

## Разработка компьютерной настраиваемой модели двигателя внутреннего сгорания

И. П. Добролюбов, О. Ф. Савченко, В. В. Альт, С. Н. Ольшевский  
*Сибирский физико-технический институт аграрных проблем Россельхозакадемии  
Новосибирск, Россия*  
e-mail: sof-oleg46@yandex.ru

Рассмотрены вопросы применения настраиваемой компьютерной модели для идентификации состояния двигателя внутреннего сгорания с помощью измерительной экспертной системы. Рассчитаны функции чувствительности изменяемых параметров модели. В результате моделирования динамических процессов двигателя получены зависимости силовой функции и углового ускорения коленчатого вала от угла поворота коленчатого вала при появлении в двигателе различных существенных нелинейностей — “зона нечувствительности”, “сухое трение”, “люфт”.

*Ключевые слова:* параметры технического состояния двигателя внутреннего сгорания, нелинейные элементы, идентификация динамических объектов, компьютерная настраиваемая модель, измерительная экспертная система.

### Введение

Совершенствование имеющихся и формирование новых методов идентификации состояния двигателей внутреннего сгорания (ДВС) постоянно находится в центре внимания исследователей. Это способствует улучшению технического обслуживания, своевременному проведению ремонтных воздействий для обеспечения работоспособности двигателей, увеличению ресурса ДВС и в целом повышению эффективности использования техники. С целью обеспечения работоспособности требуется разработка средств диагностирования ДВС, в том числе на основе моделирования быстропротекающих физических рабочих процессов и создания моделей динамики двигателя.

Из-за разброса параметров впрыскивания и сгорания топлива мгновенные значения крутящего момента и углового ускорения ДВС от цикла к циклу являются случайными величинами. В каждом цикле работы двигателя содержатся также детерминированные составляющие крутящего момента и углового ускорения от неуравновешенных и остаточных сил инерции. Кроме того, при экспертизе структурных ресурсных параметров необходимо измерять и анализировать более сложные процессы. Это прежде всего вызвано недостаточным для обнаружения (измерения) уровнем данных процессов, отражающих ресурсные параметры, а также разнообразием существенно нелинейных элементов (“зона нечувствительности”, “сухое трение”, “люфт”), характеризующих эти параметры и вызывающих значительный разброс их значений.

Основные положения разработки математической модели ДВС, изложенные В.И. Крутовым [1], получили развитие в работе [2]. Известны также некоторые модели, использование которых возможно для диагностирования ДВС различного назначения [3–5]. Однако применение этих моделей затруднено для целей экспертизы технического

состояния автотракторных ДВС и его компонентов в условиях эксплуатации. В результате многолетних исследований, проведённых в СибФТИ [6–16], данные модели уточняются и развиваются с целью их использования при идентификации состояния ДВС в эксплуатационных условиях. Это позволило обосновать применение указанных методов, создать информационное, техническое, метрологическое, алгоритмическое и программное обеспечения измерительной экспертной системы двигателя (ИЭСД). Однако практическое применение ИЭСД, особенно при многообразии разномарочных двигателей, является достаточно сложным, трудоёмким и недостаточно оперативным. Повысить эффективность эксплуатации ИЭСД позволяет автоматизация её разработки, основанная на применении настраиваемой модели [17]. Использование при этом пакетов программ MATLAB и LABVIEW существенно облегчает моделирование. Данной проблеме и посвящена настоящая работа. Теоретические методы идентификации ДВС с моделью изложены в [7], а примеры практического применения этих методов в эксплуатационных условиях приведены в [6–9].

## 1. Постановка задачи

Идентификация динамических объектов в общем случае состоит в определении их структуры и параметров по измеряемым данным — входным воздействиям и выходным процессам — и осуществляется при помощи настраиваемой модели той или иной структуры, параметры которой могут изменяться.

