

УДК 681.5.09: 517.518.8

РЕГРЕССИОННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОДСИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ

Кузнецова Т.А.

*ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: tak@pstu.ru*

Проводится анализ методов повышения адаптационных свойств газотурбинных авиационных двигателей (ГТД) к внешним и внутренним возмущениям (помехам). В качестве причин возмущений рассматриваются естественное старение и аномальные явления, приводящие к изменению характеристик двигателя и составляющих системы автоматического управления (САУ ГТД). Адаптивные свойства САУ ГТД во многом определяются точностью встраиваемых математических моделей ее подсистем. Целью исследования является разработка регрессионной математической модели гидропривода входных направляющих аппаратов компрессора (ВНА) методом полиномиальной аппроксимации. В качестве обобщенной характеристики выбрана экспериментальная скоростная характеристика гидропривода ВНА, задаваемая графически или таблично. Экспериментально установлено, что действие основных четырех типов помех приводит к трансформациям скоростной характеристики. В результате статистической обработки полученных с выборкой $N = 200$ семейств кривых, соответствующих каждому случаю действия помех, предложена модель исполнительного механизма с разделением влияния факторов, основанная на полиномиальной аппроксимации. Значения коэффициентов аппроксимационного полинома выбирались в соответствии с методом линейной регрессии. Учет действия возмущений производился путем введения корректирующих полиномиальных коэффициентов. Построенная регрессионная модель гидропривода ВНА с разделением влияния факторов (помех) имеет более высокие показатели точности, чем аналогичные модели, разработанные с применением других методов аппроксимации, и может применяться как в стендовом оборудовании для наземных испытаний ГТД, так и в бортовых моделях САУ ГТД всех уровней в статическом и динамическом режиме в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: авиационный двигатель, система автоматического управления, идентификация, математическая модель, регрессионные методы, полиномиальная аппроксимация

THE MODEL WITH SEPARATION OF THE FACTORS' INFLUENCE FOR THE AIR-ENGINE AUTOMATIC CONTROL SUBSYSTEM

Kuznetsova T.A.

State National Research Politechnical University of Perm, Perm, e-mail: tak@pstu.ru

The methods for increasing of the adaptive properties of gas-turbine aircraft engines (GTE) to external and internal disturbances (noise) are analyzed. The natural aging and anomalous phenomena, leading to changes in the characteristics of the engine and components of the automatic control system (ACS GTE), are considered as the reasons of disturbances. Adaptive properties of ACS GTE are determined in many respects by the accuracy of the embedded mathematical models of its subsystems. The aim of the study is the development of the regression mathematical model of hydraulic actuator of compressor's inlet guide vanes (IGV) by polynomial approximation method. The experimental speed characterization of the hydraulic drive of the IGV was selected as the generalized characteristic specified graphically or in tabular form. It was experimentally established that the effect of the four main types of interference leads to transformations of the speed characteristic. As a result of statistical processing of the obtained samples $N = 200$ families of curves corresponding to each case of interference, the model of the actuator with the division of influence factors based on polynomial approximation was offered. The coefficients of the approximation polynomial is selected according to the method of linear regression. The accounting of the perturbation was produced by the introduction of corrective polynomial coefficients. The developed regression model of the hydraulic drive of the IGV with the separation of influence factors (noise) has a higher accuracy than the similar models developed by using other methods of approximation, and can be used both in bench equipment for ground tests of GTE, and ACS GTE on-board in static and dynamic under operating conditions.

Keywords: aircraft engine, automatic control system, identification, mathematical model, regression methods, polynomial approximation

Обеспечение адаптивности газотурбинных авиационных двигателей (ГТД) к внешними и внутренним возмущениям (помехам) ведется средствами систем автоматического управления с обратными связями (САУ ГТД), для повышения эффективности которых применяются встроенные математические модели (ММ). В целях обеспечения надежности и безопасности работы модель должна быть адаптирована к нормальным

деградационным (старение) и аномальным (отказы) процессам в двигателе, датчиках и исполнительных механизмах (ИМ) обратной связи САУ.

