

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РОБАСТНОСТИ НЕЧЁТКИХ ЛОГИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ПРИМЕРЕ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ТОПЛИВА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2012 Е. В. Чичерова

Открытое акционерное общество «Климов», г. Санкт-Петербург

В статье рассматриваются вопросы применения регуляторов с нечёткой логикой в электронных системах автоматического управления газотурбинными двигателями. Проводится сравнительный анализ качества управления расходом топлива при работе нечёткого логического регулятора П-типа и линейного ПИД-регулятора в полностью детерминированной линейной системе и в системе с зоной нечувствительности и отклонениями параметров неизменяемой части системы от номинальных значений. По результатам сравнения выбирается лучший регулятор и делается вывод о целесообразности применения алгоритмов нечёткой логики в системах управления газотурбинными двигателями.

Газотурбинный двигатель, расход топлива, нечёткий логический регулятор, ПИД-регулятор, нелинейность, зона нечувствительности, робастность, качество регулирования.

Введение

Вопросы совершенствования систем автоматического управления (САУ) силовыми установками летательных аппаратов по сей день остаются актуальными. В условиях широкого внедрения электронных вычислительных устройств в системы управления авиационных двигателей возникает задача синтеза различных законов управления, обеспечивающих требуемое качество регулирования. Среди электронных регуляторов наибольшее распространение получили линейные ПИД-регуляторы. Благодаря своей простоте, низкой стоимости и высокой эффективности, ПИД-регуляторы часто используются для управления линейными системами. Однако такие регуляторы могут иметь плохие показатели качества при управлении нелинейными системами, системами с какого-либо рода неопределённостями, а также при неполной информации об объекте управления. Например, возникновение или увеличение зоны нечувствительности, гистерезиса или отклонения параметров неизменяемой части системы от их номинальных значений приводят к необходимости синтеза нелинейных законов управления.

Одним из средств, позволяющих синтезировать законы управления для перечисленных выше систем, является аппарат теории нечётких множеств. Данный аппарат позволяет синтезировать регуляторы, относящиеся к классу экспертных систем и использующие такие обороты естественного

языка, как «далеко», «близко», «холодно», «горячо» и т.д. [1]. Благодаря этому для создания нечёткого логического регулятора (НЛР) не требуется точного математического описания объекта регулирования. Это, как следствие, приводит к тому, что нелинейные САУ с НЛР являются более робастными, т.е. обладают меньшей чувствительностью к изменению параметров неизменяемой части системы, чем САУ с линейными ПИД-регуляторами.

Проиллюстрируем работу НЛР на примере контура управления расходом топлива газотурбинного двигателя ТВ7-117В.

Математическое описание контура управления расходом топлива

Структурная схема контура управления расходом топлива газотурбинного двигателя ТВ7-117В представлена на рис. 1.

На рис. 1 обозначено:

- БАРК – блок автоматического регулирования и контроля;
- y_0 – требуемый расход топлива [кг/ч];
- Δy – величина ошибки рассогласования по расходу топлива [кг/ч];
- y – фактический расход топлива [кг/ч];
- ξ – ток управления [мА];
- ГМИМ – гидромеханический исполнительный механизм;
- ПС – электрогидромеханический преобразователь сигналов;
- ГУ – гидроусилитель;

$f(\xi)$ – нелинейность с зоной нечувствительности по входному току;
 K_h и $K_{ГУ}$ – коэффициенты усиления преобразователя сигналов и гидроусилителя;

τ – постоянная времени преобразователя сигналов;
 h – изменение управляющего давления.

