
УДК 681.5.013

Использование алгоритмов нечёткой логики для управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя

Чичерова Е.В.

Корпорация «Климов», ул. Кантемировская, 11, Санкт-Петербург,

194100, Россия

e-mail: proffgrand@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена вопросам повышения качества управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя с помощью различных электронных регуляторов. Рассматриваются линейные регуляторы и нечёткий логический регулятор. Проводится исследование качества работы каждого из регуляторов в электронном контуре поддержания частоты вращения силовой турбины. Сравнивается запас устойчивости и качество переходных процессов, обеспечиваемое каждым регулятором. По результатам анализа выбирается регулятор, обеспечивающий наилучшее качество управления частотой вращения силовой турбины.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, силовая турбина, линейный регулятор, нечёткий логический регулятор.

Введение

Газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой сложную термогазодинамическую систему со множеством особенностей, которых 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. Цифровой регулятор выполняет основную часть функций по управлению двигателем. Основными его задачами являются управление режимами работы ГТД, поддержание и / или ограничение различных его 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 упрощённым 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, дешёвой реализацией и достаточной эффективностью. Однако, как показывает практика, в рамках линейной теории не всегда удаётся настроить

ПИД-регулятор для обеспечения требуемого качества переходных процессов в нелинейной системе. При управлении сложными нелинейными объектами, каким является газотурбинный двигатель, такие регуляторы не всегда могут обеспечить требуемое качество управления параметрами ГТД, устойчивость и робастность системы при изменениях условий эксплуатации и возникновении отказов. В этом случае имеет смысл применения альтернативных нелинейных регуляторов [1]. Например, это может быть нечёткий логический регулятор (НЛР), обладающий свойством робастности [2 – 3]. Благодаря отсутствию необходимости строгого математического описания объекта, НЛР завоевали большую популярность у разработчиков электронных систем [4 – 6]. Получаемый в результате синтеза нечёткий закон управления является нелинейным и хорошо работают 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 [5 – 8].

Рассмотрим пример использования нечётких логических регуляторов в электронной системе управления вертолётного двигателя, и сравним запас устойчивости и качество переходных процессов, обеспечиваемое НЛР, с запасом устойчивости и качеством, обеспечиваемым линейным регулятором.

Описание контура поддержания частоты вращения силовой турбины

Основной задачей САУ вертолётного двигателя является поддержание частоты вращения несущего винта $n_{нв}$. Эта задача выполняется путём

управления частотой вращения силовой турбины (СТ) $n_{ст}$ через требуемый расход топлива G_T . Величина требуемого расхода топлива формируется по частоте вращения ротора турбокомпрессора (ТК) $n_{тк}$ и её производной $\dot{n}_{тк_треб}$.

В зависимости от режима работы двигателя величину требуемой производной частоты вращения ротора ТК формируют различные контуры. Например, на режиме «Малый Газ» величина $\dot{n}_{тк_треб}$ определяется контуром поддержания требуемой частоты вращения ротора турбокомпрессора, а на режиме «Полёт» – контуром поддержания частоты вращения силовой турбины.

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

На рисунке 1 представлена типовая схема контура поддержания частотой вращения силовой турбины ГТД с линейным ПД-регулятором.

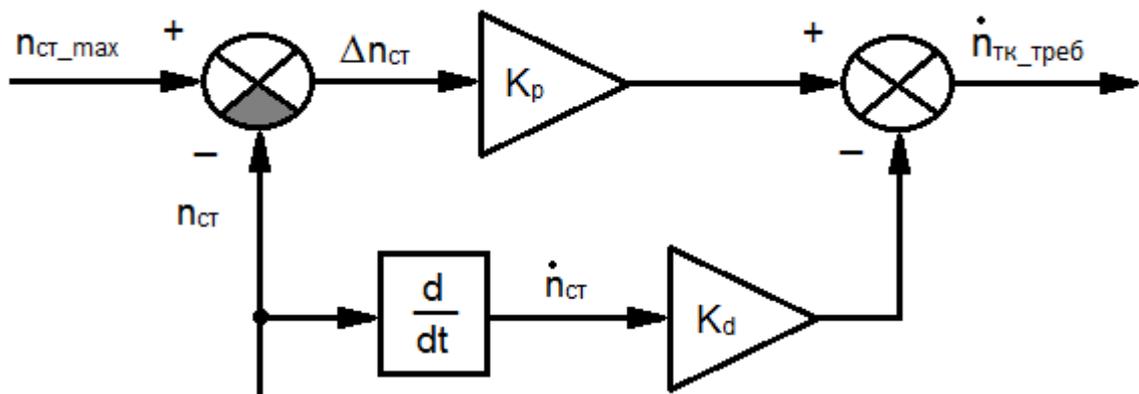


Рис. 1. Структурная схема контура поддержания частоты вращения силовой турбины с линейным электронным регулятором

На вход контура подаётся 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 величина требуемой производной 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 звена определяются из 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.