Авиационный двигатель является сложной динамической системой, уравнения состояния которой определяют как регулярной составляющей нестационарного процесса изменения параметров двигателя, так и случайным разбросом его

характеристик. Разброс характеристик узлов двигателя и ИМ САУ определяется: техническим разбросом параметров, обусловленным допусками на изготовление и сборку узлов; отклонением в подобию режимов при различных внешних условиях эксплуатации; изменением характеристик в процессе наработки ресурса (отказы и старение узлов) и др. Сложность рассматриваемого объекта обуславливает трудности его идентификации при моделировании. В зависимости от решаемой задачи используются математические модели различного уровня детализации и точности.

Широкое практическое применение имеют термодинамические нелинейные математические модели высокого уровня, описывающие физические процессы в каждом компоненте двигателя. Такие модели наиболее полно отражают статические и динамические свойства двигателей как объектов управления во всем диапазоне рабочих режимов и служат основой для построения моделей низшего уровня. Основным достоинством этих моделей является высокая точность воспроизведения характеристик двигателя по всем параметрам реального рабочего процесса в диапазоне частот, определяемой частотой пропускания устройств автоматики. Основным недостатком, стимулирующим процесс дальнейшего поиска оптимальных решений задачи идентификации, является значительная сложность модели и ее зависимость от различного рода внешних и внутренних помех. В частности, для учета отклонений параметров ГТД от средних значений, заложенных в детерминированную модель, необходимо моделировать процессы в некоторой возможной области, обусловленной технологическим разбросом параметров. В то же время, для учета отклонений, вызванных внутренней и внешней неравномерностью потока газа в двигателе, необходимо в модель вносить шум с заданными вероятностными характеристиками. Кроме того, на их качество влияет погрешность, связанная с неточностью задания физических констант. Следует также учитывать вероятные изменения характеристик двигателя вследствие старения. Большинство перечисленных проблем можно избежать, используя имитационные регрессионные модели, построенные на основе данных натурного эксперимента, производимого над отдельными узлами ГТД.

Цель исследования

Целью исследования является разработка регрессионной математической модели ИМ САУ ГТД с разделением влияния

факторов методом полиномиальной аппроксимации.

Материалы и методы исследования

В предлагаемом исследовании строится математическая модель нижнего уровня исполнительного механизма обратной связи САУ ГТД – гидропривода входных направляющих аппаратов компрессора (ВНА) ГТД с помощью регрессионного анализа. Выбранный метод идентификации основан на регрессионной процедуре с использованием метода наименьших квадратов и применяется для описания нестационарных процессов, характеризующихся медленным (по сравнению с регрессией) изменением параметров, а также для полиномиальной аппроксимации неизвестных нелинейных функций.

Рассматриваемый объект является астатическим и в первом приближении описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$T_{\text{пс}} \frac{d^2 \alpha_{\text{вна}}}{dt^2} + \frac{d\alpha_{\text{вна}}}{dt} = K_{\text{гм}} \cdot I_{\text{упр}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{упр}}$ – входной сигнал гидропривода (входной ток преобразователя электрических сигналов (ПС)), мА; $\alpha_{\text{вна}}$ – выходной сигнал гидропривода (угол поворота ВНА), град; $T_{\text{пс}}$ – постоянная времени ПС, сек; $K_{\text{гм}}$ – коэффициент усиления гидропривода. Причем

$$K_{\text{гм}} = K_{\text{гц}} \cdot K_{\alpha}; \quad \alpha_{\text{вна}} = K_{\gamma} \cdot \gamma_{\text{гц}} - \alpha_o, \quad (2)$$

где $K_{\text{гц}}$ – коэффициент усиления гидроцилиндра гидропривода; K_{α} – коэффициент усиления устройства поворота ВНА; α_o – угол установки механического упора, град; $\gamma_{\text{гц}}$ – выходной сигнал гидроцилиндра гидропривода, мм.

