

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-4-89-98

УДК 62-83:621

**А. С. КОВАЛЬ**, канд. техн. наук, доц.

**А. Ю. САДОВСКИЙ**

**Д. С. ЛУКАШОВ**

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

### К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИ-, ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

#### Аннотация

Представлена сравнительная характеристика использования ПИ-, ПИД-, ИП-регуляторов, а также вариантов этих регуляторов с адаптацией их параметров при использовании возможностей нечеткой логики и нейронных сетей (на примере однонейронного ПИД-регулятора) в системах автоматического регулирования.

#### Ключевые слова:

ПИ-, ПИД-регуляторы, псевдо-ПИД-регулятор, нечеткая логика, однонейронный ПИД-регулятор, подчиненное регулирование, ошибка по скорости.

#### Для цитирования:

Коваль, А. С. К вопросу использования ПИ-, ПИД-регуляторов для систем автоматического управления электроприводами / А. С. Коваль, А. Ю. Садовский, Д. С. Лукашов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 4 (89). – С. 89–98.

В настоящее время основной практический принцип построения систем управления автоматизированных электроприводов – принцип подчиненного регулирования. Основная идея этого принципа управления заключается в приведении передаточной функции разомкнутой системы автоматического управления к желаемому виду за счет выбора передаточной функции соответствующего регулятора, что позволяет обеспечить требуемое качество изменения регулируемой переменной в динамике и статике и получить системы регулируемого электропривода с оптимальными, в определенном смысле, характеристиками. Основные типы регуляторов, используемые в зависимости

от требуемой настройки системы и объекта регулирования в системах подчиненного регулирования, – это ПИ-, П-, ПИД-регуляторы [1]. Наиболее широко используемые ПИ-регуляторы обеспечивают системам астатизм и возможность работы при больших диапазонах регулирования за счет присутствия интегральной составляющей в законе регулирования регулятора при наличии рассогласования на входе регулятора. Рассмотрим систему автоматического регулирования с ПИ-регулятором (рис. 1), параметры регулятора и объекта регулирования представлены в табл. 1.

Передаточная функция замкнутой системы по задающему воздействию (получена на основе структурных пре-

образований [2]) имеет вид

$$W_{\text{ПИ}}(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{T_2 J} p + \frac{k_2}{T_1 T_2 J} = \frac{\frac{1}{T_2 J} p + \frac{k_2}{T_1 T_2 J}}{p^3 + \frac{1}{T_2} p^2 + \frac{1}{T_2 J} p + \frac{k_2}{T_1 T_2 J}}. \quad (1)$$

Передаточная функция по возмущению

$$W(p) = \frac{\frac{1}{J} p^2 + \frac{1}{J T_2} p}{p^3 + \frac{1}{T_2} p^2 + \frac{k_1}{J T_1 T_2} p + \frac{k_2}{T_1 T_2 J}}.$$

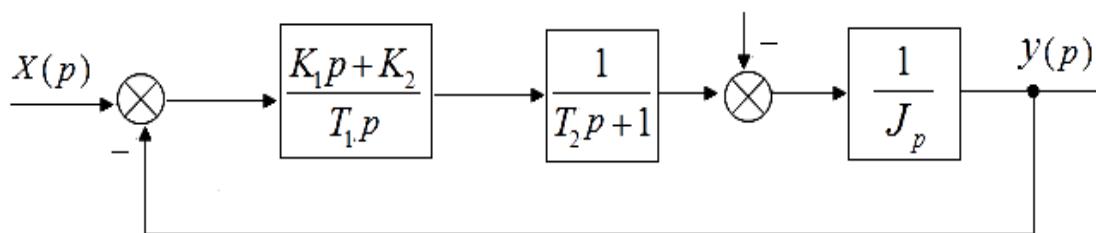


Рис. 1. Система автоматического регулирования с ПИ-регулятором

Табл. 1. Параметры регуляторов и объекта регулирования

$K_1$	$K_2$	$T_1, \text{ с}$	$T_2, \text{ с}$	$J_p, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$K_6$	$K_H$	$K_{\Pi}$
0,1	5	0,1	0,01	0,0012	2	2	0,6

Соответствующие ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы по задающему воздействию показаны на рис. 2.

