

<https://doi.org/10.5281/zenodo.12541656>

**И.Х.Сиддиков**

**Г.Р.Алимова**

**М.М.Усанов**

<sup>1</sup>Ташкентский Государственный Технический Университет

Адресс: ул. Университетская-2, 100095, г.Ташкент, Республика Узбекистан

<sup>2</sup>Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

Адресс: ул. Шохжахон-5, 100100, г.Ташкент, Республика Узбекистан

**Аннотация:** В статье рассматриваются вопросы построения адаптивной системы управления динамическом объектом на основе фаззи регулятора, реализованный в виде нечеткой системы типа Сугено. Для технической реализации фаззи регулятора предложен использования вычислительный модуль FPGA (программируемая логическая интегральная схема), отличающаяся возможностью интеграции системы управления с операцией сбора данных в один чип и высокой вычислительной мощности. Вычислительный модуль FPGA в системах управления позволяет оперировать со значительно большим числом входных и выходных потоков, данных в реальном времени, а также при необходимости универсальности применяемых вычислительных алгоритмов в одном чипе. Предложена методика выбора разрядности дробной части чисел, позволяющей обеспечить необходимой точности вычисления управляющих сигналов. Адаптация параметров фаззи регулятора осуществляется на основе «дельта-правило», что позволяет существенно упростить вычисления коррекции параметров фаззи регулятора и облегчить реализации алгоритма адаптации на различных типах микроконтроллера. Для упрощения вычисления параметров функции принадлежности предложен использование операции *min* вместо операции умножения, что существенно увеличит время расчета переходного процесса. В качестве динамического объекта рассмотрим двигатель постоянного тока. Приведен сравнительный анализ предложенной системы адаптивного микроконтроллерного управления ПИ регулятором, настроенным на оптимальное по быстродействию.

**Ключевые слова:** Адаптация, фаззи регулятор, алгоритм управления, микроконтроллер, коррекция, вычислительный модуль.

**ВВЕДЕНИЕ**

Современные исследования и разработки в области автоматизации производств направлены на получения высококачественного управления за счёт использования современных методов интеллектуальных технологий. Таких как:

- методы создания экспертных систем;
- методы нечёткого управления;
- методы нейросетевого управления;

Одним из путей повышения производительности производства является применения современных энергосберегающих технологий для управления технологическими объектами. Решения этой задачи непосредственно связана с управлением электроприводов, являющийся основным исполнительным элементом системы. В настоящее время для управления различными технологическими оборудованьями широко используются двигатели постоянного тока с традиционными линейными ПИД-регуляторами. Наиболее существенным недостатком вышеуказанных регуляторов, реализованные на базе микроконтроллером является их невысокое быстродействие. Например, если ход технологического процесса контролируется с помощью 10-битных датчиков и при этом количество слов, поступающие от двух датчиков, в количестве  $1024 \times 1024 = 1048576$  слов, то для выбора управляющего воздействия необходимо выполнить 20 млн. операций в единицу времени.

Следует заметить, что с увеличением количества контролируемых параметров быстродействие системы также снижается. Эти проблемы поставить задачу выбора микроконтроллера с высокоэффективным вычислительным модулем. В современных системах управления электроприводами используются регуляторы, построенные на базе микроконтроллере с использованием вычислительного модуля FPGA (Field Programmable Gate Array). На обусловлена несколькими технико-экономическими факторами таких как:

- возможность интеграция системы управления (вычисления) сбора данных в один чип (one chip – one solution);
- высокая вычислительная мощность;
- Относительная низкая стоимость устройства.

Также необходимо отметить, что в настоящее время способы и средства моделирования Verilog HDL/VHDL позволяют использовать совместно симуляционный пакет MATLAB и, например, Xilinx System Generator для симуляции и верифицирования разработанных алгоритмов.

