

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-143-156>



УДК 681.515.8

Настройка адаптивных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя

**К.Э. Чертилин,
В.Д. Ивченко[@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: professor55@rambler.ru

Для нестационарных объектов, параметры которых в процессе работы могут существенно меняться, применение обычных управляющих устройств в виде пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов может не обеспечить требуемое качество работы системы. Поэтому желательно создать адаптивную систему автоматического регулирования, в которой целенаправленно изменяется структура и параметры управляющего регулятора для обеспечения приспособляемости (настройки) системы к изменяющимся условиям работы на основе информации о свойствах объекта регулирования и внешним воздействиям. Проблема построения адаптивных систем является одной из наиболее важных в теории управления и смежных областях. Это обусловлено двумя обстоятельствами: сложностью решения проблемы в целом и наличием большого числа технически разнообразных ситуаций, нуждающихся в адаптации и оптимизации. В статье рассматривается адаптивная система автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя, включающая в себя магнитный усилитель, двигатель постоянного тока с редуктором, клапан подачи топлива и тахогенератор. Для реализации адаптивного управления были предложены три пропорционально-интегрально-дифференциальных регулятора: «классический», нечеткий и нейрон-нечеткий. Параметры «классического» регулятора оптимизированы при помо-

щи методов линейного программирования. Для нечеткого регулятора предложены функции принадлежности и база правил. Для нейро-нечеткого регулятора выбран алгоритм адаптации. При компьютерном моделировании системы применены три регулятора для трех режимов работы двигателя: малого газа, крейсерский и максимальный. На основе полученных переходных характеристик проведен сравнительный анализ качества работы трех регуляторов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем автоматического регулирования газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, адаптивная система, газотурбинный двигатель, цифровое ПИД-регулирование, нечёткое и нейро-нечёткое ПИД-регулирование, переходный процесс.

Для цитирования: Чертилин К.Э., Ивченко В.Д. Настройка адаптивных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):143-156. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-143-156>

Configuring adaptive PID-controllers of the automatic speed control system of the GTE

**Kirill E. Chertilin,
Valeriy D. Ivchenko[@]**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: professor55@rambler.ru

For non-stationary objects with parameters, which could be changed significantly during operation, using conventional controllers in the form of proportional-integral-differential regulators may not provide the required quality of the system. Therefore, it is desirable to create an adaptive automatic control system with the structure and parameters of the control regulator that are purposefully changed to ensure the system adaptation, that is based on information about the properties of the object of regulation and external influences, to the changing operating conditions. The problem of designing adaptive systems is one of the most important in control theory and related fields. This is conditioned by two factors: the complexity of solving the problem as a whole and the presence of a large number of technically diverse situations that need to be adapted and optimized. In the paper, an adaptive system for the automatic control of the speed of a gas turbine engine, which includes a magnetic amplifier, a DC motor with a gearbox, a fuel supply valve and a tachogenerator, is developed. For adaptive control execution, three proportional-integral-differential controllers were proposed: "classic", fuzzy and neuro-fuzzy. The parameters of the "classic" controller were optimized using linear programming methods. The membership functions and the rule base were proposed for the fuzzy controller. An adaptation algorithm was selected for the neuro-fuzzy controller. Three controllers were used for three engine-operating modes: low-gas, cruiser and maximum during the computer simulation of the system. A comparative analysis of the quality of the

three regulators was performed and it is based on the obtained transient characteristics. The derived results can be used in the development of automatic control systems for gas turbine engines.

Keywords: automatic control system, adaptive system, gas turbine engine, digital PID-control, fuzzy and neuro-fuzzy PID-control, transient process.

For citation: Chertilin K.E., Ivchenko V.D. Configuring adaptive PID-controllers of the automatic speed control system of the GTE. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):143-156 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-143-156>

Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в авиастроении и оснащены различными системами автоматического регулирования (САР). В статье рассмотрено управление ГТД по одному из каналов – частоте вращения. В САР ГТД широкое применение находят корректирующие устройства – пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы [1], причем параметры регулятора настраиваются на один из типовых режимов работы двигателя, например, крейсерский. Переход на другой режим работы двигателя требует перестройки параметров самого регулятора и вызывает изменение параметров двигателя. Если нам известен этот режим и известны параметры двигателя, то «оптимальные» параметры ПИД-регулятора могут быть найдены [2]. Однако для других режимов работы двигателя параметры ПИД не являются «оптимальными».

Газотурбинный двигатель самолета, как объект регулирования, является нестационарной системой [3]. В зависимости от условий (высоты и скорости полета и др.) изменяются его структура и параметры, причем параметры ГТД такого рода, как коэффициенты усиления и постоянные времени, могут изменяться в разы. Поэтому возникает необходимость создания адаптивной системы автоматического регулирования, которая бы компенсировала нестационарность ГТД.

Целью работы является выбор метода настройки ПИД-регулятора, обеспечивающего наилучший переходный процесс. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- синтез «классического» и адаптивных ПИД-регуляторов;
- моделирование системы при различных режимах работы двигателя;
- анализ показателей качества переходных процессов САР.