Переходные режимы в этой систе-

ме для используемых параметров регулятора при ступенчатом входном сигнале и наборсе нагрузки приведены на рис. 3 и имеют колебательный характер.

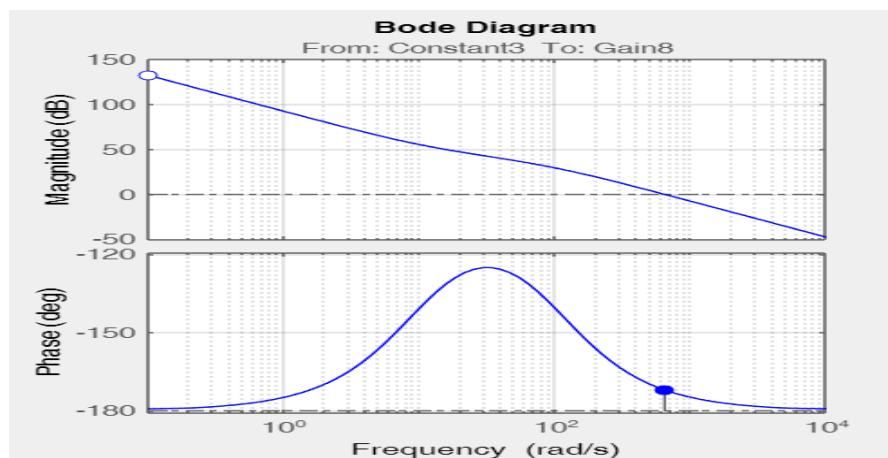


Рис. 2. ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы

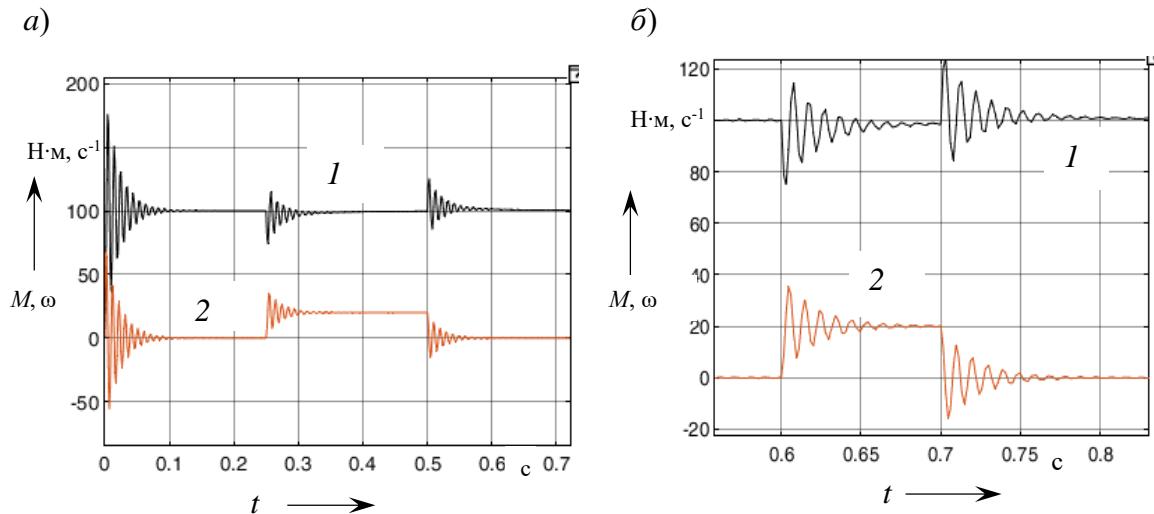


Рис. 3. Переходные режимы в системе с ПИ-регулятором: *а* – пуск и наброс нагрузки; *б* – наброс нагрузки; 1 – частота вращения; 2 – момент нагрузки

Вариантом ПИ-регулятора, уменьшающим перерегулирование при отработке единичного сигнала задания, мо-

жет являться интегрально-пропорциональный регулятор (ИП-регулятор) (рис. 4).

