

Алгоритмы нечеткого управления для системы имитации термогазодинамических параметров на испытательном стенде

И. А. Шмидт¹, Р. Р. Нарбеков², П. В. Иванов³

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

¹shmidt-ia@yandex.ru, ²renat@narbekov.space, ³pavlichenko2001@yandex.ru

Аннотация. Цель: Рассматривается алгоритм нечеткого управления для системы имитации термогазодинамических параметров на испытательном стенде газогенераторов турбореактивных двухконтурных двигателей. Система имитации термогазодинамических параметров является сложным многосвязным, нелинейным объектом.

Метод: Проведено сравнение с классическим подходом синтеза регуляторов для объектов описанного класса, обосновано применение нечеткого управления. Проанализированы неочевидные аспекты поведения испытательного стенда, лежащие в основе правил для нечеткого регулятора.

Результат: Предложена структура и алгоритм нечеткого регулятора, рассмотрены правила и функции принадлежности.

Выводы: Система управления для воспроизведения термогазодинамических параметров на испытательном стенде может быть успешно реализована на основе нечеткой логики.

Ключевые слова: нечёткое управление; стендовые САУ; многосвязные объекты управления

I. ВВЕДЕНИЕ

В сложившейся практике газогенераторы турбореактивных двигателей разрабатывают и испытывают на начальной стадии работы, когда еще окончательно не определены многие основные параметры двигателя. Отсюда возникает задача их испытания до разработки прочих конструктивных элементов ГТД [1]. Для проведения таких испытательных работ проектируются стенды, которые должны воспроизводить условия работы газогенератора в реальной компоновке двигателя. Таким образом ставится задача имитации термогазодинамических параметров разрабатываемого полноразмерного двигателя на стенде для испытания газогенератора учетом режимов его работы и предполагаемых условий полета.

Испытательный стенд для испытания газогенераторов турбореактивных двухконтурных двигателей представляет собой сложную многосвязную систему, обеспечивающую подачу воздуха в испытуемый газогенератор с определенными термогазодинамическими параметрами (температура, давление).

На рис. 1 показана структура испытательного стенда для системы имитации термогазодинамических параметров [2].

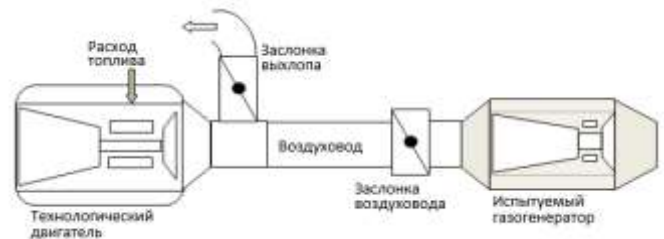


Рис. 1. Испытательный стенд

Поток воздуха нагнетается и подается на вход газогенератора из наружного контура двухконтурного технологического двигателя. Интенсивность подачи обеспечивается изменением режима работы технологического ГТД. Режим двигателя регулируется изменением расхода топлива. Перед поступлением в газогенератор нагретый двигателем воздух проходит через протяженный воздуховод. В тракте воздуховода установлены две заслонки. Заслонка перепуска воздуха на выхлоп (далее заслонка выхлопа) определяет количество воздуха, которое выбрасывается из стендовой системы наружу. Заслонка воздуховода обеспечивает изменение расхода воздуха, подаваемого на вход газогенератора.

Таким образом, имитация газодинамических параметров, соответствующих требуемым параметрам воздуха проектируемого двигателя на входе в газогенератор, обеспечивается изменением режима работы технологического ГТД и проходных сечений заслонок. Для реализации подобной имитации на стенде необходимо совместное управление всеми управляющими воздействиями для достижения поставленной цели, т. е. ставится задача разработки системы управления.

II. ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Система должна в максимальной степени воспроизводить условия, возникающие при работе испытуемого газогенератора, такие же как были бы при его работе в составе проектируемого двухконтурного газотурбинного двигателя. В качестве

термогазодинамических параметров, которые должны быть проимитированы, выступают температура и давление на входе в газогенератор ($T_{вх,ГГ}$, $P_{вх,ГГ}$).

Испытательный стенд должен обеспечивать воспроизведение этих параметров, задаваемых в виде функциональной зависимости от режима газогенератора (частоты вращения компрессора высокого давления $n_{вд}$ по закону:

$$T_{вх,ГГ} = f(n_{вд})$$

$$P_{вх,ГГ} = f(n_{вд})$$

Регулирование имитируемых термогазодинамических параметров влечет за собой изменение расхода воздуха через технологический газотурбинный двигатель (ГТД), которое в свою очередь оказывает влияние на положения рабочей точки технологического двигателя относительно его линии рабочих режимов (описывается степенью повышения давления в компрессоре ГТД – $\pi_{кнд}$).

При регулировании входных параметров испытуемого газогенератора, приоритетной задачей является обеспечение газодинамической устойчивости технологического ГТД [3, 4] – обязательное удержание рабочей точки внутри зоны допустимой работы компрессора с заданным запасом устойчивости.

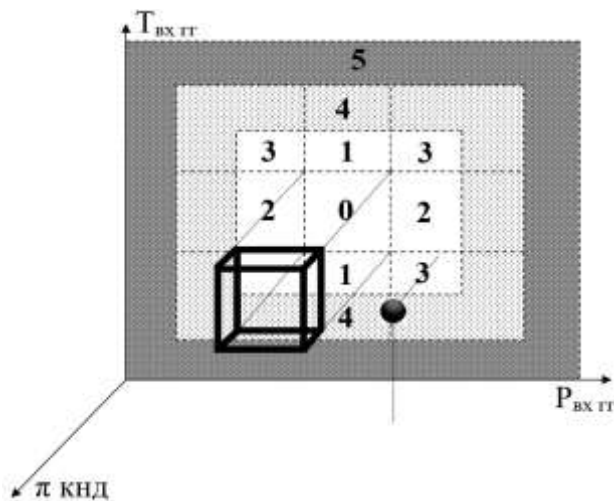


Рис. 2. Целевое регулирование параметров ГТД

Графически, цель работы разрабатываемых алгоритмов управления можно представить как решение задачи по оптимальному переводу «точки состояния», представленную координатами $T_{вх,ГГ}$, $P_{вх,ГГ}$, $\pi_{кнд}$ внутрь целевого прямоугольного параллелепипеда (рис. 2), при этом пересечение точкой границы по оси $\pi_{кнд}$ может повлечь нарушение устойчивой работы компрессора и поэтому абсолютно не допустимо. Удаленная от нас граница по оси $\pi_{кнд}$ соответствует границе «нижнего срыва», а ближняя – «верхнего срыва». Ширина и высота целевого параллелепипеда соответствуют заданной зоне нечувствительности регулятора для входной температуры и давления.

В качестве управляющих воздействий на систему имитации термогазодинамических параметров будут выступать изменение режима технологического ГТД, которое осуществляется заданием темпа подачи топлива внутри топливного регулятора двигателя, и проходного сечения заслонок перепуска воздуха на выхлоп и внутри воздуховода.

Физические газодинамические процессы, проходящие в стендовой системе имитации параметров, обуславливают логику её поведения как объекта управления, в частности:

А. Увеличение подачи топлива на технологический ГТД вызывает:

- повышение температуры воздуха на входе в газогенератор ($T_{вх,ГГ}$) в наибольшей степени;
- повышение давления на входе в газогенератор ($P_{вх,ГГ}$) в средней степени;
- смещение положения рабочей точки ($\pi_{кнд}$) на газодинамической характеристике технологического двигателя вниз в наименьшей степени.