В качестве примера рассмотрим упрощённую одномерную схему непрерывной настраиваемой модели объекта экспертизы (ОЭ). Целесообразный критерий идентификации (рис. 1)

$$E = L[q(e)] \rightarrow \min,$$

где  $L$  — функционал от чётной функции  $q(e)$ ,  $e = y - w$  — погрешность идентификации,  $w = G[u; \alpha]$ . Настройка модели  $G$  осуществляется изменением параметров  $\alpha^T = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$  в соответствии со значением градиента  $E$ :

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\gamma \nabla E,$$

где  $\gamma = \alpha(0)$  — начальное условие. Компоненты вектора градиента определяются дифференцированием:

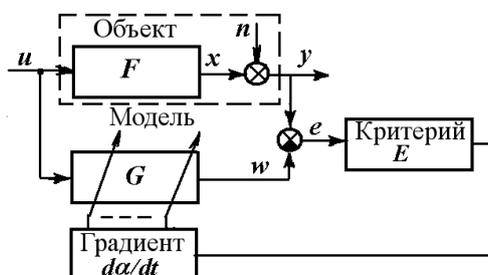


Рис. 1. Схема непрерывной настраиваемой модели:  $u$  — входное управляющее воздействие;  $x$  и  $w$  — выходные процессы ОЭ и модели;  $n$  — возмущающие воздействия;  $F$  и  $G$  — операторы связи

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha_j} = L \left[ \frac{\partial q(e)}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \alpha_j} \right]; \quad \frac{\partial e}{\partial \alpha_j} = -\frac{\partial w}{\partial \alpha_j} = -\frac{\partial G[u; \boldsymbol{\alpha}]}{\partial \alpha_j},$$

причём  $\partial w/\partial \alpha_j$  представляет собой функцию чувствительности (ФЧ) параметра  $\alpha_j$ .

Градиент  $E$

$$\nabla E = -L \left[ \frac{\partial q(e)}{\partial e} \mathbf{K}[u; \boldsymbol{\alpha}] \right],$$

где  $K_j[u; \boldsymbol{\alpha}] = \frac{\partial G[u; \boldsymbol{\alpha}]}{\partial \alpha_j}$ . Множество  $\mathbf{K}[u; \boldsymbol{\alpha}]$  позволяет получить все ФЧ параметров  $\boldsymbol{\alpha}$ .

Итак, ставится задача вычисления функций чувствительности изменяемых параметров модели и далее — использования модели динамики ДВС для вычисления углового ускорения коленчатого вала и его составляющих с целью идентификации состояния двигателя.

## 2. Вычисление функций чувствительности

Применение ФЧ позволяет провести анализ временных и частотных характеристик объекта экспертизы или их оценок, определить степень влияния изменения параметров (показателей) объекта экспертизы (ОЭ) на эти характеристики, вызванные разбросом значений параметров и другими факторами. При анализе удобно применение логарифмической функции чувствительности (ЛФЧ), которая характеризует относительное изменение выходной характеристики  $R$  (или её оценки) ОЭ или модели, вызванное соответствующим изменением  $i$ -го параметра (показателя) ОЭ или модели  $b_i$ . В первом приближении ЛФЧ имеет вид

$$\Lambda_i = \frac{\Delta R}{R} \bigg/ \frac{\Delta b_i}{b_i} \approx \frac{\partial R}{R} \bigg/ \frac{\partial b_i}{b_i} = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln b_i} = \frac{b_i}{R} \mathcal{D}_i,$$

где  $\mathcal{D}_i = (\partial R/\partial b_i)_0$  — ФЧ, индекс “ноль” означает, что частные производные находятся вблизи начального значения  $b_i(0)$ .

При одновременном изменении  $m$  параметров ОЭ или модели абсолютное и относительное изменение величины  $R$  запишется соответственно как

$$\Delta R_i \approx \sum_{i=1}^m \mathcal{D}_i \Delta b_i = \sum_{i=1}^m \frac{R}{b_i} \Lambda_i \Delta b_i, \quad \delta R_i = \frac{\Delta R_i}{R} = \sum_{i=1}^m \Lambda_i \delta b_i = \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{R} \mathcal{D}_i \delta b_i.$$

