

УДК 681.51.001.57

**И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТА СТРУКТУРЫ НЕЧЕТКОГО  
ПИД-РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ**

Данная статья посвящена разработке и исследованию нечеткого ПИД-регулятора для двухвальной газотурбинной установки, использующейся в качестве привода электрогенератора. Рассматривается возможность совместного использования ПИД-управления и нечеткой логики, при этом сохраняется простота синтеза регулятора. Проведен краткий обзор часто используемых структур нечетких ПИД-регуляторов. Предложенный нечеткий ПИД-регулятор способен осуществлять управление в заранее определенном диапазоне нагрузки газотурбинной установки, сохраняя качество управления. При экспериментальной проверке использовалась нелинейная модель двухвальной газотурбинной установки, построенная по данным, полученным в результате эксплуатации реальной ГТУ. Приведены результаты моделирования, подтверждающие целесообразность использования выбранной структуры.

**Ключевые слова:** ПИД-регулятор, нечеткая логика, газотурбинная установка.

**I.V. Bahirev, B.V. Kavalero**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**STRUCTURE VARIANT INVESTIGATION OF FUZZY  
PID ROTATION SPEED CONTROLLER  
FOR ELECTRICITY GTU**

This article focuses on the development and research of fuzzy PID controller for two-shaft gas turbine plant is used as an electric drive. The possibility of sharing the PID control and fuzzy logic, while retaining the ease of synthesis of the controller. A brief overview of commonly used structures of fuzzy PID controllers. The proposed fuzzy PID controller is able to be controlled at a predetermined load range of the gas turbine plant, preserving the quality of management. In the experimental verification used a nonlinear model of two-shaft gas turbine plant, based on data obtained from the operation of a real gas turbine. Simulation results confirming the usefulness of the selected structure.

**Keywords:** PID, fuzzy logic, a gas turbine unit.

**Введение.** Среди методов современной теории управления, несмотря на разнообразие подходов к синтезу регуляторов, наиболее широко применяется ПИД-управление. Согласно различным источникам доля ПИД-регуляторов составляет от 90 до 99 %. Это объясняется хорошей проработанностью теории, простотой разработки и знанием операторов на местах взаимосвязей параметров регулятора. Однако в случаях, когда объект управления является сложным нелинейным или плохо поддается формальному описанию, ПИД-закон управления не всегда позволяет достигнуть желаемых показателей качества. В связи с этим количество публикаций, посвященных применению нечеткой логики и нейронных сетей в задачах управления, неуклонно возрастает. В значительной части этих работ рассматривается совместное их использование с ПИД-управлением. Это во многих случаях позволяет решить проблему со сложноформализуемыми и нелинейными объектами управления. Часто комбинацию нейронных сетей, нечеткой логики и ПИД-управления используют для построения адаптивных регуляторов. В значительной мере вышеизложенное справедливо и для газотурбинных установок наземных версий применения [1].

**Нечеткий ПИД-регулятор газотурбинной установки (ГТУ).** Глобальной целью исследования, в рамках которого написана данная статья, является разработка класса адаптивных регуляторов для газотурбинных установок наземных версий применения [2]. В качестве первого этапа было решено разработать регулятор, способный работать в заданном диапазоне нагрузки газотурбинного двигателя и обладающий небольшим количеством настраиваемых параметров. Ранее рассматривалась возможность использования гибридного нейро-ПИД-управления [3], но в силу большого количества настраиваемых параметров нейронной сети было решено использовать аппарат нечеткой логики. Предполагается, что изменениям будут подвергаться только функции принадлежности, а база правил будет оставаться неизменной.

Объектом управления в данном исследовании является двухвальная ГТУ, работающая в режиме электростанции. Заданная частота вращения ГТУ не зависит от величины нагрузки. Нечеткий ПИД-регулятор сравнивается с ПИД-регулятором, настройки которого получены с помощью работы [4].

*Выбор структуры нечеткого ПИД-регулятора.* В [5] приведены возможные варианты структуры нечеткого ПИД-регулятора.

Одной из самых распространенных структур нечеткого ПИД-регулятора является иерархическая, при которой нечеткий регулятор осуществляет настройку параметров ПИД-регулятора, что во многом соответствует табличной настройке. Часто регулятор с такой структурой называют адаптивным, но у научного сообщества нет единого мнения по этому поводу.