Для создания адаптивной САР в данной статье предлагается использовать мягкие вычисления, такие как нечеткая логика и искусственные нейронные сети [2]. В работе предложена структурная схема и проведен сравнительный анализ действия адаптивной системы автоматического регулирования ГТД при различных настройках ПИД-регуляторов. Рассматриваются три метода настройки. Первый метод – «классический». Вторым и третьим методами реализуют соответственно нечеткий и нейро-нечеткий регуляторы. Выводы о работоспособности регуляторов сделаны на основе анализа показателей качества:

- времени переходного процесса,
- колебательности,
- перерегулирования,
- величины установившейся ошибки.

1. ПИД-регулирование

Дискретная передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид [4]:

$$W_p = k_{\Pi} + k_{\text{И}} \frac{Tz}{z-1} + k_{\text{Д}} \frac{z-1}{Tz} = \frac{\frac{k_{\text{Д}}}{T} + (-\frac{k_{\Pi}}{T} - 2\frac{k_{\text{Д}}}{T})z + (\frac{k_{\Pi}}{T} + k_{\text{И}}T + \frac{k_{\text{Д}}}{T})z^2}{z^2 - z}, \quad (1)$$

где k_{Π} , $k_{\text{И}}$, $k_{\text{Д}}$ – настраиваемые параметры регулятора, T – период дискретизации.

Основным отличием нечётких и нейро-нечётких ПИД-регуляторов от «классических» является их способность адаптироваться к изменениям параметров объекта (ГТД) и к внешним воздействиям. Эту задачу также можно решить, меняя коэффициенты классического регулятора в зависимости от различных обстоятельств работы двигателя (высота полёта, скорость полёта и т.д.). Однако это трудоемкая задача, которая внесет дополнительные погрешности в систему [5]. Нечёткий регулятор, получая на вход значения ошибки системы и её производной, фазифицирует эти данные и рассчитывает входные лингвистические переменные. Затем на основе базы правил регулятор должен подобрать соответствующие выходные лингвистические переменные. Затем ему необходимо дефазифицировать эти переменные в коэффициенты ПИД-регулятора. Отличием нейро-нечёткого регулятора от нечёткого является наличие у первого нейросетевой части. Её задача заключается в корректировке функций принадлежности на основе обучающего алгоритма для минимизации ошибки [6].

2. Принципы построения адаптивных систем

В теории автоматического управления существуют задачи, в которых САР объекта управления не соответствует эталонной. Это вызвано различными неопределённостями системы (изменение математической модели в результате внешних воздействий, шумы и др.). Для решения таких задач применяют робастное или адаптивное управление. В робастных системах производится настройка управляющего устройства в условиях неопределённостей с целью оптимизации процесса управления. Однако при робастном управлении коэффициенты регулятора настраиваются один раз и не меняются при выявлении новых неопределённостей [2].

Адаптивными системами управления называются системы, способные изменять параметры или структуру управляющего устройства в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних воздействий. Таким образом, система управления автоматически обеспечивает переходной процесс близкий к оптимальному [7]. В отличие от робастных систем, адаптивные системы реагируют на неопределённости в реальном времени. Поэтому при адаптивном управлении часто применяют мягкие вычисления (нечеткая логика, нейронные сети). На рис. 1 приведена функциональная схема адаптивной системы. Входное воздействие поступает на регулятор с рассчитанными параметрами. Управляющее воздействие $U_{\text{выход}}$ поступает на объект управления, на выходе которого формируется выходной сигнал $U_{\text{выход}}$. Этот сигнал обрабатывается блоком адаптации, формирующим новые параметры управляющего устройства.

В ходе адаптивного управления решаются две задачи. Первой задачей является поддержание экстремума управляемой величины. Для этой цели на объект подаются проб-

ные воздействия со стороны управления, анализируется знак изменения управляемой величины и производится управляющее воздействие, приближающее режим к точке экстремума. Второй задачей адаптации является поддержание оптимальной работы системы регулирования по условию максимального ее быстродействия. В этом случае показателем экстремума является время, в течение которого система приходит в соответствие с изменением задающего воздействия. Для решения этих задач в систему добавляется блок самонастройки [8].

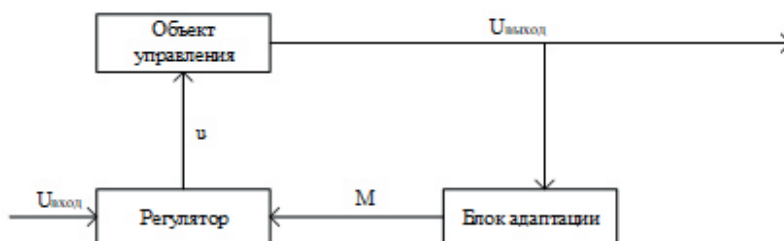


Рис. 1. Функциональная схема адаптивной системы управления.

Для реализации этого блока целесообразно использовать нейронные сети (НС). Во-первых, использование НС позволяет очень быстро и одновременно решать обе задачи за счет массивной параллельной структуры. Во-вторых, НС способны самообучаться и корректировать базу знаний для параметров регулятора на основе опыта применения тех или иных параметров при определенных условиях.

