

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-1-65-75

УДК 621.365:66

Т. С. ЛАРЬКИНА^{1,2}

П. В. КАЗАКОВ¹

Д. Ю. СТУДНЕВ¹

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске (Смоленск, Россия)

К ВОПРОСУ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ПОД ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ МНОГОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ

Аннотация

Рассмотрены варианты расчета настроек ПИД-регулятора для дальнейшего регулирования систем автоматического управления и его размещение в моделях. Для реализации данной задачи использовались программы MATLAB Simulink и КОМПАС-3D.

Ключевые слова:

автоматическая система управления, моделирование, MATLAB Simulink, ПИД-регулятор.

Для цитирования:

Ларькина, Т. С. К вопросу настройки ПИД-регулятора под оптимальные параметры для регулирования многоконтурных систем / Т. С. Ларькина, П. В. Казаков, Д. Ю. Студнев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 1 (90). – С. 65–75.

Введение

Настройка регуляторов является одной из основных задач для управления роботизированными системами. От грамотной настройки регуляторов зависит устойчивость системы при изменении ее управляющими воздействиями и качество функционирования системы в целом.

Для многоконтурных систем задача регулирования имеет особую важность из-за взаимного влияния контуров друг на друга, которые далее влияют на общую устойчивость всей системы. Поэтому недостаточно контролировать лишь один контур системы. Целесообразно регулировать всю систему в целом. В таких условиях необходимо ис-

кать оптимальные параметры регулятора, которые бы смогли обеспечить способность и функционирование всей системы.

В настоящее время наибольшее распространение в робототехнике получили пропорциональные (П), пропорционально-интегрирующие (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы из-за относительной простоты их внедрения в системы и в отдельные ее контура индивидуально.

Задачами регулирования являются улучшение устойчивости систем и повышение эффективности и качества работы. Например, внедрение П-регулятора обеспечивает заданную скорость, уменьшает время переходного процесса

и его плавность.

Оценку качества регулирования можно провести благодаря специальным критериям: перерегулирование, диапазон регулирования, плавность регулирования и т. д.

Виды регуляторов и их основные характеристики

Рассмотрим разновидности регуляторов, их применение в промышленности и робототехнике, а также в системах управления [1].

Регулятор – это устройство, собранное из различных электрических и логических компонентов, выполняющих роль стабилизации различных процессов в системе путем выработки управляющих воздействий, формирующихся от обратной связи (датчиков) процесса в системе.

Регуляторы постоянно встречаются в повседневной жизни, как и электропривод, с которым они тесно связаны. Например, кондиционер – с датчика температуры регулятор принимает сигнал, отдает его в систему управления в уже видоизмененной форме, после чего в помещении происходит смена температуры на необходимую; электросамокат, в котором применяется довольно распространенная в современном мире система «мотор – колесо», на которое приходит воздействие о повышении тока или момента со стороны управляющей системы в совокупности с регулятором, который выполняет роль поддержания необходимых координат электропривода в текущей ситуации (подъем, спуск, неровности и обход препятствий).

Рассмотрим следующие виды регуляторов.

1. Релейный регулятор.
2. Кубический регулятор.
3. Пропорциональный регулятор (П-регулятор).
4. Пропорционально-интегрирующий регулятор (ПИ-регулятор).

5. Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД-регулятор).

6. Нечеткий регулятор (fuzzy-логика).

7. Регуляторы с искусственным интеллектом (ИИ).

Релейный регулятор – это регулятор, который вырабатывает ограниченное количество различных действий для регулирования заданного процесса устройства, лежащее обычно в диапазоне от 2 до 6. Данный регулятор решает проблемы, связанные с напряжением, защитой, перемещением и током.

В жизни используется для конкретных задач, таких как стабилизация напряжения (в автомобилях, квадроциклах, снегоходах и т. д.), защита аккумулятора от разряда через обмотки генератора при останове двигателя, стабилизация при полете, передвижении и корректировка курса навигации [2].

Схема электрическая работы релейного регулятора приведена на рис. 1.