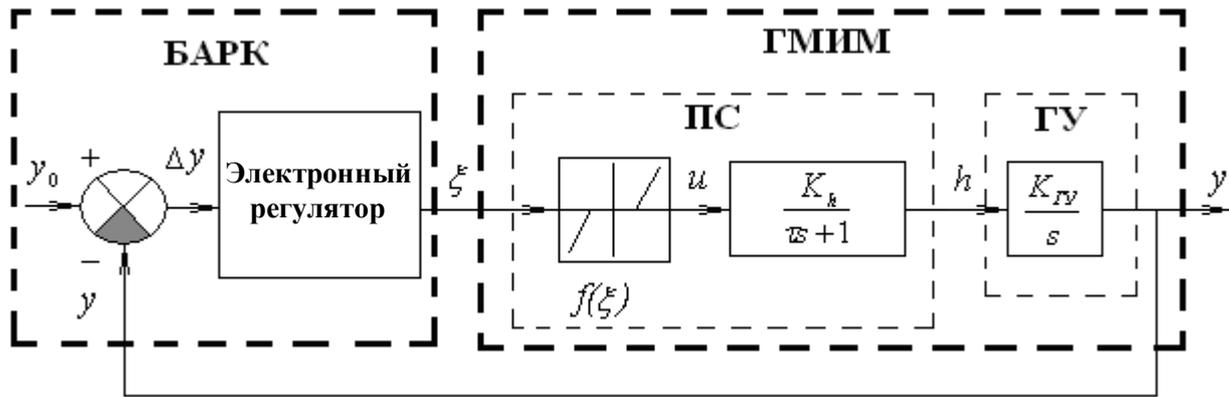


Рис. 1. Структурная схема контура управления расходом топлива

В состав контура входят электронный регулятор, формирующий управляющий ток, и гидромеханический исполнительный механизм (ГМИМ), вырабатывающий фактический расход топлива по сигналу управляющего тока. Электронный регулятор входит в состав блока автоматического регулирования и контроля (БАРК), который, в свою очередь, представляет собой цифровое устройство, работающее с частотой дискретизации 40 Гц.

Гидромеханический исполнительный механизм является составной частью насоса-регулятора, осуществляющего дозировку топлива в камеру сгорания двигателя, и представляет собой непрерывную систему. В состав ГМИМ входят электрогидромеханический преобразователь сигналов, гидроусилитель, дозирующий кран и датчик угла поворота. Скорость перемещения дозирующего крана нелинейно зависит от входного тока. Кроме того, эта зависимость содержит зону нечувствительности по входному току, величина которой может варьироваться от агрегата к агрегату. Таким образом, контур управления расходом топлива представляет собой нелинейную дискретно-непрерывную систему.

В соответствии с рис. 1 уравнения, описывающие контур управления расходом топлива, имеют вид

$$\begin{cases} \dot{y} = K_{ГУ} \cdot h, \\ \dot{h} = -\frac{1}{\tau} h + \frac{1}{\tau} K_h \cdot f(\xi, \Delta y), \\ \Delta y = y_0 - y, \end{cases} \quad (1)$$

где $f(\Delta y)$ – функция, определяющая закон управления электронного регулятора.

Функция $f(\xi)$ такова, что $f(\xi) \equiv 0$, при $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$, где $\xi_1 \leq 0$, $\xi_2 \geq 0$, $\xi_2 \geq \xi_1$, и в точках непрерывности выполнены неравенства

$$\begin{cases} 0 < f(\xi) \leq \mu_0 (\xi - \xi_2) & \text{при } \xi > \xi_2, \\ \mu_0 (\xi - \xi_1) < f(\xi) < 0 & \text{при } \xi < \xi_1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $0 < \mu_0 \leq +\infty$, причём при $\mu_0 \neq -\infty$ выполнено условие

$$\int_0^{\pm\infty} [\mu_0 \xi - f(\xi)] d\xi = \infty. \quad (3)$$

Обычно электронную часть контура выполняют по схеме ПИД-регулятора. ПИД-регулятор позволяет устранить статическую ошибку по величине расхода топлива, но создаёт сложности с обеспечением запасов устойчивости. Кроме того, чтобы обеспечить требуемую статическую точность, ПИД-регулятору может потребоваться длительное время переходного процесса.

В связи с этим в качестве альтернативного метода управления рассматривается нечёткий регулятор П-типа.

Синтез НЛР для контура управления расходом топлива

Выбор регулятора, использующего нечёткую логику, обусловлен следующей причиной. Наличие в контуре управления дискретной части и нелинейности с зоной нечувствительности усложняет возможность применения классических методов управления вследствие необходимости точного математического описания объекта регулирования. Закон управления нечёткого регулятора строится на основе знаний эксперта об объекте. Таким образом, нечёткие регуляторы хорошо подходят для управления объектами с нелинейностями типа зоны нечувствительности или объектами, параметры которых могут меняться в процессы эксплуатации.