Реальная система является нелинейной и характеризуется наличием силы трения в полости поршня гидроцилиндра; магнитного гистерезиса; люфта в цепи обратной связи; гидродинамических сил, переменных по величине расхода, возникающих в дозирующем сечении; реакции струи из сопла на заслонку, обусловленной возможной несимметричностью сопла преобразователя электрических сигналов ($I_{\text{пс}}$), поступающих на вход гидропривода с выхода регулятора и т.д. Действие этих возмущений обуславливает трансформации скоростной характеристики гидропривода, задающей экспериментально полученную функцию скорости перемещения гидроцилиндра на выходе устройства от тока управления ПС $\frac{dy_{\text{гц}}}{dt} = f(I_{\text{пс}})$, задаваемую графически или таблично.

В предлагаемой методике идентификации скоростная характеристика выступает как обобщенная характеристика рассматриваемого ИМ, и построение модели исследуемого объекта сводится к ее полиномиальной аппроксимации. Под действием различного рода возмущений (помех) на скоростной характеристике наблюдается появление зоны нечувствительности, параллельное смещение характеристики относительно начала координат, сужение линейной зоны. Для исследования рассматривалось изменение силы трения ($F_{\text{тр}}$) в полости поршня гидроцилиндра; изменение величины давления в клапане постоянного давления ($P_{\text{кпд}}$), например вследствие поломки насоса; изменения площади открытия сопел (f_{c1} и f_{c2}), задающих перепад давления на золотнике преобразователя входных электрических сигналов; изменения жесткости пружины золотника ($C_{\text{пр}}$) вследствие нару-

шения ее затяжки. В ходе работы был сделан вывод о возможности ограничения этим списком, так как действие всех прочих возмущений аналогично перечисленным.

В качестве исходных данных при построении модели исследуемого объекта использовались результаты натуральных и модельных экспериментов. С целью повышения достоверности модельного эксперимента в построенной нелинейной модели высшего уровня изменения параметров задавались различными законами распределения (нормальным, равномерным и др.) с учетом технологических допусков изготовителей. Суммарная относительная дисперсия, соответствующая технологическим нормам, составляет $D = \sum Di = 0,1189$.

Скорректированная таким образом модель использовалась для получения скоростных характеристик номинального режима работы гидропривода и режимов, соответствующих всем перечисленным возмущениям с выборкой $N = 200$. Фиксированное значение тока ПС задавалось в диапазоне $[-35 \text{ мА}; +35 \text{ мА}]$. При этом все параметры гидропривода изменялись в соответствии с заданными законами распределения в пределах заданных отклонений. Полученные семейства из 200 кривых, соответствующие каждому случаю действия возмущения, подверглись статистической обработке.

Проведенные расчеты позволили сделать вывод о возможности выбора в качестве истинного значения измеряемой величины среднего арифметического результатов наблюдений. Полученные регрессионные характеристики были сгруппированы в семейства кривых, соответствующие случаю действия каждого рассмотренного возмущения.

Предлагаемая модель с разделением влияния факторов для рассматриваемого ИМ основана на полиномиальной аппроксимации полученных скоростных характеристик. В соответствии с методом линейной регрессии наилучшие значения для коэффициентов аппроксимационного полинома можно определить из матричного уравнения:

$$a^* = (I_{\text{упр}}^T \cdot I_{\text{упр}})^{-1} \cdot I_{\text{упр}}^T \cdot u_{\text{гн}}, \quad (3)$$

где $a^* = (a_0 a_1 \dots a_n)^T$ – матрица наилучших коэффициентов аппроксимационного полинома; n – степень аппроксимационного полинома; $I_{\text{упр}}$ – матрица токов управления ПС; $u_{\text{гн}}$ – матрица выходных сигналов, соответствующих $\frac{dy_{\text{гн}}}{dt}$.

