

УДК 621.45.001

А.Н. ХУСТОЧКА

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

СПОСОБ СВЕРТКИ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГТД

На примере идентификации математической модели турбовинтовентиляторного двигателя Д-27 разработаны функции желательности невязок. Представлен один из способов свертки частных критериев для задач идентификации с применением теории нечетких множеств и нечеткой логики. Предложен метод формирования глобального критерия качества модели.

априорная информация, газотурбинный двигатель, глобальный критерий качества, идентификация, математическая модель, невязки, нечеткие множества, нечеткая логика, свертка, частый критерий качества, функции желательности

Введение

Повышение сложности и нагруженности конструкции, уровня параметров термодинамического цикла авиационных ГТД требует применения максимально адекватных математических моделей (ММ) на всех этапах жизненного цикла ГТД. Одним из наиболее эффективных направлений обеспечения адекватности ММ является их параметрическая идентификация, для реализации которой разработано достаточно большое количество методов. Однако, универсальных инженерных алгоритмов, обладающих хорошей эксплуатационной технологичностью, существует не так уж много. Поэтому, как правило, каждый специалист-практик использует достаточно хорошо проверенный математический аппарат в сочетании с собственным опытом и интуицией.

В данной работе продолжены исследования [1, 2] по разработке способов объединения человеческой логики и опыта с традиционными математическими методами идентификации ММ на основе теории нечетких множеств (ТНМ) и нечеткой логики.

1. Формулирование проблемы

Распространенные подходы к идентификации ММ ГТД, основанные на использовании классиче-

ских математических методов (наименьших квадратов, уравнивания, наименьших модулей, моментов и др.) подробно изложены в работах [3 – 8]. Однако указанные методы игнорируют априорную информацию об объекте и его модели, которыми располагает исследователь-разработчик (лицо, принимающее решение – ЛПР). Характерной чертой ММ термодинамических процессов является непрерывность изменения параметров, определяющих критерии оптимальности. В этих условиях пространство альтернатив становится бесконечным, поэтому для применения классических методов принятия решений приходится субъективно ограничивать пространство альтернатив и задавать конечный набор решений.

Автором накоплен определённый опыт по разработке ММ ряда двигателей ГП «Ивченко-Прогресс» и их идентификации с использованием современных численных методов направленного поиска [9, 10]. Было выявлено, что применение для решения задач идентификации традиционных методов сопряжено с рядом затруднений:

– как правило, явное аналитическое задание целевой функции, которая должна быть непрерывной и дифференцируемой относительно своих аргументов (варьируемых параметров), не представляется возможным;

– методы поисковой оптимизации в значительной степени оказались «слепыми» и не гарантировали нахождения глобального экстремума целевой функции;

– разброс значений варьируемых параметров не позволял аппроксимировать целевые функции монотонными зависимостями.

Преодоление этих проблем возможно на основе использования теории нечетких множеств [1, 11, 12].

2. Решение проблемы

Повышение точности и устойчивости процедуры идентификации лежит в русле максимального использования априорной информации об объекте и его ММ. Основное затруднение связано с тем, что эта информация разнородна, так как представлена в различных формах [1].

Следующее затруднение заключается в субъективной формализации параметров при ранжировании частных критериев и ограничений в порядке их значимости для оценки качества модели. Поскольку роль качественных факторов возрастает с повышением сложности задачи, полный учет критериев возможен путем формализации с помощью подходящего математического аппарата. Таковым является теория нечетких множеств и нечеткая логика, специально, разработанная Л. Заде для операций с нечеткими, расплывчатыми, связанными с неопределенностями нестатистической природы объектами [11]. Прикладное применение ТНМ для идентификации и оптимизации технологических процессов основательно разработано П.В. Севастьяновым [12].

В процессе идентификации пространство альтернатив может становиться бесконечным, что делает невозможным применение методов принятия решений, основанных на анализе частных показателей качества. Данная проблема решается путем свертки частных критериев и ограничений в некоторый глобальный критерий качества модели, экстремум (как

правило, максимум, а не минимум) которого определяет оптимум. Процедура свертки не может быть до конца формализована и определяется специфической задачей, целям и опытом, интуицией исследователя. Предлагаются варианты свертки: максимальный, аддитивный, мультипликативный.