Синтез НЛР состоит из следующих этапов: фаззификация; описание нечётких правил, посредством которых происходит выбор управляющего воздействия; агрегация и дефаззификация. Входным сигналом НЛР П-типа является величина ошибки рассогласования по расходу топлива, выходным – управляющий ток. Подробнее общая процедура синтеза НЛР описана в [1 – 4], а процедура синтеза НЛР П-типа для контура управления расходом топлива двигателя ТВ7-117В – в [5].

В соответствии с описанием [5] нечёткий логический П-регулятор определяется как статический с нелинейным коэффициентом усиления, т. е. регулятор вида

$$\xi = f(\Delta y), \tag{4}$$

где $f(\Delta y)$ – нелинейная функция.

Закон управления нечёткого П-регулятора представлен на рис. 2.

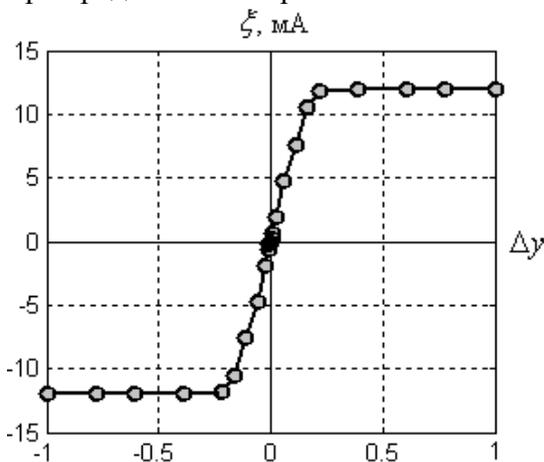


Рис. 2. Закон управления нелинейного НЛР П-типа

За счёт переменного усиления на разных этапах переходного процесса нечёткий П-регулятор обеспечивает высокое быстродействие системы без потери качества регулирования.

Оценка запасов устойчивости контура управления расходом топлива при работе НЛР П-типа

Контур управления расходом топлива содержит две нелинейные характеристики, $f(\Delta y)$ и $f(\xi)$, расположенные последовательно, и один интегратор. Можно показать, что если в системе имеется один или несколько интеграторов, то статические режимы, если они существуют, будут заключены внутри зоны нечувствительности в любой её точке.

Для анализа устойчивости равновесных состояний контура воспользуемся частотным критерием В.М. Попова для критического случая (теорема об устойчивости системы с одним интегратором, одной нелинейностью и неединственным положением равновесия) [6]. Можно показать, что условия теоремы будут выполнены, если параметры системы (1) удовлетворяют следующему условию:

$$\vartheta \geq \tau - \frac{\tau^2 \omega^2 + 1}{K_{гв} K_h \mu_0}. \tag{5}$$

Тогда отрезок покоя $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$ системы (1) точно устойчив в целом.

Исследование свойств робастности НЛР в контуре управления расходом топлива

Проведём анализ качества регулирования расходом топлива с помощью нечёткого П- и линейного ПИД-регулятора при различных параметрах неизменяемой части системы. Исследуемыми параметрами являются:

- 1) зона нечувствительности по входному управляющему току;
- 2) коэффициент усиления электрогидромеханического преобразователя сигналов;
- 3) постоянная времени электрогидромеханического преобразователя сигналов;
- 4) коэффициент усиления гидроусилителя.

В табл. 1 приведены номинальные значения и значения с отклонениями от вышеперечисленных параметров.

Таблица 1. Номинальные значения параметров контура управления расходом топлива и их отклонения

Параметры неизменяемой части системы контура управления расходом топлива	Номинальное значение	Отклонение
Зона нечувствительности по входному управляющему току	0.0 мА	± 2 мА ± 5 мА
Коэффициент усиления электрогидромеханического преобразователя сигналов	1.0 (кг/см ²)/мА	-0.9 (кг/см ²)/мА +2.8 (кг/см ²)/мА
Постоянная времени электрогидромеханического преобразователя сигналов	0.02 с	+0.98 с
Коэффициент усиления гидроусилителя	1.0 град/(кг/см ²)	-0.9 град/(кг/см ²) +2.7 град/(кг/см ²)

Входным параметром модели исследуемой системы является величина требуемого расхода топлива, изменяющегося экспоненциально в диапазоне от 150 до 250 кг/ч со скоростью 2 (кг/ч)/с. Выходным параметром модели является величина фактического расхода топлива.