Результаты исследования и их обсуждение

Выбор степени полинома был осуществлен для скоростной характеристики, соответствующей номинальному режиму. На основе анализа скоростной характеристики ИМ, можно предположить, что порядок полинома должен быть достаточно высок, поэтому в исследовании рассмотрен вариант разбиения исходной функции на два участка, соответствующих интервалам изменения аргумента $I_{\text{упр}} \in [-35 \text{ мА}; 0]$ и $I_{\text{упр}} \in [0; +35 \text{ мА}]$. При использовании описанной регрессионной процедуры получены полиномы степеней $n = 4$, а также рассчитаны

соответствующие им дисперсии $D = 0,0477$ и $0,0295$, характеризующие отклонение экспериментальных результатов от модельных значений. Сравнение с результатами произведенной аппроксимации полиномами Лагранжа показало, что точность результата для $n = 5$ улучшилась в два раза. Таким образом, был сделан вывод о целесообразности применения рассматриваемого метода при пятой степени полинома для номинального режима работы ИМ. Осциллограмма полученной функции приведена на рис. 1.

Учет действия возмущений в построенной модели для номинального режима производится путем введения корректирующих коэффициентов в виде полиномов третьей степени:

$$\begin{aligned} \frac{dy_{\text{гн}}}{dt} = & (a_0 + a_1 I_{\text{упр}} + a_2 I_{\text{упр}}^2 + \dots + a_5 I_{\text{упр}}^5) \times \\ & \times (b_0 + b_1 I_{\text{упр}} + b_2 I_{\text{упр}}^2 + b_3 I_{\text{упр}}^3) \times \\ & \dots \cdot (d_0 + d_1 I_{\text{упр}} + d_2 I_{\text{упр}}^2 + d_3 I_{\text{упр}}^3), \quad (4) \end{aligned}$$

где a_0, \dots, a_5 – коэффициенты полинома, описывающего номинальный режим работы ИМ; $b_0, \dots, b_3; \dots; d_0, \dots, d_3$ – коэффициенты полиномов, описывающих соответственно режимы работы ИМ в условиях действия помех: изменения жесткости пружины золотника $C_{\text{пр}}$, изменения величины давления в клапане постоянного давления $P_{\text{кпл}}$, изменения силы трения $F_{\text{тр}}$ в полости поршня гидроцилиндра и изменения площади открытия сопла f_{cl} , задающего перепад давления на золотнике преобразователя входных электрических сигналов.

Корректирующие полиномы определены для всех выбранных возмущений, графическое отображение влияния которых на форму скоростной характеристики ИМ отражено на осциллограмме проведенного натурального эксперимента (рис. 2).

Экспериментальные исследования показали, что корректирующие коэффициенты существенно отличаются на различных диапазонах изменения параметра, задающего действие помехи, что обусловлено необходимостью определения законов изменения каждого корректирующего коэффициента для каждого полинома на нескольких участках изменения исследуемого параметра ($C_{\text{пр}}, P_{\text{кпл}}, F_{\text{тр}}, f_{\text{cl}}$). Для определения коэффициентов b_p, \dots, d_i с целью уменьшения погрешности использовалась сплайн-интерполяция. Диапазон изменения авсциссы (тока управления ПС) также разбивался на более мелкие, чем для номинального режима, промежутки. Так, например, при моделировании изменения затяжки пружины $C_{\text{пр}}$ в диапазоне ее изменения от $0,4 C_{\text{пр ном}}$ до $2 C_{\text{пр ном}}$, кор-

ректирующие коэффициенты определялись на двух участках изменения жесткости пружины $C_{\text{пр}} \in [0,4; 0,8] \cup [0,8; 2]$ и на шести участках изменения тока $I_{\text{упр}}$ в пределах диапазона $[-35 \text{ mA}; +35 \text{ mA}]$.

В результате проведенной идентификации были получены матрицы коэффициентов корректирующих полиномов, соответствующих изменению параметров, характеризующих действие различных помех, в заданных диапазонах.

Следует отметить, что для случая изменения $P_{\text{кпд}}$ и $f_{\text{с1}}$ особенностью нахождения

коэффициентов корректирующего полинома является необходимость исключения постоянной составляющей в исходных данных, наличие которой приводит к параллельному смещению графиков функций вдоль координатных осей относительно номинального положения. Для этого определялся закон изменения константы (постоянной составляющей). Кривые скоростных характеристик, построенных с помощью разработанной регрессионной модели с разделением влияния факторов, приведены на рис. 3.

