

УДК 681.5.013

Е. В. Чичерова, инженер-конструктор, e-mail: proffgrand@mail.ru,
Открытое Акционерное Общество "Климов", г. Санкт-Петербург

Способы повышения качества управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя

Обсуждаются вопросы повышения качества управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя с помощью электронных регуляторов различных типов. Рассматриваются регуляторы со статическим и переменным коэффициентом усиления, квадратичный и нечеткий логический регуляторы. Проводится исследование качества динамических процессов и запасов устойчивости системы при работе каждого из регуляторов. По результатам анализа выбирается структура регулятора, обеспечивающая наилучшее качество управления частотой вращения силовой турбины.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, силовая турбина, линейный регулятор, квадратичный регулятор, нечеткий логический регулятор, регулятор с переменным коэффициентом усиления

Введение

Газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой сложную термогазодинамическую систему со множеством особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании системы автоматического управления (САУ). САУ современного авиационного двигателя выполняет множество функций. Эти функции распределены и осуществляются цифровым регулятором и гидромеханическими исполнительными механизмами.

Основную часть функций по управлению двигателем выполняет цифровой регулятор. В его задачи входит управление режимами работы ГТД, поддержание и/или ограничение различных параметров, диагностика и контроль состояния двигателя и элементов САУ и обеспечение сервисно-информационных функций. В задачу гидромеханической части САУ входит управление механизацией двигателя по командам цифрового регулятора и управление работой ГТД по упрощенным законам в случае отказа электронной системы.

От качества настройки электронных алгоритмов во многом зависит качество управления параметрами двигателя. Часто в электронных системах управления ГТД используются линейные регуляторы П, ПД, ПИ и ПИД типа. Их популярность объясняется простотой математического описания, дешевизной реализации и достаточной эффективностью. Однако, как показывает практика, в рамках линейной теории не всегда удается настроить ПИД регулятор для обеспечения требуемого качества переходных процессов в нелинейной системе. При управлении сложными нелинейными объектами, каким является ГТД, такие регуляторы не всегда могут обеспечить требуемое качество управления

его параметрами, устойчивость и робастность системы при изменениях условий эксплуатации и возникновении отказов. В этом случае имеет смысл применять альтернативные нелинейные регуляторы. Например, это может быть регулятор с переменным коэффициентом усиления, квадратичный регулятор или нечеткий логический регулятор (НЛР), обладающий свойством робастности.

Проведем исследование качества переходных процессов и запасов устойчивости контура поддержания частоты вращения силовой турбины ГТД с перечисленными регуляторами.

Описание контура поддержания частоты вращения силовой турбины

Основной задачей САУ вертолетного двигателя является поддержание частоты вращения несущего винта $n_{НВ}$. Эта задача выполняется путем управления частотой вращения силовой турбины (СТ) $n_{СТ}$ через требуемый расход топлива G_T , который зависит от частоты вращения ротора турбокомпрессора (ТК) $n_{ТК}$ и ее производной $\dot{n}_{ТК}$. В зависимости от режима работы двигателя требуемую производную частоты вращения ротора ТК формируют различные контуры. Например, на режиме "Малый Газ" значение $\dot{n}_{ТК}$ определяется контуром поддержания требуемой частоты вращения ротора турбокомпрессора, а на режиме "Полет" — контуром поддержания частоты вращения силовой турбины.

Поскольку на режиме "Полет" двигатель может эксплуатироваться значительную часть времени, то от выбора структуры и параметров электронного регулятора зависит динамическое качество управления ГТД и его ресурс.

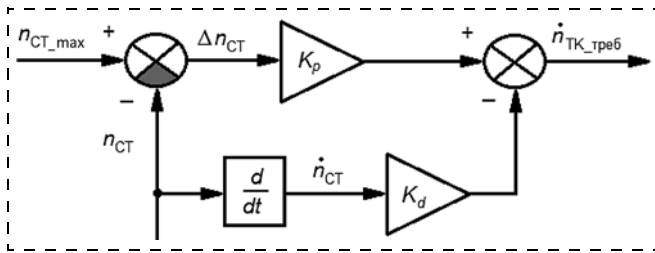


Рис. 1. Структурная схема контура поддержания частоты вращения силовой турбины с линейным электронным регулятором

На рис. 1 представлена типовая схема контура поддержания частоты вращения силовой турбины ГТД с линейным ПД регулятором.

На вход контура подается ошибка рассогласования между текущим и требуемым значением частоты вращения СТ $\Delta n_{СТ}$ и производная текущей частоты вращения СТ $\dot{n}_{СТ}$. Выходным сигналом является требуемая производная частоты вращения ротора ТК.