На рис. 3 представлены переходные характеристики контура управления расходом топлива при номинальных параметрах неизменяемой части системы и отсутствии зоны нечувствительности.

На рис. 3 и на последующих рисунках параметр $G_{т_факт}$ означает фактический расход топлива.

Как видно из рис. 3, при номинальных параметрах неизменяемой части системы и отсутствии в ней зоны нечувствительности, нечёткий регулятор и линейный ПИД-регулятор дают почти одинаковое качество управления. Оба регулятора реализуют устойчивый апериодический переходный процесс без статических ошибок.

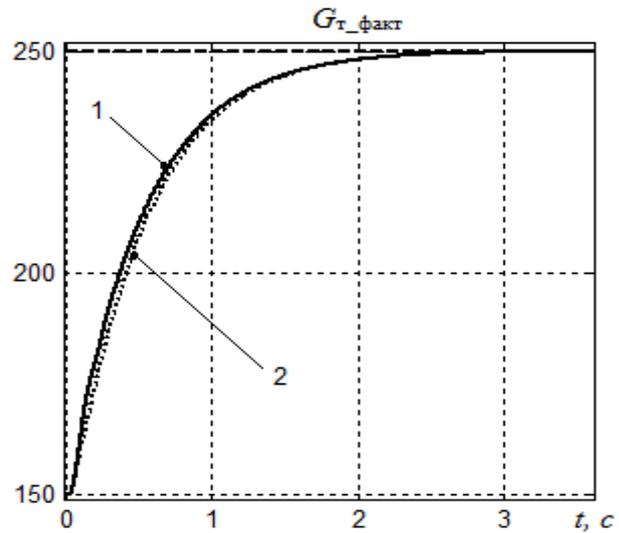


Рис. 3. Переходные характеристики в контуре управления расходом топлива при работе 1 – НЛР П-типа и 2 – линейного ПИД-регулятора при номинальных параметрах неизменяемой части системы и отсутствии зоны нечувствительности

Исследуем качество регулирования контуром при появлении и увеличении зоны нечувствительности по входному управляющему току. На рис. 4, 5 приведены графики переходных процессов в контуре управления расходом топлива при работе нечёткого П- и линейного ПИД-регулятора с зоной нечувствительности ± 2 мА и ± 5 мА.

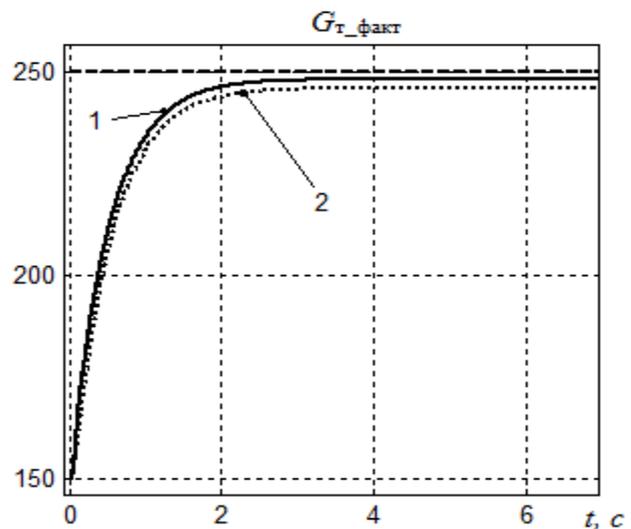


Рис. 4. Переходные характеристики в контуре управления расходом топлива при работе 1 – НЛР П-типа и 2 – линейного ПИД-регулятора с зоной нечувствительности ± 2 мА

Как видно из рис. 4 – 5, появление и/или увеличение зоны нечувствительности существенно увеличивает время переходного процесса, требуемое линейному ПИД-регулятору для устранения статической ошибки.

Нечёткий регулятор обеспечивает большую статическую точность переходного процесса, чем линейный ПИД-регулятор. Поэтому использование нечёткого П-регулятора при возможности возникновения и/или увеличения зоны нечувствительности системы в процессе её эксплуатации является более предпочтительным по отношению к линейному ПИД-регулятору.

