УДК 62-144.3

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА БАЙЕСА ДЛЯ БЕЗРАЗБОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

[1]Халиуллин Ф.Х., [1]Халиуллин А.Ф., [2]Ахметзянов И.Р., [2]Гильмутдинов И.И.

[1]ФГБОУ «Казанский национальный исследовательский технический университет (Казанский авиационный институт)», Казань, e-mail: khaliullin_kai_adis@mail.ru;

[2]ФГБОУ «Казанский государственный аграрный университет», Казань

Настоящая статья посвящена применению алгоритма Байеса, принятого за основу безразборного метода диагностики двигателей внутреннего сгорания. Данный метод позволяет сократить процесс оценки их технического состояния, и использовать апостериорную информацию по диагностики. Правильный и обоснованный выбор диагностических параметров обеспечивает доступность предложенного метода при одновременном повышении адекватности полученных результатов. Разработан стенд, который позволяет смоделировать ситуационные эксперименты для анализа технического состояния двигателя внутреннего сгорания с различной наработкой. Принимается допущение, что эффективные показатели двигателя зависят как от его конструктивных показателей, так и от параметров рабочего процесса внутри цилиндров. В качестве диагностических параметров предлагаются переходные функции по частоте вращения коленчатого вала, по подаче топлива и по расходу воздуха.

Ключевые слова: безразборная диагностика, диагностические параметры, двигатель внутреннего сгорания, алгоритм Байеса

PECULIARITIES OF USING BAYES ‘ALGORITHM FOR UNLESS DIAGNOSTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

[1]Khaliullin F.Kh., [1]Khaliullin A.F., [2]Akhmetzyanov I.R., [2]Gilmutdinov I.I.

[1]Kazan National Research Technical University (Kazan Aviation Institute), Kazan, e-mail: khaliullin_kai_adis@mail.ru;

[2]Kazan State Agrarian University, Kazan

This article is devoted to the application of the Bayes algorithm as the basis of an indiscriminate method for diagnosing internal combustion engines. This method allows to reduce the process of assessing their technical condition, and to use a posteriori information on diagnostics. The correct and reasonable choice of diagnostic parameters ensures the availability of the proposed method while increasing the adequacy of the results obtained. A stand was developed that allows simulating situational experiments to analyze the technical state of an internal combustion engine with different operating time. It is assumed that the effective performance of the engine depends both on its design parameters and on the parameters of the working process inside the cylinders. As diagnostic parameters, transient functions are proposed according to the engine speed, the fuel supply and the air flow rate.

Keywords: indiscriminate diagnostics, diagnostic parameters, internal combustion engine, Bayes algorithm

Техническая диагностика сложных объектов должна учитывать изменения характеристик самих объектов в эксплуатационных условиях и дать возможность их прогнозирования для выработки правильных методов технического воздействия с целью поддержания исправного состояния самого объекта. Особенно ценным является вариант использования априорно существующей информации по результатам технической эксплуатации подобных объектов [1]. С увеличением сложности объекта и стоимости его восстановления данные требования становятся более актуальными.

Двигатель внутреннего сгорания является сложной динамической системой, которая при принятых допущениях о стационарности его параметров и линейности характеристик описывается системой дифференциальных уравнений. Принятые при этом динамические характеристики адекватно описывают его текущее состояние и могут служить в качестве диагностических параметров при определении остаточного ресурса [2]. При этом очень важным является алгоритм получения значений диагностических параметров и методы их обработки. В настоящее время наряду с традиционными методами все большую популярность находят методы виброакустической диагностики [3, 4] и вейвлет-анализа сигналов [5–7].

Одним из распространенных методов идентификации динамических систем является метод переходных функций [8, 9]. Учитывая зависимость переходных функций двигателя не только от его конструктивного технического состояния, но и от параметров рабочего процесса внутри цилиндра, необходимо рассматривать реакцию как самого двигателя, так и его си-

стем [10, 11]. Необходимо выбрать диагностические параметры, которые учитывают техническое состояние систем топливо- и воздухоподачи, а также состояние цилиндро-поршневой группы.