Коэффициент $K(\Delta n_{ст})$ задаётся 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 дифференциального звена $K_{стат_d}$ составляет 0.05.

На рисунке 2 представлен график переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе одного двигателя на режиме «Полёт» с линейным ПД-регулятором.

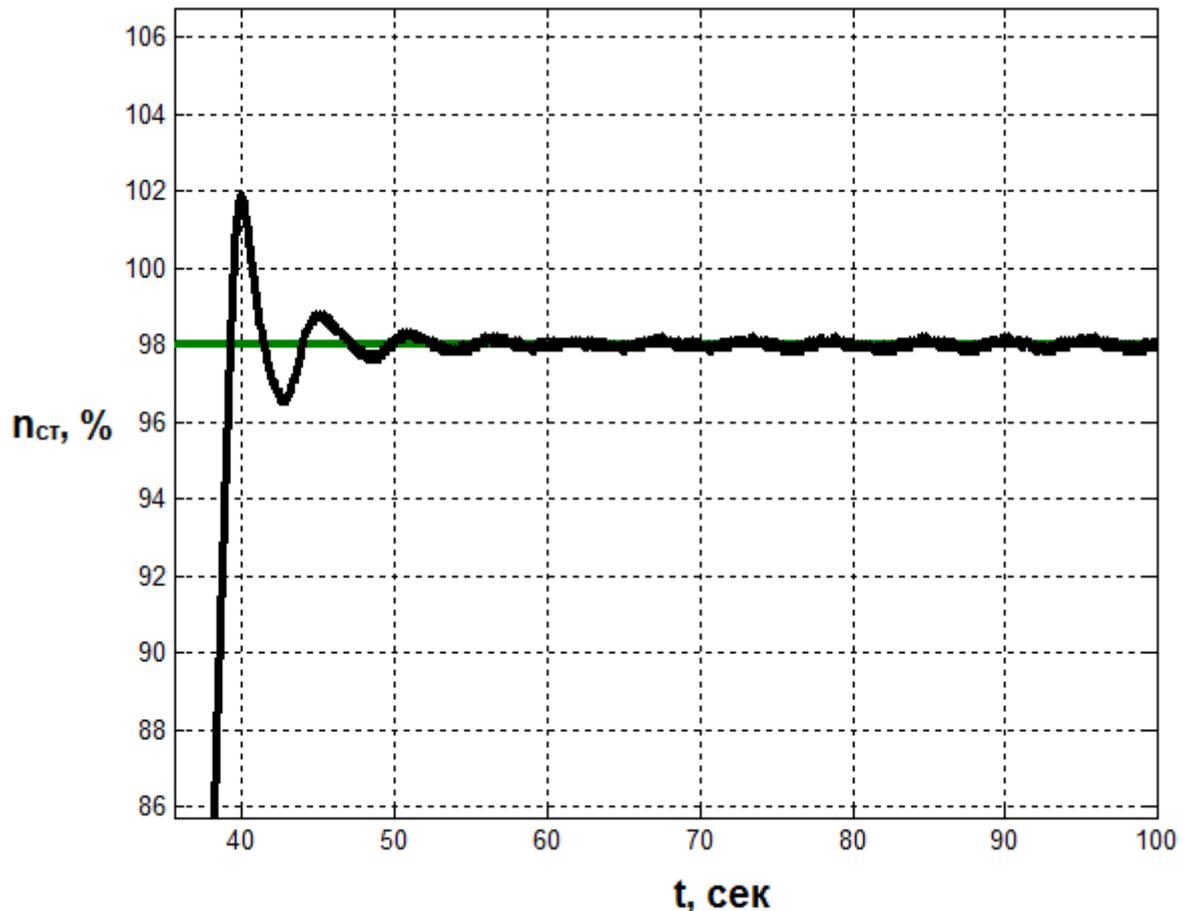


Рис. 2. Переходный процесс по частоте вращения силовой турбины при работе двигателя на режиме «Полёт» с линейным ПД-регулятором контура поддержания частоты вращения силовой турбины

Из рисунка видно, что выход на режим сопровождается забросом величиной порядка 4%. Амплитуда незатухающих колебаний составляет 0.2%. Время переходного процесса – около 20 сек.

