

УДК 681.5

СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ НЕЛИНЕЙНОСТИ ТИПА ЗОНЫ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Е. В. Чичерова¹,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Исследованы некоторые вопросы, связанные с обеспечением динамических характеристик системы автоматического управления турбовального двигателя на примере контура управления расходом топлива. Проведен анализ альтернативных методов управления, повышающих точность, быстродействие и качество переходных процессов. Рассмотрены линейный пропорционально-интегральный регулятор, нелинейный оптимальный по быстродействию регулятор и регулятор переменной структуры. Проведен сравнительный анализ работы исследуемых регуляторов, по результатам которого выбран лучший с точки зрения обеспечения требуемого качества регулирования и простоты технической реализации.

Ключевые слова — система автоматического управления, контур управления расходом топлива, ПИ-регулятор, принцип максимума, регулятор переменной структуры, устойчивость, точность, быстродействие.

Введение

Совершенствование систем автоматического управления (САУ) играет важную и все возрастающую роль в развитии авиационного двигателестроения. Современная САУ должна обеспечить высокую точность поддержания или ограничения параметров двигателя, таких как тяга, мощность, частота вращения ротора турбокомпрессора, температура газа, обеспечение запасов газодинамической устойчивости. Высокие требования предъявляются и к динамическим характеристикам (минимизации времени запуска и приемистости, снижению перерегулирования параметров, обеспечению запасов устойчивости).

Цель данной статьи — освещение некоторых вопросов, связанных с обеспечением динамических характеристик САУ турбовального двигателя на примере контура управления расходом топлива. В статье приводятся результаты исследования устойчивости и качества переходных процессов, а также анализ альтернативных способов управления расходом топлива, позволяющих по-

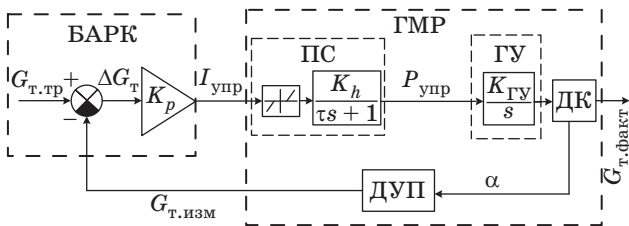
¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения Л. А. Мирославский.

высить точность, быстродействие и качество регулирования исследуемой системы.

Постановка задачи

В САУ турбовального двигателя управление расходом топлива осуществляется с помощью электронной системы блока автоматического регулирования и контроля (БАРК) совместно с гидромеханическим регулятором (ГМР). Система является двухконтурной. Внешние контуры выполняют функцию ограничения и поддержания параметров двигателя (таких как требуемая частота вращения ротора турбокомпрессора, температура газа в камере сгорания, мощность и крутящий момент на свободной турбине) и формируют сигнал требуемого расхода топлива. Далее этот расход поступает во внутренний контур. Задачей внутреннего контура является формирование фактического расхода топлива по требуемому расходу [1–3]. Структурная схема внутреннего контура управления расходом топлива представлена на рис. 1.

Гидромеханический регулятор включает одну нелинейность с зоной нечувствительности, наличие которой может привести к статической ошибке по расходу топлива. При анализе установившихся режимов системы можно показать, что если



■ **Рис. 1.** Структурная схема внутреннего контура управления расходом топлива: ПС — преобразователь сигналов; ГУ — гидроусилитель; ДК — дозирующий кран; ДУП — датчик угла поворота

электронный и гидромеханический регуляторы являются статическими, то установившийся режим будет реализован со статической ошибкой. Причем величина ошибки будет превосходить величину зоны нечувствительности. Если в системе имеется один или несколько интеграторов, то статические режимы будут заключены внутри зоны нечувствительности. В этом случае величина статической ошибки будет зависеть от начальных условий.