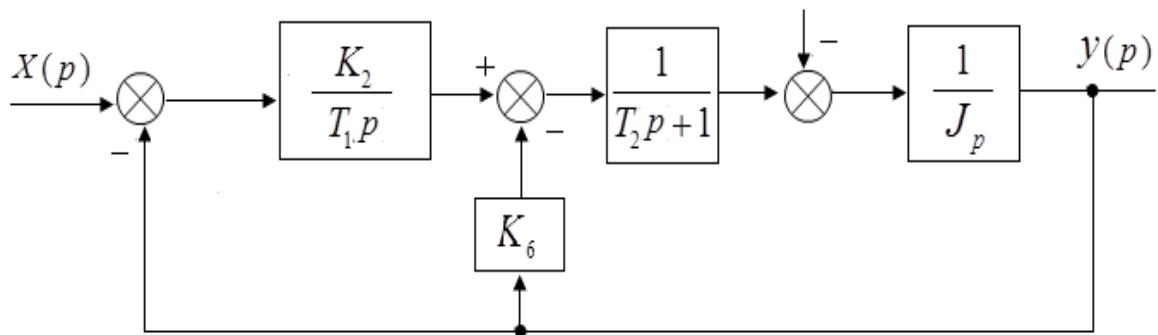


Рис. 4. Система автоматического управления с ИП-регулятором

ИП-регулятор отличается тем, что имеет пропорциональную часть в цепи обратной связи при размещении интегральной составляющей, как и у ПИ-регулятора, в прямом канале распространения сигнала. Для схемы (см. рис. 4) после структурных преобразований передаточная функция замкнутой системы имеет следующий вид:

$$W_{IP}(p) = \frac{\frac{k_2}{T_1 T_2 J}}{p^3 + \frac{1}{T_2} p^2 + \frac{k_1}{T_2 J} p + \frac{k_2}{T_1 T_2 J}}. \quad (2)$$

Соответственно, передаточная функция по возмущению

$$W(p) = \frac{\frac{1}{J}p^2 + \frac{1}{JT_2}p}{p^3 + \frac{1}{T_2}p^2 + \frac{k_6}{JT_2}p + \frac{k_2}{T_1T_2J}}. \quad (3)$$

Сравнение (1) и (2) показывает, что эти передаточные функции при одинаковых характеристических уравнениях отличаются наличием форсированного звена в числителе для передаточной функции системы с ПИ-регуля-

тором, что обеспечивает перерегулирование в системе с ПИ-регулятором при отработке единичного сигнала задания в отличие от системы с ИП-регулятором.

При сохранении параметров регулятора и объекта регулирования (см. табл. 1) ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы показаны на рис. 5, а переходные режимы с системе с ИП-регулятором – на рис. 6.

