

го заряда  $\sigma$  равна  $-3,9 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>. Так как величина электростатического эффекта определяется величиной поверхностного заряда, образованного электронами и электростатическим полем этого заряда, то подсчитаем количество электронов, расположенных на поверхности корундоэлектрета  $n_e$ :

$$n_e = \sigma/e = -3,9 \cdot 10^{-8} / -1,6021892 \cdot 10^{-19} \approx 2,434 \cdot 10^{11} \text{ 1/см}^2$$

(заряд электрона  $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$  Кл).

#### Выводы

1. С помощью гальваноплазменной обработки деталей из алюминиевых сплавов можно получить электрет с отрицательным поверхностным зарядом.

2. Плотность поверхностного заряда корундоэлектрета на детали из алюминиевого сплава составила  $-3,9 \cdot 10^{-8}$  Кл/см<sup>2</sup>.

#### Список литературы:

1. Шпаковский В.В. Электреты в двигателях внутреннего сгорания / В.В. Шпаковский, О.Ю. Линьков, В.В. Осейчук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №9 (56). – С.125-128.
2. Губкин А. Н. Электреты / Губкин А. Н.- М.: Наука, 1978.-192 с.
3. Сесслер Г. Электреты / Сесслер Г. — М.: Мир. 1983. — 487 с.
4. Луцейкин Г. А. Полимерные электреты / Луцейкин Г. А. — М.: Химия. 1984. — 184 с.
5. Пинчук Л. С. Электретные материалы в машиностроении / Пинчук Л. С., Гольдаде В. А. — Гомель: Инфотрибо, 1998. — 288 с.
6. Гороховатский Ю. А. Электретный эффект и его применение / Ю. А. Гороховатский // *Соросовский образовательный журнал*. - 1997. - № 8. — С. 92-98.
- 7.

Галиханов М. Ф. Коронэлектреты на основе полиэтиленовых композиционных материалов / М. Ф. Галиханов // *Энциклопедический справочник*. 2008. — № 5. — С.20-29.

8. Шпаковский В.В. Повышение ресурса цилиндропоршневой группы тепловозного дизеля образованием корундового слоя на поверхности поршней / В.В. Шпаковский, А.П. Марченко, И.В. Парсаданов и др. // *Локомотив информ.* — 2007. — №1. — С. 28-30.

9. Голенкова А.А. Влияние токовых режимов на свойства покрытий при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов / А.А. Голенкова, А.Е.Михеев // *Всероссийская научная конференция «Решетневские чтения»*. — 2001. — С.40-52.

#### Bibliography (transliterated):

1. Shpakovskij V.V. Jeletrety v dvigateljah vnutrennego sgoranija / V.V. Shpakovskij, O.Ju. Lin'kov, V.V.Osejchuk // *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. — 2008. — №9 (56). — S.125-128.
2. Gubkin A. N. Jeletrety / Gubkin A. N.- M.: Nauka, 1978.-192 s.
3. Sessler G. Jeletrety / Sessler G. — M.: Mir. 1983. — 487 s.
4. Luwejkina G. A. Polimernye jeletrety / Luwejkina G. A. — M.: Himija. 1984. — 184 s.
5. Pinchuk L. S. Jeletretnye materialy v mashinostroenii / Pinchuk L. S., Gol'dade V. A. — Gomel': Infotribo, 1998. — 288 s.
6. Gorohovatskij Ju. A. Jeletretnyj jeffekt i ego primenenie / Ju. A. Gorohovatskij // *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*. - 1997. - № 8. — S. 92-98.
7. Galihanov M. F. Koronojeletrety na osnove polijetilenovykh kompozicionnykh materialov / M. F. Galihanov // *Jenciklopedicheskij spravocchnik*. 2008. — № 5. — S.20-29.
8. Shpakovskij V.V. Povyshenie resursa cilindro-porshnevoj grupy teplovoznogo dizelja obrazovaniem korundovogo sloja na poverhnosti porshnej / V.V. Shpakovskij, A.P. Marchenko, I.V. Parsadanov i dr. // *Lokomotiv inform.* — 2007. — №1. — S. 28-30.
9. Golenkova A.A. Vlijanie tokovykh rezhimov na svojstva pokrytij pri mikrodugovom oksidirovanii aljuminievych splavov / A.A. Golenkova, A.E.Miheev // *Vserossijskaja nauchnaja konferencija «Reshetnevskie chtenija»*. — 2001. — S.40-52.

