

УДК 621.002:681.324

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ХОДЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Первухина Е.Л., Сопин П.К.

Излагаются методические вопросы решения задач моделирования машиностроительных объектов в ходе автоматизированных испытаний.

Приводятся алгоритмы идентификации объектов.

Современные машиностроительные объекты представляют сложные инженерные комплексы, в которых используются передовые научные достижения и реализуются предельные возможности техники. Полное математическое описание таких объектов достигается системами дифференциальных уравнений, содержащими уравнения с частными производными и сложными граничными условиями. В автоматизированном технологическом процессе испытаний на заключительном этапе машиностроительного производства, проводимом с целью поиска неисправностей, погрешностей конструирования и изготовления применяются упрощенные системы уравнений. Не отражая второстепенных характеристик, они, тем не менее, должны сохранять главные динамические свойства исходной системы [1]. Очевидно, что задача такого формализованного описания является сложной и актуальной в силу сложности и актуальности проблемы проведения испытаний в фиксированные сроки и получения информации, достаточной для надежной эксплуатации объектов.

В статье излагаются методические вопросы решения задач моделирования машиностроительных объектов в ходе автоматизированных испытаний. Приводятся алгоритмы идентификации математических моделей объектов. Результаты идентификации используются для автоматизации построения многопараметровой характеристики бензинового двигателя внутреннего сгорания.

Для комплексной оценки состояния и динамики основных характеристик объектов в качестве основной модели используется многомерная дискретная стохастическая система. Ее применение для решения задач испытаний вызвано простотой интерпретации случайных последовательностей наблюдаемых величин, адекватностью дискретных во времени алгоритмов вычислительным процессам разностных схем, экономией вычислительной производительности, возможностью получения модели на основе обыкновенных дифференциальных уравнений для непрерывных процессов. Модели построены путем описания свойств

объектов и процесса испытаний в различных параметрических пространствах.

В общем виде математическая модель испытываемого объекта задается системой нелинейных уравнений [1-3]

$$\dot{x} = \phi[x, y, u, \omega]; \quad (1)$$

$$y = \phi'[x, y, u, \omega] \quad (2)$$

при $x(t_0) = x_0$, $y(t_0) = y_0$, где $x_{n \times 1}$ - фазовый вектор модели, учитывающий динамические факторы объекта; $u_{p \times 1}$ - вектор, характеризующий воздействие на объект в ходе испытаний; $y_{m \times 1}$ - вектор параметров, характеризующий рабочие процессы объекта; $\omega_{s \times 1}$ - вектор условий испытаний; ϕ, ϕ' - нелинейные вектор-функции соответствующей размерности. Приводя все переменные, входящие в систему уравнений (1), (2), к стандартным условиям испытаний, можно исключить из нее входные параметры и преобразовать к виду

$$\dot{x}^0 = \phi^0[x^0, y^0, u^0]; \quad (3)$$

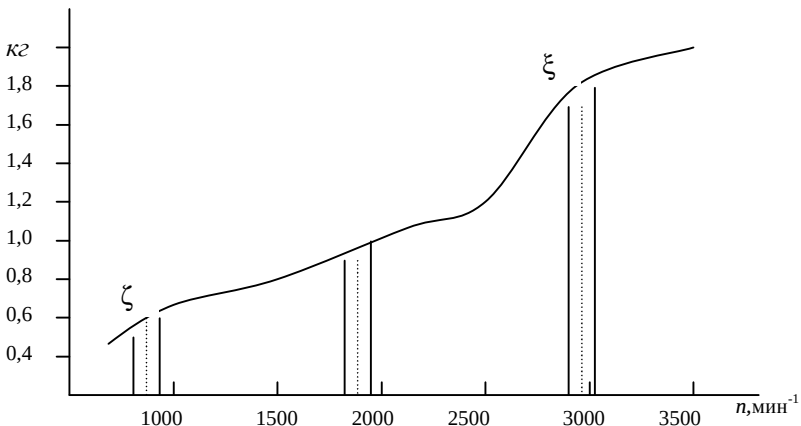
$$y^0 = \phi'^0[x^0, y^0, u^0], \quad (4)$$

где $x^0 = x(\omega)$, $y^0 = y(\omega)$, $u^0 = u(\omega)$ - рассчитанные по формулам подобия параметры объекта и его рабочих процессов; ϕ^0, ϕ'^0 - вектор-функции объекта с учетом условий подобия. В некоторых случаях допустимо исключение переменных y^0 из правых частей системы уравнений (3) и (4). Тогда математическая модель испытываемого объекта исследуется посредством обобщенной динамической характеристики

$$\dot{x}^0_i = \phi^0_i[x^0, u^0]; \quad (5)$$

$$y^0_j = \phi'^0_j[x^0, u^0]. \quad (6)$$

Индексы i и j появляются в выражениях (5) и (6) как показатели



установившихся режимов работы объекта.