**Метод решения.** Разработка микроконтроллерное управления динамическими объектами осуществлялась по следующей схеме:

- Конвертирование вычислений системы управления из double в fixed point и анализ необходимой точности для заданного качества регулирования;
- Синтез алгоритма управления на Verilog HDL/VHDL;

- Математическое моделирование системы управления и анализ результатов;
- Компиляция проекта для FPGA, проверка и анализ качества работы разработанной системы управления.

Для решения задачи синтеза микроконтроллерное управления динамическим объектом предложен использование метода прямого адаптивного управления. При этом регулятор реализован в виде нечеткой системы типа Сугено [1], описываемая формулой:

$$y(x) = \frac{\sum_{k=1}^M \left( \prod_{j=1}^N \mu_{\Lambda_i}(x_j) \right) \cdot Z_k}{\sum_{k=1}^M \left( \prod_{j=1}^N \mu_{\Lambda_i}(x_j) \right)} \quad (1)$$

где  $M$  - количество правил фаззи системы,  $N$  - количество входов фаззи системы,  $Z_k$  коэффициенты выходного слоя фаззи системы. Функции принадлежности имеют форму треугольника которая описывается зависимостью

$$\mu_{\Lambda_i}(x_j) = \max \left( \min \left( \frac{x_j - a_j^{(i)}}{b_j^{(i)} - a_j^{(i)}}, \frac{c_j^{(i)} - x_j}{c_j^{(i)} - b_j^{(i)}} \right), 0 \right). \quad (2)$$

Для упрощения вычислений функций принадлежности, деление на  $b_j^{(i)} - a_j^{(i)}$  и  $c_j^{(i)} - b_j^{(i)}$  заменяется умножением на обратные им величины. Вычисление функций принадлежности можно еще более упростить выбрав коэффициенты  $a, b, c$  в виде  $a = 2^m$ ,  $m$  - количество битов. Тогда умножение заменяется битовым сдвигом. Такое упрощение, введено с том, что количество блоков умножения в FPGA чипах ограничено [4]. В форме (1) произведение также надо заменить операцией  $\min$  что также позволяет избавиться от операции умножения, которая существенно увеличивает скорость вычисления нормирование сигналов правил фаззи системы (знаменатель формулы (1)) так же можно отбросить, без существенных потерь качества управления.

В итоге фаззи система описывается следующей зависимостью:

$$y(x) = \sum_{k=1}^M \left( \min_{1 \leq j \leq N} (\mu_{\Lambda_i}(x_j)) \right) \cdot Z_k. \quad (3)$$

Для изменения параметров фаззи регулятора используется ошибка отклонения между реальной скоростью двигателя и желаемой скоростью, которая определяется с помощью модели желаемой динамики. Минимизируемый функционал качества определяется формулой:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (w - w')^2 \quad (4)$$

Формула адаптации параметров фаззи регулятора представляет собой так называемое «дельта-правило», что аналогично методу «наискорейшего спуска». Для нахождения значения поправки коэффициентов требуется продифференцировать выражение (3) по параметрам фаззи регулятора. В итоге получим:

$$Z_{i+1} = Z_i - \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial Z_i} = Z_i - \eta (w - w') \left( \min_{1 \leq j \leq N} (\mu_{A_i}(x_j)) \right) \quad (5)$$

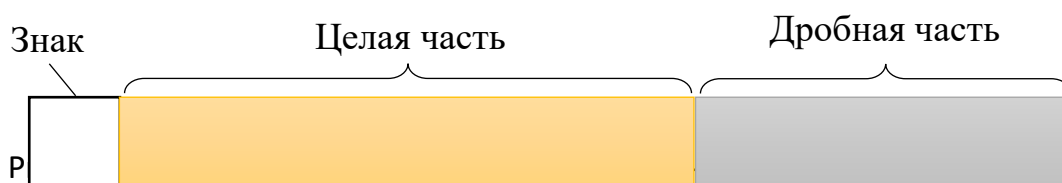
Коэффициент  $\eta > 0$  играет роль весового коэффициента.