2.1. Критерии идентификации для ММ ТВВД

Пример разработки критериев идентификации в виде функций желательности (ФЖ) представлен в [2]. Аналогичные ФЖ на основе опыта ЛПР разработаны для ММ ТВВД Д-27 (рис. 1): $\mu_{N_{\text{вб}}}$, $\mu_{G_{\text{т}}}$, $\mu_{\text{п нд}}$, $\mu_{\text{п вб}}$, μ_{T^*z} , $\mu_{G_{\text{в}}}$.

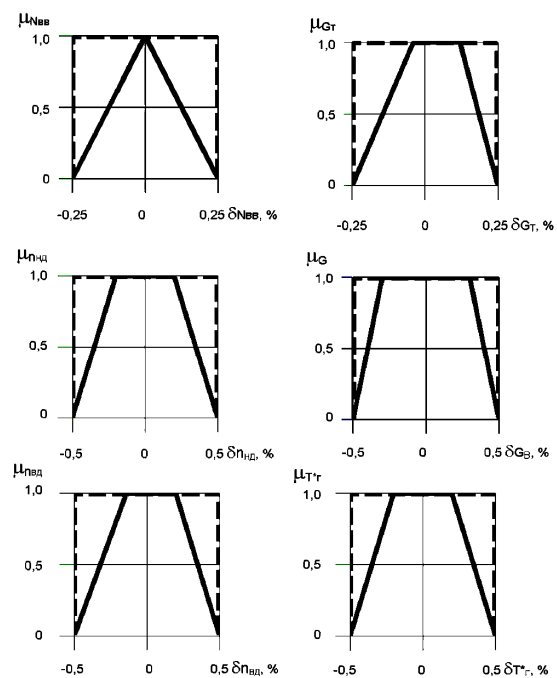


Рис. 1. Функции желательности невязок по критериям адекватности модели

2.2. Свертка частных критериев и ограничений

Предложенным способом описания критериев проблема их сравнения решается сравнительно просто, поскольку степень удовлетворения ММ критерию в той или иной точке пространства возможных решений характеризуется соответствующими значениями его ФЖ.

Например, если A и B – критерии, заданные своими функциями желательности $\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$, где $x \in X$, то точка x_1 удовлетворяет критериям A и B в одинаковой степени, если $\mu_A(x_1) = \mu_B(x_1)$, и точка x_2 удовлетворяет критерию A в большей степени, чем критерию B , если $\mu_A(x_2) > \mu_B(x_2)$. Сформулированный способ сравнения частных критериев служит основой формирования их свертки.

2.3. Способ формирования глобального критерия качества

Введем следующие условия, которым должно удовлетворять оптимальное решение:

– в точке оптимума все функции желательности должны отличаться от нуля;

– в оптимуме критерии удовлетворяются в максимально возможной степени (нежелательно, чтобы величина обобщенного критерия возрастала при улучшении ряда показателей качества за счет остальных).

На примере двух равнозначных критериев покажем способы формирования глобального критерия качества на основе сформулированных требований к оптимальности.

Пусть на множестве X заданы равнозначные частные критерии A и B , описываемые функциями желательности $\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$, $x \in X$, которые имеют единственные максимумы в точках x_A , x_B соответственно. При этом выполняются соотношения

$$\mu_A(x_A) > \mu_B(x_A), \mu_B(x_B) > \mu_A(x_B).$$

Тогда, в точке оптимума будет достигнут максимум функции

$$\mu_C(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X. \quad (1)$$

Способ свертки представлен в [12], а на рис. 2 показана графическая интерпретация полученного результата.

Для задач идентификации ММ ГТД характерно большое количество частных критериев и ограниченный, поэтому после получения гарантированной

оценки оптимума по максимальной стратегии целесообразно найти решение и для других вариантов формирования глобального критерия качества.