В этих случаях линейную модель объекта можно получить как модель, описывающую касательную плоскость к соответствующей поверхности его обобщенной динамической характеристики. Эта модель, например, по i компоненте фазового вектора x^0 определяется поверхностью $\dot{x}_i^0 = \phi_i^0[x^0, u^0]$ и задаётся уравнением в отклонениях

$$\Delta \dot{x}_i^0 = a_i^0 \Delta x_i^0 + b_i^0 \Delta u^0, \quad (7)$$

где $\Delta \dot{x}_i^0 = \dot{x}_s^0 - x^0$, $\Delta u = u_s^0 - u^0$ - отклонение переменных от заданной точки (x_s^0, u_s^0) ; (a_i^0, b_i^0) - коэффициенты касательной плоскости.

Для дальнейшего повышения точности вычисления коэффициентов модели производные параметров рабочего процесса объекта исключаются из уравнения (7). Замена производной $\Delta \dot{x}^0$ на $\left[\frac{\Delta x^0(t_{i+1}) - \Delta x^0(t_i)}{\Delta t} \right]$ приводит к дискретным уравнениям

$$\Delta x_{i+1} = A \Delta x_i + G \Delta u_i; \quad (8)$$

$$\Delta y_i = B \Delta x_i + H \Delta u_i, \quad (9)$$

где A, G, B, H – матрицы линейной модели, зависящие от матриц частных производных функций ϕ, ϕ' по параметрам x, u .

Рассмотрим построение упрощенной линейной модели (8) и (9) двигателя внутреннего сгорания на примере соотношения

$$\Delta n_{i+1} = A \Delta n_i + G \Delta G_{T_i}, \quad (10)$$

где n - частота вращения двигателя; G_T - часовой расход топлива.

На рисунке 1 показана линия установившихся режимов работы бензинового двигателя с указанием области линеаризации линейной модели (ξ - область режима малой мощности, ζ - область режима максимальной мощности). Очевидно, линейные модели двигателя на режиме малого газа и максимальном режиме имеют разные значения коэффициентов. Вдоль линии установившихся режимов двигателя можно определить упрощенную кусочно-линейную модель двигателя относительно малых вариаций параметров рабочего процесса двигателя около точек линеаризации. Коэффициенты такой модели определяются по переходным процессам $\Delta x^0(t), \Delta u^0(t), \Delta y^0(t)$. Например, модель вида (10) $\Delta n_{i+1} = 1,016 \Delta n_i + 0,78 \Delta G_T$ с достаточной для практики испытаний точностью воспроизводит статические характеристики исследуемого двигателя в области ζ . Адекватность модели оценивается с помощью

среднего квадрата ошибки воспроизведения процесса $\|\Delta n_i - \Delta n_{i(\text{mod})}\|^2$ по частоте вращения n .

В ходе испытаний двигателей внутреннего сгорания для наглядности графического изображения характерных параметров применяются многопараметровые характеристики. В общем случае их строят в координатах x и y по результатам обработки серии исходных характеристик, выявляющих зависимость исследуемого параметра z от переменного x при постоянных значениях y . Поскольку каждая точка многопараметровой характеристики соответствует лишь одной паре значений x и y , ей можно сообщить определенное значение z , взятое из вспомогательных характеристик. Многопараметровая характеристика, получающаяся соединением точек, имеющих одинаковые значения z , наглядно показывает характер изменения и величину z при любых возможных значениях x и y .