Как видно в представленном законе управления отсутствуют коррекции параметров функций принадлежности  $a, b, c$ . По результатам предварительных экспериментов было сделано заключение, что при данном законе адаптации влияние параметров функций принадлежности относительно мало в сравнении с влиянием параметров выходного слоя  $Z$  и их можно оставить константами. Это допущение позволяет очень сильно упростить вычисление коррекций параметров, и облегчить алгоритм адаптации [6].

Использование в FPGA fixed point вычислений в данном случае является целесообразным, т.к. во-первых floating point требует больше вычислительных ресурсов; во-вторых, вся точность вычислений будет нивелирована качеством и точностью измеряемых сигналов. В связи с этим был проведен анализ синтезируемой системы регулирования с fixed point арифметикой.

Наиболее распространенным способом перехода от вычислений с плавающей точкой к целочисленным вычислениям заключается в обычном масштабировании всех сигналов на некоторый коэффициент  $k \gg 0$ , который обычно выбирается равным самому большому сигналу в системе, округленному до ближайшего целого. Существенным недостатком этого метода является необходимость масштабировать все коэффициенты и параметры системы.

Другой способ заключается в том, что необходимо задаться определенной точностью (разрядностью) целой и дробной части числа. Формат числа выбирается в виде, например, 32 бита (разряда). Количество целочисленных разрядов выбирается из условий максимального рабочего диапазона числа, а количество дробных разрядов выбирается из требований к точности вычислений.



#### Виртуальная точка

В общем виде число с плавающей точкой представляется в виде:

$$\text{fixed point} = (-1)^z 2^n + 2^{-m}$$

где,  $z, n, m$  - целые числа.

Число в 32 бита хранится как целочисленное, а точка используется только при переходе из целочисленного формата в формат с плавающей точкой, отделяя заданное количество разрядов от целочисленного результата арифметических операций [8]. При умножении количество дробных разрядов удваивается, но младшие разряды отбрасываются с потерей точности. Еще один бит используется для запоминания знака числа. Как правило увеличение разрядности чисел приводит к росту требований к вычислительной мощности чипа и объему его коммуникаций.

**Пример решения.** Для обоснование предложенного подхода рассмотрим микроконтроллерное управления скоростью ДПТ (двигатель постоянного тока), построенный на базе фаззи регулятора (Рис. 3). Двигатель имеет следующие параметры:

Номинальное напряжение:  $U_N = 20 \text{ В}$ , номинальная скорость:  $w_n = 8360 \text{ 1/мин}$  ( $875 \text{ рад/с}$ ), максимальный момент:  $M_n = 26.7 \text{ мН} \cdot \text{м}$ .  
 Параметры модели представлены в таблице 1.

Табл. 1

Параметры ДПТ				
$L$ , Гн	$R$ , Ом	$C_m$ , Н*м/А	$C_v$ , м*сек/рад	$J$ , кг*м <sup>2</sup>
0.24/100	2.32	23.4/100	$407/(2*\pi/60)$ /1000	$10.3/(1000$ *104)

Схема управления и структурная схема двигателя представлены на Рис. 3.

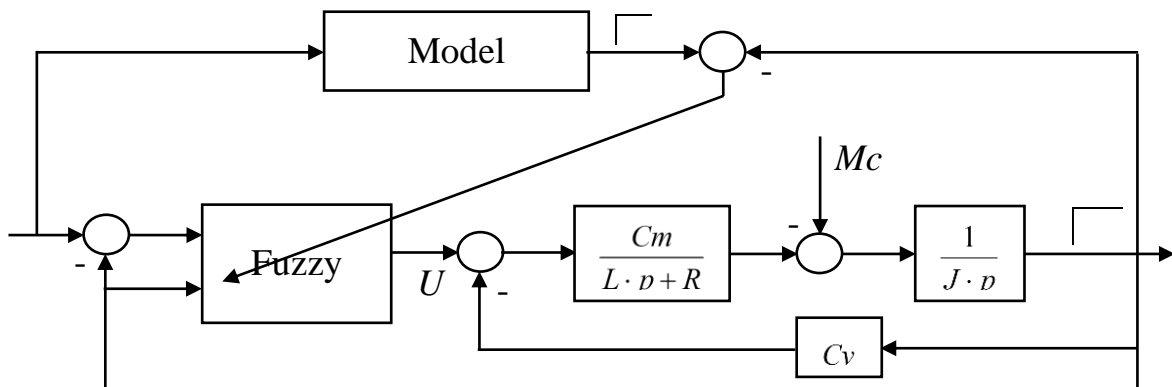


Рис. 3. Структурная схема системы прямого адаптивного управления ДПТ.