Рассмотрим выбор диагностических параметров для безразборной диагностики двигателя на основе переходных функций его систем.

Согласно уравнению динамики изменение частоты вращения коленчатого вала определяется через изменение крутящего момента двигателя выражением

$$\Delta M_e = \Delta M_c + I\frac{d\omega}{dt}, \qquad (1)$$

где ΔM_e – приращение крутящего момента двигателя;
ΔM_c – приращение момента сопротивления на валу двигателя;
I – приведенный к коленчатому валу момент инерции подвижных деталей двигателя;
ω – угловая скорость коленчатого вала.

Если примем $\Delta M_c = 0$, то изменение частоты вращения коленчатого вала в переходном процессе описывается уравнением

$$\Delta\omega = \omega_0 + \frac{1}{I}\int_{t_1}^{t_2}\Delta M_e\,dt. \qquad (2)$$

Известно, что развиваемый двигателем крутящий момент M_e зависит как от технического состояния двигателя, так и организации рабочего процесса в цилиндрах, а более точно – от подачи топлива $g_ц$ и воздуха $G_в$. Выбор диагностических параметров технического состояния двигателя производим на основании допущения, что крутящий момент двигателя зависит от качества и величины подаваемых в цилиндры воздуха и топлива, а также компрессии k в самом цилиндре. Подача воздуха в цилиндр двигателя определяется в первую очередь состоянием воздушного фильтра, который оценивается разряжением во впускном коллекторе $P_в$ (степень загрязненности воздушного фильтра) и компрессии в цилиндре, а подача топлива в эксплуатационных условиях определяется регулировочными параметрами топливоподающей аппаратуры – давление впрыска топлива форсунки $P_ф$, а также зависит от наработки двигателя l.

Если принять данные зависимости за основу:

$$\begin{cases} M_e = f\left(G_в, g_ц, k\right); \\ G_в = f\left(k, P_в\right); \\ g_ц = f\left(P_ф, l\right). \end{cases} \qquad (3)$$

Разложения функций M_e, $G_в$, $g_ц$ в ряды, дают следующие выражения:

$$\begin{cases} M_e = M_{e0} + \left(\dfrac{\partial M_e}{\partial G_в}\right)_0 \Delta G_в + \left(\dfrac{\partial M_e}{\partial g_ц}\right)_0 \Delta g_ц + \left(\dfrac{\partial M_e}{\partial k}\right)_0 \Delta k; \\ G_в = G_{в0} + \left(\dfrac{\partial G_в}{\partial k}\right)_0 \Delta k + \left(\dfrac{\partial G_в}{\partial P_в}\right)_0 \Delta P_в; \\ g_ц = g_{ц0} + \left(\dfrac{\partial g_ц}{\partial P_ф}\right)_0 \Delta P_ф + \left(\dfrac{\partial g_ц}{\partial l}\right)_0 \Delta l. \end{cases} \qquad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta M_e = \left(\dfrac{\partial M_e}{\partial G_в}\right)_0 \Delta G_в + \left(\dfrac{\partial M_e}{\partial g_ц}\right)_0 \Delta g_ц + \left(\dfrac{\partial M_e}{\partial k}\right)_0 \Delta k; \\ \Delta G_в = \left(\dfrac{\partial G_в}{\partial k}\right)_0 \Delta k + \left(\dfrac{\partial G_в}{\partial P_в}\right)_0 \Delta P_в; \\ \Delta g_ц = \left(\dfrac{\partial g_ц}{\partial P_ф}\right)_0 \Delta P_ф + \left(\dfrac{\partial g_ц}{\partial l}\right)_0 \Delta l, \end{cases} \qquad (5)$$