*Пример настройки модели.* Рассмотрим упрощённое описание двигателя внутреннего сгорания (ОЭ и модели), которым можно охарактеризовать, например, динамику изменения угловых скорости  $\omega(t)$  и ускорения  $\varepsilon(t)$  коленчатого вала в окрестности квазистатического режима  $\omega = \omega_j^*$ :

$$\frac{dy}{dt} + ay = u, \quad \frac{dw}{dt} + \alpha w = u.$$

Уравнение чувствительности модели

$$\frac{d\nu}{dt} + \alpha \nu = -w, \quad \text{или} \quad \frac{d\Lambda_\alpha}{dt} + \alpha \Lambda_\alpha = -\alpha,$$

где  $\nu = \partial w/\partial \alpha = \mathcal{D}_\alpha$ ,  $\Lambda_\alpha = (\alpha/w)\mathcal{D}_\alpha$ . Так как  $\Lambda_{\alpha i} = \delta_{wi}/\delta_{\alpha i}$ ,  $\delta_{wi}$  — относительное отклонение выходного процесса,  $\delta_{\alpha i}$  — относительное отклонение параметра  $\alpha_i$ , то для

настройки модели в этом уравнении целесообразно применить зависимости отклонений параметров ДВС. Например [6, 8, 18], отклонение угловой скорости коленчатого вала, вызванное изменением индикаторного момента, равно

$$\delta_{\omega F} = -\delta_F \{t/[T_1(1 - e^{-t/T_1})] + 1\},$$

где  $\delta_F$  — относительное отклонение параметра  $\bar{F}_d = -(d\bar{M}_e/d\omega)^*$  от среднего значения в окрестности частоты  $\omega^*$ ,  $\bar{M}_e$  — крутящий момент,  $T_1 = \bar{J}_d/\bar{F}_d$  — постоянная времени двигателя,  $\bar{J}_d$  — момент инерции ДВС.

При использовании среднеквадратичного критерия погрешности идентификации

$$E = e^2 = (y - w)^2 \rightarrow \min$$

получим

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\gamma \frac{\partial E}{\partial \alpha} = -2\gamma v(y - w).$$

В этом случае для настройки модели можно применять метод наискорейшего спуска, поскольку от параметра  $\alpha$  зависит только величина  $w$ .

### 3. Использование модели динамики двигателя внутреннего сгорания

Более сложной для настройки является модель динамики ДВС. С применением пакетов программ MATLAB и LABVIEW и с учётом опыта разработчиков [6, 9, 11, 16, 18] в СибФТИ создана модель динамики ДВС, регулятора скорости, системы автоматического регулирования скорости. Эта модель учитывает нелинейность и нестационарность отдельных звеньев двигателя, влияние изменения большого числа важнейших параметров отдельных агрегатов и систем, а также существенных нелинейностей и других отклонений на выходные процессы двигателя в функции времени, углового перемещения, скоростного и нагрузочного режимов. При этом рассчитываются временные, частотные и статистические характеристики процессов, их частные и интегральные показатели. Экспертиза состояния ДВС с помощью данной настраиваемой модели применима как при стендовых испытаниях, так и в эксплуатационных условиях. Ввиду значительного объёма реализованной математической модели в статье приведены только её отдельные фрагменты.

#### 3.1. Вычисление углового ускорения коленчатого вала

В стационарном режиме за счёт неравномерности вращения коленчатого вала и в режиме свободного разгона (при моменте нагрузки  $M_{\text{наг}} = 0$ ) угловое ускорение коленчатого вала определяется зависимостью

$$\varepsilon = \frac{1}{J_d} \left( M_i - \omega^2 \frac{dJ_d}{d\varphi} - M_{\text{вп}} - M_{\text{наг}} \right) = \frac{1}{J_d} (M_i^k + M_i^r - M_{\text{ин}} - M_{\text{вп}} - M_{\text{наг}}), \quad (1)$$

где  $J_d = J_d(\varphi)$  — приведённый момент инерции ДВС и нагрузочных масс (при моменте нагрузки  $M_{\text{наг}} = 0$  — собственный приведённый к коленчатому валу момент инер-

ции ДВС);  $\omega$  — угловая скорость коленчатого вала (частота вращения  $n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega d\varphi$ );