3. Система автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя

Структурная схема системы автоматического регулирования частоты вращения ГТД представлена на рис. 2:

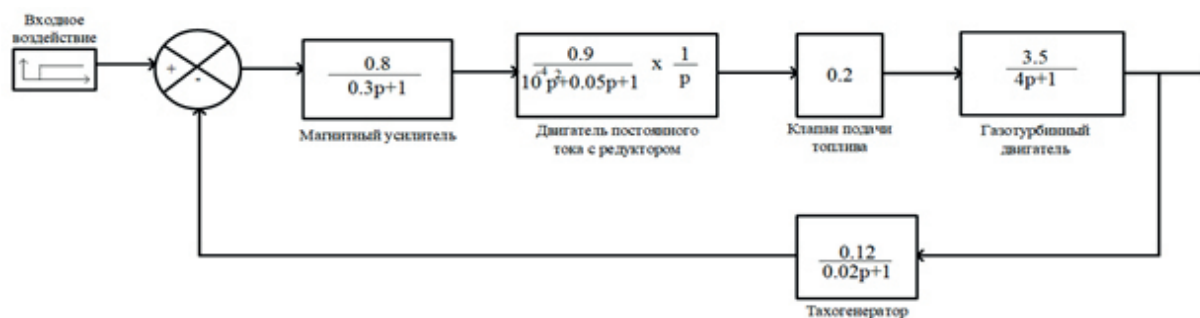


Рис. 2. Структурная схема САР частоты вращения ГТД.

Передающая функция газотурбинного двигателя (объекта регулирования) представлена в виде апериодического звена [3]:

$$W_{ГТД} = \frac{3.5}{4p+1}. \quad (2)$$

Запишем передаточную функцию замкнутой САР следующим образом:

$$W_{общ} = \frac{0.01p + 0.504}{0.000002p^6 + 0.001p^5 + 0.088p^4 + 1.502p^3 + 4.37p^2 + p + 0.006}. \quad (3)$$

4. Синтез ПИД-регуляторов

Зная передаточную функцию замкнутой САР, можно создать классический ПИД-регулятор [4]. Оптимизация коэффициентов осуществлялась симплекс-методом (линейное программирование) в инструментальной системе: $k_{II} = 3.03$, $k_{II} = 0.022$, $k_D = 1.605$. Применение симплекс-метода подробно описано в [9]. Тогда дискретная передаточная ПИД-регулятора функция равна:

$$W_p(z) = \frac{92.81z^2 - 92.8z + 32.1}{z^2 - z}. \quad (4)$$

Входными сигналами для контроллера, основанного на нечёткой логике, являются ошибка E и её скорость изменения dE . Выходным сигналом ПИД-регулятора является сигнал W_p с настраиваемыми коэффициентами k_{II} , k_{II} , k_D . Применительно к контроллеру входные сигналы и настраиваемые коэффициенты являются лингвистическими переменными.

Для реализации процедур фаззификации и дефаззификации задаются функции принадлежности для каждой входной и выходной переменных [10]. Существует несколько основных типов функций принадлежности (Λ -функции, Π -функции, Z -образные, S -образные) [5]. На основании экспериментов были выбраны треугольные Λ -функции принадлежности, представленные на рис. 3 (E), 4 (dE), 5 (k_{II}), 6 (k_{II}), 7 (k_D).

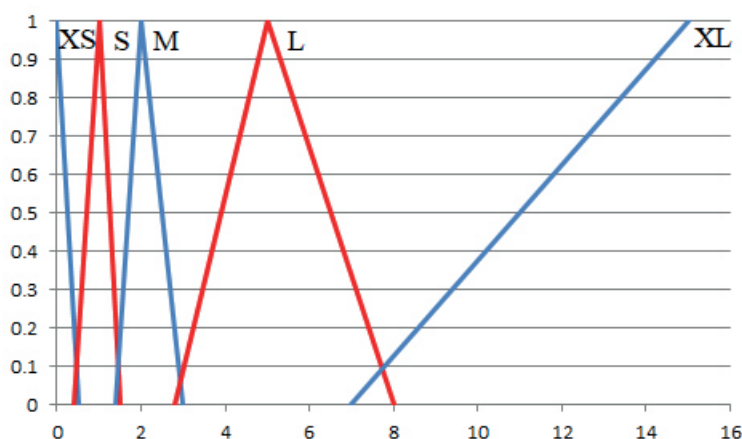


Рис. 3. Функции принадлежности входной лингвистической переменной E .

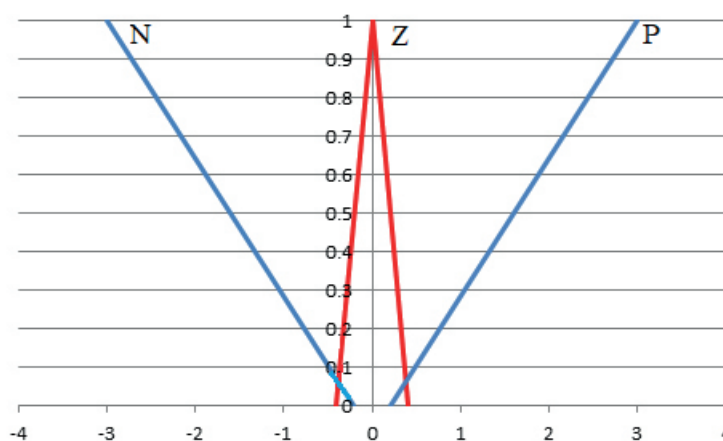


Рис. 4. Функции принадлежности входной лингвистической переменной dE .