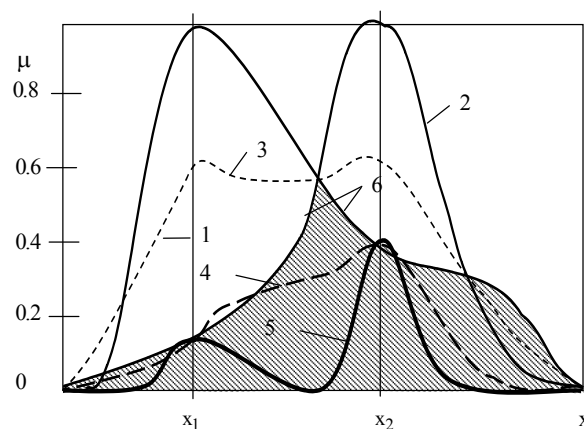


Рис. 2. Способы свертки равнозначных частных критериев, построенных на функциях принадлежности:

$$1 - \mu_A(x), 2 - \mu_B(x)$$

$$3 - \mu_C(x) = \frac{1}{2}(\mu_A(x) + \mu_B(x))$$

$$4 - \mu_C(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x)$$

$$5 - \mu_C(x) = \max(0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1)$$

$$6 - \mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Процедура отыскания компромиссного решения может заключаться в сопоставлении значений частных критериев в полученных разными методами точках оптимума.

Пусть $\mu_1(x)$, $\mu_2(x)$, $\mu_3(x)$ – некоторые варианты свертки частных критериев, например максимальный, аддитивный и мультипликативный. При максимизации каждой функции получены точки оптимума x_1 , x_2 , x_3 . В результате исследования значений частных критериев ЛПР формирует предпочтения, которые можно охарактеризовать ранжировкой x_1 , x_2 и x_3 .

Пусть эта ранжировка задана коэффициентами важности α_1 , α_2 и α_3 . Тогда, вводя нормирование на единицу функции

$$\bar{\mu}_1(x) = \mu_1(x) / \mu_1(x_1),$$

$$\bar{\mu}_2(x) = \mu_2(x) / \mu_2(x_2), \quad (2)$$

$$\bar{\mu}_3(x) = \mu_3(x) / \mu_3(x_3),$$

можно сформировать глобальный критерий – обобщенный компромиссный показатель качества:

$$\eta(x) = \min \left\{ \mu_1^{-\alpha_1}(x), \mu_2^{-\alpha_2}(x), \mu_3^{-\alpha_3}(x) \right\}, \quad (3)$$

где $\mu_i^{\alpha_i}(x)$ – показатель качества, нормированный с учетом коэффициента важности.

Заключение

Представленное применение методов ТНМ для идентификации математических моделей ГТД является новым направлением в развитии ММ ГТД. Выполнены исследования в направлении применения способа свертки частных критериев и ограничений, предложен метод формирования глобального критерия качества модели.

Дальнейшее исследование предлагается развивать в направлении практической реализации данной методики для конкретных ГТД.

Литература

1. Епифанов С.В. Анализ современных подходов к идентификации математических моделей ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2001. – Вып. 23 – С. 169 – 174.
2. Хусточка А.Н. Применение теории нечетких множеств при идентификации математических моделей ГТД // *Вестник двигателестроения: Науч.-техн. журн.* – Запорожье: ЗНТУ. – 2004. – № 2 – С. 96 – 99.
3. Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 99 – 100.
4. Литвинов Ю.А., Боровик В.О. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 288 с.
5. Идентификация систем управления газотурбинных двигателей / В.Г. Августинович, В.А. Акиндинов, Б.В. Боев, В.Т. Дедеш, А.Н. Добрынин, А.К. Жданов / Под ред. д-ра техн. наук В.Т. Дедеша. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.
6. Дмитриев А.И. Параметрическая идентификация математической модели ГТД в условиях автоматизированной системы обработки результатов испытаний: Дис... канд. техн. наук. 05.07.05. – Куйбышев, 1987. – 172 с.
7. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко, Г.Г. Грабовский, В.А. Дюков, С.А. Кузьменко, Н.А. Рюмшин, А.А. Самецкий. – К.: Техніка, 1998. – 236 с.
8. Тарелин А.А., Антипцев Ю.П., Аннопольская И.Е. Основы теории и методы создания оптимальной последней ступени паровых турбин. – Х.: Контраст, 2001. – С. 132 – 138.
9. Муравченко О.Ф., Хусточка А.Н. Поэлементная математическая модель турбовинтовентиляторного двигателя Д-27 // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2003. – Вып. 6 (41). – С. 61 – 64.
10. Хусточка А.Н. Идентификация математической модели двигателя АИ-25ТЛ при его модернизации // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2004. – Вып. 8 (16). – С. 151 – 154.
11. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
12. Севастьянов П.В., Туманов Н.В. Многокритериальная идентификация и оптимизация технологических процессов. – Минск: Навука і техника, 1990. – 224 с.

Поступила в редакцию 6.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.