Еще одной популярной идеологией для нечетких ПИД-регуляторов является управление с переключениями. В таком случае в структуре присутствует интеллектуальный блок, осуществляющий выбор между различными ПИД-регуляторами. Подобный подход предложен в статье [6].

Поскольку на первом этапе разработки исследуется регулятор максимально простой для синтеза, была выбрана структура ПИД-регулятора, представленная на рис. 1.

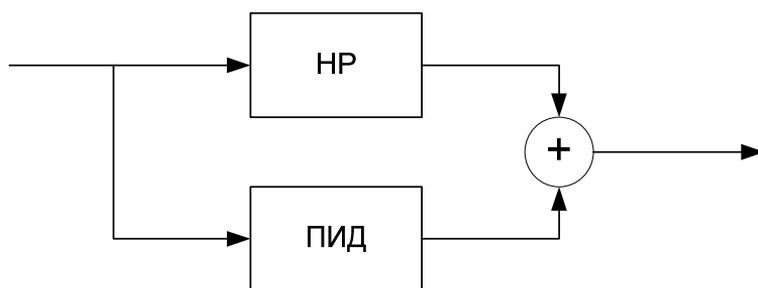


Рис. 1. Структура нечеткого ПИД-регулятора

Данную структуру следует считать простой, так как нечеткая часть регулятора и ПИД-часть не связаны явно.

*Настройка нечеткого ПИД-регулятора.* Выбранная структура нечеткого ПИД-регулятора позволяет настраивать его части по отдельности. Для ПИД-части регулятора была выбрана компромиссная настройка для заданного диапазона изменения нагрузки газотурбинной установки [7]. Нечеткая часть настроена на работу при нагрузке ГТУ, являющейся серединой выбранного интервала. На вход нечеткого регулятора поступают ошибка и первая производная ошибки по времени. Для этих лингвистических переменных определены следующие входные термы: отрицательная, нулевая и положительная. Управляющее воздействие является единственной выходной переменной, для неё определены следующие термы: большая отрицательная, малая отрица-

тельная, нулевая, малая положительная, большая положительная. Алгоритм нечеткого вывода – Мадмани. Таким образом, нечеткий регулятор обладает простой структурой, широко применяющейся с некоторыми модификациями для решения самых разных технических задач.

*Общая структура системы.* Общая структура модели с регулятором представлена на рис. 2.

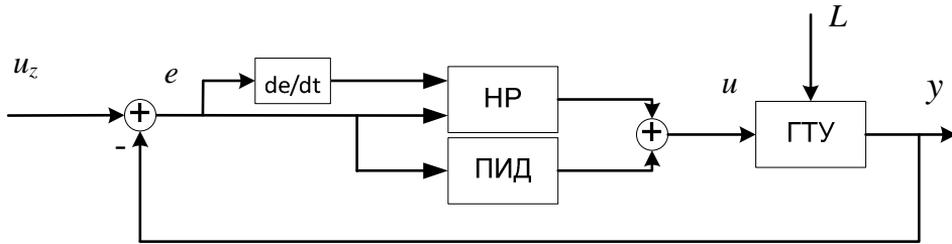


Рис. 2. Общая структура системы

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $u_z$  – заданное значение частоты вращения турбины,  $e$  – ошибка,  $u$  – управляющее воздействие,  $L$  – нагрузка и  $y$  – частота вращения турбины.

*Результаты моделирования.* При моделировании работы ГТУ в момент времени, равный единице, осуществляется наброс нагрузки различной величины, на рис. 3–8 представлены переходные процессы (нагрузка измеряется в кВт, частота вращения – в об/мин).