где период изменения исследуемых величин находятся в пределах:
– для $\Delta P_в$, $\Delta G_в$: $l \le l_{ТО\ возд.}$,
– для $\Delta P_ф$, $\Delta g_ц$: $l \le l_{ТО\ топл.}$,
– для Δk, Δl: $l \le l_{ресурс\ к.р.}$.
$l_{ТО\ возд.}$ – периодичность технического обслуживания системы воздухоподачи, мото-ч,
$l_{ТО\ топл.}$ – периодичность технического обслуживания системы топливоподачи, мото-ч,
$l_{ресурс\ к.р.}$ – ресурс до капитального ремонта.

После преобразований получаем уравнения, которые характеризуют переходную функцию всего двигателя в зависимости от его технического состояния и технического состояния его систем:

$$\Delta M_e = \left(\frac{\partial M_e}{\partial G_в}\right)_0 \cdot \left(\frac{\partial G_в}{\partial P_в}\right)_0 \Delta P_в + \left(\frac{\partial M_e}{\partial g_ц}\right)_0 \cdot \left(\frac{\partial g_ц}{\partial P_ф}\right)_0 \Delta P_ф +$$

$$+\left(\frac{\partial M_e}{\partial g_ц}\right)_0 \cdot \left(\frac{\partial g_ц}{\partial l}\right)_0 \Delta l + \left[\left(\frac{\partial M_e}{\partial k}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_e}{\partial G_в}\right)_0 \cdot \left(\frac{\partial G_в}{\partial k}\right)_0\right] \cdot \Delta k, \quad (6)$$

$$\Delta\omega = \frac{1}{I}\int_{t_1}^{t_2}\left[\left(\frac{\partial M_e}{\partial G_в}\right)_0 \cdot \left(\frac{\partial G_в}{\partial P_в}\right)_0 \Delta P_в + \left(\frac{\partial M_e}{\partial g_ц}\right)_0 \cdot \left(\frac{\partial g_ц}{\partial P_ф}\right)_0 \Delta P_ф +\right.$$

$$\left.+\left(\frac{\partial M_e}{\partial g_ц}\right)_0 \cdot \left(\frac{\partial g_ц}{\partial l}\right)_0 \Delta l + \left[\left(\frac{\partial M_e}{\partial k}\right)_0 + \left(\frac{\partial M_e}{\partial G_в}\right)_0 \cdot \left(\frac{\partial G_в}{\partial k}\right)_0\right]\Delta k\right] dt. \quad (7)$$

Коэффициенты $\frac{\partial M_e}{\partial G_в}$ и $\frac{\partial M_e}{\partial g_ц}$ характеризуют влияние на изменение крутящего момента двигателя законов и параметров подачи воздуха и топлива, они в процессе эксплуатации меняются с периодичностью технического обслуживания этих систем. Коэффициенты $\frac{\partial G_в}{\partial P_в}$ и $\frac{\partial g_ц}{\partial P_ф}$ показывают изменение показателей воздухо- и топливоподачи в процессе эксплуатации, которые меняются с периодичностью технического обслуживания этих систем. Коэффициенты $\frac{\partial G_в}{\partial k}$ и $\frac{\partial g_ц}{\partial l}$ показывают ухудшение рабочих процессов двигателя и его систем в процессе эксплуатации и изменяются от номинального до предельного значения. Согласно полученным выражениям для идентификации ДВС как динамического объекта необходимо рассматривать переходные функции самого двигателя (по частоте вращения) и его систем воздухо- и топливоподачи.

Для проверки предложенной схемы диагностирования был создан стенд для безразборной диагностики [12], с разработкой прибора для диагностики двигателя внутреннего сгорания по переходным характеристикам [13]. Стенд позволяет создать параметры двигателя для ситуационных испытаний, соответствующие его техническому состоянию при различной наработке. Это дает возможность применить для диагностики алгоритм на основе формулы Байеса [14, 15].