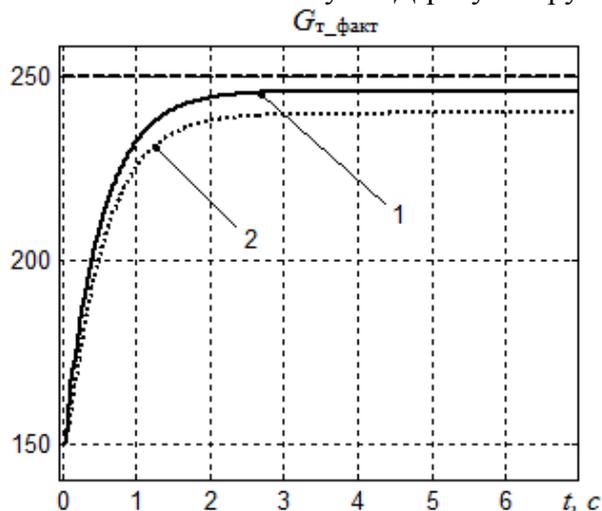


Рис. 5. Переходные характеристики в контуре управления расходом топлива при работе 1 – НЛР П-типа и 2 – линейного ПИД-регулятора с зоной нечувствительности ± 5 мА

Исследуем влияние коэффициента усиления электрогидромеханического преобразователя сигналов K_h и коэффициента усиления гидроусилителя $K_{ГУ}$. На рис. 6 приведены графики переходных процессов при отклонении K_h от номинального значения на величину -0.9 ($\text{кг}/\text{см}^2$)/мА.

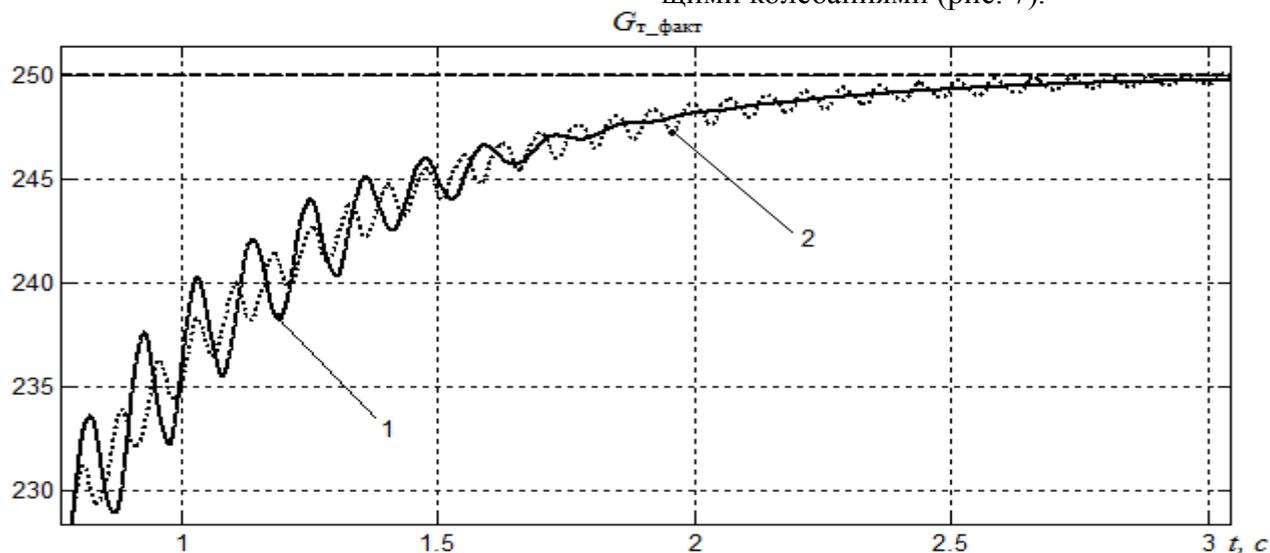
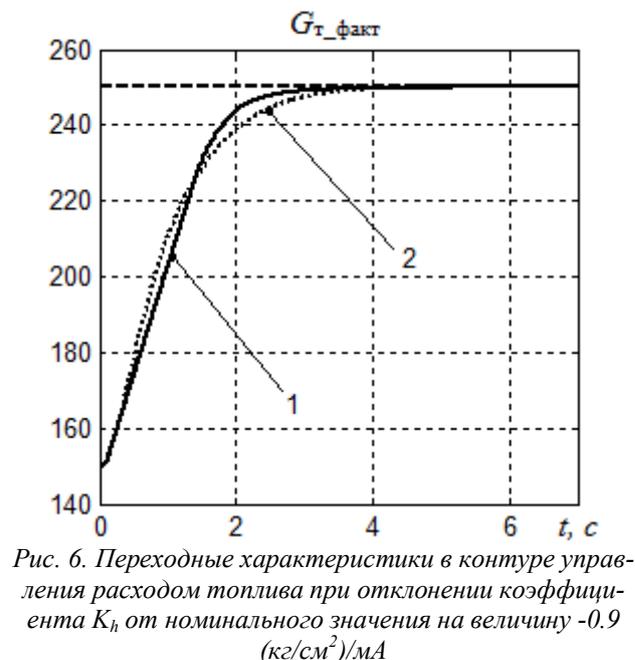