Выражение, описывающее контур поддержания частоты вращения СТ с линейным ПД регулятором, имеет вид

$$\dot{n}_{ТК_треб_n_{СТ}} = \Delta n_{СТ} K_p + \dot{n}_{СТ} K_d. \quad (1)$$

Коэффициенты усиления пропорционального K_p и дифференциального K_d звеньев определяются из следующих уравнений:

$$K_p = K(\Delta n_{СТ}) K_{стат_p} G_{Т_стат}(n_{ТК}) a_{13}(n_{ТК}), \quad (2)$$

$$K_d = K_{стат_d} T_{СТ}(n_{ТК}). \quad (3)$$

Здесь $G_{Т_стат}(n_{ТК})$ — характеристика статического расхода топлива; $a_{13}(n_{ТК})$ — коэффициент линейно-динамической модели двигателя по расходу топлива; $T_{СТ}(n_{ТК})$ — постоянная времени ротора силовой турбины.

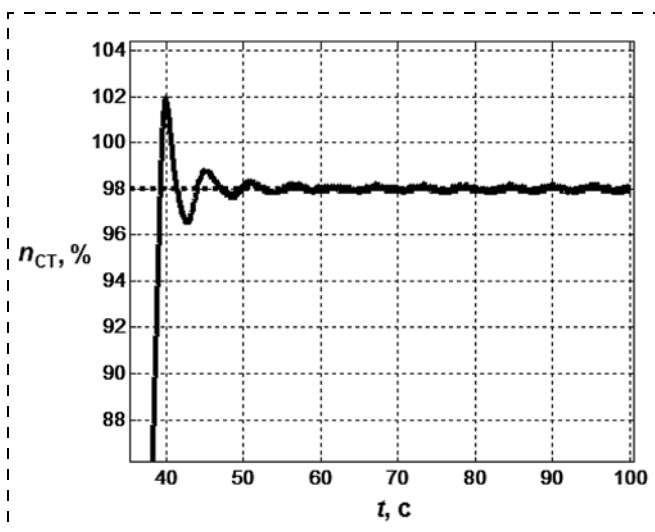


Рис. 2. Переходный процесс по частоте вращения силовой турбины при работе двигателя на режиме "Полет" с линейным ПД регулятором контура поддержания частоты вращения силовой турбины

Коэффициент $K(\Delta n_{СТ})$ задается следующей системой уравнений:

$$K(\Delta n_{СТ}) = \begin{cases} |\Delta n_{СТ}|, & \Delta n_{СТ} \leq 1; \\ 1 + 0,5(\Delta n_{СТ} - 1), & 1 < \Delta n_{СТ} \leq 3; \\ 2 + (2/7)(\Delta n_{СТ} - 3), & \Delta n_{СТ} > 3. \end{cases} \quad (4)$$

Статический коэффициент пропорционального звена $K_{стат_p}$ равен 0,35, а статический коэффициент дифференциального звена $K_{стат_d}$ составляет 0,05.

На рис. 2 представлен график переходного процесса по частоте вращения СТ при работе одного двигателя на режиме "Полет" с линейным ПД регулятором.

Из рис. 2 видно, что выход на режим сопровождается забросом порядка 4 %. Амплитуда незатухающих колебаний составляет 0,2 %. Время переходного процесса — около 20 с.

Проведем анализ альтернативных способов регулирования, позволяющих повысить запасы устойчивости исследуемой системы и устранить колебания. Рассмотрим следующие регуляторы: ПД регулятор с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления, квадратичный регулятор, регулятор с переменным коэффициентом усиления, нечеткий логический регулятор пропорционального типа и нечеткий регулятор с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном.

Линейный ПД регулятор с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления

Рассмотрим переходную характеристику по частоте вращения силовой турбины при работе линейного ПД регулятора с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что уменьшение пропорционального коэффициента усиления обеспечивает аперио-

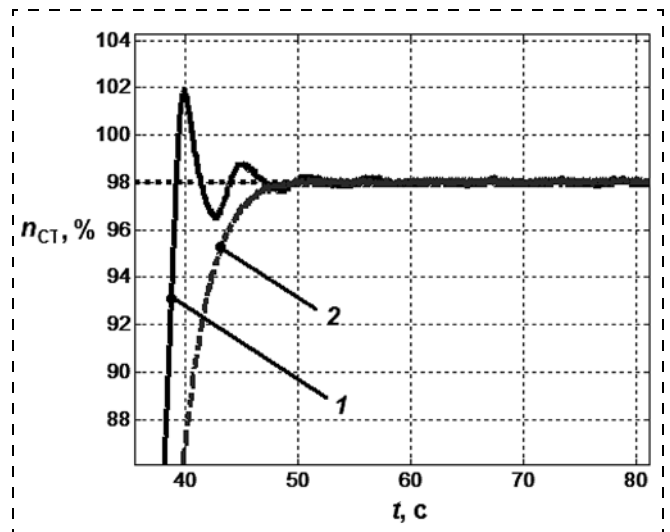


Рис. 3. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и ПД регулятора с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления (2). Фрагмент

дический характер переходного процесса, повышает запасы устойчивости системы (отсутствие забросов, колебаний) при сохранении высокой статической точности, обеспечивает более высокое быстродействие системы по сравнению с исходным ПД регулятором (порядка 15 с). Однако требуется обеспечить более высокое быстродействие системы (порядка 8...10 с). Данное требование обосновано тем, что электронный регулятор поддержания частоты вращения СТ должен компенсировать инерционность СТ. В связи с этим исследуем эффективность применения нелинейных регуляторов.

