной стоимости и адаптивного управления измерительными каналами в зависимости от скорости деградации состояния ПМ. Принцип коррекции неидеальности измерительных трактов вычислительными методами на ЭВМ позволяет обеспечивать высокие метрологические свойства СДМ при не-

больших аппаратных затратах. Принцип само-диагностики и автоматизированной поверки всех измерительных каналов СДМ обеспечивает поэтапный ввод и легкий пуск систем в эксплуатацию, простоту обслуживания и ремонта отдельных каналов, высокую метрологическую и функциональную надежность системы, ее выживаемость и приспособляемость к постоянно меняющимся условиям реального производства. Принцип дружественности интерфейса при максимальной информационной емкости экрана представления данных обеспечивает восприятие состояния ПМ как системы в целом при одном взгляде на монитор и получение целеуказывающего предписания на ближайшие неотложные действия. Принцип многоуровневой организации обеспечивает работу с системой независимо от уровня квалификации и ответственности.

Средства СДМ (рис. прил. 3). Каждая КМ содержит m узлов, подлежащих диагно-

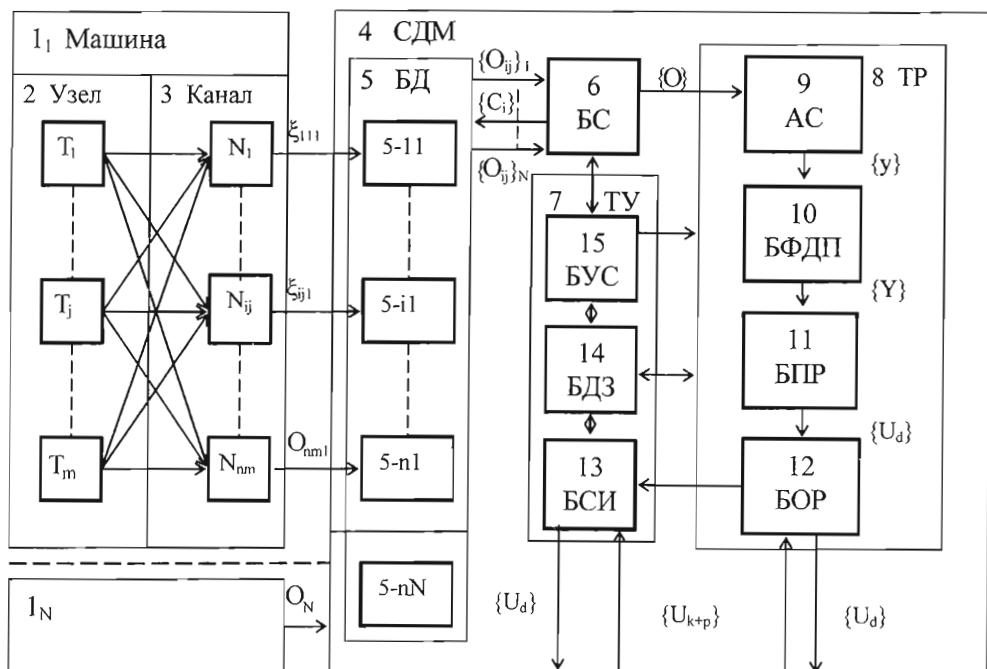


Рис. прил. 3. Алгоритм:

I_1, \dots, I_N — машина; 2_1-2_m — диагностируемые узлы в машине; 3_1-3_n — каналы распространения сигналов от m узлов к n датчикам; 4 — СДМ; 5 — блок датчиков (БД); 6 — блок согласования (БС); 7 — тракт управления (ТУ); 8 — тракт распознавания (ТР); 9 — анализатор (АС); 10 — блок формирования диагностических признаков (БФДП); 11 — блок принятия решения (БПР); 12 — блок оповещения, отображения и регистрации (БОР); 13 — блок сетевых интерфейсов (БСИ); 14 — информационные базы данных и знаний (БДЗ); 15 — блок управления и синхронизации (БУС)

стированию, ограничивающих надежность и ресурс. Диагностические сигналы от диагностируемых узлов 2 через каналы 3 распространения колебаний N_{ij} поступают на точки внешней поверхности машины, а затем в СДМ, где после преобразования воспринимаются датчиками 5, реализующими различные методы неразрушающего контроля. Здесь также используются датчики частоты вращения, момента, состава газов и др., позволяющие идентифицировать режим функционирования и привязать постановку диагноза к конкретным рабочим параметрам машины и режимам ее работы. Восприятие сигналов от датчиков, обеспечение режимов их функционирования, самодиагностику обеспечивает блок согласования 6, которым управляет тракт управления 7. В тракте распознавания 8 часть сигналов, по которым осуществляется синхронизация с режимом работы машины, поступает из блока согласования 6 в тракт управления 7. Анализатор сигналов 9 и блок формирования диагности-