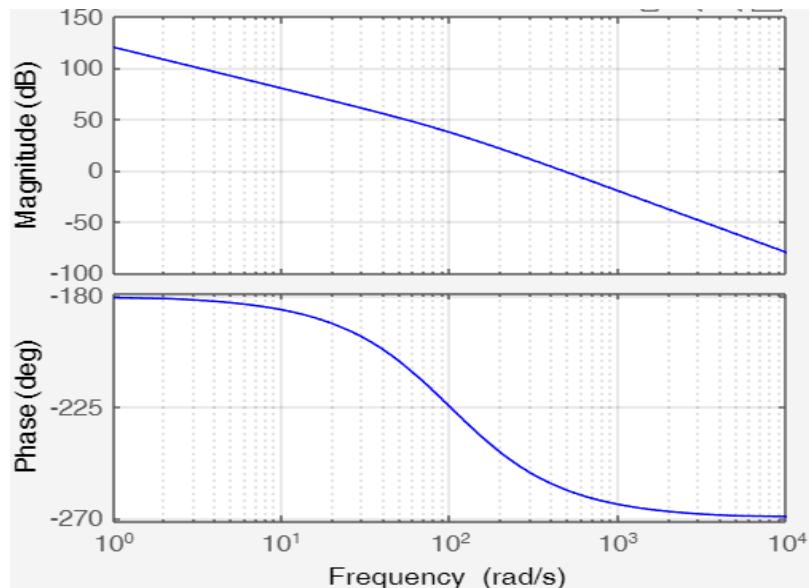


Рис. 5. ЛАЧХ и ЛФЧХ системы с ИП-регулятором

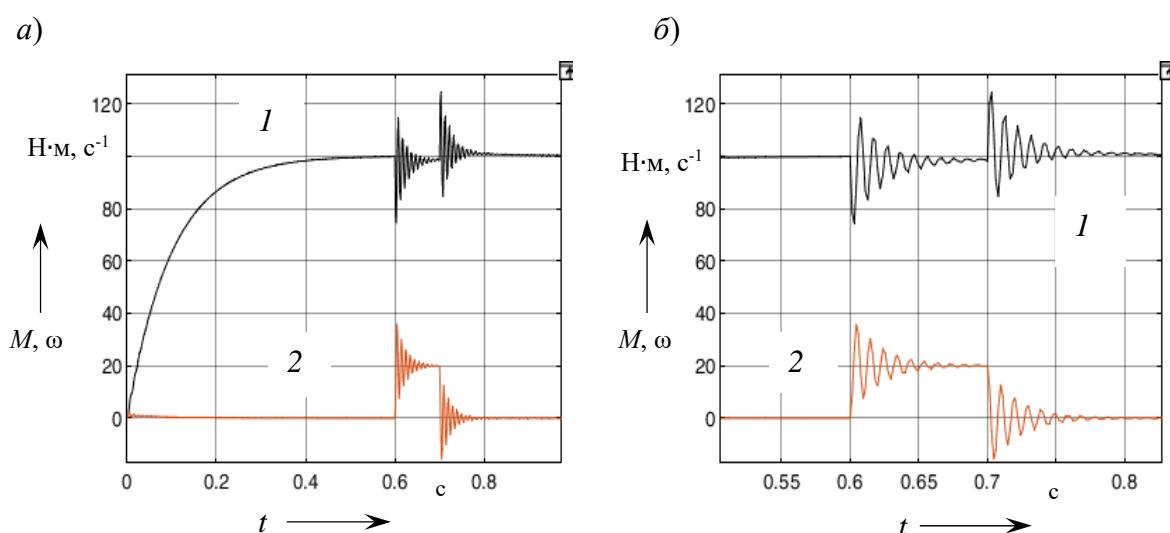


Рис. 6. Переходные режимы в системе с ИП-регулятором: *а* – пуск и наброс нагрузки; *б* – наброс нагрузки; 1 – частота вращения; 2 – момент нагрузки

Время переходного режима при пуске системы с ИП-регулятором может регулироваться коэффициентом пропорциональной составляющей в цепи обратной связи.

Вариант ИП-регулятора, названный как псевдодифференцирующий (pseudo derivative feedforward) ПИД-ре-

гулятор (ППИД-регулятор) (рис. 7), предложен в [3]. Отличие – в наличии канала по сигналу задания, добавляющего пропорциональную составляющую по сигналу задания на выход ИП-регулятора, обеспечивая эффект, названный псевдодифференцированием.

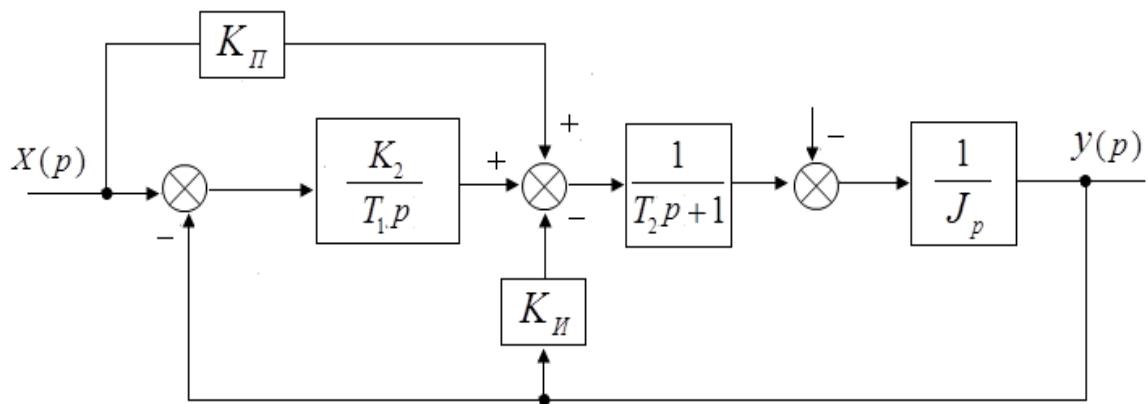


Рис. 7. Система автоматического регулирования с ППИД-регулятором

При стандартных преобразованиях структурных схем передаточная функция замкнутой системы (см. рис. 7) по задающему воздействию имеет вид