$\varphi$  — угол поворота коленчатого вала (ПКВ);  $M_i = M_i(\omega, \psi, \varphi) = M_i^K + M_i^G$  — индикаторный момент двигателя ( $\psi$  — положение органа топливоподачи):  $M_i^K = \sum_{\kappa=1}^{i_{\text{ц}}} M_{i1(\kappa)}^K$  и  $M_i^G = \sum_{\kappa=1}^{i_{\text{ц}}} M_{i1(\kappa)}^G$  — компрессионная и газовая составляющие индикаторного момента;  $M_{i,1}^K$  и  $M_{i,1}^G$  — компрессионная и газовая составляющие одного цилиндра;  $i_{\text{ц}}$  — число цилиндров;  $M_{\text{ин}} = M_{\text{ин}}(\omega, \varphi) = M_{\text{ин}}^{\text{рег}}(\varphi - \zeta_m) + M_{\text{ин}}^{\text{ост}} = \omega^2 \frac{dJ_{\text{д}}}{d\varphi}$  — инерционная составляющая крутящего момента, содержащая регулярную составляющую, вызванную неуравновешенными инерционными силами (например, у двигателя компоновки 4-Р это вторая гармоника частоты вращения), и остаточную составляющую случайного характера, присущую всем двигателям;  $M_{\text{вп}} = M_{\text{вп}}(\omega, \varphi)$  — момент внутренних потерь (преимущественно трения).

Уравнение (1) при  $M_{\text{нар}} = \text{const}$  или  $M_{\text{нар}} = 0$  можно представить в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon^K + \varepsilon^G + \varepsilon_{\text{ин}}^{\text{рег}} + \varepsilon_{\text{ин}}^{\text{ост}} + \varepsilon_{\text{вп}} = \\ &= \sum_{m=1}^{i_{\text{ц}}} \varepsilon_{i1}^K(\varphi - \xi_m) + \sum_{m=1}^{i_{\text{ц}}} \varepsilon_{i1}^G(\varphi - \xi_m) + \sum_{m=1}^{i_{\text{ц}}} \varepsilon_{\text{ин}1}(\varphi - \zeta_m) + \varepsilon_{\text{ин}}^{\text{ост}} + \varepsilon_{\text{вп}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\xi_m$  — угол сдвига по фазе (по углу ПКВ) в соответствии с диаграммой распределения вспышек по цилиндрам;  $\zeta_m$  — угол сдвига по фазе между инерционными составляющими, зависящий от конструктивного расположения кривошипно-шатунных механизмов; индекс 1 — для одного цилиндра.

### 3.2. Вычисление составляющих углового ускорения коленчатого вала

Полное ускорение  $\varepsilon$  содержит составляющие: индикаторные — компрессионную  $\varepsilon^K$  и газовую  $\varepsilon^G$ ; инерционные — регулярную  $\varepsilon_{\text{ин}}^{\text{рег}}$  и остаточную  $\varepsilon_{\text{ин}}^{\text{ост}}$ ; внутренних потерь (преимущественно трения)  $\varepsilon_{\text{вп}}$ . Для каждого из цилиндров составляющие полного ускорения

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i1}^K &= \frac{1}{J_{\text{д}}} M_{i1}^K(\varphi - \xi_{1m}) = \frac{1}{J_{\text{д}}} \nu_{\text{ц}} p_c K_1(\varphi), \\ \varepsilon_{i1}^G &= \frac{1}{J_{\text{д}}} M_{i1}^G(\varphi - \xi_{1m}) = \frac{1}{J_{\text{д}}} \nu_{\text{ц}} p_i S_1(\varphi), \\ \varepsilon_{\text{ин}1} &= - \left[ \frac{1}{J_{\text{д}}} M_{i1}^{\text{рег}}(\varphi - \zeta_{1m}) + \frac{M_{\text{ин}1}^{\text{ост}}}{J_{\text{д}}} \right] = \varepsilon_{\text{ин}1}^{\text{рег}} + \varepsilon_{\text{ин}1}^{\text{ост}}, \\ \varepsilon_{\text{ц}} &= \varepsilon_{i1}^K + \varepsilon_{i1}^G + \varepsilon_{\text{ин}1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\text{ц}}$  — ускорение коленчатого вала, вызванное работой одного цилиндра (далее — ускорение цилиндра);  $\nu_{\text{ц}}$  — объём цилиндра;  $p_c$  — давление сжатия;  $p_i$  — среднее индикаторное давление;  $K(\varphi)$  и  $S(\varphi)$  — известные из теории ДВС безразмерные компрессионная и газовая (индикаторная) силовые функции.