ческих признаков 10 осуществляют преобразование массива входных сигналов в массив диагностических признаков. Блок принятия решения 11 на основании входного массива диагностических признаков и эксплуатационных данных, хранящихся в информационной базе данных и знаний 14, определяет состояние машины и выдает требуемую диагностическую информацию и/или указания по ее приведению в допустимое состояние. Блок управления и синхронизации 15 осуществляет общее управление всей системой по определенному алгоритму и/или набору адаптивных алгоритмов, синхронизированных с режимом работы машины. В БПР 11 реализованы способы оценки и прогнозирования ресурса инвариантные к форме связи между вибродиагностическими признаками и параметрами технического состояния, на основе самообучающихся ранговых процедур безэталонной диагностики и прогнозирования.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

IV-14

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ В СОРОКА ТОМАХ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ФРОЛОВ К.В.
Председатель редакционного совета

Члены совета:

Белянин П.Н. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Колесников К.С. (зам. Председателя редсовета и главного редактора), Адамов Е.О., Анфимов Н.А., Асташев В.К., Бессонов А.П., Бюшгенс Г.С., Васильев В.В., Васильев Ю.С., Воронин Г.П., Долбенко Е.Т., Жесткова И.Н., Кирпичников М.П., Клюев В.В., Коптев Ю.Н., Ксеневич И.П., Мартынов И.А., Митенков Ф.М., Новожилов Г.В., Образцов И.Ф., Панин В.Е., Паничев Н.А., Патон Б.Е., Пашин В.М., Платонов В.Ф., Пугин Н.А., Румянцева О.Н., Силаев И.С., Федосов Е.А., Фортов В.Е., Черный Г.Г., Шемякин Е.И.

Раздел IV

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН

Том IV-14

ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Редакторы-составители:

д-р техн. наук, профессор **Н.А. Иващенко**
д-р техн. наук, профессор **А.А. Александров**

Ответственный редактор академик РАН

К.С. Колесников

Редакторы тома: **Н.А. Иващенко** (Введение. Теория и расчет рабочих процессов двигателей); **Н.Д. Чайнов** (Основы конструирования и расчета двигателей и их основных узлов и деталей); **Л.В. Грехов, Ю.А. Гришин, В.А. Марков** (Системы двигателей); **В.А. Звонов, В.Е. Тольский** (Снижение вредного влияния двигателей на окружающую среду); **Б.М. Бунаков** (Топлива, смазочные материалы и охлаждающие жидкости); **В.Н. Костюков, С.В. Гусаков** (Испытания и диагностика двигателей); **В.А. Рыжов, Н.Д. Чайнов** (Конструкции, технико-экономические показатели современных двигателей); **В.Н. Никишин** (Приложение. Качество двигателей как основа обеспечения их конкурентоспособности)

УДК 621.01/03
ББК 34.44
М38

Авторы: Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков, Э.В. Аболтин, С.А. Афинеевский, Ф.Б. Барченко, Д.И. Бельский, А.О. Борисов, Г.В. Борисова, Б.М. Бунаков, В.А. Вагнер, А.В. Васильев, В.И. Волков, А.И. Гайворонский, Ю.В. Галышев, М.Д. Гарипов, Л.Н. Голубков, А.Н. Гоц, Ю.А. Гришин, С.В. Гусаков, Р.И. Давтян, А.В. Дмитриевский, В.Г. Дьяченко, Р.Д. Еникеев, Ю.К. Есеновский-Лашков, В.Г. Заренбин, В.А. Звонов, А.А. Зеленцов, В.А. Зенкин, В.И. Ивин, Д.В. Извеков, А.А. Ипатов, Р.З. Кавтарадзе, В.Ф. Каменев, Б.В. Кисуленко, В.Б. Клименков, А.В. Козлов, А.Д. Конев, Г.А. Конкс, Ю.А. Корольков, В.Н. Костюков, Л.Д. Котельников, А.Н. Краснокутский, А.Г. Кузнецов, А.С. Кулешов, В.Ф. Кутенев, Н.А. Лапушкин, В.А. Лашко, В.Г. Лежнев, В.А. Лукшо, М.В. Мазинг, Н.С. Маластовский, А.П. Марченко, Д.Д. Матиевский, Л.Л. Мягков, М.В. Нагайцев, А.П. Науменко, В.Н. Никишин, А.А. Обозов, П.Л. Озимов, Д.О. Онищенко, В.И. Панин, В.И. Панчишный, И.В. Парсаданов, Н.Н. Патрахальцев, А.В. Первушин, М.Р. Петриченко, Е.Г. Пономарев, С.В. Путинцев, М.И. Раенко, В.С. Рогов, И.Б. Рудой, В.А. Рыхков, М.А. Салтыков, Г.Д. Седельников, В.В. Соколов, В.И. Сонкин, Г.Г. Тер-Мкrtичян, А.Н. Тиняков, В.Е. Тольский, В.А. Федоров, Т.А. Филипоянц, Н.А. Хрипач, Н.Д. Чайнов, А.А. Черноусов, В.И. Шатров, М.Г. Шатров, В.В. Эфрос, А.И. Яманин