Квадратичный регулятор

Квадратичный регулятор описывается выражением вида

$$\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{СТ}}} = \Delta n_{\text{СТ}}^2. \quad (5)$$

Переходная характеристика по частоте вращения СТ при работе квадратичного регулятора представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что переходный процесс по частоте вращения СТ сопровождается забросом и колебаниями. Такой регулятор не обеспечивает требуемого запаса устойчивости системы. В связи с этим рассмотрим нелинейные регуляторы.

Регулятор с переменным коэффициентом усиления

Данный регулятор разбивает область управления на пять структур (α , β , γ , δ , ε), каждая из которых представляет собой линейный коэффициент усиления.

Закон управления регулятора имеет вид

$$\dot{n}_{\text{TK_треб_}n_{\text{СТ}}} = \Psi \Delta n_{\text{СТ}}, \quad (6)$$

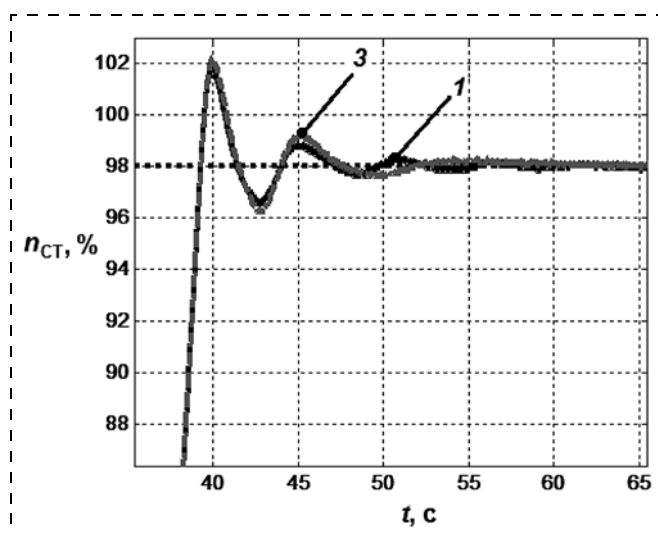


Рис. 4. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и квадратичного регулятора (3). Фрагмент

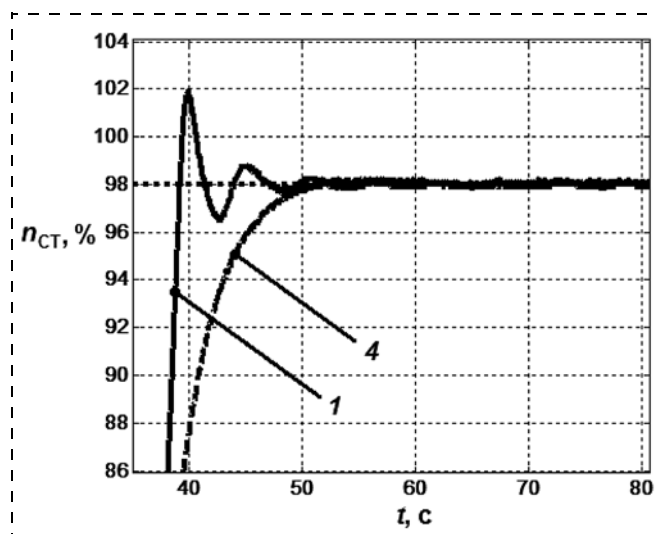


Рис. 5. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и регулятора с переменным коэффициентом усиления (4). Фрагмент

где Ψ определяется следующим образом:

$$\Psi = \begin{cases} \alpha, & |\Delta n_{\text{СТ}}| > 30; \\ \beta, & 20 < |\Delta n_{\text{СТ}}| \leq 30; \\ \gamma, & 10 < |\Delta n_{\text{СТ}}| \leq 20; \\ \delta, & 4 \leq |\Delta n_{\text{СТ}}| \leq 10; \\ \varepsilon, & 0 \leq |\Delta n_{\text{СТ}}| \leq 4. \end{cases} \quad (7)$$

Коэффициенты усиления α , β , γ , δ и ε определены методом математического моделирования и заданы следующими значениями: $\alpha = 8$, $\beta = 0,7$, $\gamma = 0,1$, $\delta = 0,05$, $\varepsilon = 0,01$. Коэффициенты выбраны таким образом, чтобы переходная характеристика по частоте вращения СТ имела устойчивое вырожденное движение, без колебаний и перерегулирования.