$$W_{\text{ППИД}}(p) = \frac{\frac{k_P}{T_2 J} p + \frac{1}{T_2 J}}{p^3 + \frac{1}{T_2} p^2 + \frac{k_P}{T_2 J} p + \frac{k_2 + k_I}{T_1 T_2 J}}. \quad (4)$$

Передаточная функция по возмущающему воздействию совпадает с (3).

ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы показаны на рис. 8.

Отработка задающего сигнала и наброса нагрузки показаны на рис. 9.

Сравнение систем с ИП-регулятором и ППИД-регулятором показывает, что качественная реакция на наброс нагрузки при параметрах системы, заданных табл. 1, одинакова. Отличие рассматриваемых систем – в реакции на сигнал задания. Наличие пропорци-

ональной связи по сигналу задания в системе с ППИД-регулятором позволяет форсировать соответствующую реакцию системы. Но этот же эффект в системе может быть достигнут изменением коэффициента пропорциональной составляющей в ИП-регуляторе.

Рассмотренные регуляторы имеют фиксированные коэффициенты передачи и теряют свою эффективность при вариации параметров объекта управления, т. к. не обладают возможностями адаптации к изменению параметров объекта регулирования. Разработке регуляторов, адаптивных к возможному изменению параметров объекта регулирования, сегодня уделяется большое внимание. Способствовало этому развитие теории нейронных сетей, нечеткой логики, возможностей искусственного интеллекта [4]. Регуляторам, использующим вычислительные возможности современных компьютеров, не требуют-

ся для их реализации априорные математические модели объектов управления в отличие от традиционных систем адаптивного и оптимального управления. При этом всегда привлекает внимание наиболее простая реализация возможностей адаптации в широко применяемых и известных технических решениях. Пример системы электропривода с ПИ-регулятором с коэффициентами,

корректируемыми применением алгоритмов нечеткой логики (рис. 10) с использованием функций принадлежности, базы логических правил и нечеткого вывода типа Мамдани или Сугено, приведен в [5].

Переходные характеристики в этом случае в системе с классическим и нечетким ПИ-регуляторами скорости приведены на рис. 11.