УДК 621.002:681.324

**К. Н. Осипов, асп., Е. Л. Первухина, д-р техн. наук, Ю. Л. Рапацкий, канд. техн. наук**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРШНЕВЫХ ДВС В ХОДЕ ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

#### Введение

Повышение эффективности приемосдаточных и контрольных испытаний ДВС остается важной проблемой современного двигателестроения [1, 2]. Это связано, с одной стороны, с ростом затрат на испытания, вызванных усложнением конструкции ДВС, а с другой стороны, ужесточением требований к их качеству, прежде всего, надежности и экологической безопасности. Обеспечение конкурентоспособности изделий возможно путем сокращения затрат без снижения точности и достоверности результатов испытаний. Это может быть достигнуто за счет использования новых методов автоматизации испытаний на основе вероятностно-

статистических подходов к моделированию испытываемых объектов.

К сожалению, в научно-технической литературе последних лет отсутствуют работы, указывающие на решение указанной проблемы для поршневых двигателей с впрыскиванием бензина, оснащенных электронной системой управления и комплектом датчиков, в том числе массового расхода воздуха, детонации, температуры охлаждающей жидкости, лямбда-зондом и др.

К настоящему времени известен ряд методов технической диагностики (например, [3]), в том числе ДВС. Однако они уже не соответствуют уровню развития современных ДВС и не могут

быть использованы в ходе приемосдаточных испытаний из-за различия в постановках решаемых задач.

**Целью работы** является моделирование поршневых ДВС с искровым зажиганием и впрыскиванием бензина в ходе приемосдаточных испытаний по результатам измерения их диагностических параметров.

**Основная часть**

Класс рассматриваемых ДВС ограничен двигателями с принудительным искровым зажиганием рабочей смеси и впрыскиванием бензина без дополнительного нагнетания воздуха в цилиндры. Упрощенная структурная схема двигателей исследуемого класса изображена на рисунке 1.

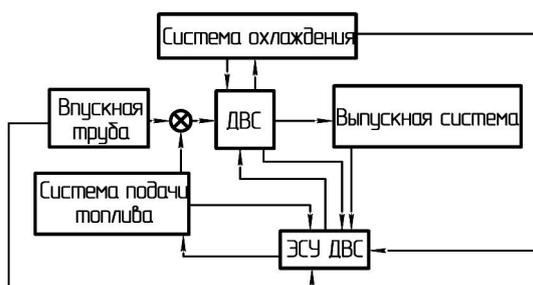


Рис. 1. Структурная схема ДВС рассматриваемого класса

Техническое состояние ДВС в ходе приемосдаточных испытаний после сборки на двигателестроительных и ремонтных заводах оценивают по результатам измерения их диагностических параметров через равноотстоящие промежутки времени. Под диагностическими параметрами понимают параметры функционирования двигателей. Для двигателей рассматриваемого класса к ним относятся: крутящий момент, средняя эффективная мощность, часовой и удельный расход топлива, давление масла в основной магистрали и т.д.

Схема испытаний двигателя, как управляемого объекта, (рис.2) связывает его параметры на входе  $U[t]$  с выходными диагностическими (измеренными) параметрами  $Y[t]$ , представляя двигатель в виде функционального преобразователя.

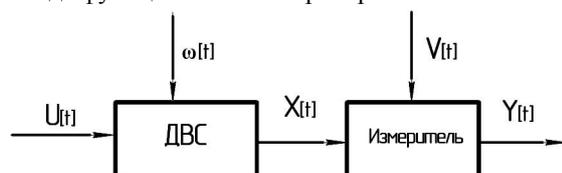


Рис. 2. Схема испытаний ДВС

Здесь  $X[t]$  – вектор действительных (ненаблюдаемых) значений диагностических параметров,  $W[t]$  и  $V[t]$  – внешние возмущения.

Входными параметрами, или параметрами управления ДВС, являются подача топлива и настройки потребителя, т.е. изменение угла поворота дроссельной заслонки, регулирующей подачу воздуха. Угол поворота дроссельной заслонки связан с частотой вращения коленчатого вала прямо пропорциональной зависимостью, поэтому, как правило, в диагностике управляющей координатой считают частоту вращения коленчатого вала [3]. Кроме того, систему впуска для указанного класса ДВС подбирают из условия подачи воздуха в цилиндры на номинальном режиме работы в количестве, достаточном для полного сгорания топлива. Следовательно, влиянием давления воздуха в системе впуска на режимах работы, ниже номинального, на значения мощностных диагностических параметров можно пренебречь.