Переходная характеристика по частоте вращения СТ при работе регулятора с переменным коэффициентом усиления представлена на рис. 5.

Регулятор с переменным коэффициентом усиления обеспечивает аperiodический характер переходного процесса, более высокий запас устойчивости по сравнению с квадратичным регулятором (отсутствуют забросы и колебания) и статическую точность. Однако данный регулятор не обеспечивает требуемого быстродействия контура.

Рассмотрим следующий альтернативный регулятор, построенный на основе теории нечетких множеств.

Нечеткий логический регулятор пропорционального типа

НЛР относится к классу экспертных систем и в качестве переменных используют обороты естественного языка "жарко", "холодно", "далеко", "близко" и т. д., в результате чего при синтезе НЛР отсутствует необходимость строгого математического описания объекта.

Благодаря этому свойству НЛР завоевали большую популярность у разработчиков электронных систем [1, 2]. Получаемый в результате синтеза нечеткий закон управления является нелинейным и хорошо работает в системах с высокой степенью сложности, нелинейностями типа зоны нечувствительности, гистерезиса, при отклонениях параметров неизменяемой части системы от их номинальных значений и потере информации при отказах [3–6].

Синтез НЛР пропорционального типа для контура поддержания частоты вращения силовой турбины реализован в соответствии с описанием [7–9]. Регулятор определен как статический с нелинейным коэффициентом усиления и описывается выражением вида

$$\dot{n}_{\text{ТК_треб_}n_{\text{СТ}}} = f(\Delta n_{\text{СТ}}), \tag{8}$$

где $f(\Delta n_{\text{СТ}})$ — нелинейная функция.

Для синтеза данного регулятора были использованы три термина для описания входной и выходной лингвистических переменных. Входной переменной является рассогласование между текущим и требуемым значением частоты вращения СТ $\Delta n_{\text{СТ}}$, а выходной — требуемая производная частоты вращения ротора ТК $\dot{n}_{\text{ТК_треб_}n_{\text{СТ}}}$. Термы и диапазоны их изменения на четком множестве для входной и выходной лингвистических переменных представлены в табл. 1.

Таблица 1
Термы входной и выходной лингвистических переменных НЛР
II типа контура поддержания частоты вращения силовой турбины

Лингвистическая переменная	Термы		
	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
Входная	[−30, 0]	[−25, 25]	[0, 30]
Выходная	[−1.2, 0]	[−0.6, 0.6]	[0, 1.2]

В табл. 1 буквенные обозначения расшифровываются следующим образом:

- N* — (Negative) отрицательная величина;
- Z* — (Zero) нулевая величина;
- P* — (Positive) положительная величина.

Степень принадлежности каждого точного значения к одному из термов определяется с помощью функции принадлежности, вид которой может быть любым и определяется спецификой задачи. Для большинства задач используется несколько стандартных функций принадлежности, таких как треугольная, трапецевидная, гауссова, сигмоидная, Z-образная и S-образная. Но чаще всего разработ-

чики используют треугольную функцию принадлежности, описываемую выражением вида

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < A; \\ \frac{x-A}{B-A}, & A \leq x \leq B; \\ \frac{C-x}{C-B}, & B \leq x \leq C; \\ 0, & x > C, \end{cases} \tag{9}$$

(как, например, при решении похожей задачи в работе [10]).

В данной работе треугольная функция принадлежности используется для определения степени принадлежности четких значений к терму *Z*.

Степень принадлежности четких значений к термам *N* и *P* задается сигмоидной функцией принадлежности, описываемой выражением вида

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \exp[-A(x - B)]}. \tag{10}$$

Здесь x — элемент четкого множества; *A*, *B* и *C* — подмножества нечеткого множества; $\mu_A(x)$ — степень принадлежности четких входных и выходных значений к каждому из термов нечеткого множества.

Совместное расположение функций принадлежности, определяющих степень принадлежности каждого точного значения к одному из термов входной и выходной лингвистических переменных, показано на рис. 6–7.

В диапазоне изменения $\Delta n_{\text{СТ}}$ свыше 30 % и меньше −30 % выходное значение требуемой про-

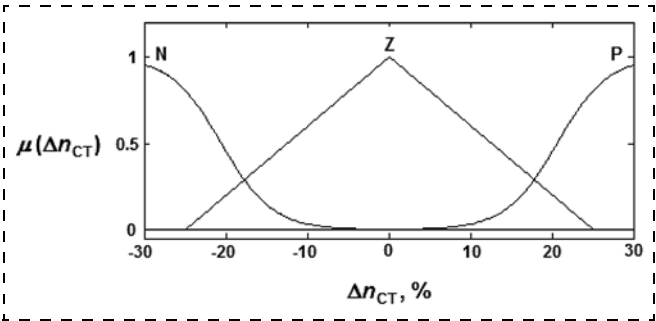


Рис. 6. Описание входных термов нечеткого регулятора пропорционального типа контура поддержания частоты вращения силовой турбины