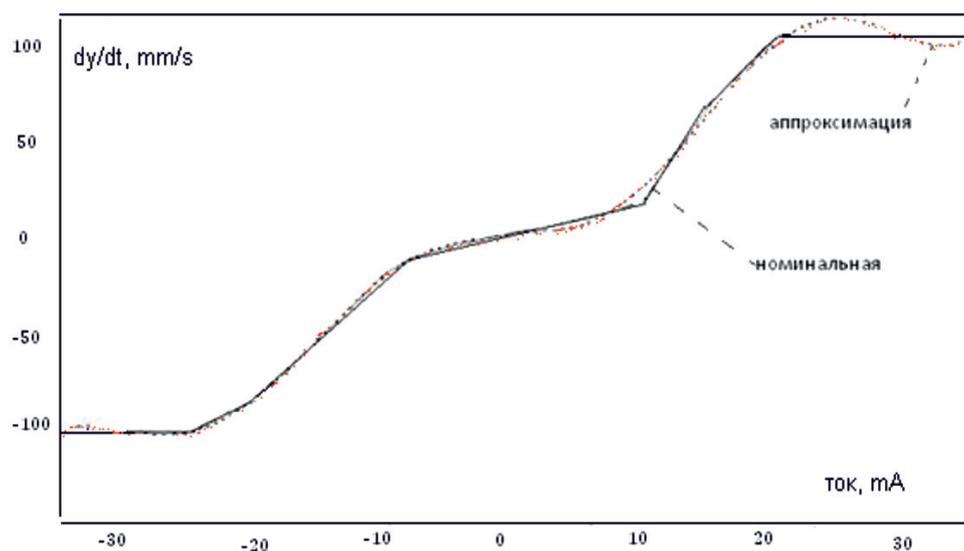


Рис. 1. Осциллограмма результатов полунатурного эксперимента по полиномиальной аппроксимации номинальной скоростной характеристики

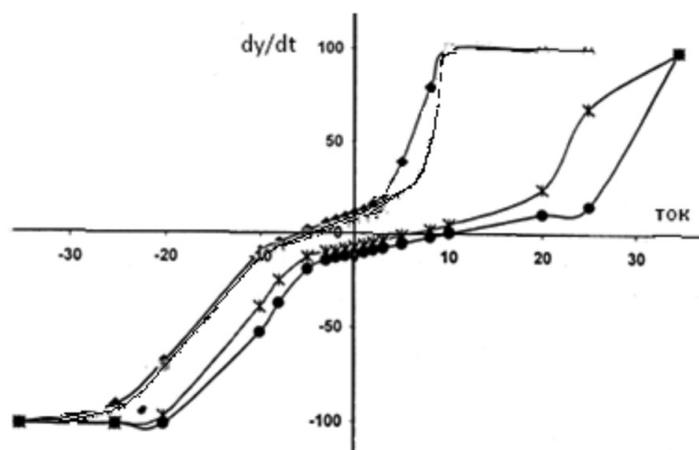


Рис. 2. Осциллограмма результатов натурального эксперимента по определению трансформаций скоростной характеристики ВНА при различных видах помех