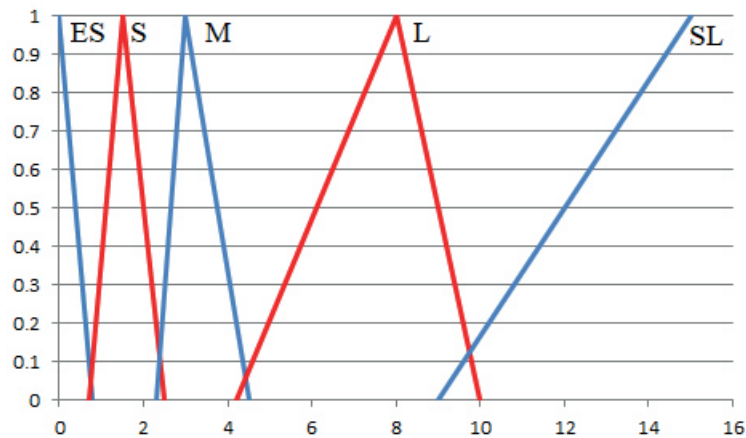


Рис. 5. Функции принадлежности выходной лингвистической переменной k_{II}

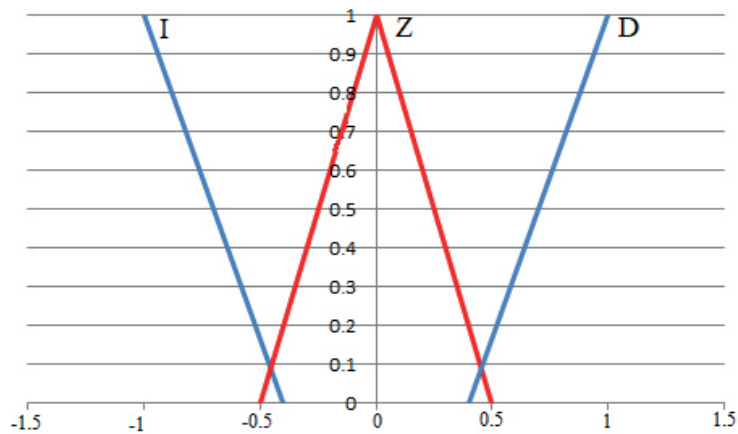


Рис. 6. Функции принадлежности выходной лингвистической переменной k_{II}

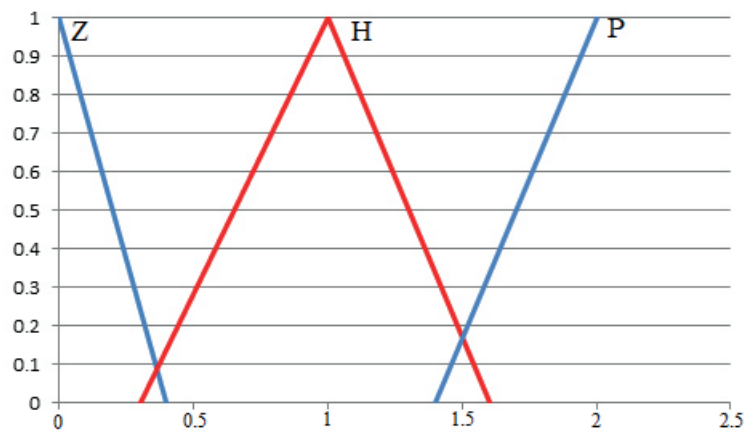


Рис. 7. Функции принадлежности выходной лингвистической переменной k_d

Далее формируется база правил. Под нечеткой базой знаний подразумевается совокупность правил «если – то», определяющих взаимосвязь между входными и выходными лингвистическими переменными контроллера.

База правил нечеткого ПИД-регулятора выглядит следующим образом:

1. Если $E = XS$ и $dE = N$, то $k_{II} = ES$, $k_{II} = I$, $k_d = Z$;
2. Если $E = S$ и $dE = N$, то $k_{II} = S$, $k_{II} = Z$, $k_d = H$;

3. Если $E = M$ и $dE = N$, то $k_{\Pi} = M, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
4. Если $E = L$ и $dE = N$, то $k_{\Pi} = L, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
5. Если $E = XL$ и $dE = N$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = N, k_{\Delta} = Z$;
6. Если $E = XS$ и $dE = Z$, то $k_{\Pi} = ES, k_{\Pi} = I, k_{\Delta} = P$;
7. Если $E = S$ и $dE = Z$, то $k_{\Pi} = S, k_{\Pi} = I, k_{\Delta} = H$;
8. Если $E = M$ и $dE = Z$, то $k_{\Pi} = M, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
9. Если $E = L$ и $dE = Z$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
10. Если $E = XL$ и $dE = Z$ то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
11. Если $E = XS$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = ES, k_{\Pi} = I, k_{\Delta} = P$;
12. Если $E = S$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = S, k_{\Pi} = Z, k_{\Delta} = H$;
13. Если $E = M$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
14. Если $E = L$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
15. Если $E = XL$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$.

Затем выбирается функция активизации. Оптимальной является min-функция активизации $\mu_j(Y) = \min(\beta_j, \mu_j(Y))$. При дефаззификации используется метод центра тяжести.

Проектирование нейро-нечёткого ПИД-регулятора частоты вращения газотурбинного двигателя осуществляется на основе полученных результатов при проектировании нечёткого ПИД-регулятора [10].