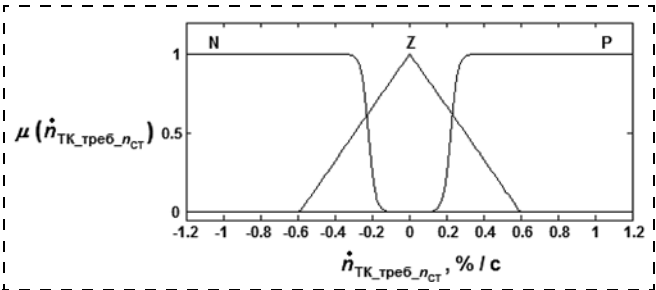


Рис. 7. Описание выходных термов нечеткого регулятора пропорционального типа контура поддержания частоты вращения силовой турбины

изводной частоты вращения ротора ТК принимается постоянным, равным $+10\text{ \%/с}$ и $-10\text{ \%/с}$ соответственно:

$$\dot{n}_{\text{ТК_треб_}n_{\text{СТ}}} = \begin{cases} 10\text{ \%/с}, & \Delta n_{\text{СТ}} > 30\text{ \%}; \\ -10\text{ \%/с}, & \Delta n_{\text{СТ}} < -30\text{ \%.} \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 8 представлена переходная характеристика по частоте вращения силовой турбины двигателя ТВ7-117В при работе НЛР.

Из рис. 8 следует, что нечеткий П регулятор обеспечивает достаточный запас устойчивости, высокую статическую точность и аperiodический переходный процесс, но не имеет требуемого быстродействия.

Повышения быстродействия можно добиться путем увеличения коэффициента усиления пропорциональной части регулятора. Однако это неизбежно приведет к возникновению заброса по регулируемой величине и колебательному переходному процессу.

Для повышения быстродействия исследуемой системы рассмотрим гибридную схему, объединяющую нечеткий и линейный регуляторы.

Нечеткий логический регулятор с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном

Регулятор данного типа включает: 1) нечеткий регулятор с пропорциональным коэффициентом усиления и 2) дифференциальное звено, вносящее поправку в вычисление значения $\dot{n}_{\text{ТК_треб_}n_{\text{СТ}}}$. Нечеткая пропорциональная часть синтезирована по аналогии с описанным выше НЛР и отличается только диапазоном изменения выходной переменной

$\dot{n}_{\text{ТК_треб_}n_{\text{СТ}}}$ (от $-8\text{ \%/с}$ до $8\text{ \%/с}$ — см. рис. 9).

Дифференциальное звено синтезировано по аналогии с дифференциальным звеном исходного ПД

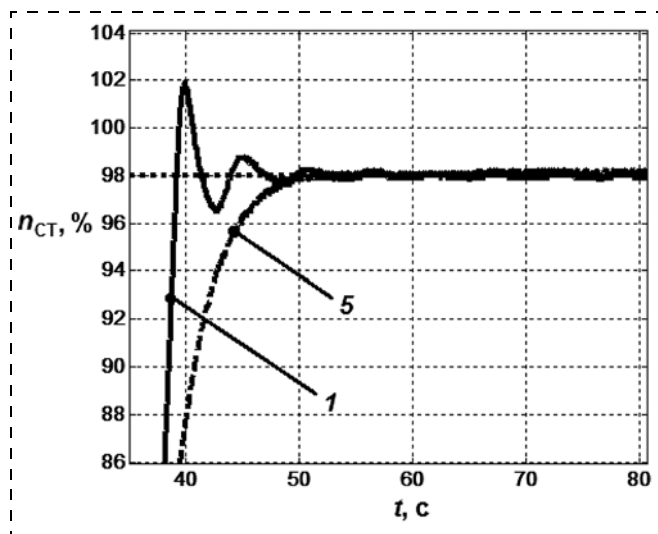


Рис. 8. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и нечеткого регулятора пропорционального типа (5). Фрагмент

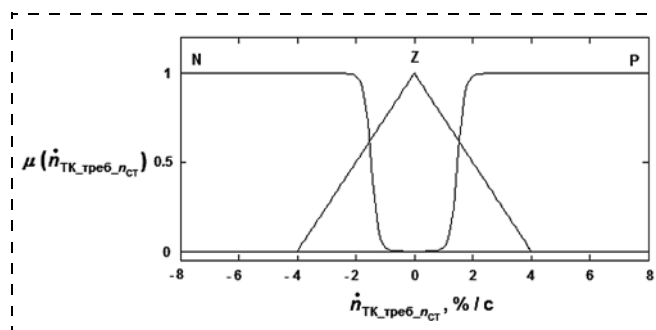


Рис. 9. Выходные термы, описывающие пропорциональный коэффициент усиления НЛР

регулятора, но отличается от него увеличенным выходным коэффициентом усиления. Кроме того, звено включается в работу, когда ошибка рассогласования $\Delta n_{\text{СТ}}$ находится в пределах $0,25\text{ \%} \leq |\Delta n_{\text{СТ}}| \leq 2,9\text{ \%}$.