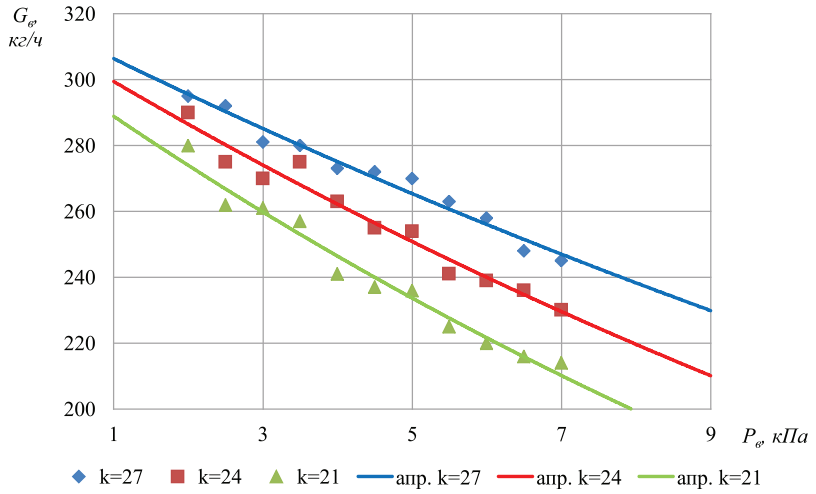

Рис. 1. Зависимость часового расхода воздуха $G_в$, кг/ч, от разряжения во впускном коллекторе $P_в$, кПа, при различных компрессиях k, атм

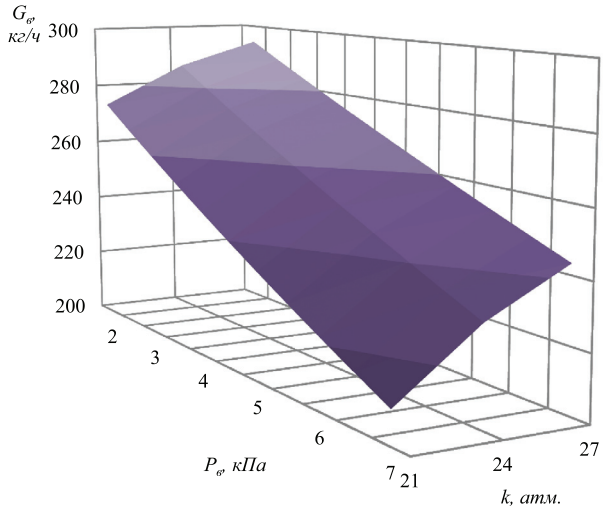

Рис. 2. Зависимость часового расхода воздуха $G_в$, кг/ч, от разряжения во впускном коллекторе $P_в$, кПа, при различных компрессиях k, атм

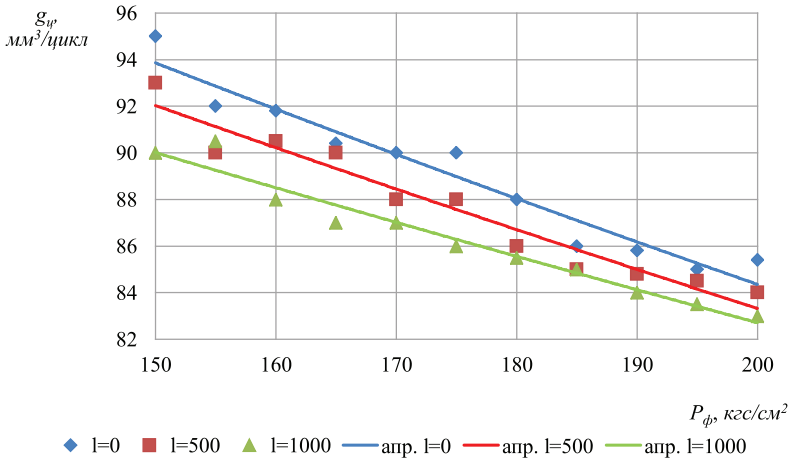

Рис. 3. Зависимость цикловой подачи топлива $g_ц$, мм³/цикл, от давления впрыска топлива $P_ф$, кгс/см², при различной наработке l, мото-ч