Вектор входных переменных нейро-нечеткого регулятора частоты вращения имеет вид:

$$\overline{X}_i = (\overline{x_{1i}}, \overline{x_{2i}})^T,$$

где $\overline{x_{1i}}$ – мгновенное значение ошибки, $\overline{x_{2i}}$ – мгновенное значение скорости изменения ошибки.

Сигналы ошибки и её производной (E и dE) сначала поступают на фаззификатор. Затем нейросеть корректирует базу правил дефаззикации. После этого выходной слой нейронов формирует выходной сигнал (настраивая коэффициенты ПИД-регулятора).

Нейронная сеть, приведенная на рис. 8, состоит из входного, скрытого и выходного слоев (здесь F_1, F_2 – активационные функции гиперболического тангенса адаптивных нейронов скрытого слоя; F_3 – линейная активационная функция нейрона выходного слоя НС; x_{cm}, v_{10}, v_{20} – «нейронные смещения»; v_{1i}, v_{2i} – степени принадлежности соответственно терм-множеств фаззификатора по отклонению частоты вращения и производной отклонения частоты вращения; ϕ, θ – настраиваемые коэффициенты нейронов скрытого слоя соответственно по отклонению частоты вращения и по производной отклонения частоты вращения). Входной (распределительный) слой НС представлен двумя векторами степеней принадлежности термов фаззификатора по отклонению частоты вращения и производной отклонения частоты вращения. Скрытый (промежуточный) слой НС состоит из двух нейронов. Каждый нейрон скрытого слоя дополнен обратной связью. Элемент сравнения в цепи обратной связи сопоставляет фактический сигнал с выхода сумматора нейрона с желаемым сигналом d (это может быть ошибка регулирования в САР или производная ошибки регулирования). Алгоритм адаптации (алгоритм Уидроу – Хоффа) подстраивает коэффициенты входной матрицы так, чтобы свести к нулю ошибку ε . Эта процедура заключается в сведении к минимуму квадрата ошибки с помощью итерационной

процедуры с переменным шагом. Сигнал с выхода сумматора нейрона через нелинейную активационную функцию типа гиперболического тангенса подается на вход нейрона выходного слоя.

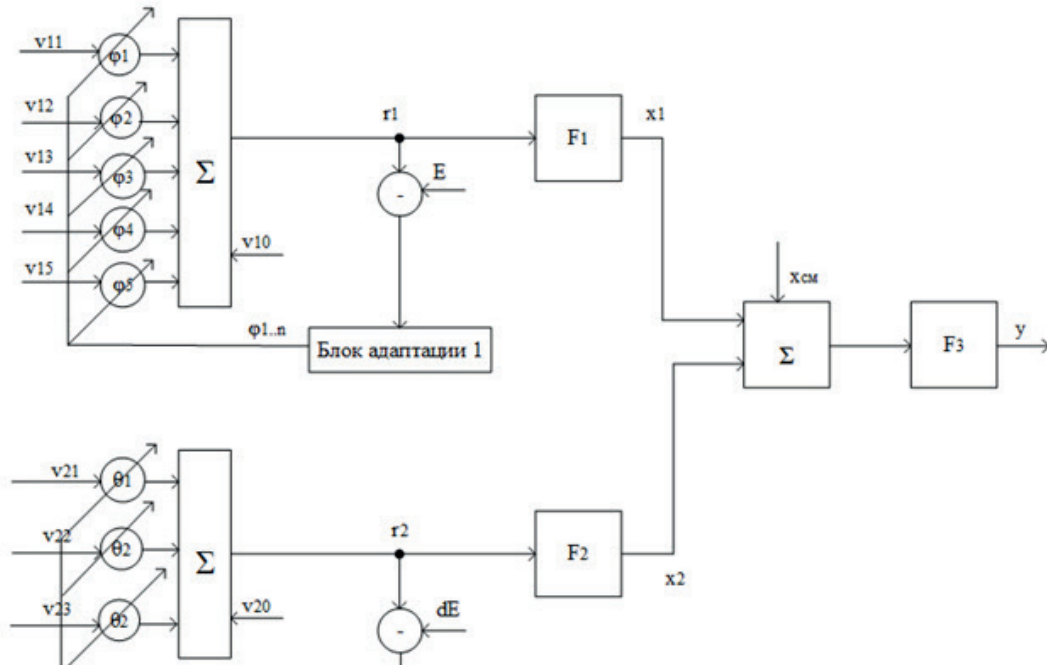


Рис. 8. Функциональная схема нейро-нечеткого ПИД-регулятора.

Выходной слой НС с линейной активационной функцией формирует управляющее воздействие y на регулируемый объект (ГТД), которое ограничено по модулю $|y| \leq y_{\max}$. НС описывается формулой:

$$y = F_3(x_{cm} + F_1(\sum_{i=1}^n v_{1i} \phi_i) + F_2(\sum_{i=1}^m v_{2i} \theta_i)), \quad (5)$$

где n, m – размерность терм-множеств векторов входа НС ($n = 5, m = 3$), v_1, v_2 – степень принадлежности соответственно терм-множеств фазсификатора по отклонению частоты вращения и производной отклонения частоты вращения.

