

УДК 681.7.068  
EDN: MRKKXJ

PACS: 42.30.Va, 42.79.Bh, 07.05.Mh

## Автофокусировка изображения в оптико-электронных системах на основе нечеткого ПИД-регулятора

© А. А. Берилло

АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия  
E-mail: berillo.andrey@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16.03.2026; после доработки 3.04.2026; принята к публикации 27.04.2026  
Шифр научной специальности: 2.2.6

*Рассматривается задача повышения точности и быстродействия систем автоматической фокусировки в оптико-электронных системах (ОЭС). Показано, что применение классических ПИД-регуляторов ограничено нелинейностями приводов и нестационарностью наблюдаемых сцен. Предложена структура адаптивной системы, использующей нечеткую логику для динамической настройки коэффициентов ПИД-регулятора. Обоснован выбор функции оценки контрастности методом Тененграда и аппаратной платформы Orange Pi 6 Plus для реализации алгоритмов в реальном времени. Прогнозируется снижение перерегулирования на 20–30 % и времени переходного процесса на 25–35 % при замене классического ПИД-регулятора на нечеткий.*

*Ключевые слова:* автофокусировка, оптико-электронная система, нечеткий регулятор, ПИД-регулятор, функция оценки фокуса, обработка изображений, Orange Pi, адаптивное управление.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-82-85

### Введение

Современные оптико-электронные системы (ОЭС) предъявляют высокие требования к качеству изображения, ключевым условием которого является точная настройка на резкость (автофокусировка). Задача осложняется нелинейностями привода объектива (люфт, сухое трение) и изменчивостью характеристик наблюдаемых сцен (освещенность, контраст), что делает объект управления нестационарным. Перспективным направлением для работы в таких условиях является применение адаптивных методов управления [1, 2].

Традиционные ПИД-регуляторы, настроенные на одну рабочую точку, теряют эффективность при изменении динамики объекта. Экстремальные регуляторы склонны к колебаниям вблизи точки фокуса и обладают низким быстродействием. Перспективным направлением является применение нечетких

ПИД-регуляторов (Fuzzy PID) [3], которые позволяют адаптировать параметры управления в реальном времени, обеспечивая робастность к нелинейностям и внешним возмущениям. Эффективность такого подхода для задач автофокусировки подтверждена экспериментально [2].

Целью данной работы является теоретическое обоснование и разработка структуры системы автофокусировки на основе нечеткого ПИД-регулятора с использованием современной элементной базы для обработки видеоданных.

### Постановка задачи и выбор функции оценки фокуса

Процесс автофокусировки можно представить как задачу поиска положения объектива  $x^*$ , при котором функция оценки резкости  $F(x)$  максимальна:  $x^* = \arg \max F(x)$ .

Ошибка управления  $e(t)$  косвенно определяется через отклонение от этого максимума. Динамика привода, например, двигателя постоянного тока, может быть описана передаточной функцией  $W(s) = \frac{k}{s(T_m s + 1)}$ , где  $k$  – коэффициент передачи,  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени. Эта модель не учитывает нелинейности – такие, как люфт, что требует применения более сложных алгоритмов управления [2, 4].

Качество работы системы напрямую зависит от выбора  $F(x)$ . Сравнительный анализ методов показал, что для задач реального времени наиболее применим градиентный метод Тененграда (Tenengrad), который обеспечивает хороший компромисс между точностью и вычислительной сложностью. Фундаментальное обоснование этого метода представлено в работе [5]. Его эффективность для изображений, близких по природе к получаемым в ОЭС, подтверждена в более поздних исследованиях [6]. Алгоритм заключается в свертке изображения  $I(x, y)$  с операторами

Собела для получения горизонтальной  $G(x)$  и вертикальной  $G(y)$  составляющих градиента, для вычисления модуля градиента  $S(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2}$  и его суммирования по области анализа  $M \times N$ :

$$F_{Tenengrad} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N S(x, y).$$

### Разработка нечеткого ПИД-регулятора

Предлагаемая система (рис. 1) построена по двухуровневой схеме. Нижний уровень – классический ПИД-регулятор, формирующий сигнал  $u(t)$  на привод. Верхний уровень – нечеткий корректор, который динамически изменяет коэффициенты ПИД-регулятора:  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ . Результирующие коэффициенты:  $K_p = K_{p0} + \Delta K_p$  и т. д., где  $K_{p0}$  – базовые значения. Теоретические основы нечеткого управления изложены в [3], а успешное применение подобной структуры для задач автофокусировки продемонстрировано в [2, 4].