Рабочая группа Редакционного совета: К.С. Колесников, В.К. Асташев, П.Н. Белянин, А.П. Бессонов, В.В. Васильев, Н.Ф. Иванников, Г.В. Москвитин, Е.Т. Долбенко, И.Н. Жесткова

Машиностроение. Энциклопедия. Ред совет: К.В. Фролов (пред.) и др. — М38 М.: Машиностроение.

Двигатели внутреннего сгорания. Т. IV-14 / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др.; Под общ. ред. А.А. Александрова и Н.А. Иващенко. 2013. 784 с.: ил.

ISBN 978-5-94275-623-9 (Т. IV-14)
ISBN 5-217-01949-2

Изложены вопросы теории рабочих процессов и моделирования двигателей внутреннего сгорания, а также принципы конструирования и расчеты основных узлов и деталей на прочность, жесткость и надежность. Рассмотрены основные системы (питания, управления, наддува, охлаждения, смазочная, очистки, пуска и реверсирования), методы снижения вредного влияния двигателей на окружающую среду. Приведены характеристики топлив (в том числе альтернативных), смазочных материалов и охлаждающих жидкостей, методы испытаний и технического диагностирования двигателей. Рассмотрены циклы, конструктивные особенности и основные технико-экономические показатели современных двигателей, включая нетрадиционные, и установок. Сформулированы принципы обеспечения качества и конкурентоспособности двигателей.

