

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Чжоу Силян

Самарский университет, г. Самара, zhousiliang@yandex.ru

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель, частота вращения ротора, идентификация динамической системы, ПИ-регулятор, модельно-прогнозирующее управление.

Целью исследования является анализ особенностей построения локальной динамической модели и синтеза алгоритма управления частотой вращения авиационного газотурбинного двигателя по экспериментальным данным Pump–RPM. В качестве управляющего воздействия рассматривается команда топливного насоса Pump, а в качестве регулируемой величины – частота вращения ротора двигателя RPM.

Поддержание заданной частоты вращения относится к числу основных задач автоматического управления авиационным двигателем [1]. Ее решение осложняется нелинейностью объекта, изменением динамических свойств при переходе между режимами, ограничениями исполнительного механизма и наличием шумов в экспериментальных данных. Поэтому для предварительного синтеза регулятора целесообразно использовать локальные линейные модели, идентифицированные в окрестности рабочих точек [2].

Исходные экспериментальные данные были разделены на участки переходных процессов, соответствующие изменению команды Pump и последующей реакции частоты вращения RPM. Для выбранных режимов работы определялись начальные и конечные установившиеся значения входной и выходной величин, после чего оценивались статический коэффициент усиления и постоянная времени локальной модели. В общем виде локальная динамическая модель принималась в форме аperiодического звена первого порядка

$$G(s) = K / (T s + 1),$$

где K – статический коэффициент усиления, T – постоянная времени объекта. При неудовлетворительном результате стандартной идентификации использовалась оценка по экспериментальной переходной характеристике. В этом случае коэффициент усиления определялся по изменению установившихся значений входа и выхода:

$$K = \Delta y / \Delta u.$$

Такой подход позволяет сохранить физический смысл модели и избежать появления некорректных параметров, например отрицательного коэффициента усиления, возникающего при идентификации коротких или зашумленных фрагментов данных. Общая последовательность обработки данных и синтеза регулятора представлена на рис. 1.



Рис. 1 – Структурная схема обработки экспериментальных данных и синтеза регулятора

Основные численные результаты идентификации и независимой проверки модели представлены в табл. 1. Для одного из рабочих участков в области 50 000 об/мин

была получена модель с высокой степенью соответствия экспериментальным данным. Для участка в области 91 000 об/мин прямая идентификация оказалась неустойчивой, поэтому была применена оценка по переходной характеристике с последующей проверкой модели в среде MATLAB/Simulink.

Таблица 1 – Основные результаты идентификации и независимой проверки модели

Параметр	Режим / условие	Значение
Статический коэффициент усиления K , об/мин/Pump	около 50 000 об/мин	$1,213 \cdot 10^5$
Соответствие локальной модели Fit, %	около 50 000 об/мин	95,1
Статический коэффициент усиления K , об/мин/Pump	около 91 000 об/мин	$7,898 \cdot 10^4$
Соответствие локальной модели Fit, %	около 91 000 об/мин	87,4
Время дискретизации, с	независимая проверка	1,000
Число точек данных	независимая проверка	173
Соответствие модели Fit, %	независимая проверка	88,11
RMSE, об/мин	независимая проверка	6672,89
MAE, об/мин	независимая проверка	4422,39
Максимальная ошибка, об/мин	независимая проверка	23257,90

На основе полученной локальной модели были синтезированы два закона управления: классический ПИ регулятор и регулятор на основе модельно-прогнозирующего управления. ПИ-регулятор был выбран как базовый промышленный вариант, обладающий простой структурой и понятной процедурой настройки [3]. MPC-регулятор использует модель объекта для прогнозирования будущей динамики и формирования оптимального управляющего 1 воздействия с учетом ограничений на команду насоса, скорость ее изменения и допустимый диапазон частоты вращения [4, 5].