Рис. 6. Переходные характеристики в контуре управления расходом топлива при отклонении коэффициента K_h от номинального значения на величину $+2.6$ ($\text{кг}/\text{см}^2$)/мА



На рис. 6 – 9 цифрами обозначено:
1 – нечёткий П-регулятор;
2 – линейный ПИД-регулятор.

Из графиков видно, что при уменьшении K_h относительно номинального значения качество регулирования по критерию быстродействия и статической точности при работе нечёткого П-регулятора совпадает с качеством, обеспечиваемым работой линейного ПИД-регулятора. Переходные процессы являются аperiodически устойчивыми.

При отклонении K_h от номинального значения на положительную величину, меньшую или равную 2.6 ($\text{кг}/\text{см}^2$)/мА, переходный процесс сопровождается затухающими колебаниями (рис. 7).

Колебания переходной характеристики при работе нечёткого П-регулятора затухают быстрее, чем при работе линейного ПИД-регулятора.

При превышении коэффициентом K_h отклонения в $2.6 \text{ (кг/см}^2\text{)/мА}$ колебания ста-

новятся незатухающими при работе обоих регуляторов (рис. 8). Амплитуда колебаний переходной характеристики, полученной при работе НЛР, больше, чем при работе линейного ПИД-регулятора.

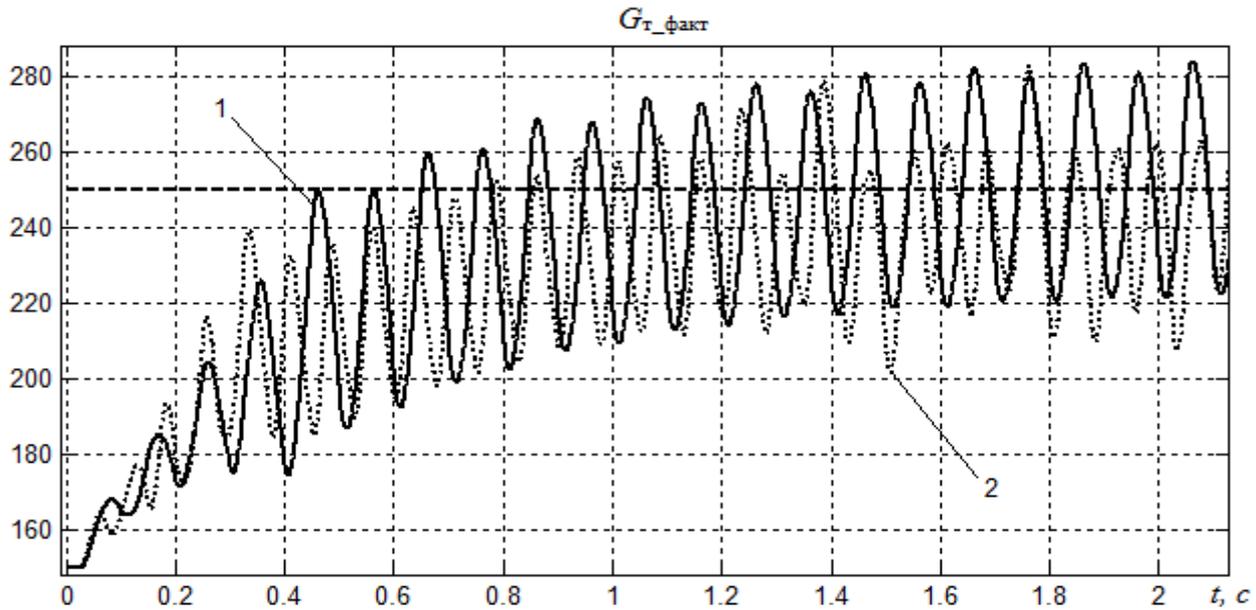


Рис. 8. Переходные характеристики в контуре управления расходом топлива при отклонении коэффициента K_h от номинального значения на величину $+2.8 \text{ (кг/см}^2\text{)/мА}$