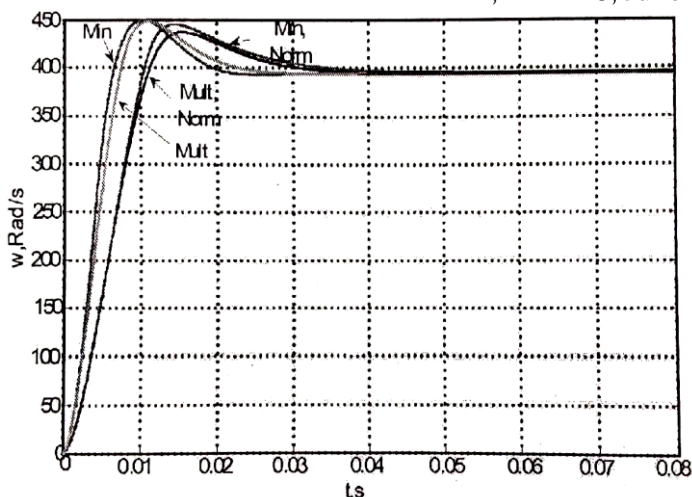


Рис. 4. Переходные процессы регулирования скорости при различных операциях фаззи правил.

На Рис. 4 представлены результаты упрощения структуры фаззи системы при использовании слоя нормализации и без, а также использование в качестве «И» правила – умножение на операции  $\min$ . Из представленных переходных процессов можно сделать вывод, что отказ от нормализации заметно ускоряет переходный процесс и увеличивает перерегулирование. Использование операции  $\min$  вместо умножения несущественно влияет на ошибку управления. Судя по результатам тестирования, представленным на Рис. 4 внесенные в нейро-фаззи упрощения не оказывают сильного негативного влияния на переходный процесс регулируемой системы [12].

Ниже на Рис. 5 представлены графики переходных процессов при управлении ДПТ с нейрофаззи регулятором и ПИ регулятором, настроенным на оптимальное быстродействие. Слева представлены графики соответствующие нейрофаззи регулятору. Справа представлены графики переходного процесса при ПИ управлении. Внизу показаны графики соответствующие абсолютному отклонению текущей координаты в *fixed point* от „идеального“ процесса в числах с *floating point*. В момент времени 25 мсек момент инерции двигателя увеличивается скачком в 5 раз. В момент времени 50 мсек прикладывается момент нагрузки, равный номинальному – 0.0283 Нм.

На Рис. 5 введены следующие обозначения: 1 переходный процесс при *fixed point* всего 32 разряда, и из них 8 разрядов на дробную часть при изменении момента инерции двигателя; 3 переходный процесс при *fixed point* всего 32 разряда, и из них 4 разряда на дробную часть, без изменения момента инерции двигателя; 4 переходный процесс при *fixed point* всего 32 разряда, и из них 4 разряда на дробную часть, при изменении момента инерции двигателя;