В. Увеличение проходного сечения заслонки перепуска воздуха на выхлоп приводит к:

- понижению $P_{вх,ГГ}$ в средней степени;
- понижению $T_{вх,ГГ}$ в наименьшей степени;
- снижению точки $\pi_{кнд}$ на газодинамической характеристике технологического двигателя в наибольшей степени.

С. Увеличение проходного сечения заслонки воздуховода приводит к:

- понижению $T_{вх,ГГ}$ в наименьшей степени;
- повышению $P_{вх,ГГ}$ в наибольшей степени;
- снижению точки $\pi_{кнд}$ на газодинамической характеристике технологического двигателя в средней степени.

Очевидно, что при уменьшении соответствующего управляющего воздействия на исполнительный механизм, влияние их на регулируемые параметры будет описываться симметрично.

III. ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ

Традиционный подход к управлению многосвязным объектом подразумевает полную автономность каналов управления по заданию [5], что обеспечивается введением передаточных функций, корректирующих обратные связи между каналами управления (корректирующих звеньев).

На практике, при синтезе САУ для многосвязных объектов, практически всегда ограничиваются объектами второго порядка, для которых необходимо введение в структуру регулятора только двух корректирующих

звеньев. При большем количестве контуров синтез регулятора становится практически невозможным.

Ситуация усугубляется тем, что система является существенно нелинейной, так как, состоит из газотурбинного технологического двигателя – нелинейного объекта с перекрестными связями, воздуховода – существенной инерционности и заслонок с нелинейной расходной характеристикой перекрестной связью по давлению с технологическим двигателем. Сам испытуемый газогенератор со своей системой управления тоже является нелинейным. Таким образом, отсутствие автономности каналов управления может привести к неустойчивой работе системы вследствие их взаимодействия.

IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В УПРАВЛЕНИИ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ

В качестве альтернативы предлагается разработка регулятора, основанного на нечеткой логике (fuzzy logic), обеспечивающего гарантированный запас устойчивости замкнутой системы управления.

Аналогом могут служить нечеткие регуляторы, предложенные для управления ТРД [6].

При проектировании нечеткого регулятора необходимо учитывать неочевидные аспекты поведения объекта управления [7], которые или являются составляющими экспертного опыта специалистов, проводящих испытания на стенде, или выявляются при проектировании и моделировании.

Например, при большом отклонении температуры от заданного значения невозможно скомпенсировать её за счет увеличения или уменьшения подачи топлива на технологический ГТД, поскольку при этом диапазона изменения проходного сечения заслонок будет недостаточно для удержания рабочей точки внутри зоны допустимой работы компрессора. Обращаясь к графическому представлению (рис. 2) это значит, что при смещении точки состояния по оси $T_{вхгг}$ вверх или вниз в пределах зон, обозначенных цифрой 1, регулятор должен обеспечить качественное регулирование температуры на входе в испытуемый газогенератор. При выходе точки состояния в зону, обозначенную цифрой 4, регулятор должен учитывать положение по оси $\pi_{кнд}$, а при дальнейшем удалении точки состояния от верхней/нижней грани целевого параллелепипеда, т. е. попадания в зону 5, регулирование будет обеспечиваться только благодаря удержанию точки состояния между гранями целевого параллелепипеда по оси $\pi_{кнд}$.

Аналогичные закономерности справедливы и для смещения точки состояния по оси $P_{вхгг}$.

Обобщая сказанное можно разделить плоскость $T_{вхгг}$, $P_{вхгг}$ на отдельные участки:

- При нахождении точки состояния в участке 0 система достигла своей цели, выдача управляющих воздействий не производится. Выполняется требуемое равенство параметров на входе

испытуемого газогенератора и заданных параметров системы.