Характер переходных процессов и качество регулирования при вариации коэффициента K_h аналогичны и для коэффициента $K_{ГУ}$. Поэтому описание вышеприведённых переходных характеристик при вариации K_h справедливо и для характеристик, полученных при вариации коэффициента $K_{ГУ}$.

Анализ влияния постоянной времени электрогидромеханического преобразователя сигналов на качество регулирования расходом топлива в исследуемой системе показывает, что при её возрастании характер переходного процесса становится колебательным (рис. 9). Колебания носят затухающий характер при любых сколь угодно больших¹ значениях постоянной времени.

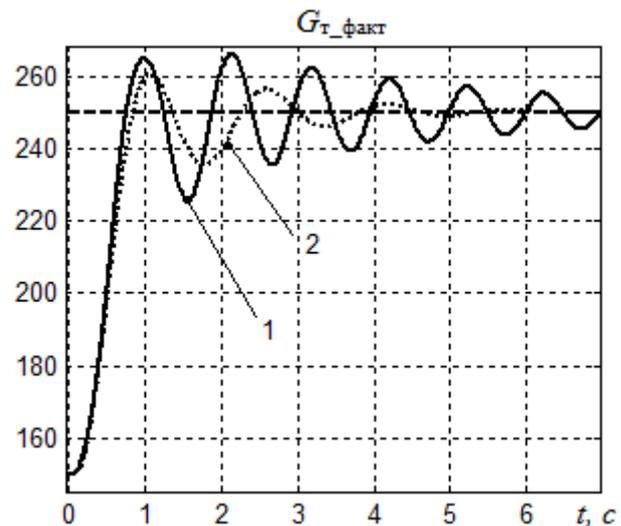


Рис. 9. Переходные характеристики в контуре управления расходом топлива при отклонении постоянной времени электрогидромеханического преобразователя сигналов от номинального значения на величину $+0.98 \text{ с}$

¹ Под понятием «сколь угодно большая постоянная времени» подразумевается максимальная величина постоянной времени из диапазона физически допустимых значений, определяемых разработчиком агрегата.

Полученные в процессе регулирования колебания переходной характеристики при работе линейного ПИД-регулятора затухают быстрее, чем колебания, полученные при работе нечёткого П-регулятора. Это связано с тем, что регулятор, в структуре которого

присутствует интегратор, обеспечивает лучшее качество регулирования системой со звеньями, имеющими большие постоянные времени, чем регулятор с нелинейным коэффициентом усиления.

Поэтому в случае возможного увеличения постоянных времени исследуемой системы в процессе эксплуатации использование регулятора с интегральным звеном является более предпочтительным, чем использование регулятора П-типа (необязательно нечёткого).

Достоинства и недостатки нечётких логических регуляторов

Достоинства:

1. Не требуется точного знания математической модели объекта управления.
2. Возможность синтеза нелинейного закона управления для нелинейных и дискретных систем.
3. При наличии малого количества входных терм возможен быстрый синтез алгоритма управления при изменении условий эксплуатации или характеристик объекта регулирования.
4. Использование алгоритмов нечёткой логики для подстройки коэффициентов ПИД-регулятора.

Недостатки:

1. Необходимость привлечения экспертов для составления описания объекта управления в терминах нечёткой логики.
2. Большое количество нечётких правил и терм приводят к сложности окончательной настройки регулятора.

Заключение

Из проведённого анализа следует, что контур управления расходом топлива с нечётким логическим регулятором обладает свойствами робастности. В зависимости от изменения тех или иных параметров неизменяемой части системы получается различное качество управления. При отсутствии зоны нечувствительности по входному управляющему току и отклонений параметров неизменяемой части системы от их номинальных значений нечёткий П-регулятор и линейный ПИД-регулятор дают одинаковое качество управления. В системе реализуется

устойчивый апериодический переходный процесс без статических ошибок.