Уменьшение пропорционального коэффициента усиления обеспечивает апериодический характер переходного процесса, повышается запас

устойчивости системы (отсутствуют забросы и колебания) и статическая точность (см. рис. 3).

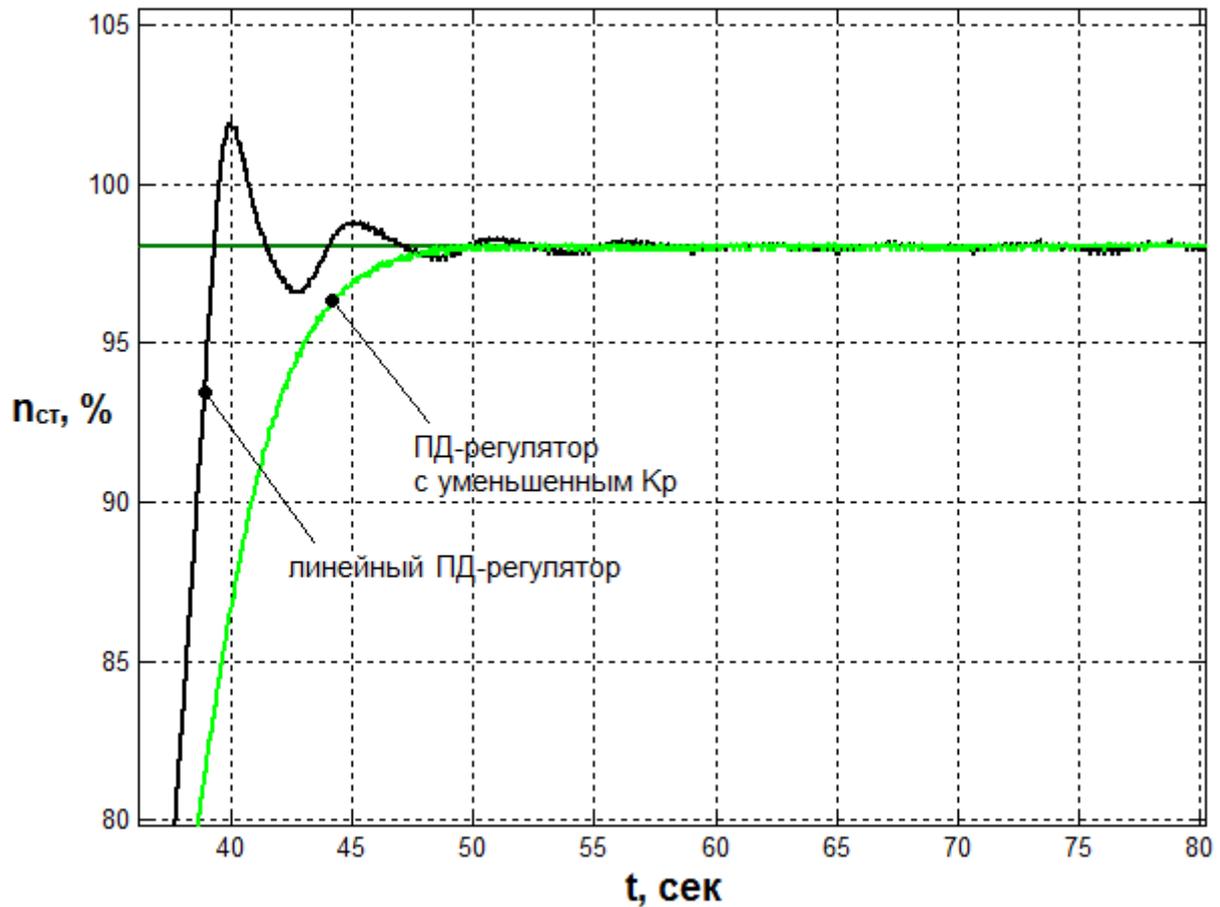


Рис. 3. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе линейного ПД-регулятора и ПД-регулятора с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления. Фрагмент

Однако требуется обеспечить более высокое быстродействие системы (порядка 8 – 10 сек). Данное требование обосновано тем, что электронный регулятор поддержания частоты вращения силовой турбины должен компенсировать инерционность силовой турбины.

В качестве альтернативного способа регулирования, позволяющего повысить быстродействие и обеспечить требуемые запасы устойчивости исследуемой системы, рассмотрим нечёткий логический регулятор П-типа.

Синтез нечёткого логического П-регулятора

Синтез нечёткого П-регулятора реализован в соответствии с описанием, приведённым в работах [8 – 11]. Стандартный алгоритм синтеза НЛР состоит из четырёх этапов: фаззификация, описание нечётких правил, по средствам которых происходит выбор управляющего воздействия, агрегация и дефаззификация [7], [9], [12].