Для четырёхтактного ДВС

$$\varepsilon_{\text{ц}} = \begin{cases} \varepsilon(t) & \text{при } \varphi \in \left[ \frac{(k-1)4\pi}{i_{\text{ц}}}; \frac{4k\pi}{i_{\text{ц}}} \right], \\ 0 & \text{при } \varphi \in \left[ \frac{(k-1)4\pi}{i_{\text{ц}}}; \frac{4k\pi}{i_{\text{ц}}} \right], \quad k = \overline{1, i_{\text{ц}}}. \end{cases}$$

При определённых скоростном и нагрузочном режимах величины  $M_i^k$ ,  $M_{вп}$ ,  $M_{ин}$  и  $M_{наг}$  являются неизменными (значит  $\varepsilon^k$ ,  $\varepsilon_{ин}^{рег}$ ,  $\varepsilon_{ин}^{ост}$ ,  $\varepsilon_{вп}$  и  $\varepsilon_{наг}$  также неизменны) и информацию о крутящем моменте и мощности двигателя и отдельных цилиндров несёт газовая составляющая углового ускорения  $\varepsilon^r$ . Следовательно, если обеспечить разделение полного ускорения коленчатого вала ДВС на составляющие для каждого из цилиндров  $\varepsilon_{i1}^r$ , которые повторяют по форме функцию  $S(\varphi)$  в стационарном режиме полной нагрузки и в разгоне, то по ним можно оценить неравномерность работы цилиндров, а в выбеге при низких частотах вращения по составляющим  $\varepsilon_{i1}^k$ , повторяющим по форме функцию  $K(\varphi)$ , — герметичность отдельных цилиндров. В качестве признаков состояния используются также следующие характеристики: временные (переходная и импульсная), частотные (спектральные), скоростные (зависимость процессов от скоростного режима работы ДВС), статистические (дифференциальный закон распределения вероятностей, авто- и взаимокорреляционные функции, энергетические спектры) и интегральные (плотность, центр тяжести процесса).

### 3.3. Определение зависимостей параметров ДВС от нелинейных элементов

При воздействии случайного процесса на существенные нелинейности на их выходе происходит деформация дифференциального закона распределения вероятностей: появля-

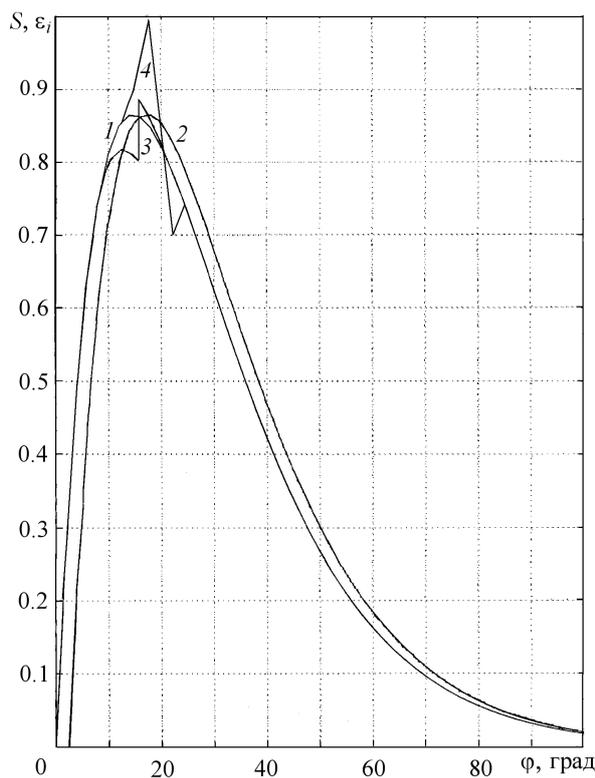


Рис. 2. Зависимости силовой функции  $S(\varphi)$  и углового ускорения  $\varepsilon_i(\varphi)$  коленчатого вала от угла ПКВ при отсутствии нелинейностей (кривая 1), при появлении значительных нелинейностей: “зона нечувствительности” (кривая 2), “сухое трение” (кривая 3), “люфт” (кривая 4)