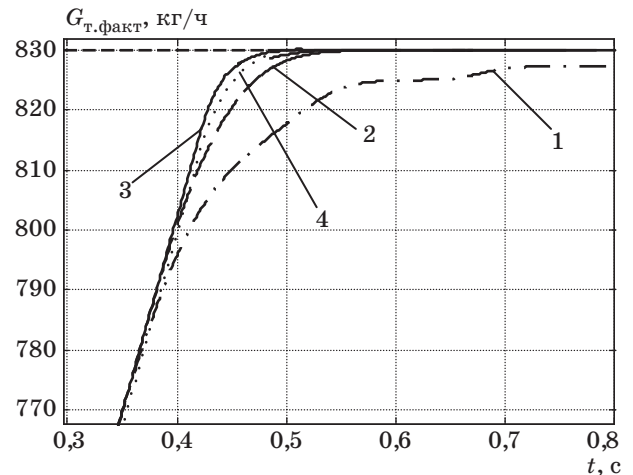
В ходе исследования системы на устойчивость установлено, что, по частотному критерию В. М. Попова (теорема об устойчивости системы с одним интегратором, одной нелинейностью и неединственным положением равновесия) [4], такая система является устойчивой.

Таким образом, внутренний контур управления расходом топлива представляет собой устойчивую систему, у которой положение равновесия может достигаться в любой точке зоны нечувствительности в зависимости от начальных условий.

Для уменьшения статической ошибки можно воспользоваться штатными средствами, например, увеличить коэффициент усиления по входному току K_T . Однако такой способ приводит к возникновению колебаний в системе, что отрицательно сказывается на качестве регулирования.

Другой способ уменьшения статической ошибки — подача на вход ПС дополнительных гармонических колебаний малой амплитуды. Установлено, что сигнал с амплитудой, равной величине зоны нечувствительности, существенно уменьшает статическую ошибку. Однако это требует длительного времени переходного процесса. Причем даже незначительное превышение амплитудой гармонического сигнала величины зоны нечувствительности заметно усиливает колебания в системе, увеличивая время переходного процесса, что в целом ухудшает качество регулирования (кривая 1 на рис. 2).

В статье рассматриваются три альтернативных регулятора, способных обеспечить минимум

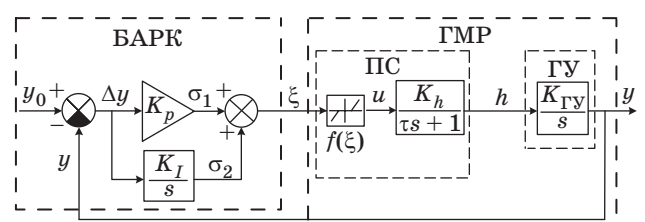


■ **Рис. 2.** Переходные процессы во внутреннем контуре управления расходом топлива при участии различных регуляторов: 1 — ПИ-регулятор с добавлением гармонического сигнала амплитудой 2 мА; 2 — ПИ-регулятор; 3 — оптимальный по быстродействию регулятор, построенный на основании принципа максимума Л. С. Понтрягина; 4 — регулятор переменной структуры

статической ошибки по величине расхода топлива и улучшить качество переходных процессов в системе: линейный пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор), оптимальный по быстродействию регулятор и регулятор переменной структуры (РПС). Синтез регуляторов осуществлен при условии, что требуемый расход топлива является постоянной величиной. Такой подход основан на предположении, что быстродействие внутреннего контура значительно выше, чем внешнего, и требуемый расход топлива изменяется существенно медленнее фактического расхода.

ПИ-регулятор

Для обеспечения нулевой статической ошибки управляющий сигнал, поступающий в ГМР, формируется как сумма ошибки регулирования по расходу топлива и интеграла от нее. Структурная схема контура управления с ПИ-регулятором показана на рис. 3.



■ **Рис. 3.** Структурная схема внутреннего контура управления расходом топлива с ПИ-регулятором

В работе [5] показано, что установившийся режим реализуется без статической ошибки.

На основании теоремы об устойчивости с одной нелинейностью и двумя интеграторами [4] было установлено, что исследуемая система устойчива, если ее параметры удовлетворяют следующему неравенству: $K_p - K_I\tau > 0$.

В ходе исследования было установлено влияние параметров ПИ-регулятора на динамические характеристики внутреннего контура. Исследование показало, что в системе реализуется апериодический переходный процесс. С ростом коэффициента усиления при интегральной составляющей время переходного процесса вначале сокращается, но, начиная с некоторого его значения, возникает перерегулирование. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к возрастанию величины перерегулирования и затягиванию времени переходного процесса. Данное явление можно устранить, введя ограничение на время работы интегратора. Тогда коэффициент усиления можно увеличить, сохранив высокое быстродействие системы при отсутствии перерегулирования.

График переходного процесса во внутреннем контуре управления расходом топлива с ПИ-регулятором представлен кривой 2 на рис. 2.