Фаззификация заключается в определении количества терм, разбивающих чёткое множество входных и выходных лингвистических переменных на нечёткие подмножества. Степень принадлежности каждого точного значения к одной из терм определяется посредством 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.

На следующем этапе определяются нечёткие правила, связывающие входные и выходные термы. Количество нечётких правил и терм, используемых в алгоритме, определяет сложность окончательной настройка регулятора.

Процедура агрегации заключается в объединении нечётких выводов из всех нечётких правил. Агрегация может реализоваться как среднее

арифметическое, среднее геометрическое, или как среднее гармоническое всех нечётких выводов.

В процедуре дефаззификации осуществляется переход от нечётких величин к чётким физическим параметрам, служащим командами для исполнительного устройства.

Результатом синтеза стал нечёткий П-регулятор, определённый как статический с нелинейным коэффициентом усиления. Регулятор описывается выражением вида:

$$\dot{n}_{\text{ТК_треб_}n_{\text{СТ}}} = f(\Delta n_{\text{СТ}}), \quad (5)$$

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

В НЛР П-типа было использовано три термы для описания входной и выходной лингвистической переменной. Входной переменной является величина рассогласования между текущим и требуемым значением частоты вращения СТ $\Delta n_{\text{СТ}}$, а выходной – величина требуемой производной частоты вращения ротора ТК $\dot{n}_{\text{ТК_треб_}n_{\text{СТ}}}$. Термы и диапазоны их изменения на чётком множестве для входной и выходной лингвистической переменной представлены в таблице 1.

Таблица 1

Термы входной и выходной лингвистической переменной НЛР П-типа контура поддержания частоты вращения силовой турбины

Термы вх.	N	[-30, 0]		Термы вых.	N	[-1.2, 0]
-----------	---	----------	--	------------	---	-----------

лингвист-х перемен.	Z	[-25, 25]		лингвист-х перемен.	Z	[-0.6, 0.6]
	P	[0, 30]			P	[0, 1.2]

В таблице 1 буквенные обозначения расшифровываются следующим образом:

N – (Negative) отрицательная величина;

Z – (Zero) нулевая величина;

P – (Positive) положительная величина.

Степень принадлежности чётких значений к термам N и P определяется сигмоидной функцией принадлежности, описываемой выражением вида:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \exp[-A(x - B)]}. \quad (6)$$

Степень принадлежности чётких значений к терму Z определяется треугольной функцией принадлежности, описываемой выражением вида:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < A; \\ \frac{x - A}{B - A}, & A \leq x \leq B; \\ \frac{C - x}{C - B}, & B \leq x \leq C; \\ 0, & x > C. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь x – элемент чёткого множества, A, B и C – подмножества нечёткого множества, $\mu_A(x)$ – величина степени принадлежности чётких входных и выходных значений к каждой из терм нечёткого множества.

Совместное расположение функций принадлежности, определяющих степень принадлежности каждого точного значения к одной из терм входной и выходной лингвистической переменной, показано на рисунках 4 – 5.

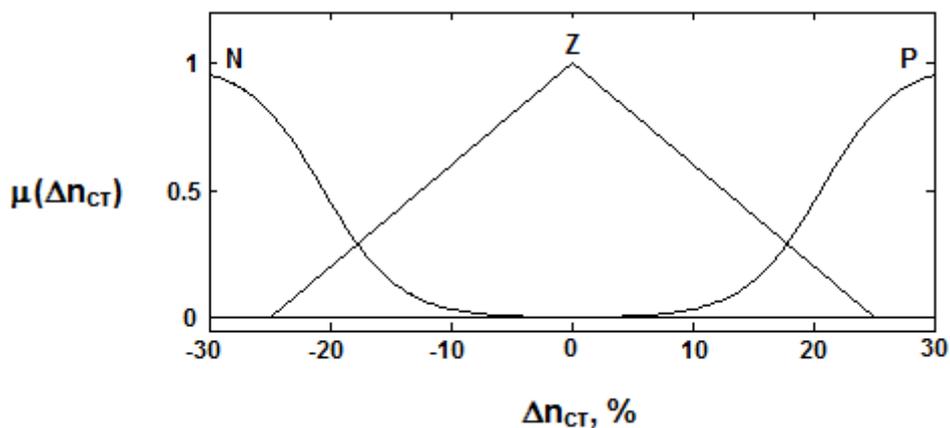


Рис. 4. Описание входных термов нечёткого П-регулятора контура поддержания частоты вращения силовой турбины