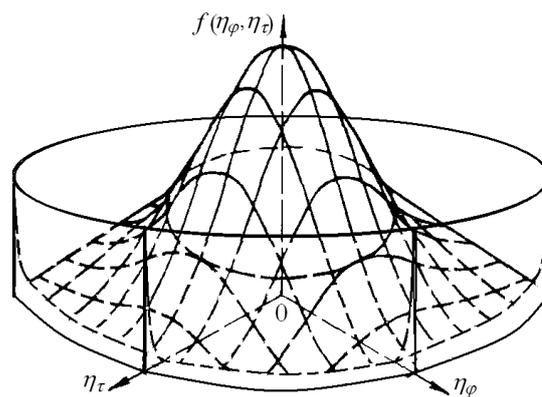


Рис. 3. Двумерный закон распределения вероятностей рабочих процессов ДВС при появлении значительного уровня нелинейности типа “люфт”

ются выбросы, происходит изменение дисперсии по сравнению с её входным значением, что отражается в возникновении среднеквадратичной разности процессов на входе  $\xi(t)$  и выходе  $\eta(t)$ . В качестве примера на рис. 2 приведены полученные с помощью пакета для моделирования технических систем MATLAB/Simulink зависимости силовой функции  $S(\varphi)$  и углового ускорения  $\varepsilon_i(\varphi)$  коленчатого вала от угла ПКВ при появлении в двигателе различных существенных нелинейностей, а на рис. 3 представлена поверхность двумерного нормального закона распределения вероятностей в функции времени  $\tau$  и угла поворота коленного вала  $\varphi$  при нелинейности типа “люфт”.

## Заключение

В работе предложена схема настраиваемой модели ДВС, позволяющая провести регулировку параметров модели по критерию минимума погрешности идентификации. Получены уравнения функции чувствительности для изменяемых параметров модели. На основании упрощённого описания работы двигателя оценена динамика изменения угловой скорости и ускорения коленчатого вала и показана возможность использования зависимостей отклонений параметров ДВС, вызванных изменением индикаторного момента, для настройки модели.

С помощью настраиваемой модели динамики ДВС рассчитаны угловое ускорение коленчатого вала и его составляющие — индикаторные, инерционные и внутренних потерь, применяемые для идентификации состояния двигателя, его агрегатов и систем. В качестве признаков состояния используются временные, частотные, скоростные и статистические характеристики. Приведены зависимости силовой функции и углового ускорения коленчатого вала от угла поворота коленчатого вала при появлении в двигателе различных нелинейностей.

Методы идентификации технического состояния ДВС измерительной экспертной системой с помощью настраиваемой модели позволяют повысить оперативность и снизить трудоёмкость процесса экспертизы, определить отклонение от требуемых значений большинства функциональных и ресурсных структурных параметров двигателей, расширить перечень методов экспертизы ДВС и его отдельных компонентов, что обеспечивает повышение точности и достоверности экспертного заключения.

Полученные результаты имеют общий характер и могут быть эффективными при автоматической экспертизе приработки ДВС, при автоматическом управлении агрегатами с характерной для сельскохозяйственного производства резкопеременной нагрузкой — машинно-тракторным агрегатом, дизель-генератором.

## Список литературы

- [1] Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1979. 615 с.
- [2] Добролюбов И.П., Лившиц В.М. Динамический метод диагностики автотракторных двигателей. Принципы построения диагностических моделей переходных процессов: Метод рекомендации. Новосибирск: СибИМЭ СО ВАСХНИЛ, 1981. 88 с.
- [3] Гребенников А.С., Гребенников С.А., Никитин А.В. Математическая модель внутрициклового изменения угловой скорости коленчатого вала дизеля на холостом ходу // Изв. ВолгГТУ. Межвуз. сб. науч. ст. 2013. Т. 5, № 12. С. 42–46.