Выражение, описывающее дифференциальное звено, имеет вид

$$K_d = \begin{cases} C_{\text{стат}} K_{\text{стат}} T_{\text{СТ}}(n_{\text{ТК}}) & \text{при } 0,25\text{ \%} \leq |\Delta n_{\text{СТ}}| \leq 2,9\text{ \%}; \\ 0 & \text{при } 0,25\text{ \%} > |\Delta n_{\text{СТ}}| > 2,9\text{ \%.} \end{cases} \quad (12)$$

График с переходной характеристикой по частоте вращения силовой турбины при работе НЛР с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном представлен на рис. 10.

Увеличенный коэффициент усиления, получаемый на выходе нечеткого регулятора, позволяет повысить быстродействие переходного процесса и увеличить статическую точность системы. Но при этом возникает заброс, который медленно убывает. Дифференциальное звено, встроенное в регулятор с отрицательным коэффициентом усиления, уменьшает значение заброса, тем самым сохраняя аperiodический характер переходного процесса.

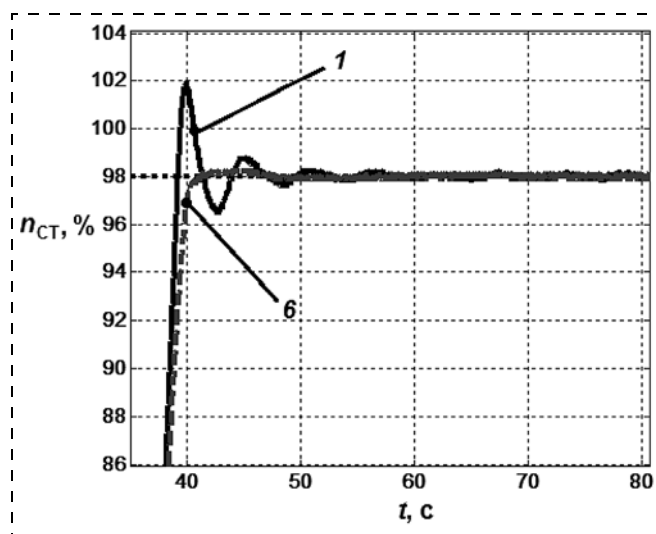


Рис. 10. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе исходного ПД регулятора (1) и НЛР с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном (6). Фрагмент

Анализ качества работы контура поддержания частоты вращения силовой турбины с различными регуляторами

Тип регулятора	Статическая точность, %	Быстродействие, с	Характер переходного процесса	Значение заброса, %
Исходный ПД регулятор	$\pm 0,2$	20	Колебательный	1,9
ПД регулятор с уменьшенным коэффициентом K_p	$\pm 0,3$	15	Апериодический	—
Квадратичный регулятор	$\pm 0,2$	18	Колебательный	2,2
Регулятор с переменным коэффициентом K_p	$\pm 0,2$	16,5	Апериодический	0,1
НЛР пропорционального типа	$\pm 0,1$	16,5	Апериодический	—
НЛР пропорционального типа с корректирующим дифференциальным звеном	$\pm 0,2$	6	Апериодический	0,3

Сравнительный анализ качества работы различных регуляторов в контуре поддержания частоты вращения силовой турбины

Перейдем к сравнению качества управления переходной характеристикой по частоте вращения СТ и запасов устойчивости, обеспечиваемых каждым из рассмотренных выше регуляторов. На рис. 11 представлен график совместного расположения кривых переходного процесса по частоте вращения СТ при работе различных регуляторов.

На рис. 11 цифрами обозначены переходные процессы со следующими электронными регуляторами: 1 — исходный линейный ПД регулятор; 2 — ПД регулятор с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления; 3 — квадратичный регулятор; 4 — регулятор с переменным коэффициентом усиления; 5 — НЛР с пропорциональным коэффициентом усиления; 6 — НЛР с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном.

В табл. 2 представлен численный анализ качества работы контура поддержания частоты вращения силовой турбины с различными регуляторами. Из рис. 11 и табл. 2 следует, что наилучшее качество переходного процесса по частоте вращения

силовой турбины обеспечивает нечеткий регулятор с пропорциональным коэффициентом усиления и корректирующим дифференциальным звеном. Переходная характеристика при работе данного регулятора отличается от прочих более высоким быстродействием (порядка 6 с) и отсутствием колебаний (кривая 6).