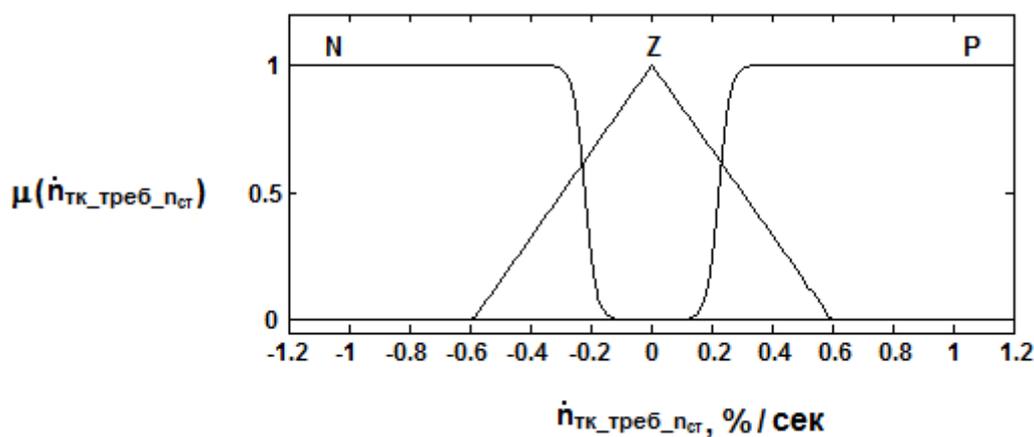


Рис. 5. Описание выходных термов нечёткого П-регулятора контура поддержания частоты вращения силовой турбины

В диапазоне изменения $\Delta n_{ст}$ свыше 30% и меньше -30% выходная величина требуемой производной частоты вращения ротора ТК принимается постоянной, равной +10%/сек и -10 %/сек, соответственно:

$$n_{\text{тк_треб_}n_{\text{ст}}} = \begin{cases} 10\% / \text{сек}, & \Delta n_{\text{ст}} > 30\%, \\ -10\% / \text{сек}, & \Delta n_{\text{ст}} < -30\%. \end{cases} \quad (8)$$

На рисунке 6 представлена переходная характеристика по частоте вращения силовой турбины двигателя ТВ7-117В при работе НЛР П-типа.

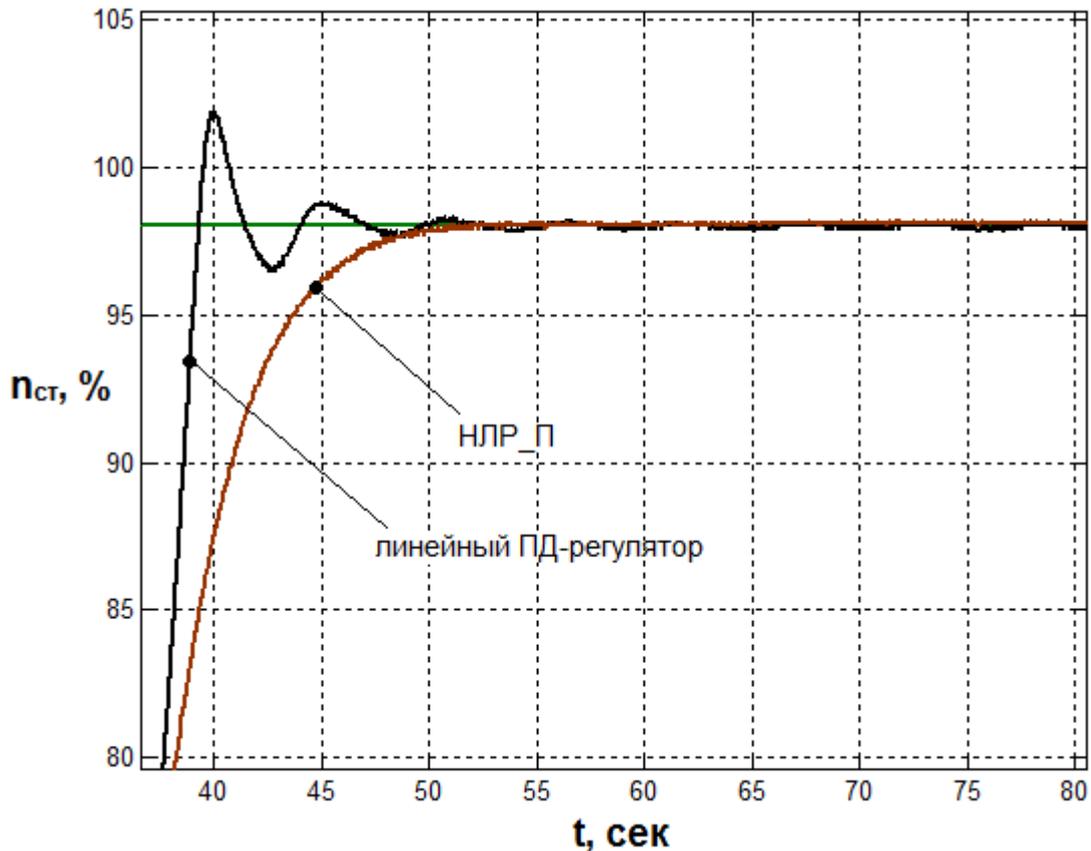


Рис. 6. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе линейного ПД-регулятора и нечёткого П-регулятора. Фрагмент