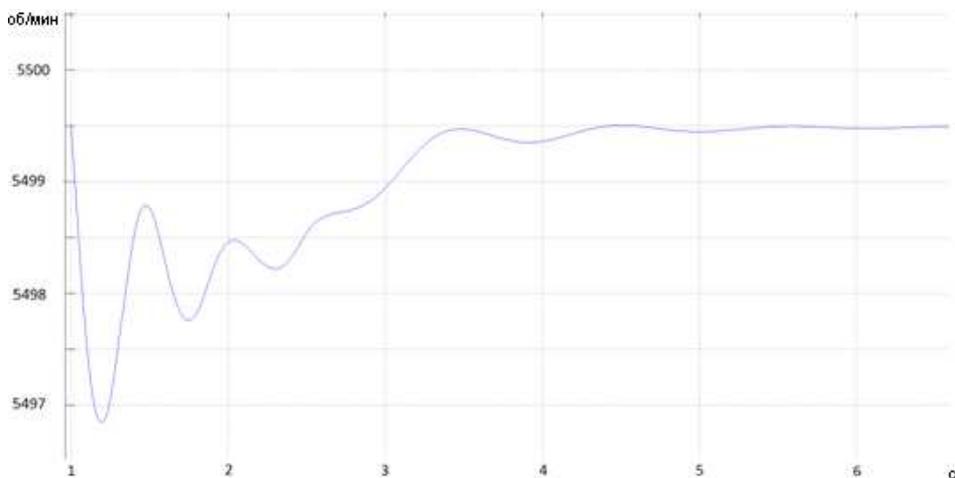


Рис. 3. Переходный процесс с нечетким ПИД-регулятором, нагрузка 1100 кВт

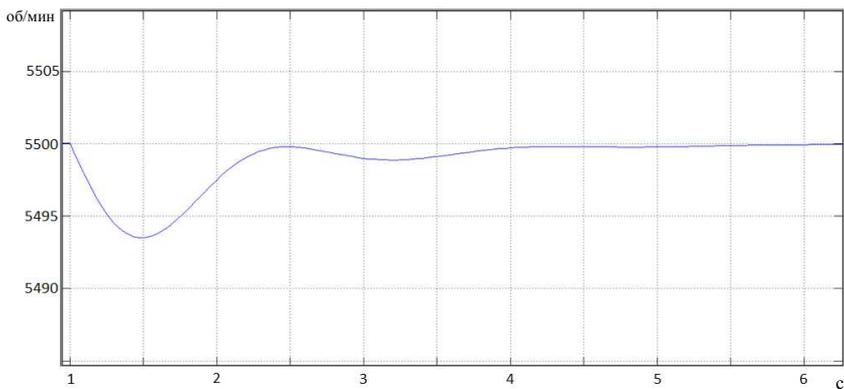


Рис. 4. Переходный процесс с ПИД-регулятором, нагрузка 1100 кВт

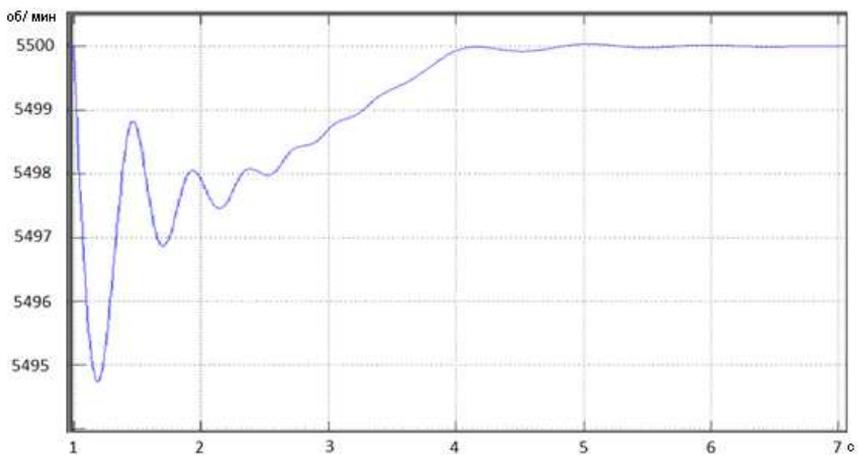


Рис. 5. Переходный процесс с нечетким ПИД-регулятором, нагрузка 1200 кВт

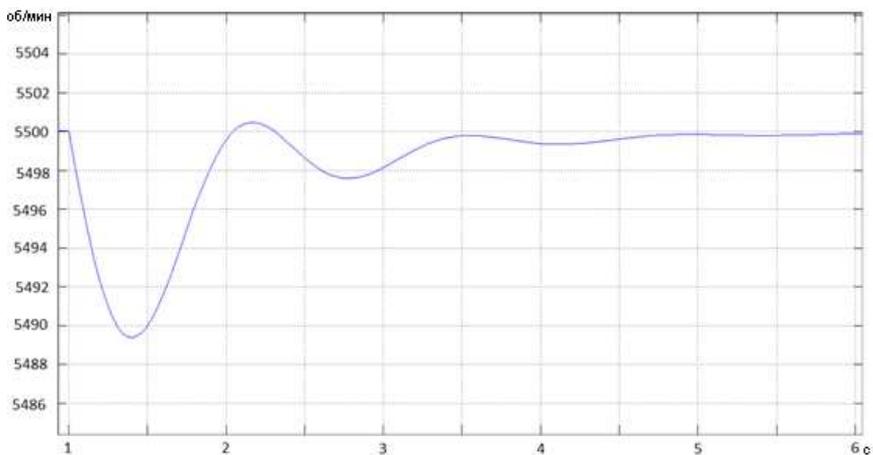


Рис. 6. Переходный процесс с ПИД-регулятором, нагрузка 1200 кВт