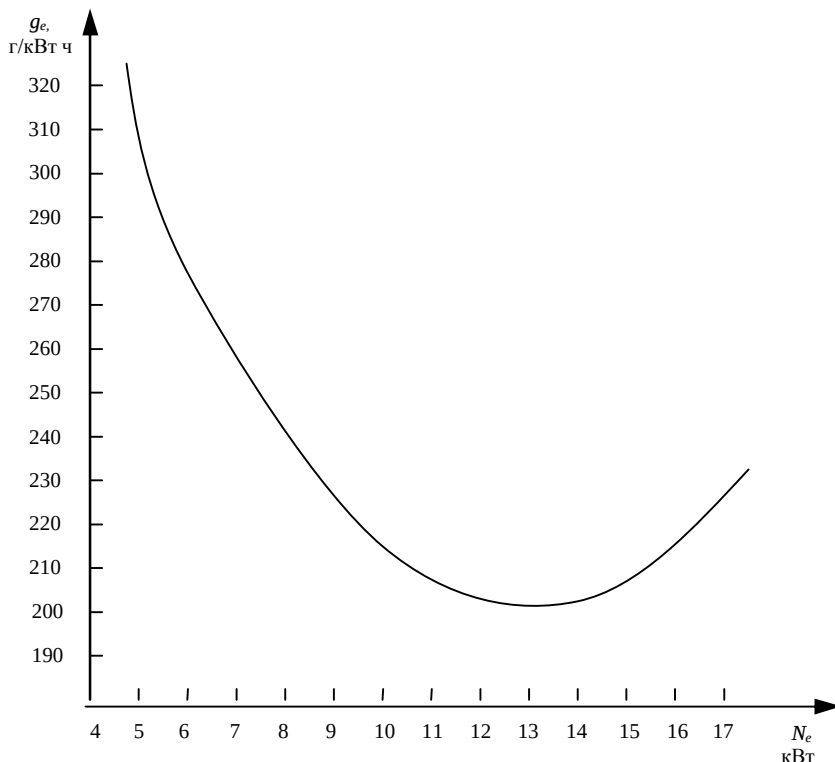


Рисунок 2 – Нагрузочная характеристика

Алгоритм построения многопараметровой характеристики двигателя в системе координат частоты вращения коленчатого вала и среднего эффективного давления базируется на восьми нагрузочных характеристиках, выявляющих закономерность изменения удельного расхода топлива g_e в зависимости от изменения эффективной мощности N_e при постоянной частоте вращения вала $n=1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000$ об/мин.

На первом шаге алгоритма по нагрузочной характеристике рисунка 2 определяется мощность, соответствующая фиксированному значению, например $g_e=200$ г/Квт·ч. Соответствующие минимальное и максимальное значения эффективного давления рассчитываются по формуле

$$P_e = \frac{\tau \cdot N_e}{n \cdot k \cdot V_h} \text{ МПа},$$

где V_h - объем цилиндра в л, k - число цилиндров, n - частота вращения коленчатого вала в об/мин; расчетный коэффициент $\tau = 119,95$.

При автоматизации построения многопараметровой характеристики возникает задача определения значений функции $g_e(N_e)$, заданной конечным числом значений аргумента, в промежутках между этими значениями, т.е. задача интерполяции функций. Использование традиционных методов вносит дополнительные погрешности, поскольку при больших расстояниях между узловыми точками точность вычислений мала, а применение интерполяционных многочленов высокого порядка, как правило, искажает граничные значения функций. Поэтому применим кусочную интерполяцию (линейную или квадратичную).

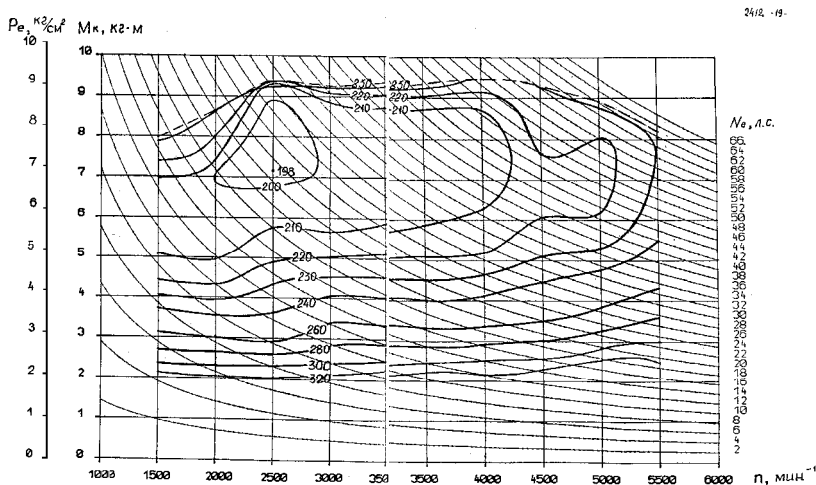


Рисунок 3 – Многопараметровая характеристика двигателя

На рисунке 3 многопараметровая характеристика обобщает серию нагрузочных, снятых на восьми скоростных режимах работы двигателя. Линии удельного расхода топлива g_e , нанесенные на характеристику, дают полное представление об экономичности двигателя во всем диапазоне его возможных скоростей и нагрузок и выявляют зону режимов наибольшей экономичности. На многопараметровую характеристику нанесены также линии постоянных значений дополнительных показателей: эффективной мощности и крутящего момента.

Главным преимуществом приведенных упрощенных кусочно-линейных моделей двигателя является достаточная точность воспроизведения статических характеристик в широком диапазоне рабочих режимов и возможность моделирования исследуемых процессов в реальном времени. Такие модели предназначены для использования в ходе автоматизированных испытаний двигателей на различных режимах, в частности, для автоматизации построения их многопараметровых

характеристик. Заметим, что полная нелинейная модель двигателя (1), (2) не позволяет воспроизводить происходящие в нем процессы в реальном масштабе времени.

Библиографический список

1. 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.
2. Батхан Л.З. Модель системы динамических испытаний дизельных двигателей / Л.З. Батхан // Математические вопросы автоматизации проектирования и испытаний. — Минск, 1986. — С. 107 – 114.
3. Гуляев В.А. Вычислительная диагностика / В.А. Гуляев — К.: Наук думка, 1992. — 232 с.
4. Первухина Е.Л. Обработка информации в системе автоматизированных испытаний машиностроительных изделий / Е.Л. Первухина // Сборка в машиностроении, приборостроении — 2001. — №2. — С. 37 – 40.

Поступила в редакцию 16.04.2001 г.