Из рисунка 6 следует, что нечёткий П-регулятор обеспечивает достаточный запас устойчивости, высокую статическую точность и апериодический переходный процесс, но не имеет требуемого быстродействия.

Повышения быстродействия можно добиться путём увеличения коэффициента усиления пропорциональной части регулятора. Однако это

неизбежно приведёт к возникновению заброса по регулируемой величине и колебательному переходному процессу.

Для повышения быстродействия исследуемой системы используем модификацию НЛР П-типа – нечёткий логический регулятор П-типа с корректирующим дифференциальным звеном.

Синтез нечёткого логического П-регулятора с корректирующим дифференциальным звеном

Модифицированный нечёткий регулятор состоит из двух частей: 1) нечёткий П-коэффициент усиления и 2) дифференциальное звено, вносящее поправку в вычисление значения $\dot{n}_{\text{TK_треб_нст}}$. Нечёткая пропорциональная часть синтезирована по аналогии с описанным выше НЛР П-типа и отличающийся только диапазоном изменения выходной переменной $\dot{n}_{\text{TK_треб_нст}}$ (от -8%/сек до 8%/сек – см. рисунок 7.)

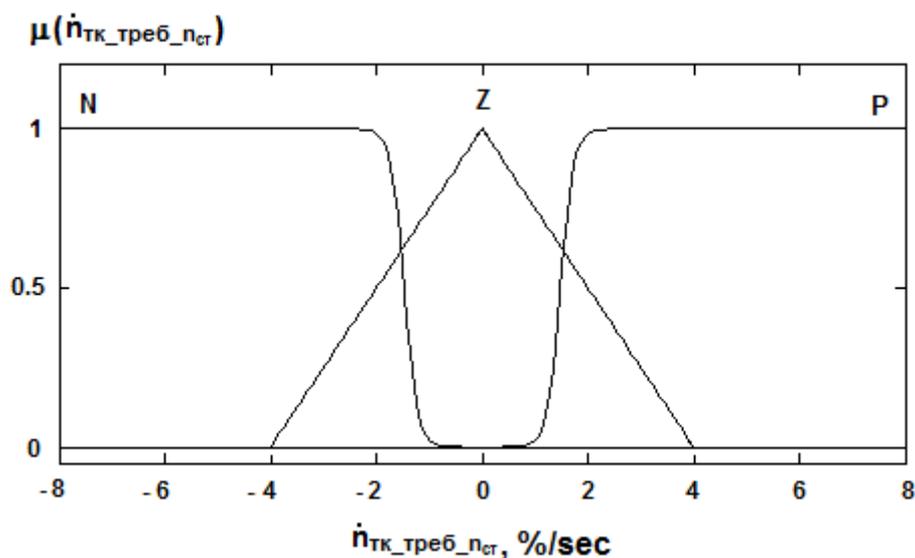


Рис. 7. Выходные термы, описывающие нечёткий П-коэффициент усиления

Дифференциальное звено синтезировано по аналогии с дифференциальным звеном исходного ПД-регулятора, но отличается от него увеличенным выходным коэффициентом усиления. Кроме того, звено включается в работу, когда ошибка рассогласования $\Delta n_{ст}$ находится в пределах $0.25\% \leq |\Delta n_{ст}| \leq 2.9\%$.

Выражение, описывающее дифференциальное звено, имеет вид:

$$K_d = \begin{cases} C_{стат} K_{стат_d} T_{ст}(n_{тк}), & \text{при } 0.25\% \leq |\Delta n_{ст}| \leq 2.9\%, \\ 0, & \text{при } 0.25\% > |\Delta n_{ст}| > 2.9\%. \end{cases} \quad (9)$$

График с переходной характеристикой по частоте вращения силовой турбины при работе нечёткого П-регулятора с корректирующим дифференциальным звеном представлен на рисунке 8.