УДК 621.01/03
ББК 34.44

ISBN 978-5-94275-623-9 (Т. IV-14)
ISBN 5-217-01949-2

© ООО «Издательство Машиностроение», 2013

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

3.9.2. Типы систем автоматического управления	486	5.1.2. Альтернативные виды топлива (В.А. Марков)	601
3.9.3. Конструктивные особенности и статический расчет регуляторов	489	5.1.3. Дизельное биотопливо (Е.Г. Пономарев, В.В. Соколов)	611
3.9.4. Динамические характеристики САУ	496	5.1.4. Водород как перспективное топливо для автомобильных энергостановок (Н.А. Хрипач)	615
3.9.5. Использование электронных устройств в САУ	503	Глава 5.2. Смазочные и охлаждающие жидкости	624
Глава 3.10. Системы автоматического управления и регулирования бензиновых двигателей (А.Г. Кузнецов, В.А. Марков)	506	5.2.1. Моторные масла (Б.М. Бунаков)	624
3.10.1. Этапы развития систем регулирования и управления двигателей	506	5.2.2. Присадки к маслам (А.Н. Тиняков)	631
3.10.2. Основные элементы комплексных электронных систем регулирования и управления	518	5.2.3. Синтетические масла (А.Н. Тиняков)	633
Список литературы	525	5.2.4. Расход масла и пути его снижения (С.А. Афинеевский, А.В. Первушин)	634
Раздел 4. СНИЖЕНИЕ ВРЕДНОГО ВЛИЯНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	527	5.2.5. Энергосберегающие масла (Д.В. Извеков)	636
Глава 4.1. Токсичность отработавших газов двигателей	527	5.2.6. Охлаждающие жидкости (А.В. Первушин)	637
4.1.1. Экологическая безопасность двигателя в полном жизненном цикле (В.А. Звонов, А.В. Козлов)	527	Список литературы	640
4.1.2. Токсичные компоненты в выпускных газах (В.А. Звонов, А.В. Козлов)	530	Раздел 6. ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКА ДВИГАТЕЛЕЙ	641
4.1.3. Нормирование выбросов токсичных компонентов (В.А. Марков)	532	Глава 6.1. Испытания двигателей (С.В. Гусakov, В.В. Эфрос, А.Н. Гоц)	641
4.1.4. Уменьшение токсичности выпускных газов воздействием на рабочий процесс (В.А. Марков)	541	6.1.1. Цели и виды испытаний. Основные требования	641
4.1.5. Выпускные системы с нейтрализацией и фильтрацией отработавших газов (В.И. Панчишин)	550	6.1.2. Определение характеристик двигателей	642
Глава 4.2. Шум и вибрация автомобильных двигателей (В.Е. Тольский, А.Д. Конев)	560	6.1.3. Оборудование для испытаний двигателей	649
4.2.1. Нормирование внешнего уровня шума автотранспортных средств	560	6.1.4. Ускоренные испытания двигателей	657
4.2.2. Составляющие шума двигателей	562	Глава 6.2. Техническая диагностика двигателей (В.С. Рогов, Н.С. Маластовский, А.А. Обозов)	661
4.2.3. Методы исследований влияния структурного шума двигателя на внешний шум автомобиля	566	6.2.1. Задачи технической диагностики	661
4.2.4. Шум и вибрация отдельных систем и механизмов	575	6.2.2. Двигатель как объект диагностирования	662
4.2.5. Шум выпускных систем двигателей. Автомобильные глушители	578	6.2.3. Средства и методы диагностики двигателей	665
4.2.6. Применение виброакустических материалов	583	6.2.4. Функциональное техническое диагностирование судовых дизелей большой мощности	672
4.2.7. Вибрация двигателя и силовой передачи	587	6.2.5. Вибродиагностика двигателей (В.Н. Костюков, А.П. Науменко)	679
Список литературы	595	Список литературы	681
Раздел 5. ТОПЛИВА, СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА И ОХЛАЖДАЮЩИЕ ЖИДКОСТИ	597	Раздел 7. КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОВРЕМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	683
Глава 5.1. Топлива	597	Глава 7.1. Дизели наземных транспортных средств (П.Л. Озимов, В.Ф. Эфрос, А.Н. Гоц)	683
5.1.1. Физико-химические характеристики топлив и их ассортимент (Б.М. Бунаков, Д.В. Извеков)	597	Глава 7.2. Судовые дизели (В.А. Лашко, Г.А. Конкс)	703
		7.2.1. Судовые среднеоборотные двигатели	703
		7.2.2. Судовые малооборотные двигатели	708
		7.2.3. Системы утилизации теплоты судовых двигателей (Г.Д. Седельников)	717

Глава 7.3. Альтернативные двигатели и комбинированные установки	724	Приложение. КАЧЕСТВО ДВИГАТЕЛЕЙ КАК ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ.	762	
7.3.1. Двигатели с внешним подводом теплоты (А.И. Гайворонский, В.А. Федоров)	724		1. Качество и системы менеджмента качества (В.Н. Никишин)	762
7.3.2. Свободнопоршневые двигатели (Н.А. Лапушкин)	730		2. Стандартизация и унификация двигателей (А.А. Ипатов, Б.В. Кисуленко)	768
7.3.3. Комбинированные (гибридные) установки с двигателями внутреннего горения (В.Г. Лежнев, Н.А. Хрипач, В.Г. Дьяченко)	735		3. Характеристика компонентов двигателей и направления развития их производства (А.А. Ипатов, Ю.А. Корольков)	771
7.3.4. Двигатели с регулируемыми степенью сжатия и рабочим объемом (Г.Г. Тер-Мкртычян, В.Ф. Кутенев)	743		4. Повышение надежности поршневых машин, оснащенных системой диагностики и мониторинга (СДМ) (В.Н. Костюков)	775
7.3.5. Интеллектуальные двигатели (В.А. Лашко)	754		Список литературы	781
Список литературы	761	Предметный указатель	782	

Печать офсетная. Усл. печ. л. 63,7.
Уч.-изд. л. 78,2. Заказ 2730

ООО «Издательство Машиностроение»,
107076, Москва, Строгинский пер., 4.
www.mashin.ru

Отпечатано в ППП «Типография «Наука»,
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-94275-623-9



9 785942 756239