Остальные регуляторы уступают в отношении обеспечения требуемого качества управления. Например, переходная характеристика по частоте вращения СТ, полученная при работе квадратичного регулятора, по качеству почти не отличается от характеристики, полученной при работе исходного линейного ПД регулятора (кривые 1 и 3). Процесс характеризуется наличием колебаний и забросом порядка 4 %. Амплитуда колебаний составляет 0,2 %. Время переходного процесса — порядка 20 с. При анализе характеристик переходных процессов, полученных при работе ПД регулятора с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления, регулятора с переменным коэффициентом усиления и НЛР П типа, видно, что эти характеристики незначительно отличаются друг от друга. Переходный процесс имеет апериодический характер (кривые 2, 4 и 5) и почти одинаковое быстродействие (у кривой 2 время переходного процесса составляет 15 с, у кривых 4, 5 — 16,5 с).

Заключение

Из проведенного анализа следует, что для обеспечения требуемого качества поддержания частоты вращения силовой турбины лучше всего подходит нелинейный или кусочно-линейный регулятор. В частности, это может быть регулятор с переменным коэффициентом усиления и дифференциальным звеном ограниченного диапазона работы. Данный диапазон может зависеть от значения ошибки рассогласования по частоте вращения силовой турбины.

Список литературы

- Гриняев С. Нечеткая логика в системах управления // Компьютера. 2001. № 38. URL: <http://old.computerra.ru/offline/2001/415/13052>
- Энциклопедия АСУ ТП: Нечеткая логика, нейронные сети и генетические алгоритмы. URL: http://bookasutp.ru/Chapter5_6.aspx
- Чичерова Е. В. Исследование свойств робастности нечетких логических регуляторов на примере контура управления

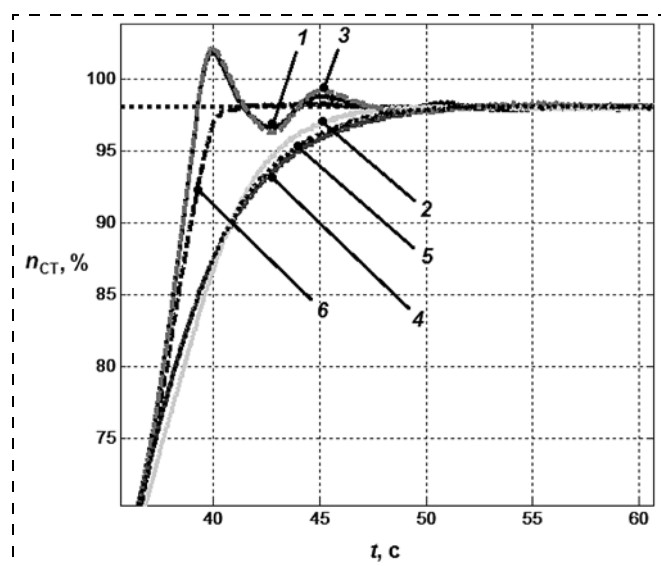


Рис. 11. Характеристики переходных процессов по частоте вращения силовой турбины при работе различных регуляторов

расходом топлива газотурбинного двигателя. Ч. 1. // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 3 (34). С. 145—152.

4. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. 744 с.

5. **Бураков М. В., Коновалов А. С.** Синтез нечетких логических регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1 (50). С. 22—27.

6. **Чичерова Е. В.** Способы оптимизации динамических систем, содержащих нелинейности, типа зоны нечувствительности // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 33—37.

7. **Бураков М. В.** Нечеткие регуляторы: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2010. 236 с.

8. **Арсеньев Г. Н., Шалыгин А. А.** Математическое моделирование нечетких регуляторов на основе MATLAB // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9, № 5. С. 26—37.

9. **Mallesham G., Rajani A.** Automatic tuning of PID controller using fuzzy logic // 8th International Conference on Development and application system, Suceava (Romania). 2006. P. 120—127.

10. **Дудкин Ю. П., Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н.** Нечеткое управление частотой вращения свободной турбины газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института (государственный технический университет). 2010. Т. 17, № 6. С. 55—60.

Methods for Improvement of the Quality of the Power Turbine Speed Control of a Gas Turbine Engine