Введем обозначения терм-множеств по отклонению частоты вращения: $v_{11} - \mu(E)_{XS}$; $v_{12} - \mu(E)_S$; $v_{13} - \mu(E)_M$; $v_{14} - \mu(E)_L$; $v_{15} - \mu(E)_{XL}$; по производной отклонения частоты вращения: $v_{21} - \mu\left(\frac{dE}{dt}\right)_N$; $v_{22} - \mu\left(\frac{dE}{dt}\right)_Z$; $v_{23} - \mu\left(\frac{dE}{dt}\right)_P$.

На входе блока адаптации 1 формируется сигнал ошибки $\varepsilon_1(k) = E - \sum_{i=1}^n \phi_i v_{1i_k}$. Вычисление новых значений весовых коэффициентов ϕ_i адаптивного нейрона по отклонению частоты вращения выполняется по рекуррентной формуле:

$$\phi_i(k+1) = \phi_i(k) + 2C_1 \varepsilon_1(k) x_{1i}(k), \quad (6)$$

где $2C_1$ задает скорость настройки коэффициентов ϕ_i нейрона по отклонению частоты вращения, определяемой скоростью сходимости итерационного процесса оптимизации,

$2C_1 = 0.01 - 0.1$, $x_{1i}(k) = \left(\frac{dr_1}{d\phi_i(k)} \right) k$ – производная k -й итерации i -го коэффициента нейрона отклонения частоты вращения [6].

На входе блока адаптации 2 формируется сигнал ошибки $\varepsilon_2(k) = \frac{dE}{dt} - \sum_{i=1}^m \theta_i v_{2i_k}$. Вычисление новых значений весовых коэффициентов θ_i адаптивного нейрона по производной отклонения частоты вращения выполняется по рекуррентной формуле:

$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + 2C_2 \varepsilon_2(k) x_{2i}(k), \quad (7)$$

где $2C_2$ задает скорость настройки коэффициентов θ_i нейрона по отклонению напряжения, определяемой скоростью сходимости итерационного процесса оптимизации, $C_2 = 0.01 - 0.1$, $x_{2i}(k) = \left(\frac{dr_2}{d\theta_i(k)} \right) k$ – производная k -й итерации i -го коэффициента нейрона отклонения напряжения [6].

Тогда выход нейро-нечеткого регулятора частоты вращения, согласно вышеуказанным соотношениям, соответствует формуле:

$$y = F_3(x_{cm} + r_1 th(r_1) + r_2 th(r_2)) = F_3(x_{cm} + x_1 + x_2), \quad (8)$$

где r_1, r_2 – выходы сумматоров нейронов закрытого слоя, x_1, x_2 – выходы нейронов закрытого слоя.

5. Моделирование системы с различными ПИД-регуляторами

Результаты моделирования САР с различными ПИД-регуляторами представлены на рис. 9. Нечеткий регулятор характеризуется синей переходной характеристикой, нейро-нечеткий – желтой, «классический» – красной.

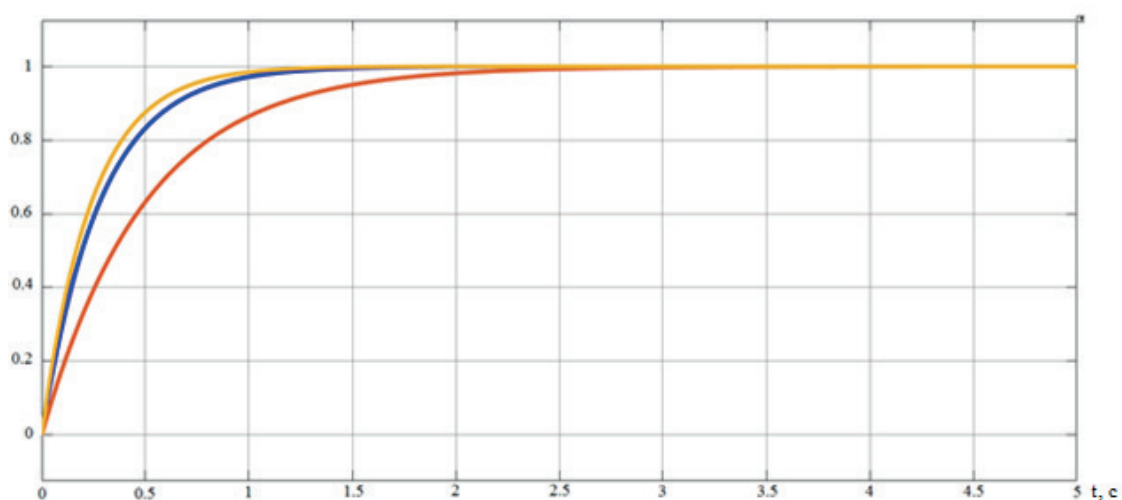


Рис. 9. Переходные процессы системы при работе двигателя в крейсерском режиме работы.

Переходные характеристики САР с нечётким и нейро-нечетким регулятором обладают одинаковым быстродействием (время переходных процессов – 1.5 с), что значительно меньше времени переходного процесса САР с «классическим» регулятором, которое составляет 2.5 с.