При появлении и/или возникновении зоны нечувствительности использование нечёткого регулятора является более предпочтительным, т.к. линейному ПИД-регулятору требуется длительное время для устранения статической ошибки.

Уменьшение коэффициентов усиления электрогидромеханического преобразователя сигналов и гидроусилителя относительно их номинальных значений не влияет на качество регулирования в контуре. Оба регулятора обеспечивают одинаково высокое быстродействие и статическую точность переходных процессов в системе.

Отклонение коэффициента усиления электрогидромеханического преобразователя сигналов на $\Delta = +2.6$ (кг/см²)/мА, а коэффициента гидроусилителя на $\Delta = +2.7$ град/(кг/см²) влечёт появление затухающих колебаний. Колебания переходной характеристики при работе нечёткого П-регулятора затухают быстрее, чем при работе линейного ПИД-регулятора.

Отклонение вышеназванных коэффициентов усиления на большую величину вызывает появление незатухающих колебаний в системе. При работе нечёткого регулятора амплитуда колебаний больше, чем при работе линейного ПИД-регулятора.

При увеличении значений постоянных времени в системе возникают затухающие колебания. При работе линейного ПИД-регулятора колебания затухают быстрее, чем при работе нечёткого П-регулятора.

Таким образом, в качестве основного электронного регулятора исследуемой системы можно использовать линейный ПИД-регулятор, а нечёткий регулятор применить в качестве резервного. В этом случае НЛР может быть использован, когда линейный ПИД-регулятор не обеспечивает требуемого качества управления.

Библиографический список

1. Нечеткая логика в системах управления [Электронный ресурс] / С.С. Гриняев // Электронный журнал «Компью-тера», 2001. – №38.
2. Бураков, М.В. Синтез нечётких логических регуляторов [Текст] / М.В.

Бураков, А.С. Коновалов // Информационно-управляющие системы. - 2011. – № 1 (50). – С. 22-27.

3. Бураков, М.В. Нечёткие регуляторы [Текст]: учеб. пособие / М.В. Бураков. – СПб.: СПб ГУАП, 2010. – 252с.

4. Нечеткая логика, нейронные сети и генетические алгоритмы [Электронный ресурс] // Энциклопедия АСУ ТП – http://bookasutp.ru/Chapter5_6.aspx

5. Чичерова, Е.В. Использование алгоритмов нечёткой логики в системах автоматического управления ГТД [Текст] / Е.В. Чичерова // Сб. тез. науч.-техн. конгресса по двигателестроению (НКТД-2012). Москва, 18 – 19 апреля 2012 года. – С. 247-251.

6. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления [Текст] / А.Т. Барабанов, В.Я. Катковник, Р.А. Нелепин [и др.]; под общ. ред. Р.А. Нелепина. – М.: Наука, 1975. – 447с.

ROBUST RESEARCH OF THE FUZZY LOGIC CONTROLLERS USING A FUEL FLOW CONTROL LOOP OF THE GAS-TURBINE ENGINE AS AN EXAMPLE

© 2012 E. V. Chicherova

Klimov JSC, St. Petersburg

The article issues of application fuzzy logic controllers for the automatic control electronic systems gas-turbine engine is research. A comparative analysis of transient performances a fuel flow control loop with fuzzy logic P controller and line PID controller for the deterministic line system, system contenting dead zone and deflections of parameters invariable part of system comparative them nominal value has been made. As a result of the comparison the best controller has been chosen. Conclusion about of appropriateness using fuzzy logic controllers for the automatic control systems gas-turbine engine has been made.

Gas-turbine engine, fuel flow, fuzzy logic controller, PID controller, nonlinearity, dead zone, robust, transient performance.

Информация об авторах

Чичерова Елизавета Владимировна, инженер-конструктор конструкторского бюро регулирования и автоматики, Открытое акционерное общество «Климов», г. Санкт-Петербург. E-mail: proffgrand@mail.ru. Область научных интересов: теория систем автоматического управления и компьютерное моделирование динамических систем.

Chicherova Elizaveta Vladimirovna, design engineer of Design Bureau of Control and Automatics, Klimov JSC, St. Petersburg. E-mail: proffgrand@mail.ru. Area of research: theory of the automatic control systems, computer simulation technique of dynamic systems.