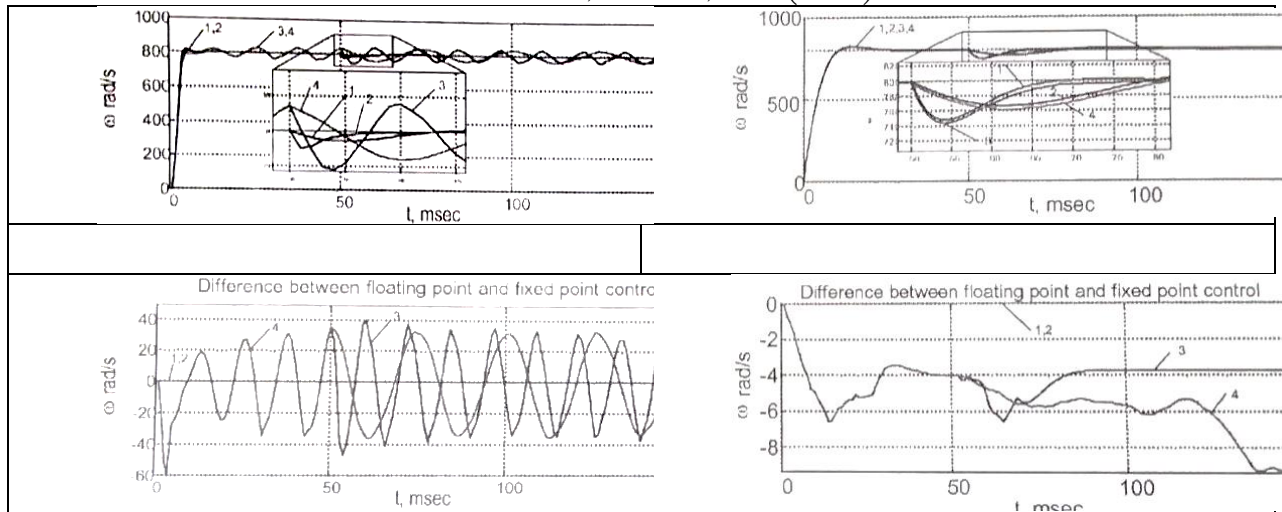


Рис. 5. Переходной процесс регулирования скорости ДПТ при различной точности представления чисел.

Как видно из Рис. 5 для приемлемой точности управления достаточно использовать 32 разрядные числа, в которых дробная часть должна иметь не менее 5 разрядов. С увеличением разрядности дробной части точность резко возрастает. Если дробная часть имеет разрядность более 8, процесс практически не отличается от расчетов в floating point. Колебательный процесс изменения отклонения скорости при нейро-фаззи управлении объясняется влиянием закона адаптации регулятора. Кроме того, нейрофаззи регулятор всегда стремится уменьшить ошибку [14], и в статическом режиме отклонение от заданного значения стремится к нулю, в то время как при fixed point вычислениях ПИ регулятор обладает статической ошибкой при регулировании скорости. В обоих регуляторах достигается приемлемое качество регулирования при изменении момента инерции двигателя. При использовании всего 4 разрядов для дробной части чисел нейрофаззи регулятор работает с колебаниями, что вызвано погрешностями при выполнении арифметических операций. ПИ регулятор работает все еще без колебаний поскольку требует значительно меньше расчетов.

**Заключения.** В статье приведены возможности построения адаптивной системы управления на базе фаззи регулятора, реализуемой в вычислительном модуле FPGA, имеющий возможность интеграции системы управления с операций сбора, хранения и обработки информации в один чип. Адаптация параметров фаззи регулятора осуществляется на основе «дельта-правило», что позволяет существенно упростить вычисления коррекции параметров фаззи регулятора и облегчить реализации алгоритма адаптации на различных типах микроконтроллера. Для упрощения вычисления параметров функции принадлежности предложен использование операции min вместо операции умножения, что существенно увеличить время расчета переходного процесса. Предложена методика разработки микроконтроллерного управления динамическим объектом с фаззи регулятором. Приведен сравнительный анализ предложенной системы адаптивного микроконтроллерного управления ПИ регулятором, настроенным на оптимальное по

быстродействию. Применение FPGA позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления в автоматизированной среде, позволяющей проводить предварительное моделирование и в итоге получать эффективные, надежные и относительно дешевые средства управления сложными динамическими объектами.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Марахимов А.Р., Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Сиддиков И.Х. Нечетко-множественные модели и интеллектуальное управление технологическими процессами. – Ташкент: ТГТУ, 2014. – 243 с.