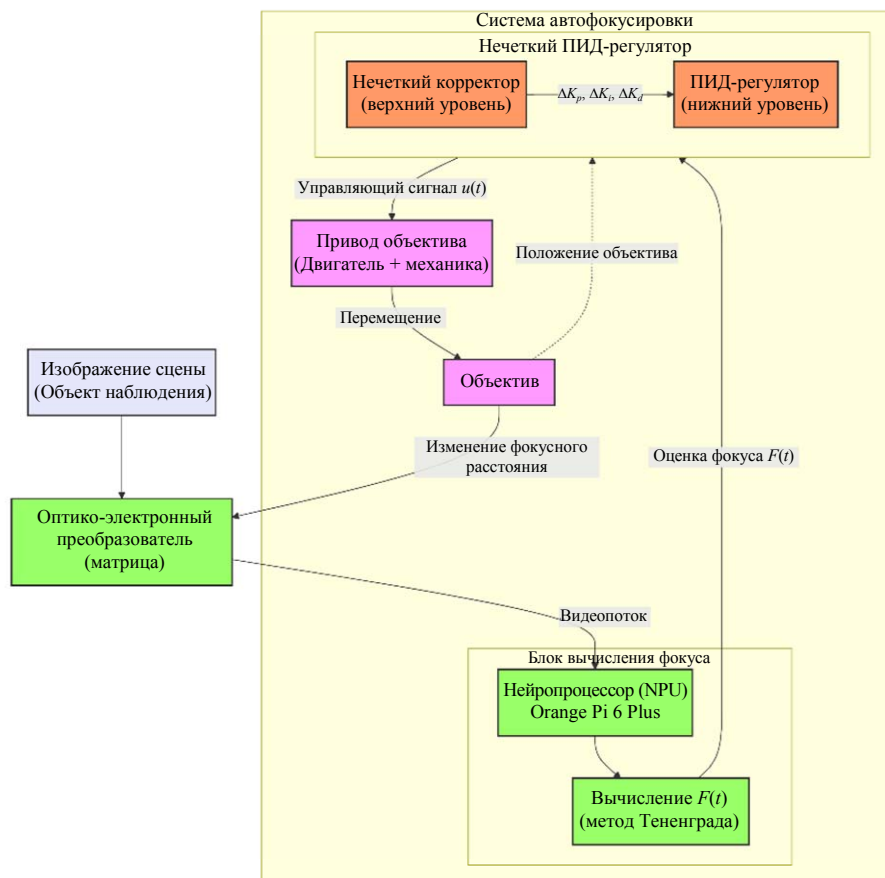


Рис. 1. Структурная схема системы автофокусировки с нечетким ПИД-регулятором

Входные четкие переменные – ошибка  $e$  и скорость ее изменения  $\dot{e}$  – преобразуются в лингвистические переменные с семью термами: NB (отрицательное большое), NM, NS, Z, PS, PM, PB (положительное большое). Функции принадлежности выбраны треугольной формы. База нечетких правил (таблица) разработана на основе эмпирических знаний о настройке ПИД-регуляторов, адаптированных для задачи автофокусировки. Для получения четких значений корректирующих коэффициентов используется метод центра тяжести (Centroid). Аналогичный подход к формированию базы правил использован в [2].

Таблица

Фрагмент базы правил для коррекции  $\Delta K_p$

| $e/\dot{e}$ | NB | NM | NS | Z  | PS | PM | PB |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB          | PB | PB | PM | PM | PS | Z  | Z  |
| Z           | PM | PM | PS | Z  | NS | NM | NM |
| PB          | Z  | Z  | NS | NM | NM | NB | NB |

### Аппаратная реализация и ожидаемые результаты

Для реализации системы предлагается использовать одноплатный компьютер Orange Pi 6 Plus с SoC CIX CD8180. Ключевым преимуществом является встроенный нейропроцессор (NPU) производительностью  $28,8 \times 10^{12}$  операций в секунду, позволяющий аппаратно ускорить вычисление функции Тененграда (свертка с ядрами Собела). Планируется следующее распределение нагрузки: NPU – предобработка и вычисление  $F(t)$ ; CPU (высокопроизводительные ядра) – работа нечеткого регулятора.

Ввиду того, что работа находится на стадии теоретической проработки, количественные показатели эффективности оцениваются как прогнозируемые. Планируется проведение имитационного моделирования в MATLAB/Simulink для модели привода с нелинейностью типа «люфт». Ожидается, что по сравнению с классическим ПИД-регулятором нечеткий ПИД-регулятор позволит снизить перерегулирование на 20–30 % и уменьшить время переходного процесса на 25–35 % (рис. 2), что согласуется с результатами, полученными в [2, 4].