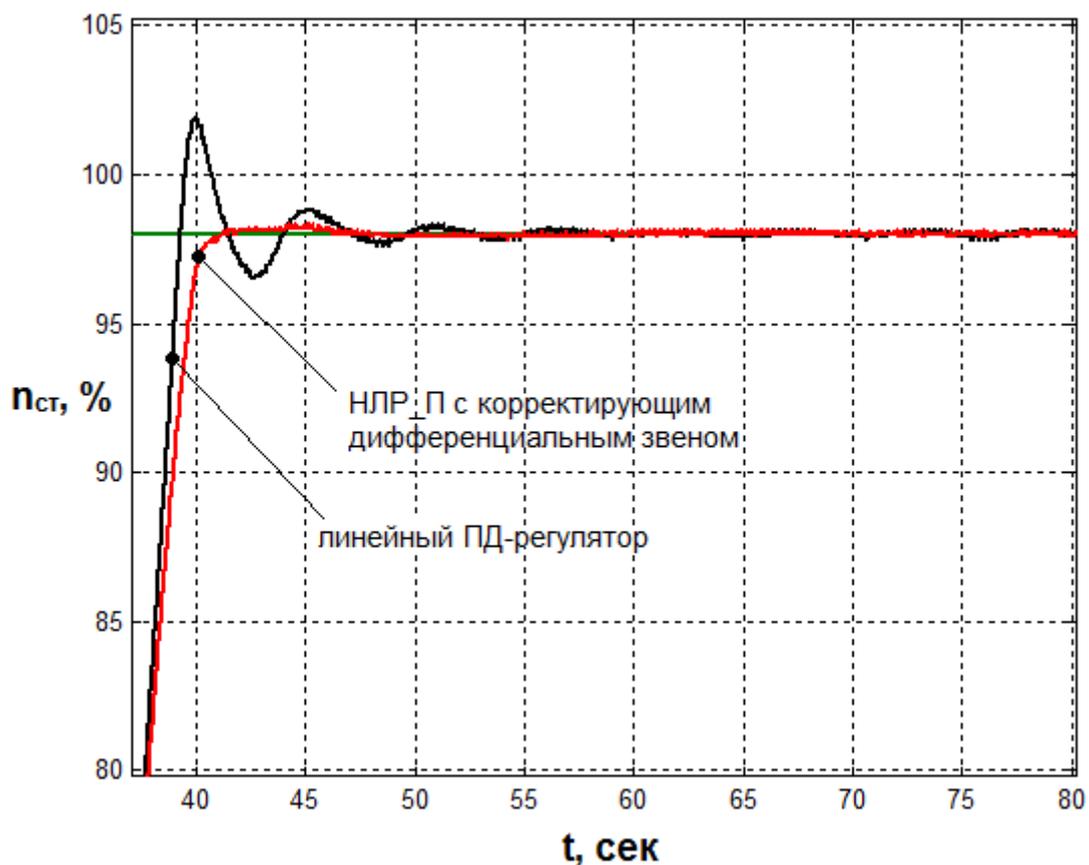


Рис. 8. Характеристика переходного процесса по частоте вращения силовой турбины при работе линейного ПД-регулятора и нечёткого П-регулятора с корректирующим дифференциальным звеном. Фрагмент

Увеличенный коэффициент усиления, получаемый на выходе нечёткого П-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 величину заброса, тем самым сохраняя апериодический характер переходного процесса.

Сравнительный анализ качества работы различных регуляторов в контуре поддержания частоты вращения СТ

Перейдём к сравнению качества управления переходной характеристикой по частоте вращения СТ и запасов устойчивости, обеспечиваемых каждым из рассмотренных выше регуляторов. На рисунке 9 представлен график совместного расположения кривых переходного процесса по частоте вращения СТ при работе различных регуляторов.