С учетом сказанного, в ходе моделирования связи между различными параметрами ДВС с достаточной степенью точности можно описать с помощью уравнений, порядок которых зависит от инерционности вращающихся деталей, запаздывания выделения теплоты в цилиндрах и теплообмена между стенками цилиндров и охлаждающей жидкостью, а степень этих уравнений не превышает вторую или третью.

Так, например, в общем случае развиваемый двигателем крутящий момент  $M_k$  зависит от расхода топлива  $G_t$  и воздуха  $G_B$ , количества оборотов коленчатого вала  $n$ , нагрузки  $M_c$ , внутренних механических потерь  $p_M$ , внешних возмущений  $\epsilon$  и мощности  $N_e$ :

$$M_k = f(G_t, G_B, n, p_M, M_c, N_e). \quad (1)$$

В свою очередь, мощность  $N_e$  зависит от частоты вращения коленчатого вала, расхода топлива, механических потерь и геометрических параметров ДВС (величины хода поршня  $S$ , длины шатуна  $L$ , диаметра поршня  $D$  и т.д.):

$$N_e = f_2(n, G_t, p_M, S, D, L) \quad (2)$$

В частности, для рассматриваемого класса двигателей, исходя из необходимых условий испытаний (определение диагностических параметров ДВС при: 1) постоянной частоте вращения коленчатого вала и переменной нагрузке; 2) постоянной нагрузке и переменной частоте вращения коленчатого вала), зависимости между параметрами ДВС в окрестностях рабочей точки могут быть аппроксими-

мированы линейными моделями [4]. Для рассматриваемых ДВС количество таких рабочих точек равно трем, что соответствует 1500, 2500, и 3500 мин<sup>-1</sup>. При этом окрестности рабочих точек характеризуются 10 % отклонением значений частоты вращения коленчатого вала от рассматриваемых значений.

Возможность использования линейных моделей, например, для двигателя ВАЗ-2108, может быть проиллюстрирована графиком изменения значений диагностических параметров в зависимости от нагрузки при постоянной частоте вращения коленчатого вала (рис 3). для ДВС МеМЗ-3071 – скоростной характеристикой в указанном диапазоне (1000 – 3500 мин<sup>-1</sup>), изображенной на рис.4.

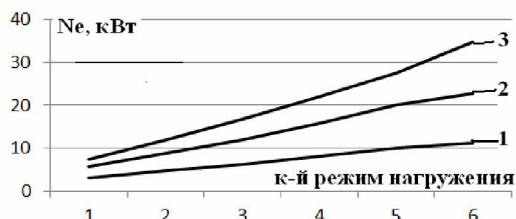


Рис. 3. Изменение мощности ДВС ВАЗ-2108 при постоянной частоте вращения и переменной нагрузке  
1 – 1500 мин<sup>-1</sup>; 2 – 2500 мин<sup>-1</sup>; 3 – 3500 мин<sup>-1</sup>

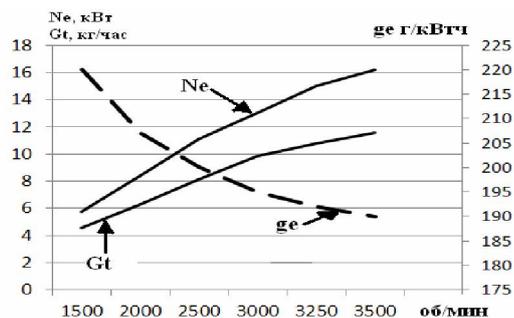


Рис. 4. Скоростная характеристика двигателя МеМЗ-3071

Рассмотрим процедуру построения линеаризованной модели ДВС на примере инжекторного двигателя модели «МеМЗ-3071». В ходе приемосдаточных испытаний при работе двигателя на различных режимах обобщенные зависимости (1) и (2) между параметрами испытуемых ДВС можно описать с помощью дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{1}{J} \Delta M_k - \frac{1}{J} \Delta M_c \\ N_e = \frac{J \cdot \pi \cdot n}{1000 \cdot 30} \cdot \frac{dn}{dt} \\ \frac{dn}{dt} = k(n) \Delta G_t \\ \vdots \end{cases} \quad (3)$$

где  $J$  – момент инерции движущихся деталей;  $k(n)$  – нелинейный коэффициент.