К достоинствам ПИ-регулятора можно отнести:

- обеспечение нулевой статической ошибки по расходу топлива;
- простоту реализации.

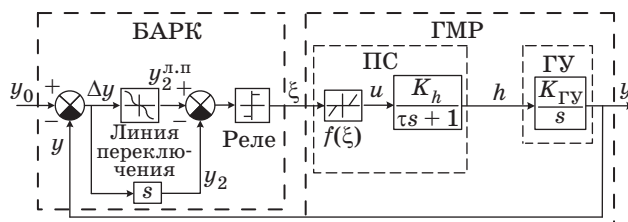
Недостаток — сложность с обеспечением запасов устойчивости системы.

Оптимальный по быстродействию регулятор

Синтез нелинейного оптимального по быстродействию регулятора проведен в соответствии с принципом максимума Л. С. Понтрягина [6].

Задача оптимального быстродействия формулируется следующим образом: среди всех допустимых управлений $\xi = \xi(t)$, под воздействием которых управляемый объект переходит из заданного начального фазового состояния $y = (y_1, y_2)$ в требуемое конечное состояние $y_0 = (0, 0)$, найти такое, для которого этот переход осуществляется за кратчайшее время.

Таким образом, задача управления нелинейным объектом сводится к линейной задаче оптимального по быстродействию управления, для которой принцип максимума является необходимым и достаточным условием оптимальности. На оптимальной траектории функция $\xi = \xi(t)$ имеет не более одного переключения [6–9]. В оптимальном законе управления используются только максимальное и минимальное значения функ-



■ Рис. 4. Структурная схема внутреннего контура управления расходом топлива с нелинейным оптимальным регулятором

ции $f(\xi)$. Это делает структуру оптимального управления и вид фазовых траекторий инвариантными от вида нелинейности функции $f(\xi)$.

Структурная схема контура управления расходом топлива с нелинейным оптимальным регулятором показана на рис. 4.

График переходного процесса в контуре управления расходом топлива при работе нелинейного оптимального регулятора представлен кривой 3 на рис. 2.

Достоинствами нелинейного оптимального регулятора являются:

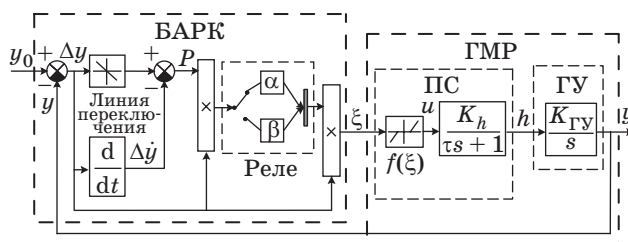
- обеспечение наименьшего времени переходного процесса;
- отсутствие перерегулирования при любых начальных условиях управляемого параметра;
- независимость структуры оптимального управления и вида фазовых траекторий от вида нелинейности.

Недостаток — для реализации оптимального закона управления необходимо точно знать функцию переключения как часть фазовой траектории.

Регулятор переменной структуры

Синтез РПС осуществлен в соответствии с работами [10–13]. Данный регулятор представляет собой линейные структуры α и β , переключающиеся между собой по линейному закону. Схема контура управления расходом топлива с РПС показана на рис. 5.

Такой регулятор характеризует простота его машинной реализации, так как закон управ-



■ Рис. 5. Структурная схема внутреннего контура управления расхода топлива с РПС

ления представляет собой линейную зависимость вида

$$\xi = \Psi \Delta y, \quad (1)$$

а закон переключения управляющего сигнала представляет собой комбинацию координаты ошибки и ее производной вида

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } (\Delta \dot{y} + c \Delta y) \Delta y > 0; \\ \beta & \text{при } (\Delta \dot{y} + c \Delta y) \Delta y < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где Δy — величина ошибки регулирования; $\Delta \dot{y}$ — величина производной ошибки регулирования; c — величина, меньшая, чем τ^{-1} .

В данной комбинации важен только знак. В зависимости от знака происходит выбор между двумя структурами — α -структурой или β -структурой. Коэффициенты усиления α - и β -структуры выбираются таким образом, чтобы линейная структура, соответствующая $\Psi = \alpha$, была колебательной, а линейная структура, соответствующая $\Psi = \beta$, имела устойчивое вырожденное движение.

Благодаря комбинации двух структур удается получить не только устойчивость, но и хорошее качество переходных процессов, поскольку за счет такого комбинирования получают новые свойства системы, которые были недоступны для системы с одной структурой.