В действительности модель газотурбинного двигателя описывается дифференциальным уравнением высокого порядка (до 30-го) [3]. Это вызывает определенные сложности при синтезе регуляторов. При разработке систем управления применяют упрощенные модели, описываемые уравнениями 2–4 порядка. Однако не все регуляторы могут гарантировать нормальную работоспособность системы в условиях реального полета. Поэтому при исследовании и моделировании систем управления рассматриваются различные режимы работы газотурбинного двигателя.

Представленная ранее модель газотурбинного двигателя актуальна при крейсерском режиме (основном). Рассмотрим модели двигателя в двух других режимах: максимальный (набор высоты) и режим малого газа (наземный).

При максимальном режиме работы ГТД передаточная функция имеет вид [3]:

$$W_{ГТД} = \frac{5}{6p+1}. \quad (9)$$

При работе ГТД в режиме малого газа передаточная функция имеет вид [3]:

$$W_{ГТД} = \frac{2.5}{3.5p+1}. \quad (10)$$

Переходные характеристики САР с различными ПИД-регуляторами при максимальном режиме работы двигателя представлены на рис. 10.

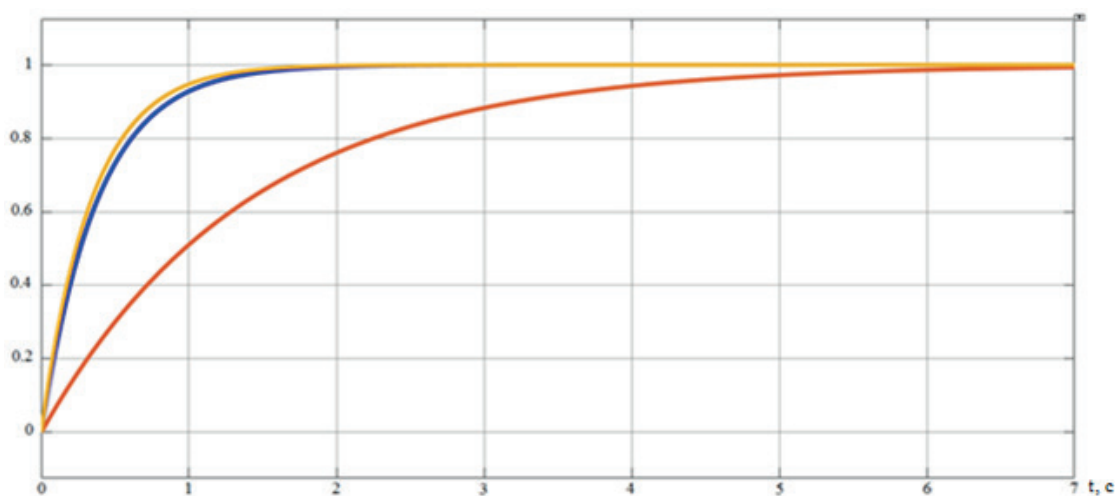


Рис. 10. Переходные процессы системы при работе двигателя в режиме набора высоты.

На рис. 11 представлен результат моделирования системы в режиме работы малого газа.

При максимальном режиме работы нечёткий и нейро-нечёткий ПИД-регуляторы обеспечивают время переходного процесса 2 с. Время переходного процесса системы с классическим регулятором — 6 с, что значительно выше времени переходного процесса САР с нечётким и нейро-нечётким ПИД-регуляторами.

В режиме работы малого газа переходной процесс системы с «классическим» регулятором обладает перерегулированием и колебательностью, что недопустимо. Нечёткий и нейронечёткий ПИД-регуляторы обеспечивают время переходного процесса 1 с.

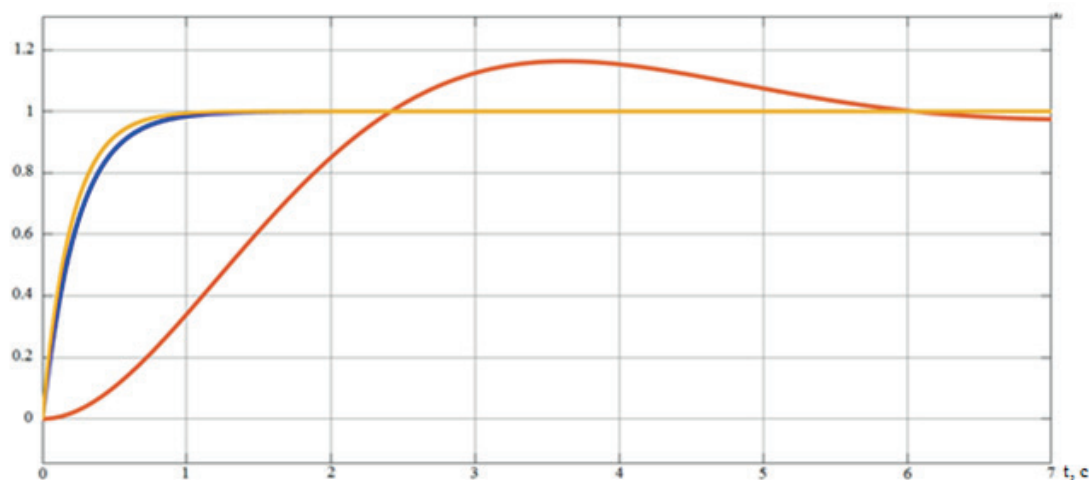


Рис. 11. Переходные процессы системы при работе двигателя в наземном режиме.