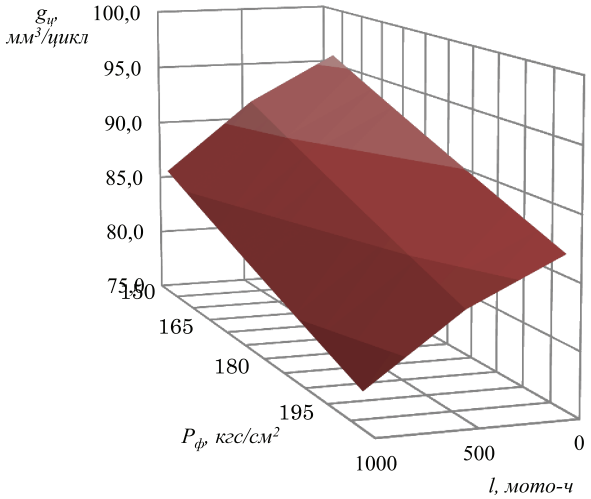

Рис. 4. Зависимость цикловой подачи топлива $g_ц$, мм³/цикл, от давления впрыска топлива $P_ф$, кгс/см², при различной наработке l, мото-ч

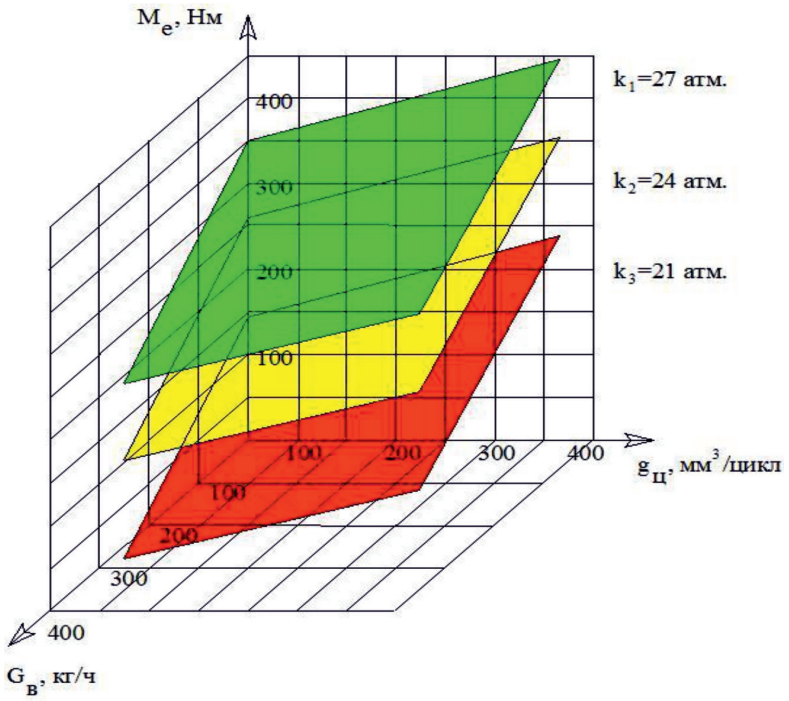

Рис. 5. Зависимость крутящего момента Me от цикловой подачи $g_ц$, мм³/цикл, топлива и расхода воздуха $G_в$, кг/ч, при различных компрессиях k

Идентификация предложенной модели проводилась для двигателя Д-243 после проведения соответствующих регулировок и обслуживания согласно ГОСТ Р 53639-2009. Для получения технического состояния двигателя в пределах изменения выбранной наработки $\Delta l = 0 \div 1000$ мото-часов изменялись значения компрессии в цилиндре в диапазоне $\Delta k = 21 \div 27$ атм. и давления во впускном коллекторе $\Delta P_в = 2 \div 7$ кПа. Значения цикловой подачи топлива $g_ц$, частоты вращения коленчатого вала n и крутящего момента двигателя M_e замерялись в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ Р 53639-2009.