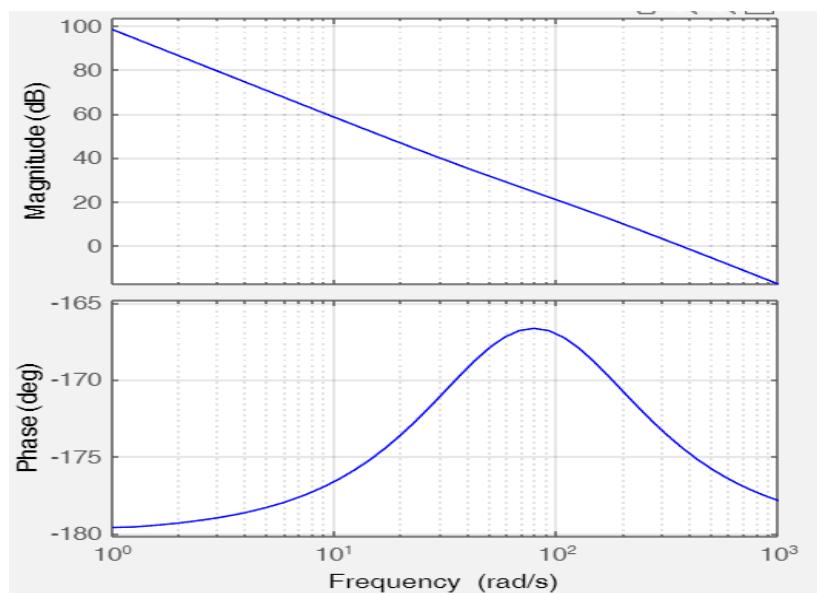


Рис. 8. ЛАЧХ и ЛФЧХ системы с ППИД-регулятором

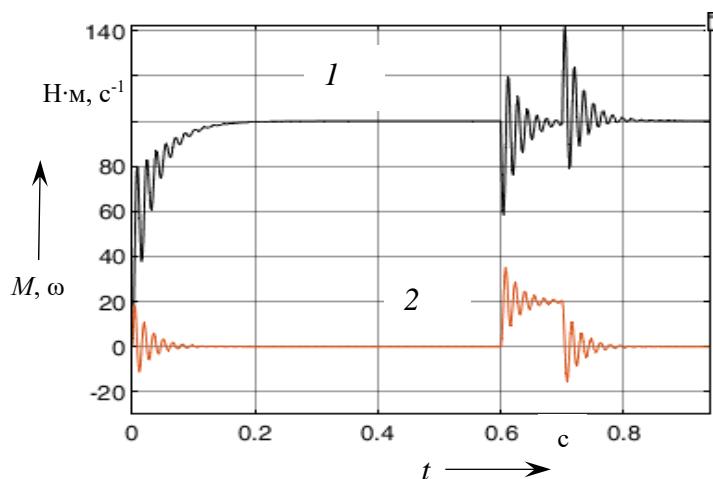


Рис. 9. Переходные режимы в системе с ППИД-регулятором: 1 – частота вращения; 2 – момент нагрузки

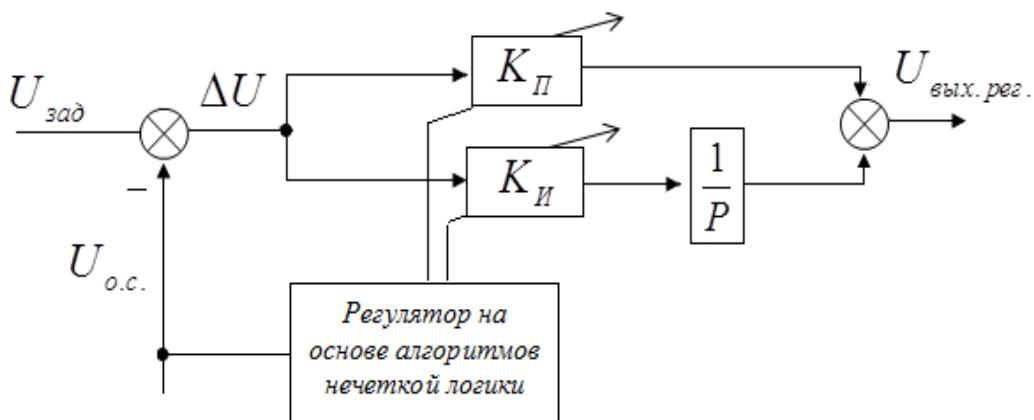


Рис. 10. ПИ-регулятор с использованием алгоритмов нечеткой логики

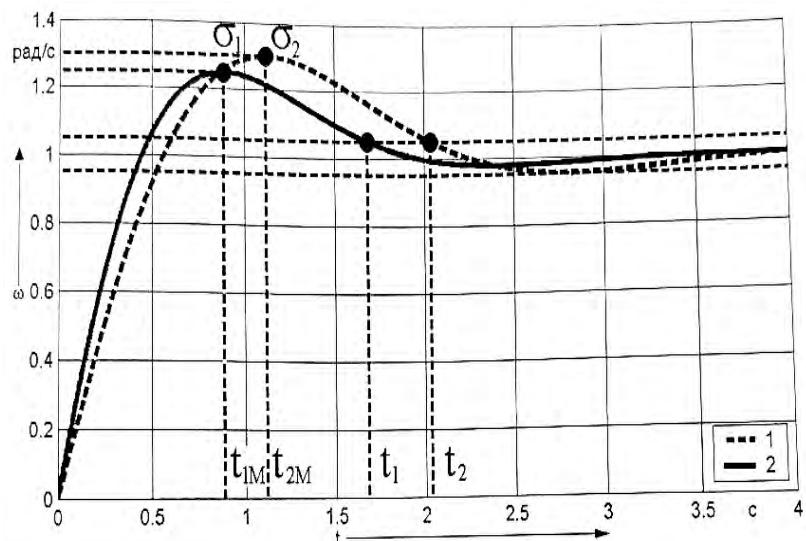


Рис. 11. Переходные характеристики в системе управления с классическим ПИ-регулятором (1) и нечетким регулятором (2)

В системе с нечетким ПИ-регулятором оценка на основе квадратичной ошибки показывает, что реализуются лучшие переходные процессы.