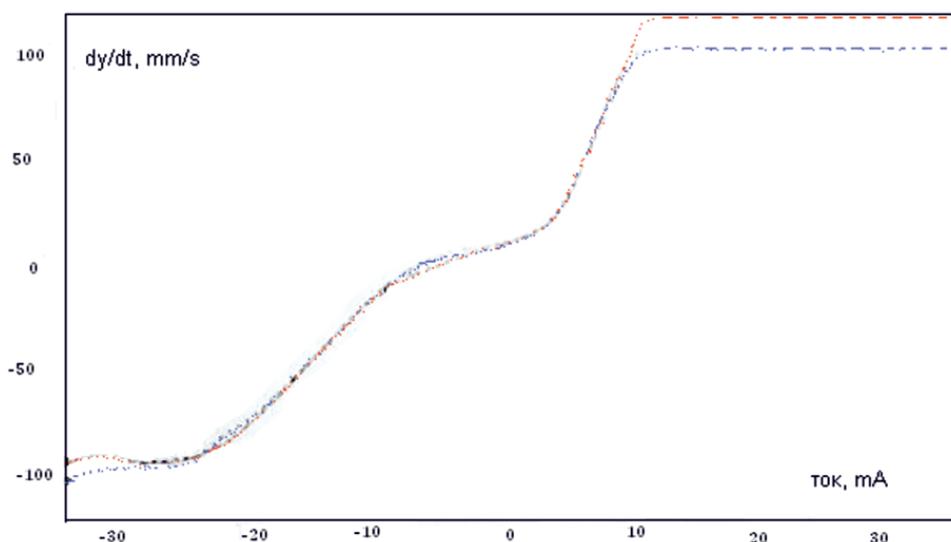


Рис. 3. Осциллограмма результатов модельного эксперимента по учету влияния помех путем введения корректирующих полиномиальных коэффициентов

Выводы

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что построенная регрессионная модель входных направляющих аппаратов компрессора с разделением влияния факторов (помех) имеет более высокие показатели точности, чем аналогичные модели, разработанные с применением других методов аппроксимации. Разработанная модель применима как в статическом, так и в динамическом режиме в условиях действия нескольких помех. Характеристики помех могут задаваться или изменяться по случайному закону в указанном диапазоне.

Разработанная модель может применяться как в стендовом оборудовании для наземных испытаний ГТД, так и в бортовых моделях двигателя всех уровней.

Список литературы

1. Кузнецова Т.А., Губарев Е.А. Отказоустойчивые алгоритмы идентификации входной информации бортовой математической модели в составе системы автоматического управления авиационного двигателя // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 6–1. – С. 39–43.
2. Леготкина Т.С., Шестаков Д.А. Идентификация систем автоматического управления статистическим методом // *Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2011. – № 5. – С. 221–228.

3. Лялькина Г.Б., Бердышев О.В. Математическая обработка результатов эксперимента: учебное пособие // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 3. – С. 180.

4. Kobayashi T., Simon D.L. Hybrid Kalman filter approach for aircraft engine in-flight diagnostics: sensor fault detection case // *Proc. of ASME Turbo-Expo 2006 (May 8–11, 2006, Barcelona, Spain)*. – GT2006-90870. – 2006. – 11 p.

5. Kobayashi T., Simon D.L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management/ Paper NASA/TM-2007-214980 – Hanover: NASA Center for Aero Space Information (CASI). – 2007. – 11 p. URL: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070031718.pdf>.

References

1. Kuznecova T.A., Gubarev E.A. Otkazoustojchivye algoritmy identifikacii vhodnoj informacii bortovoj matematicheskoj modeli v sostave sistemy avtomaticheskogo upravlenija aviacionnogo dvigatelja // *Fundamentalnye issledovanija*. 2015. no. 6–1. pp. 39–43.

2. Legotkina T.S., Shestakov D.A. Identifikacija sistem avtomaticheskogo upravlenija statisticheskim metodom // *Vestnik PGTU. Jelektrotehnika, informacionnye tehnolo-gii, sistemy upravlenija*. 2011. no. 5. pp. 221–228.

3. Ljalkina G.B., Berdyshev O.V. Matematicheskaja obrabotka rezultatov jeksperimenta: uchebnoe posobie // *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2014. no. 3. p. 180.

4. Kobayashi T., Simon D.L. Hybrid Kalman filter approach for aircraft engine in-flight diagnostics: sensor fault detection case // *Proc. of ASME Turbo-Expo 2006 (May 8–11, 2006, Barcelona, Spain)*. GT2006-90870. 2006. 11 p.

5. Kobayashi T., Simon D.L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management/ Paper NASA/TM-2007-214980 Hanover: NASA Center for Aero Space Information (CASI). 2007. 11 p. URL: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070031718.pdf>.