Заключение

В статье рассмотрены методы настройки адаптивных ПИД-регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения ГТД. Были проанализированы три вида ПИД-регуляторов («классический», нечёткий и нейро-нечёткий) для системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя.

Моделирование системы при крейсерском (основном) режиме работы ГТД показало, что все три регулятора обеспечивают протекание переходного процесса, удовлетворяющего основным требованиям к системам данного типа. Однако моделирование системы при изменении параметров САР ГТД проиллюстрировало неспособность классического регулятора обеспечивать необходимые показатели качества переходного процесса.

Нечёткий и нейро-нечёткий регуляторы продемонстрировали идентичные показатели качества системы, но переходной процесс системы с нейро-нечётким регулятором демонстрирует немного лучшее быстродействие.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что оптимальным подходом настройки ПИД-регулятора для системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя является нейро-нечеткий метод.

Литература:

1. Воробьёв В.В., Киселев А.М., Поляков В.В. Системы управления в летательных аппаратах. М.: ВВИА; 2008. 203 с.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления, под ред. Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Баумана; 2001. 662 с.
3. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей, как объектов регулирования. М.: Изд-во МАИ; 1999. 97 с. ISBN 5-7035-2215-3
4. Рудинский И.Д. Технология проектирования автоматизированных систем обработки информации и управления. М.: Горячая Линия – Телеком; 2011. 304 с. ISBN 978-5-9912-0148-3
5. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и статистик; 2009. 320 с. ISBN: 5-279-02776-6

6. Будько М.Б., Будько М.Ю., Гирик А.В., Грозов В.А. Система управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом на основе гибридного нейрорегулятора. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019;19(2):209–215.

<https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-209-215>

7. Вилесов А.В., Гуревич Е.И., Ивченко В.Д. Аналитический метод расчета и оптимизации параметров измерительных узлов автоматизированных систем контроля. *Вестник концерна ПВО «Алмаз-Антей»*. 2015;1(13):37–42.

8. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит; 2016. 464 с.

9. Гутова С.Г., Казакевич И.А. Настройка параметров пропорционально интегрального регулятора с помощью метода симплекс планирования. *Управление большими системами: сборник трудов*. 2016;61:95–117.

10. Рутковская Д.А., Пилинский М.В., Рутковский Л.Р. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудницкого. М.: Горячая линия – Телеком; 2008. 383 с. ISBN 5-93517-103-1

References:

1. Vorob'ev V.V., Kiselev A.M., Polyakov V.V. *Sistemy upravleniya v letatel'nykh apparatakh* (Aircraft control systems). Moscow: VVIA Publishing House; 2008. 203 p. (in Russ.).

2. *Metody robustnogo, neuro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya* (Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control); N.D. Egupov (Ed.). Moscow: MGTU im. Bauman Publishing House; 2001. 662 p. (in Russ.).

3. Gol'berg F.D., Batenin A.V. *Matematicheskie modeli gazoturbinnnykh dvigatelei, kak ob'ektov regulirovaniya* (Mathematical models of the gas turbine engines as control objects). Moscow: MAI Publishing House; 1999. 97 p. (in Russ.). ISBN 5-7035-2215-3

4. Rudinskii I.D. *Tekhnologiya proektirovaniya avtomatizirovannykh sistem obrabotki informatsii i upravleniya* (Design technology of automated information processing and control systems). Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom; 2011. 304 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0148-3

5. Yarushkina N.G. *Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system* (Fundamentals of the theory of the fuzzy and hybrid systems). Moscow: Finansy i statistika; 2009. 320 p. (in Russ.). ISBN: 5-279-02776-6

6. Bud'ko M.B., Bud'ko M.Yu., Girik A.V., Grozov V.A. Multi-Rotor unmanned aerial control system based on Hybrid neuro-regulator. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2019;19(2):209–215 (in Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-209-215>

7. Vilesov A.V., Gurevich V.I., Ivchenko V.D. Analytical method of calculation and optimization of parameters measuring units automated control systems. *Vestnik kontserna PVO «Almaz-Antei» = J. «Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation*. 2015;1(13):37–42 (in Russ.).

8. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Mnogomernnye, nelineinye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* (Automatic control theory. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems). Moscow: Fizmatlit; 2016. 464 p. (in Russ.).

9. Gutova S.G., Kazakevich I.A. Tuning parameters proportional integral controller using the method of simplex planning. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov = Large-Scale Systems Control*. 2016;61:95–117 (in Russ.).

10. Rutkovskaya D.A., Pilinskii M.V., Rutkovskii L.R. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy, per. s pol'sk. I.D. Rudnitskogo* (Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems: trans. from Polish. by I.D. Rudnitsky). Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom; 2008. 383 p. (in Russ.). ISBN 5-93517-103-1

[Rutkowska, Danuta Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. Warszawa; Łódź: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2004]

Об авторах:

Чертилин Кирилл Эдуардович, аспирант кафедры автоматических систем Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0003-1211-4905>

Ивченко Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 56664128900.

Настройка адаптивных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя

About the authors:

Kirill E. Chertilin, Postgraduate Student, Department of Automatic systems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-1211-4905>

Valeriy D. Ivchenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Automatic systems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia). Scopus Author ID: 56664128900.

Поступила: 17.02.2020; получена после доработки: 23.07.2020; принята к опубликованию: 07.09.2020.