При использовании нейронных сетей представляет интерес цифровой одннейронный адаптивный ПИД-регулятор, имеющий, в отличие от многослойных структур, наиболее простую структуру нейронной сети и самообучающийся за счет непрерывной коррекции весовых коэффициентов, определяющих параметры собственно регуля-

тора (рис. 12) [6].

Функционирование регулятора может быть пояснено следующим образом [6]. На рис. 12  $e(k)$  – дискретная выборка ошибки (например, по скорости)

$$e(k) = U_{\text{зад}}(k) - U_{\text{о.с.}}(k),$$

где  $k$  – номер периода квантования.

Ошибка преобразуется функциональным преобразователем в переменные состояния по ошибке в конечных разностях:

$$x_1(k) = e(k);$$

$$x_2(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1);$$

$$x_3(k) = \Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2).$$

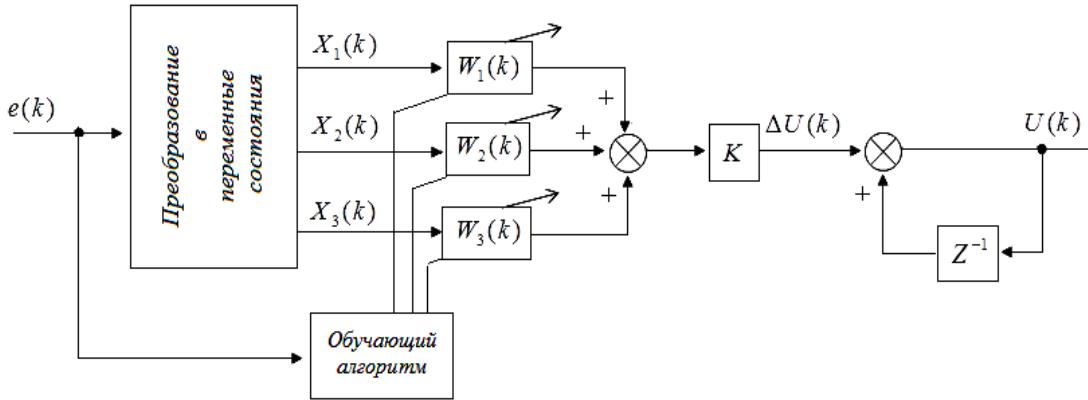


Рис. 12. Однонейронный ПИД-регулятор

Выход однонейронного регулятора  $U(k)$  может быть записан в виде

$$U(k) = \Delta U(k) + U(k-1) = \\ = U(k-1) + K \cdot \sum_1^3 W(k) \cdot x_i(k),$$

где  $K$  – масштабирующий коэффициент, который может корректироваться по результатам моделирования;

$$W(k) = \frac{W_i(k)}{\sum_1^3 |W_i(k)|}.$$

Величина  $\Delta U(k)$  может регулироваться коррекцией весовых коэффициентов в процессе обучения алгоритмом обучения, оптимизирующим процесс на базе минимизации квадратичной функции ошибки [4, 6]:

$$Q = \frac{1}{2} [e_r(k+1) - e(k+1)]^2.$$

Коррекция весовых коэффициентов  $W_i(k)$  может быть выражена как

$$\Delta W_i(k) = W_i(k+1) - W_i(k) =$$

$$= -\eta_i \cdot \frac{\partial Q}{\partial W_i(k)}, \quad (5)$$

где  $\eta_i$  – скорость обучения весовых коэффициентов.

Выражение (5) может быть представлено в виде [4]

$$\Delta W_i(k+1) = W_i(k) + \eta_i \cdot K \times \\ \times e(k+1) \cdot x_i(k) \cdot \text{sign}\left(\frac{\partial e(k+1)}{\partial U(k)}\right),$$

где  $\text{sign}$  – функция знака (например, сигмоидная функция) [4].