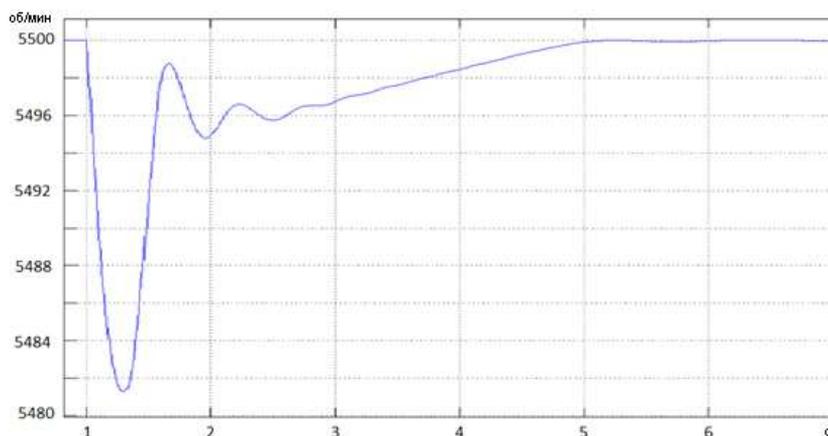


Рис. 7. Переходный процесс с нечетким ПИД-регулятором, нагрузка 1500 кВт

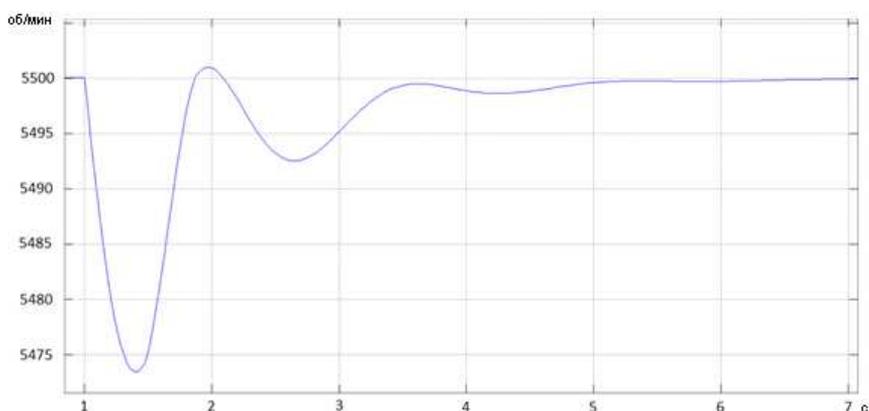


Рис. 8. Переходный процесс с ПИД-регулятором, нагрузка 1500

Настройки нечеткого ПИД-регулятора неизменны в каждом эксперименте, а для ПИД-регулятора настройка производилась для каждой конкретной нагрузки. Как можно видеть из рис. 3–8, провал при набросе нагрузки заметно уменьшился, но повысилась колебательность системы.