Результаты проведенных ситуационных испытаний, которые позволяют определить коэффициенты уравнений (6) и (7), приведены на рис. 1–5.

Полученные функциональные зависимости позволяют в качестве диагностических параметров двигателя внутреннего сгорания принять переходные функции частоты вращения коленчатого вала, подачи топлива и расхода воздуха. При этом требуемая для использования в алгоритме Байеса априорная информация о техническом состоянии двигателя и его систем при различных наработках может быть смоделирована на основании уравнений (6, 7) на предлагаемом стенде.

Использование предложенного алгоритма позволит не только повысить достоверность принятого решения по результатам диагностики двигателя и уменьшить его трудоемкость, но и снизить влияние человеческого фактора и квалификации исполнителя.

Список литературы

1. Ляпаев В.Г., Манфановский С.Б. К вопросу о разработке матрицы технического состояния автомобилей по статистическим данным / Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономика. Право. Управление. – 2013. –№ 3. – С. 85–87.

2. Халиуллин Ф.Х., Ахметзянов И.Р. Обоснование выбора диагностических параметров энергетических установок мобильных машин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 2(32). – С. 72–74.

3. Гассельберг В.С., Запорожец А.В. Диагностика двигателей внутреннего сгорания автомобилей по виброакустическим параметрам // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. – № 2. – С. 72–74.

4. Чурилин А.С. Оперативная виброакустическая диагностика автомобилей // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2011. – № 17. – С. 20–22.

5. Фатьянов М.П. Применение метода кросс-вейвлетов для анализа финансовых рядов // Молодой ученый. – 2014. – № 3. – С. 83.

6. Шиндор О.А. Методика контроля критических режимов работы высокоэнергетических установок на основе вейвлет-анализа их нестационарных флуктуационных и шумовых сигналов / дисс. ... канд. тех. наук. – Казань, 2015. – 164 с.

7. Щеглов В.А. О возможности диагностики цилиндропоршневой группы ДВС методом частотно-амплитудного анализа сигнала вибрации с использованием вейвлет-анали-

за / Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 1–8.

8. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления: учебное пособие / Самарск. гос. ун-т. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2009. – С. 43–50.

9. Павленко В.Д., Фомин А.А. Информационная технология модельной диагностики нелинейных динамических объектов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/11 (70). – С. 38–43.

10. Крашенинников С.В. Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – 2013. – № 12. – С. 59–68.

11. Пестриков В.М., Евкарпиев В.Е. Особенности диагностики современных автотранспортных средств // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2014. – № 4(30) – С. 15–16.

12. Халиуллин Ф.Х., Ахметзянов И.Р., Ширяздaнов Р.Р., Халиуллин А.Ф. Стенд для исследования рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания в динамических режимах с возможностью имитации некоторых неисправностей двигателя // Патент на полезную модель России № 151482.2014. Бюл. № 10.

13. Халиуллин Ф.Х., Ахметзянов И.Р., Ширяздaнов Р.Р., Халиуллин А.Ф. Прибор для диагностики двигателя внутреннего сгорания по переходным характеристикам // Патент на полезную модель России № 160474.2016. Бюл. № 8.

14. Лукасов В.В., Никушкин Н.В. Применение методики поиска неисправностей по теореме гипотез (метод Байеса) в диагностике авиационной техники // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2007. – № 4. – С. 71–73.

15. Халиуллин Ф.Х., Ахметзянов И.Р. Особенности составления диагностической матрицы Байеса при безразборной диагностике двигателей внутреннего сгорания // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5(2). – С. 205–209.