- На участках 1 происходит регулирование $T_{вхгг}$ при помощи изменения подачи топлива на технологический ГТД.
- На участках 2 происходит регулирование $P_{вхгг}$ при помощи изменения проходного сечения заслонки воздуховода.
- На участках 3 регулятор производит совместное регулирование $T_{вхгг}$ и $P_{вхгг}$.
- При нахождении точки состояния на участках 4 невозможно игнорировать смещение точки состояния по оси $\pi_{кнд}$ – регулятор производит регулирование $T_{вхгг}$ или $P_{вхгг}$ совместно с регулированием положения рабочей точки $\pi_{кнд}$.
- Если точка состояния находится на участке 5, то это означает, что расстояние до целевых значений $T_{вхгг}$, $P_{вхгг}$ превышает возможности регулирования по этим координатам. Производится только регулирование положения рабочей точки $\pi_{кнд}$.

Данные неформальные правила регулирования объекта построены на основе экспертного опыта и моделирования системы, классические подходы к управлению не позволяют учитывать такие неочевидные аспекты.

Однако качественная оценка параметра в лингвистической форме позволяет описывать очень сложные явления, которые с трудом можно представить в количественном описании. Например, отклонение рабочей точки может находиться в допустимой области, ниже допустимой области, выше, критически выше или критически ниже. Таким образом, лингвистическая переменная «Отклонение рабочей точки» имеет 5 термов («Допустимое», «Требуется понизить РТ», «Требуется повысить РТ», «Критически требуется понизить РТ», «Критически требуется повысить РТ»).

Все переменные связаны между собой правилами, которые объединены в общую базу правил. Правило состоит из совокупностей событий и результатов. Правила формируются экспертом, исходя из целей регулирования, с учетом рассмотренных выше аспектов поведения системы. Все правила работают параллельно.

При формировании управляющих воздействий происходит обработка правил – нечеткие значения условий преобразуются в количественную форму. Для этого используются функции принадлежности (ФП), которые характеризуют принадлежность величины лингвистической переменной.

Для наглядности представим правила и соответствующие им ФП для входной переменной «Отклонение температуры» (ДлтТ). На рисунке 3 представлены следующие термы (или же ФП): «Требуется повысить Температуру», «Регулирование Температуры», «Требуется понизить Температуру»

$\mu_{\text{ТребПовыситьТ}}(\text{ДлтТ})$

$$= \begin{cases} 0, & \text{ДлтТ} < -\text{МахДлтТ} \\ 1, & -\text{МахДлтТ} \leq \text{ДлтТ} \leq -\text{ЧувстТ} \\ 0, & \text{ДлтТ} > -\text{ЧувстТ} \end{cases}$$

Если отклонение температуры от заданной меньше допустимого – температуру требуется повысить. Используются обозначения: МахДлтТ – практически возможное отклонение температуры $T_{\text{вхгр}}$ от заданного значения, ЧувстТ – граница чувствительности по отклонению температуры $T_{\text{вхгр}}$ (точка 3 на рис. 3), которая означает попадание текущей температуры в границы целевого параллелепипеда.

$\mu_{\text{РегулируемТ}}(\text{ДлтТ})$

$$= \begin{cases} 0, & \text{ДлтТ} < -\text{РегРТ}(\text{лев}) \\ \frac{\text{ДлтТ} + \text{РегРТ}(\text{лев})}{\text{РегРТ}(\text{лев}) - \text{РегТ}}, & -\text{РегРТ}(\text{лев}) < \text{ДлтТ} < -\text{РегТ}(\text{лев}) \\ 1, & -\text{РегТ}(\text{лев}) \leq \text{ДлтТ} \leq \text{РегТ}(\text{прав}) \\ \frac{\text{РегРТ}(\text{прав}) - \text{ДлтТ}}{\text{РегРТ}(\text{прав}) - \text{РегТ}}, & \text{РегТ}(\text{прав}) < \text{ДлтТ} < \text{РегРТ}(\text{прав}) \\ 0, & \text{ДлтТ} > \text{РегРТ}(\text{прав}) \end{cases}$$

Положение до точки 1 (и после точки 6) на рис. 3, соответствует области 5 на рисунке 2 (производится только регулирование положения рабочей точки $\pi_{\text{кнд}}$), от точки 1 до 2 (или от 5 до 6) – соответствует областям 4 (совместное регулирование $T_{\text{вхгр}}$ и $\pi_{\text{кнд}}$), от 2 до 5 – областям 1, в которых происходит регулирование $T_{\text{вхгр}}$. В формуле обозначено: РегТ – граница зоны регулирования температуры (точки 2 и 5 на рис. 3), РегРТ – граница зоны регулирования положения рабочей точки (точки 1 и 6).