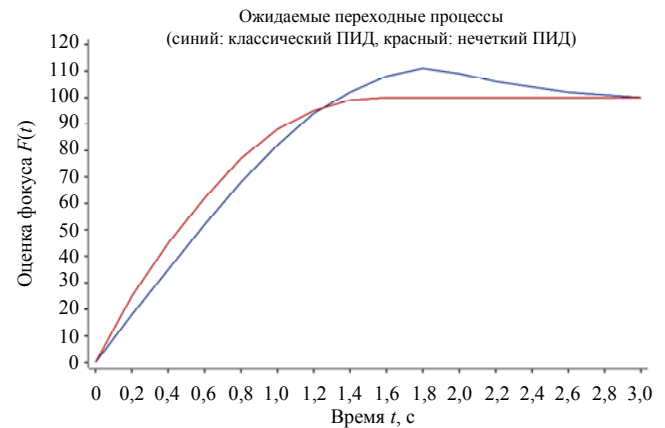


Рис. 2. Ожидаемые переходные процессы для классического и нечеткого ПИД-регуляторов

### Заключение

В работе проведен анализ проблемы автофокусировки и обоснована целесообразность применения адаптивных методов управления [1, 2]. Выбрана функция оценки контрастности (метод Тененграда), базирующаяся на фундаментальных [5] и современных [6] исследованиях, и разработана структура нечеткого ПИД-регулятора [2, 3]. Обоснован выбор аппаратной платформы Orange Pi 6 Plus, использование которой позволит реализовать алгоритмы в реальном времени. Сформулированы прогнозируемые показатели эффективности. Дальнейшие исследования будут направлены на имитационное моделирование и экспериментальную апробацию на разработанном стенде.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пегам А. Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. Подвесовского А. Г., Тюменцева Ю. В. Изд. 4-е. – М.: Лаборатория знаний, 2020.
2. Zhou J., Xue L., Li Y., Cao L., Chen C. / Sensors. 2022. Vol. 22. № 22. P. 8657.
3. Ali R., Peng Y., Ali A., Ali H., Akhter N., Ahmed J., Jalil A. / IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 130014–130026.
4. Wang D. J., Ding X., Zhang T., Kuang H. / Optics & Laser Technology. 2013. Vol. 45. P. 190–197.
5. Pech-Pacheco J. L., Cristobal G., Chamorro-Martinez J., Fernandez-Valdivia J. / Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition. – Barcelona, 2000. Vol. 3. P. 314–317.
6. Ma C., Zhang M., Dai Z., Zhang Q., Ma J., Niu X., Yan Y. / PLoS ONE. 2025. Vol. 20. № 11. P. e0336810.

## Image autofocusing in optoelectronic systems based on a fuzzy PID controller

A. A. Berillo

RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

E-mail: berillo.andrey@yandex.ru

Received 16.03.2026; revised 3.04.2026; accepted 27.04.2026

*The problem of improving the accuracy and speed of automatic focusing systems in optoelectronic systems (OES) is considered. It is shown that the application of classical PID controllers is limited by nonlinearities of drives and non-stationarity of observed scenes. A structure of an adaptive system using fuzzy logic for dynamic tuning of the PID controller coefficients is proposed. The choice of the Tenengrad contrast measure function and the Orange Pi 6 Plus hardware platform for real-time algorithm implementation is substantiated. The expected performance indicators of the proposed approach are given.*

*Keywords:* autofocus, optoelectronic system, fuzzy controller, PID controller, focus measure function, image processing, Orange Pi, adaptive control.

### REFERENCES

1. Pegat A. Fuzzy Modeling and Control. Moscow: Laboratoriya znaniy Publ., 2020 [in Russian].
2. Zhou J., Xue L., Li Y., Cao L., and Chen C., *Sensors* **22** (22), 8657 (2022).
3. Ali R., Peng Y., Ali A., Ali H., Akhter N., Ahmed J., and Jalil A., *IEEE Access* **8**, 130014–130026 (2020).
4. Wang D. J., Ding X., Zhang T., and Kuang H., *Optics & Laser Technology* **45**, 190–197 (2013).
5. Pech-Pacheco J. L., Cristobal G., Chamorro-Martinez J., and Fernandez-Valdivia J. *Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition, Barcelona*, **3**, 2000, pp. 314–317.
6. Ma C., Zhang M., Dai Z., Zhang Q., Ma J., Niu X., and Yan Y., *PLoS ONE* **20** (11), e0336810 (2025).

### Об авторе

**Берилло Андрей Анатольевич**, ведущий инженер-программист, магистр, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: berillo.andrey@yandex.ru