Таким образом, работа однонейронного ПИД-регулятора описывается уравнениями выхода регулятора и коррекции весовых коэффициентов [4, 6]:

$$\begin{aligned} U(k) &= \Delta U(k) + U(k-1) = \\ &= U(k-1) + K \cdot \sum_1^3 W_i(k) \cdot x_i(k); \\ \Delta W_i(k+1) &= W_i(k) + \eta_i \cdot K \times \\ &\times e_n(k+1) \cdot x_i(k) \cdot \text{sign}\left(\frac{\partial e(k+1)}{\partial U(k)}\right). \end{aligned}$$

Регулируемые коэффициенты однонейронного ПИД-регулятора содержат коэффициенты скорости обучения, масштабный коэффициент и весовые коэффициенты для начального значения. Начальными значениями весовых коэффициентов и скорости обучения весовых коэффициентов задаются. Масштабный коэффициент имеет постоянное значение, но может корректироваться по результатам моделирования и эксперимента.

Связь между соответствующими коэффициентами однонейронного ПИД-регулятора и интегрирующим, пропорциональным и дифференцирующим коэффициентами соответственно аналогового ПИД-регулятора имеет вид

$$k_H = K \cdot W_1(k);$$

$$k_P = K \cdot W_2(k);$$

$$k_D = K \cdot W_3(k).$$

### Выводы

Эффективность использования традиционных ПИ- и ПИД-регуляторов доказана практикой управления различными процессами. Они давно и широко используются в том числе и в системах автоматического управления электроприводами. Вариациями схем традиционных ПИ- и ПИД-регуляторов, позволяющими формировать реакцию системы на задающие сигналы, являются ИП-, ППИД-регуляторы, а также ПИ-, ПИД-регуляторы с возможностью адаптации к изменению параметров системы на базе использования алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей. С целью реализации адаптации управления представляет существенный интерес, в том числе и для применения в системах электропривода, однонейронный ПИД-регулятор, использующий математику нейронных сетей, но имеющий наиболее простую для реализации структуру.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анучин, А. С.** Системы управления электроприводов / А. С. Анучин. – М. : МЭИ, 2015. – 373 с.
2. **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.
3. **Prabhakaran Koothu Kesavan.** Laboratory Implementation of Direct Torque Controller based Speed Loop Pseudo Derivative Feedforward Controller for PMSM Drive / Prabhakaran Koothu Kesavan, Umashankar Subramaniam, Dhafer J. Almakhles // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – 2024. – Vol. 8, № 1. – P. 12–21.
4. **Сигеру Омату.** Нейроуправление и его приложения / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф // Радиотехника. – 2000. – С. 271.
5. **Коваль, А. С.** К вопросу построения нечеткого регулятора скорости для электропривода при ПУМ с ШИМ лифтовой установки / А. С. Коваль, А. В. Швайков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – № 1. – С. 114–122.

- 
6. **Maoli Wang.** A single Neuron Self-Adaptiv PID Controller of Brushless DC Motor / Maoli Wang, Guanghe Cheng, Xiangxin Kong // Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. – 2011. – P. 262–266.

*Статья сдана в редакцию 11 сентября 2025 года*

Контакты:

epiapubru@gmail.com (Коваль Александр Сергеевич);  
epiapubru@gmail.com (Садовский Артем Юрьевич);  
epiapubru@gmail.com (Лукашов Денис Сергеевич).

**A. S. KOVAL, A. Y. SADOVSKY, D. S. LUKASHOV**

## **ON USING PI AND PID CONTROLLERS IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC DRIVES**

A comparative analysis of the use of PI, PID, IP controllers, as well as variants of these controllers, is presented with the adaptation of their parameters while using the capabilities of fuzzy logic and neural networks in automatic control systems (based on a single neuron PID controller as an example).

**Keywords:**

PI, PID regulators, pseudo-PID controller, fuzzy logic, single neuron PID controller, subordinate control, speed error.

**For citation:**

Koval, A. S. On using PI and PID controllers in automatic control systems for electric drives / A. S. Koval, A. Y. Sadovsky, D. S. Lukashov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 4 (89). – P. 89–98.