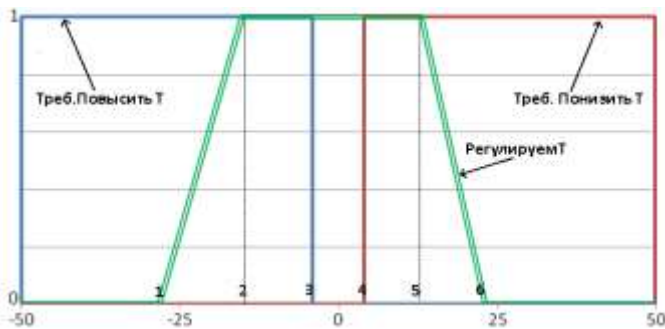


Рис. 3. Пример функций принадлежности для переменной «Отклонение температуры»

Для участка между точками 1 и 6 вклад в регулирование температуры $T_{\text{вхгр}}$ будет определяться следующей частью одного из правил:

if 'ДлтТ' is 'РегулируемТ' and 'ДлтТ' is 'ТребПовыситьТ' ... then 'РасходТоплива' is 'РасходУвеличить'

После слова «then» описывается выход регулятора – действие, которое необходимо совершить. В данном случае требуется подать управляющую команду на увеличение подачи топлива.

Полная формулировка этого правила учитывает: отклонение рабочей точки от линии режима турбины по оси $\pi_{\text{кнд}}$ (ДлтРТ), степень открытия заслонки выхлопа (ПроцЗаслВхл) и положение рукоятки управления технологического двигателя (АРудТД). Таким образом, полная формулировка правила будет иметь вид.

if 'ДлтТ' is 'РегулируемТ' and 'ДлтРТ' is not 'ТребПовыситьРТ' and 'АРудТД' is not 'АрудМеньшеМГ' and 'ПроцЗаслВхл' is not 'ЗаслонкаПочтиЗакрыта' and 'ДлтТ' is 'ТребПонизитьТ' then 'РасходТоплива' is 'РасходУвеличить'

Полная база правил включает около двух десятков правил.

Результаты математического моделирования и испытаний на стенде подтвердили полную адекватность поставленной задаче разработанного нечеткого регулятора.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим, что нетрадиционные подходы к реализации алгоритмов управления многосвязными объектами, со значительными нелинейными характеристиками и перекрестными связями оказываются более эффективными чем традиционные. В данном случае, нечеткую логику целесообразно применять, когда необходимо учитывать неочевидные аспекты поведения объекта управления, которые или являются составляющими экспертного опыта специалистов, или выявляются при проектировании и моделировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Григорьев В.А. Испытания и обеспечение надежности авиационных ГТД и энергетических. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), 2011.
- [2] Пат. РФ № 2622588 / А.А. Иноземцев, М.Д. Галлямов, А.В. Двинских, И.Н. Грибков, А. И. Полулях. Стенд для испытания газогенераторов турбореактивных двухконтурных двигателей; Опубл. 16.06.17. Бюл. № 17.
- [3] Клячкин А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1969.
- [4] Августиневич В.Г., Акиндинов В.А. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей. / Под ред. В.Т. Дедеша. М.: Машиностроение, 1984. 196 с.
- [5] Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. / Под ред. О.С. Соболева. М: Энергия, 1970.
- [6] Титов Ю.К. Адаптивные нечеткие устройства систем управления с гарантированной устойчивостью: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. / ПНИПУ, 2019.
- [7] Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. К.: Радиоаматор, 2008.