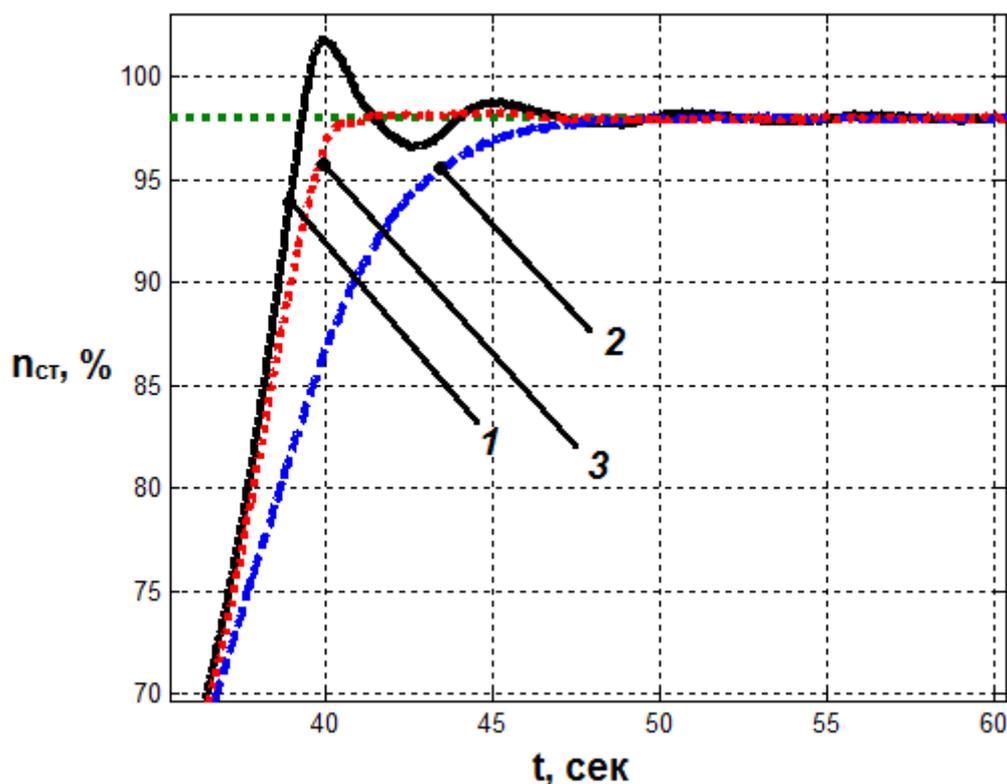


Рис. 9. Характеристики переходных процессов по частоте вращения силовой турбины при работе различных регуляторов

На рисунке цифрами обозначены переходные процессы со следующими электронными регуляторами: 1 – исходный линейный ПД-регулятор, 2 – ПД-регулятор с уменьшенным пропорциональным коэффициентом усиления, 3 – нечёткий П-регулятор с корректирующим дифференциальным звеном.

Ниже представлена таблица с численным анализом качества работы контура поддержания частоты вращения силовой турбины с различными регуляторами.

Таблица 2

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

	Исходный линейный ПД-регулятор	ПД-регулятор с уменьшенным K_p	НЛР_П с корр. диф. звеном
Статическая точность, %	± 0.2	± 0.3	± 0.2
Быстродействие, сек	20	15	6
Характер переходного процесса	Колебательный	Апериодический	Апериодический
Величина заброса, %	1.9	–	0.3

Из рисунка 9 и таблицы 2 следует, что наилучшее качество переходного процесса по частоте вращения силовой турбины обеспечивает нечёткий П-регулятор с корректирующим дифференциальным звеном. Переходная характеристика при работе данного регулятора отличается от прочих более высоким быстродействием (порядка 6 сек) и отсутствием колебаний (кривая б).

Заключение

Из проведённого 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 ПД-регулятор, включающий нечёткий П-коэффициент усиления и дифференциальное звено с ограниченным интервалом работы, зависящим от ошибки рассогласования по частоте вращения силовой турбины.

Библиографический список

1. Чичерова Е.В. Способы оптимизации динамических систем, содержащих нелинейности, типа зоны нечувствительности // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 33 – 37.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.
3. Чичерова Е.В. Исследование свойств робастности нечётких логических регуляторов на примере контура управления расходом топлива газотурбинного двигателя // Вестник СГАУ. 2012. № 3 (34). С. 145 - 152.
4. Гриняев С.В. Нечеткая логика в системах управления // Электронный журнал «Компьютерра», 2001, № 38: www.computerra.ru (дата публикации 08.10.2001).
5. Энциклопедия АСУ ТП // Нечеткая логика, нейронные сети и генетические алгоритмы, URL: http://bookasutp.ru/Chapter5_6.aspx
6. Дудкин Ю.П., Титов Ю.К., Филиппенков Р.Г., Хижняков Ю.Н. Нечёткое управление частотой вращения свободной турбины газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 6. С. 55 – 60.
7. Гостев В.И. Нечёткие регуляторы в системах автоматического управления. – Киев, Радиоаматор, 2008. – 972 с.
8. Бураков М.В., Коновалов А.С. Синтез нечётких логических регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1 (50). С. 22-27.

9. Бураков М.В. Нечёткие регуляторы: Учеб. пособие. - С-Пб.: Изд-во ГУАП, 2010. – 236 с.

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

11. Malleshram 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.

12. Ramot D., Friedman M., Langholz, G., Kandel A. Complex fuzzy logic // Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 2003, vol . 11, issue 4, pp. 450-461.