Система уравнений (3) отражает динамические характеристики испытуемых двигателей, которые могут быть геометрически интерпретированы как многомерные поверхности. Каждая точка такой поверхности определяется совокупностью конкретных значений параметров, определяющих заданный режим работы двигателя [4,5]. Линейную модель ДВС можно получить как модель, описывающую касательную плоскость к соответствующей поверхности обобщенной динамической характеристики. Так, для рассматриваемого примера нелинейные зависимости  $N_e = f(n(t), G_t(t))$  и  $M_k = f(n(t), G_t(t))$  могут быть представлены поверхностями в трехмерном пространстве координат  $\{N_e, n, G_t\}$  и  $\{M_k, n, G_t\}$ , соответственно (рис.5,6).

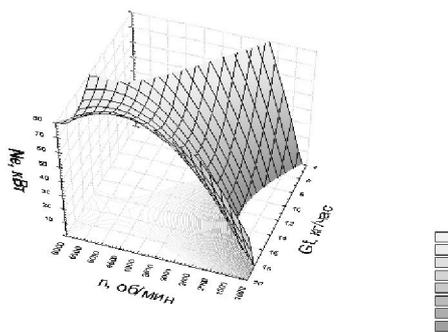


Рис. 5. Динамическая характеристика ДВС «МеМЗ-3071»:  $N_e = f(n(t), G_t(t))$

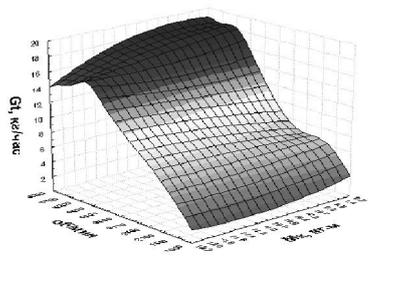


Рис. 6. Динамическая характеристика ДВС «МеМЗ-3071»:  $M_k = f(n(t), G_t(t))$

Построение линеаризованной модели в окрестностях  $k$ -й рабочей точки, при условии, что эта

точка является «обыкновенной» (частные производные исследуемой функции в этой точке непрерывны и сумма их квадратов не равна нулю), заключается в определении коэффициентов касательной плоскости к соответствующей поверхности.

В соответствии с [6,7], упрощенную линейную модель рассматриваемого двигателя в окрестностях рабочих точек можно описать следующими уравнениями:

$$\Delta N_e = \begin{cases} 0,02 \cdot \Delta n + 0,003 \cdot \Delta Gt \text{ при } n = 1500 \text{ мин}^{-1} \\ 0,02 \cdot \Delta n + 0,003 \cdot \Delta Gt \text{ при } n = 2500 \text{ мин}^{-1} \\ 0,02 \cdot \Delta n - 0,01 \cdot \Delta Gt \text{ при } n = 3500 \text{ мин}^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta Mk = \begin{cases} 0,015 \cdot \Delta n + 0,003 \cdot \Delta Gt \text{ при } n = 1500 \text{ мин}^{-1} \\ 0,0004 \cdot \Delta n + 0,004 \cdot \Delta Gt \text{ при } n = 2500 \text{ мин}^{-1} \\ 0,006 \cdot \Delta n + 0,009 \cdot \Delta Gt \text{ при } n = 3500 \text{ мин}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

Адекватность полученных моделей представлена в виде графика на рис. 5 и в виде таблицы 1. Ошибка моделирования не превышает 3%, что свидетельствует об адекватности полученных моделей.