2. Ahmad Nor Kasruddin Nasir, Mohd Ashraf Ahmad, and M.Osman Tokhi. Hybrid spiral-bacterial foraging algorithm for a fuzzy control design of a flexible manipulator. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. Vol. 41, Issue 1. 2022. pp. 340-358. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/14613484211035646>

3. Kulakov G.G., Kravchenko V.V., Makoska Yu.V. Calculation technique for economic efficiency of implementation of innovative TPP automatic control systems (Part One). *Science & Technique*. 2012; (5):92-97. (In Russ.)

4. И.Х.Сиддиков, Д.А.Халматов, Г.Р.Алимова. Адаптивно-нечеткая система автоматической регуляции вытяжки ленты//Текстильный журнал Узбекистана. 2020. №1. С.77-84

5. Isamidin Siddikov, Gulruksor Nashvandova, Gulchekhira Alimova Neural network optimizer of proportional-integral-differential controller parameters. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 14, No. 3, June 2024, pp. 2533~2540 ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v14i3.pp 2533-2540

6. Richard C. Dorf, Robert H. Bisho. *Modern Control Systems*. Pearson Higher Ed USA; 12 edition, 2010. -1104 p.

7. *Automation Control - Theory and Practice*. Edited by A.D.Rodić, Tech, 2009. - 360 p.

8. Isamidin Siddikov, Davronbek Khalmatov, Gulchekhira Alimova, Ulugbek Khujanazarov, Sadikova Feruzaxon, Mustafaqu Usanov. Investigation of auto-oscillational regimes of the system by dynamic nonlinearities. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 14, No. 1, February 2024, pp. 230-238. DOI: 10.11591/ijece.v14i1.pp230-238.

9. Astrom K.J. (2006) *Advanced PID control*/ K. J. Astrom, T. Hagglund – ISA (The instrumentation, Systems, and Automation Society), 2006 – 460 p.

10. F. S. Ismatovich, "Synthesis of an Automatic Control System with Pulse-width Modulation According to the Speed Criterion," 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan, 2020, pp. 1-5, doi: [10.1109/ICISCT50599.2020.9351393](https://doi.org/10.1109/ICISCT50599.2020.9351393)



11. Demchenko V.A. (2001) Automation and modeling of technological processes at nuclear power plants and thermal power plants / V. A. Demchenko. - Odessa: Astroprint, - 308 p.
12. Isamiddin Siddikov, Davronbek Khalmatov, Gulchexra Alimova. Algorithm for the synthesis of a predictive control system for the tape pulling process. // E3S Web of Conferences 389, 01083.UESF-2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338901083>
13. Kulakov G.T., Kravchenko V.V., Makosko Yu.V. (2012, 2013) Economical Efficiency Evaluation Technique of Implementing Innovation Systems in the TPP Automatic Control Systems. Part 1. Nauka i Tekhnika [Science & Technique], 5, 92–97, 2, 77–82.
14. Oksana Porubay, Isamiddin Siddikov, Gulruxsor Nashvandova, Gulchexra Alimova. Synthesis of a Control System for a Two-Mass Electromechanical. // Problems in the textile and light industry in the context of integration of science and industry: Vol: 2023, DOI: <https://nammti.uz/uz/ptlicispws-2/>.
15. M.R.Atanafasov, T.A.Ochilov, R.X.Norboev, M.A.Mansurova, D.A.Khalmatov. Changes in the Uneven Indexes of Sliver and Threads by Different Technological Processes // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). Volume-9 Issue-1, May 2020. P.2809-2811
16. Siddikov I.X., Jukova Y.A., Xujanazarov U.O. Synthesis predictive control system of dynamic objects // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Volume 6, Issue 2, February 2016, pp 127-130.
17. Siddikov I.X., Iskandarov Z.Ə., Synthesis of adaptive-fuzzy control system of dynamic in conditions of uncertainty of information // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Texnology, 5(1): 5089-5093. 2018