**Заключение.** В результате проведенных исследований получен нечеткий ПИД-регулятор, обладающий простой структурой и относительно небольшим количеством настраиваемых параметров. К его преимуществам по сравнению с обычным ПИД-регулятором можно отнести улучшение такого показателя качества, как перерегулирование, стабильную работу в заданном диапазоне нагрузки газотурбинной установки. Также стоит отметить достаточно простой процесс настройки

и тот факт, что время переходного процесса равно времени переходного процесса с ПИД-регулятором. Дальнейшая работа будет посвящена снижению колебательности переходного процесса.

### **Библиографический список**

1. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейро-нечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. – 2010. – № 5. – С. 17–21.
2. Кавалеров Б.В., Бахирев И.В. Современные тенденции развития адаптивного управления и перспективы его применения для наземных газотурбинных установок // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы VII Всерос. (с междунар. участием) науч.-техн. интернет-конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 132–139.
3. Бахирев И.В., Кавалеров Б.В., Один К.А. Применение нейросетевой технологии при испытании и настройке систем управления ГТУ с использованием программного комплекса «ЭлектроДин» // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 7. – С. 96–105.
4. Кавалеров Б.В., Один К.А., Даденков Д.А. Автоматическая настройка систем автоматического управления газотурбинными установками с использованием алгоритмов библиотеки Apache Commons Math [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – URL: [www.science-education.ru/115-12039](http://www.science-education.ru/115-12039) (дата обращения: 12.03.2014).
5. Reznik L., Ghanayem O., Bourmistrov A. PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial applications // Source of the Document Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2000. – № 4(13). – P. 419–430.
6. Chen C.-L., Chang F.-Y. Design and analysis of neural/fuzzy variable structural PID control systems // IEE Proceedings, Control Theory and Applications. – 1996. – № 2 (143). – P. 200–208.
7. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Ключев [и др.]; под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.

## References

1. Khizhniakov Iu.N., Iuzhakov A.A. Neuro-nechetkii regulator chastoty gazoturbinnogo dvigatel'ia [Neural fuzzy frequency controller gas turbine engine]. *Pribory*, 2010, no. 5, pp. 17-21.

2. Kavalerov B.V., Bakhirev I.V. Sovremennye tendentsii razvitiia adaptivnogo upravleniia i perspektivy ego primeneniia dlia nazemnykh gazoturbinykh ustanovok [Modern trends in the development of adaptive control and prospects of its application for land based gas turbines]. *Materialy VII Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii "Energetika. Innovatsionnye napravleniia v energetike CALS-tehnologii v energetike"*, 2014, pp. 132-139.

3. Bakhirev I.V., Kavalerov B.V., Odin K.A. Primenenie neurosetevoi tekhnologii pri ispytanii i nastroiike sistem upravleniia GTU s ispol'zovaniem programmnoho kompleksa «ElektroDin» [The use of neural network technology in testing and tuning of turbine control systems using the program «ElektroDin» complex] *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2013, no. 7, pp.96-105.

4. Kavalerov B.V., Odin K.A., Dadenkov D.A. Avtomaticheskaia nastroiika sistem avtomaticheskogo upravleniia gazoturbinnymi ustanovkami s ispol'zovaniem algoritmov biblioteki Apache Commons Math [Automatic adjustment of gas turbines automatic control systems with the use of algorithms Apache Commons Math library] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2014, no. 1, available at: [www.science-education.ru/115-12039](http://www.science-education.ru/115-12039) (accessed 12 March 2014).

5. Reznik L., Ghanayem O., Bourmistrov A. PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial applications. *Source of the Document Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2000, no. 4(13), pp. 419-430.

6. Chen C.-L., Chang F.-Y. Design and analysis of neural/fuzzy variable structural PID control systems. *IEE Proceedings, Control Theory and Applications*, 1996, no. 2 (143), pp. 200-208.

7. Rotach V.Ia, Kuzishchin V.F., Kliuev A.S. [et al.]. Avtomatizatsiia nastroiiki sistem upravleniia [Automation configuration management systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 272 p.

### **Сведения об авторах**

**Бахирев Иван Владимирович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: bahirevy@mail.ru).

**Кавалеров Борис Владимирович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

### **About the authors**

**Bahirev Ivan Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is a Postgraduate Student at the Department of Automation Microprocessors Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: bahirevy@mail.ru).

**Kavalerov Boris Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, the Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Получено 26.03.2014