Сравнение качества регулирования выполнялось в среде MATLAB/Simulink. В качестве критериев использовались максимальная ошибка, среднеквадратическая ошибка, интегральная абсолютная ошибка и установившаяся ошибка. Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнение качества регулирования частоты вращения

Параметр	ПИ-регулятор	MPC-регулятор
Максимальная ошибка, об/мин	1156,76	553,73
Среднеквадратическая ошибка RMSE, об/мин	356,70	145,42
Интегральная абсолютная ошибка IAE	55371,83	22335,17
Установившаяся ошибка, об/мин	0,00	0,00

Результаты моделирования показывают, что оба регулятора обеспечивают выход частоты вращения на заданное значение без установившейся ошибки. При этом модельно-прогнозирующее управление обеспечивает уменьшение максимальной ошибки примерно в 2,1 раза, а среднеквадратической ошибки – примерно в 2,5 раза по сравнению с ПИ-регулятором. Это соответствует общим преимуществам MPC при управлении объектами с ограничениями и выраженной динамикой [6].

Независимая проверка по четвертой группе экспериментальных данных показала, что построенная модель описывает основные динамические свойства объекта с показателем соответствия 88,11 %. Наличие повышенной максимальной ошибки на отдельных участках связано с нелинейностью двигателя и изменением динамических характеристик при переходе между режимами. Для повышения точности в широком диапазоне частот вращения необходимо использовать набор локальных моделей и алгоритм переключения или интерполяции параметров.

Анализ особенностей идентификации и управления показал возможность:

- построения локальных динамических моделей авиационного двигателя по экспериментальным данным Pump RPM;

- использования переходных характеристик для получения физически корректных параметров модели при ограниченном объеме данных;
- применения ПИ-регулятора как базового варианта регулирования частоты вращения;
- повышения качества переходного процесса за счет модельно-прогнозирующего управления;
- использования независимой группы экспериментальных данных для проверки адекватности модели.

Таким образом, сочетание экспериментальной идентификации, локального моделирования и MPC регулирования может рассматриваться как перспективная основа для дальнейшей разработки многорежимной системы автоматического управления авиационным газотурбинным двигателем. Дальнейшее развитие работы целесообразно связать с построением gain-scheduling структуры, учетом ограничений исполнительного механизма и применением нелинейного модельно-прогнозирующего управления.

Список литературы

1. Jaw L.C., Mattingly J.D. Aircraft Engine Controls: Design, System Analysis, and Health Monitoring. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009. DOI: 10.2514/4.867057.
2. Ljung L. System Identification: Theory for the User. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1999. 609 p. ISBN 978-0-13-656695-3.
3. Åström K.J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. ISBN 978-1-55617-516-9.
4. Maciejowski J.M. Predictive Control with Constraints. Harlow: Prentice Hall, 2002. 331 p. ISBN 978-0-201-39823-6.
5. Rawlings J.B., Mayne D.Q., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. 2nd ed. Madison: Nob Hill Publishing, 2017. 623 p. ISBN 978-0-9759377-3-0.
6. Qin S.J., Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology // Control Engineering Practice. 2003. Vol. 11, No. 7. P. 733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.

Сведения об авторе

Чжоу Силиан, магистрант Самарского университета. Область научных интересов: автоматическое управление авиационными двигателями, идентификация динамических систем, модельно-прогнозирующее управление.

ANALYSIS OF IDENTIFICATION AND MODEL PREDICTIVE ROTOR SPEED CONTROL OF AN AERO-ENGINE BASED ON EXPERIMENTAL PUMP-RPM DATA

Zhou Siliang

Samara University, Samara, zhousiliang@yandex.ru

Keywords: aero-engine control, rotor speed control, system identification, PI controller, model predictive control.

The study presents an approach to aero-engine rotor speed modeling and control based on experimental Pump-RPM data. Local first-order dynamic models are identified around selected steady-state operating points, and a step-response-based estimation method is applied when direct identification gives physically incorrect parameters. A PI controller and a model predictive controller are compared in MATLAB/Simulink. The simulation results show lower maximum tracking error and RMSE for MPC than for PI control; validation on an independent data set gives Fit = 88.11 %, confirming applicability for multi-mode aero-engine control design.