E. V. Chicherova, proffgrand@mail.ru, Klimov Co., St.-Petersburg, 194100, Russian Federation

Received on September 15, 2014

The article is dedicated to the task of improvement of the quality of the electronic system of automatic control of the gas turbine engines. An analysis was done of the control loop speed power turbines with various electronic controllers. The authors studied the linear PD controller, PD controller with reduced proportional coefficient, quadratic regulator, variable gain controller, fuzzy P controller and fuzzy P controller with a corrective differentiator. A study of the dynamic stability of the quality and quantity parameters of operation of each of the regulators is presented. When a control loop speed power turbine is operated with an original PD controller the required quality of the transients is not ensured. Achievement of the desired speed of the power turbine is accompanied by an overshoot of about 4 % and 0,2 % of the amplitude fluctuations. The transient time can be up to 20 seconds. Reduction of the proportional gain ensures an aperiodic transient increase of the stability margin (no overshoot) and enhances the static accuracy. But the performance is not efficient enough. The transient time is 15 seconds. A quadratic regulator improves the system performance, but does not ensure the required stability margin. The transient factor is accompanied by an overshoot of about 4 % of the amplitude fluctuations. A variable gain controller provides an aperiodic transient increase of the static accuracy and stability margin (no overshoot and amplitude fluctuations). However, the performance is not efficient enough. The transient time is 16.5 seconds. Fuzzy P controller ensures high static accuracy and speed, but the transition process is accompanied by a deregulation. In order to reduce the overshoot and ensure an aperiodic transition process in the fuzzy logic controller a differentiator is added with a negative gain. Because of the negative sign of the gain the differentiator compensates for the overshoot. For correct functioning of the controller the differentiator operates in a strictly defined range, and the error on the speed of the power turbine is within the range of $\pm[0,25 \%, 2,9] \%$. The resulting controller improves the system's performance up to 6 seconds, but it also ensures an aperiodic transient and high static accuracy of the system. Thereby the required quality control is achieved, when the speed of the power turbine is the best with a non-linear or piecewise-linear controller. For example, it can be PD-controller including a fuzzy P-gain and a differentiator with a limited interval of operation. Within this operating range it depends on the mismatch errors of the power turbine speed.

Keywords: gas turbine engine, power turbine, linear regulator, quadratic regulator, fuzzy logic controller, variable gain controller

For citation:

Chicherova E. V. Methods for Improvement of the Quality of the Power Turbine Speed Control of a Gas Turbine Engine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 402—408.

DOI: 10.17587/mau.16.402-408

References

1. **Grinyaev S.** *Nechetkaya logika v sistemakh upravleniya* (Fuzzy logic control systems), Komp'yutera, 2001, no. 38 (in Russian), available at: <http://old.computerra.ru/offline/2001/415/13052>

2. **Entsiklopediya ASU TP: Nechetkaya logika, neyronnye seti i geneticheskie algoritmy** (Encyclopedia APCs: Fuzzy logic, neural networks and genetic algorithms) (in Russian), available at: http://bookasutp.ru/Chapter5_6.aspx

3. **Chicherova E. V.** *Issledovanie svoystv robastnosti nechetkikh logicheskikh regulyatorov na primere kontura upravleniya rashodom topliva gazoturbinnogo dvigatelya. Ch. 1* (Robust research of the fuzzy logic controllers using a fuel flow control loop of the gas-turbine engine as an example), *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta*, 2012, no 3 (34). Vol. 1. pp. 145—152 (in Russian).

4. **Egupov N. D.** ed. *Metody robastnogo, nejronechetkogo i adaptivnogo upravleniya: uchebnik* (Robust methods, neuro-fuzzy and adaptive control: a textbook), Moscow, Published in MGTU im. Bauman, 2002, iss. 2, 744 p. (in Russian).

5. **Burakov M. V., Kononov A. S.** *Sintez nechetkikh logicheskikh regulyatorov* (Fuzzy Controllers Design), *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2011, no 1 (50). pp. 22—27 (in Russian).

6. **Chicherova E. V.** *Sposoby optimizatsii dinamicheskikh sistem, soderzhashchikh nelineynosti, tipa zony nechuvstvitel'nosti* (Optimization Method for Dynamic Systems Containing Nonlinearity Type of the Dead Zone), *Informatsionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2012, no. 6 (61), pp. 33—37 (in Russian).

7. **Burakov M. V.** *Nechetkie regulatory: uchebnoe posobie* (Fuzzy controllers: Tutorial), St. Petersburg, Published in GUAP, 2010, 236 p. (in Russian).

8. **Arsen'ev G. N., Shalygin A. A.** *Matematicheskoe modelirovanie nechetkikh regulyatorov na osnove MATLAB* (The synthesis of fuzzy controllers on the base MATLAB), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy* 2011, vol. 9, no 5. pp. 26—37 (in Russian).

9. **Mallesham G., Rajani A.** Automatic tuning of PID controller using fuzzy logic, *8th International Conference on Development and Application System*, Suceava, Romania, 2006, pp. 120—127.

10. **Dudkin Ju. P., Titov Ju. K., Filippenkov R. G., Hishnjakov Ju. N.** *Nechetkoe upravlenie chastotой vrashcheniya svobodnoy turbiny gazoturbinnogo dvigatelya* (Fuzzy control the speed of the free turbine gas turbine engines), *Vestnik Moskovskogo Aviacionnogo Instituta*, 2012, vol. 17, no 6, pp. 55—60 (in Russian).

Corresponding author:

E. V. Chicherova, Design engineer, Klimov Co., St. Petersburg, 194100, Russian Federation, e-mail: proffgrand@mail.ru