Таблица 1. Анализ полученных результатов

	Режим работы, мин <sup>-1</sup>		
	1500	2500	3000
Измеренное значение $\Delta N_e$ , кВт	9,3	29,8	45,2
Расчетное значение $\Delta N_e$ , кВт	9,1	30,2	45,0
Ошибка моделирования $\varepsilon = \frac{\Delta N_e - \Delta N_{e \text{ рас}}}{\Delta N_e} 100\%$	2,2	1,3	0,4

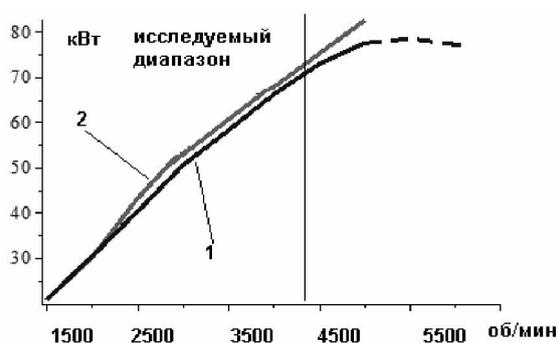


Рис. 5. Скоростная характеристика ДВС: 1 — измеренное значение  $N_e$ , 2 — расчетное значение  $N_e$

### Заключение

Моделирование инжекторных поршневых ДВС в ходе приемосдаточных испытаний по результатам измерения их диагностических парамет-

ров в реальном времени возможно на основе линейных моделей. Основными преимуществами использования таких моделей ДВС являются: простота интерпретации случайных последовательностей; достаточная адекватность дискретных во времени алгоритмов вычислительным процессам разностных схем; экономия времени вычислений; возможность получения модели на основе обыкновенных дифференциальных уравнений для непрерывных процессов.

В перспективе указанные линейные модели могут быть использованы для автоматизации процесса оценки технического состояния ДВС в ходе приемосдаточных испытаний.

### Список литературы:

1. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов / В.И. Пронякин // Измерительная техника. – 2008. – №10. – С 9 – 13.
2. Осипов К. Н. Совершенствование методики приемосдаточных испытаний двигателей внутреннего сгорания после сборки на основе зависимостей между диагностическими параметрами / К. Н. Осипов, Е. Л. Первухина, Ю. Л. Рапачкий // Проблемы машиностроения и надежности машин – 2011, №2 – С. 93–99.
3. Климов Е.Н. Идентификация и диагностика судовых технических систем. / Е.Н. Климов, С. А. Попов, В.В. Сахаров – Л.: Судостроение, 1978. – 176 с.
4. Августинович В.Г. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей / В. Г. Августинович и [др.] – М.: Машиностроение, 1984 – 200 с.
5. Гуляев В.А. Вычислительная диагностика. – К.: Наукова думка, 1992.-232 с.
6. Pierwuchina E. Analiza informacji w trakcie badan produkcyjnych wyrobow maszynowych // Technologia i automatyzacja montazu, 2005. – №3. – S.23-25.
7. Боев Б. В. Идентификация и диагностика в информационно-управляющих системах авиакосмической энергетики / Б.В. Боев, В.В. Бугровский, М.П. Вершинин и др. - М.: Наука, 1988. - 168 с.

### Bibliography (transliterated):

1. Pronjakin V.I. Problemy diagnostiki ciklicheskih mashin i mehanizmov / V.I. Pronjakin // Izmeritel'naja tehnika. – 2008. – №10. – S 9 – 13.
2. Osipov K. N. Sovershenstvovanie metodiki priemosdatochnyh ispytaniy dvigatelej vnutrennego sgoraniya posle sborki na osnove zavisimostej mezhdia diagnosticheskimi parametrami / K. N. Osipov, E. L. Pervuhina, Ju. L. Rapackij // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin – 2011, №2 – S. 93–99.
3. Klimov E.N. Identifikacija i diagnostika sudovyh tehniceskikh sistem. / E.N. Klimov, S. A. Popov, V.V. Saharov – L.: Sudostroenie, 1978. – 176 s.
4. Avgustinovich V.G. Identifikacija sistem upravlenija aviacionnyh gazoturbinnih dvigatelej / V. G. Avgustinovich i [dr.] – M.: Mashinostroenie, 1984 – 200 s.
5. Guljaev V.A. Vychislitel'naja diagnostika. – K.: Naukova dumka, 1992.-232 s.
6. Pierwuchina E. Analiza informacji w trakcie badan produkcyjnych wyrobow maszynowych // Technologia i automatyzacja montazu, 2005. – №3. – S.23-25.
7. Boev B. V. Identifikacija i diagnostika v informacionno-upravljajuwih sistemah aviakosmicheskoj jenergetiki / B.V. Boev, V.V. Bugrovskij, M.P. Vershinin i dr. - M.: Nauka, 1988. - 168 s.