- [4] ОБОЗОВ А.А., ТАРИЧКО В.И. Математическое имитационное моделирование рабочего процесса автомобильного ДВС в целях получения диагностической информации // Двигателестроение. 2013. № 2. С. 21–25.
- [5] ЖЕРНАКОВ С.В., РАВИЛОВ Р.Ф. Контроль и диагностика технического состояния авиационного двигателя на основе экспертной системы С-PRIZ // Вестник УфимГАТУ. 2012. Т. 16, № 6. С. 3–11.
- [6] АЛЬТ В.В., ДОБРОЛЮБОВ И.П., САВЧЕНКО О.Ф. Информационное обеспечение экспертизы состояния двигателей. Новосибирск: СибФТИ СО РАСХН, 2001. 220 с.
- [7] ДОБРОЛЮБОВ И.П., САВЧЕНКО О.Ф., АЛЬТ В.В. Идентификация состояния сельскохозяйственных объектов измерительными экспертными системами. Новосибирск: СибФТИ СО РАСХН, 2003. 209 с.
- [8] САВЧЕНКО О.Ф., ДОБРОЛЮБОВ И.П., АЛЬТ В.В., ОЛЬШЕВСКИЙ С.Н. Автоматизированные технологические комплексы экспертизы двигателей. Новосибирск: СибФТИ СО РАСХН, 2006. 272 с.
- [9] АЛЬТ В.В., ДОБРОЛЮБОВ И.П., САВЧЕНКО О.Ф., ОЛЬШЕВСКИЙ С.Н. Техническое обеспечение измерительных экспертных систем машин и механизмов в АПК / Под ред. В.В. Альта. Новосибирск: СибФТИ, Сиб. регион. отделение, Россельхозакадемия, 2013. 523 с.
- [10] САВЧЕНКО О.Ф. Экспертиза технического состояния ДВС на основе интеллектуального анализа данных // Труды ГОСНИТИ. 2008. Т. 101. С. 96–103.
- [11] ДОБРОЛЮБОВ И.П., САВЧЕНКО О.Ф., ОЛЬШЕВСКИЙ С.Н. Оптимизация обнаружения и измерения параметров ДВС измерительной экспертной системой // Ползуновский вестник. 2011. № 2/2. С. 275–279.
- [12] САВЧЕНКО О.Ф., ОЛЬШЕВСКИЙ С.Н., ДОБРОЛЮБОВ И.П. Развитие информационной технологии для определения технического состояния тракторных двигателей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 11. С. 27–30.
- [13] ДОБРОЛЮБОВ И.П., САВЧЕНКО О.Ф. Выбор совокупности косвенных диагностических параметров для измерительной экспертной системы ДВС // Двигателестроение. 2012. № 2. С. 30–33.
- [14] Пат. RU 2175120 С2. МПК G01M15/04. МКИ G01M15/00. Способ определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания и экспертная система для его осуществления / И.П. Добролюбов, О.Ф. Савченко, В.В. Альт. Бюл. № 29. 20.10.2001.
- [15] Пат. RU 2293962 С2. МПК G01M15/04. Способ определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания и экспертная система для его осуществления / И.П. Добролюбов, О.Ф. Савченко, В.В. Альт. Бюл. № 5. 20.02.2007.
- [16] Пат. RU 2428672 С2. МПК G01M15/04. Способ определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания и экспертная система для его осуществления / И.П. Добролюбов, В.В. Альт, О.Ф. Савченко, С.Н. Ольшевский. Бюл. № 25. 10.09.2011.
- [17] Эйкофф П. Основы идентификации систем управления: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 684 с.
- [18] ДОБРОЛЮБОВ И.П., ЛИВШИЦ В.М., БАШМАКОВА В.Н. Автоматизированное оперативное управление технологическими процессами диагностирования и режимами работы МТА. Информационное, техническое, алгоритмическое и программное обеспечение: Метод. рекомендации. Новосибирск: СибИМЭ СО ВАСХНИЛ, 1989. 208 с.

*Поступила в редакцию 17 мая 2013 г.,  
с доработки — 10 октября 2013 г.*