Прямая $P = \Delta \dot{y} + c \Delta y$ является траекторией, на которой происходит переключение между структурами. В данном случае прямая P является линией скольжения. Коэффициент λ характеризует скорость затухания движения по этой траектории.

Условие существования скользящего режима на прямой P имеет вид

$$P \frac{dP}{dt} < 0. \quad (3)$$

В скользящем режиме траектория движения системы не зависит от ее линейной части. Значения коэффициентов α и β могут быть больше, чем в системе с П-регулятором. За счет этого достигается более высокая статическая точность и повы-

шается быстродействие системы. Однако быстродействие РПС будет ниже, чем у оптимального регулятора. Это объясняется тем, что в РПС величина управляющего сигнала уменьшается с уменьшением величины рассогласования, в отличие от оптимального регулятора, в котором управляющий сигнал не зависит от величины рассогласования.

График переходного процесса при работе РПС в контуре управления расходом топлива представлен кривой 4 на рис. 2.

Достоинствами РПС являются:

- простота реализации: закон управления и функция переключения являются линейной комбинацией фазовых координат;
- более высокое быстродействие по сравнению с быстродействием ПИ- и П-регулятора системы;
- инвариантность траекторий системы относительно линейной части системы в скользящем режиме.

Недостаток РПС — меньшее быстродействие и меньшая статическая точность, чем у оптимального регулятора.

Заключение

Из приведенного исследования видно, что все рассмотренные выше регуляторы: ПИ-регулятор, оптимальный нелинейный регулятор и РПС — обеспечивают более высокую статическую точность и быстродействие, чем П-регулятор с добавлением гармонического сигнала малой амплитуды.

Наилучшими характеристиками по быстродействию и качеству переходных процессов обладает оптимальный нелинейный регулятор, но с точки зрения практического применения более приемлемым является РПС. По своим характеристикам он незначительно уступает оптимальному регулятору, при этом его линейный закон управления реализовать практически значительно проще, чем закон управления оптимального нелинейного регулятора.

Литература

1. Системы автоматического управления авиационными ГТД; энциклопедический справочник / под ред. д-ра техн. наук, проф. О. С. Гуревича. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. — 208 с.
2. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями / под ред. О. С. Гуревича. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. — 264 с.
3. Сумачев С. А. Анализ систем автоматического управления газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук / СПбГУ. — СПб., 2002. — 84 с.
4. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления / под ред. Р. А. Нелепина. — М.: Наука, 1975. — 447 с.
5. Чичерова Е. В. Анализ динамики и синтез законов управления расходом топлива газотурбинного дви-

- гателя: дис. ... маг. техн. и технолог. — СПб.: СПбГУАП, 2011. — 90 с.
6. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Наука, 1969. — 384 с.
 7. Чичерова Е. В. Принцип максимума как метод оптимизации динамических систем, содержащих нелинейности типа зоны нечувствительности // 64-я Междунар. студ. науч. конф. ГУАП: сб. докл. В 2 ч. Ч. I. Технические науки. СПб.: СПбГУАП, 2011. С. 66–70.
 8. Цирлин А. М. Условия оптимальности скользящих режимов и принцип максимума для задач управления со скалярным аргументом // Автоматика и телемеханика. 2009. № 5. С. 106–121.
 9. Карамзин Д. Ю. Принцип максимума в задаче управления при ограниченных фазовых координатах // Автоматика и телемеханика. 2007. № 2. С. 26–38.
 10. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. — М.: Наука, 1967. — 336 с.
 11. Мещанов А. С. Синтез многоуровневых векторных уравнений для скользящего режима заданного порядка // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2007. № 4. С. 47–51.
 12. Петунин В. И., Фрид А. И. Метод построения адаптивных логико-динамических систем автоматического управления с селекторами // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 5. С. 49–56.
 13. Петунин В. И. Синтез систем автоматического управления газотурбинными двигателями с селектором каналов // Вестник УГАТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2008. Т. 11. № 1(28). С. 3–10.

Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2010 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>) и на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2009 гг. Вы можете заказать в редакции по льготной цене.

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4200 рублей, включая НДС 18 %, почтовые и таможенные расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>

«Гал»

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕР-ПОЧТА-2003»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: krasnodar@interpochta.ru

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru, сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru, сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.