Кубический регулятор – это регулятор, который вырабатывает кубическое значение воздействия на возмущение, применяемый в системах с небольшими ошибками. Примерами являются роботизированные системы, заточенные на прямолинейное движение, такие как автоматические погрузчики, сортировщики и т. д. Работа данного регулятора описывается уравнением [3]

$$U_{возд} = k_n E + k_k E^2, \quad (1)$$

где k_n – пропорциональное звено; k_k – кубическое звено; E – сигнал ошибки с датчика.

Пропорциональный регулятор (П-регулятор) – это самый простой тип регулятора, использующийся в современных системах автоматического управления, который имеет одно пропорциональное звено воздействия на приходящую ошибку от обратной связи регулируемой системы. Его передаточ-

ная функция описывается постоянным коэффициентом (по преобразованию Лапласа) [4] как

$$W(p) = K_{II}, \quad (2)$$

где K_{II} – коэффициент пропорциональности.

Схема П-регулятора имеет следующий вид структуры (рис. 2).

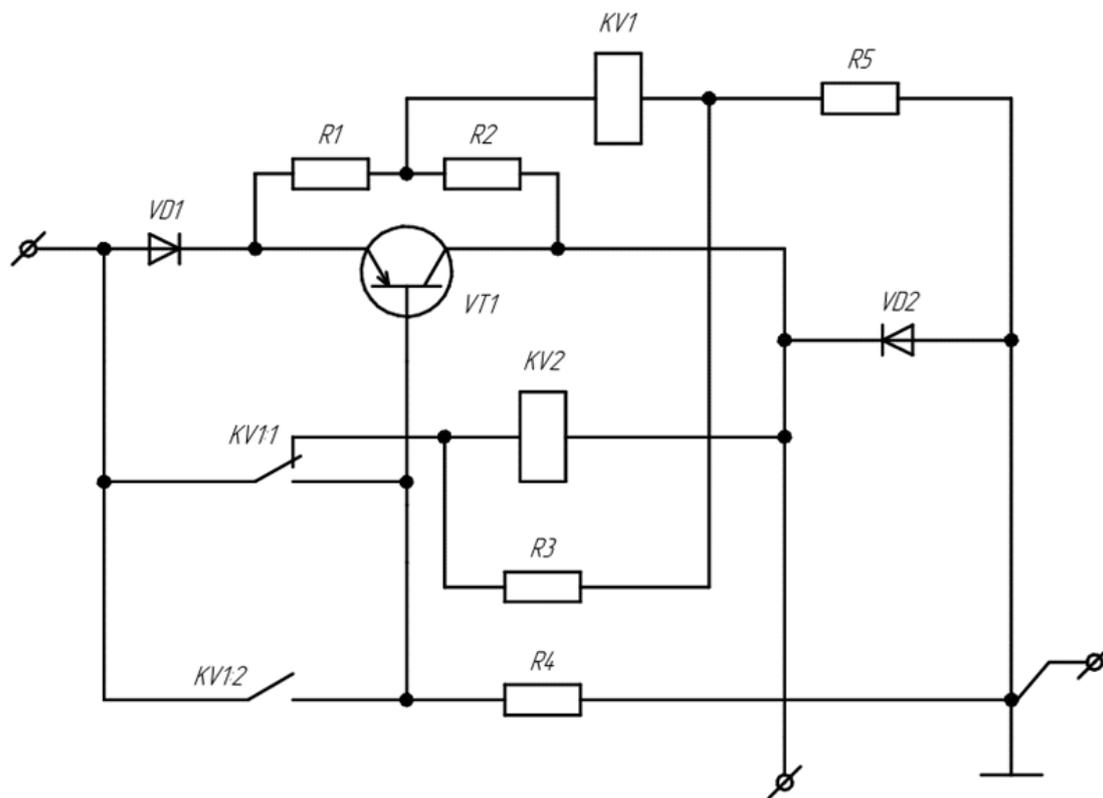


Рис. 1. Схема электрическая работы релейного регулятора

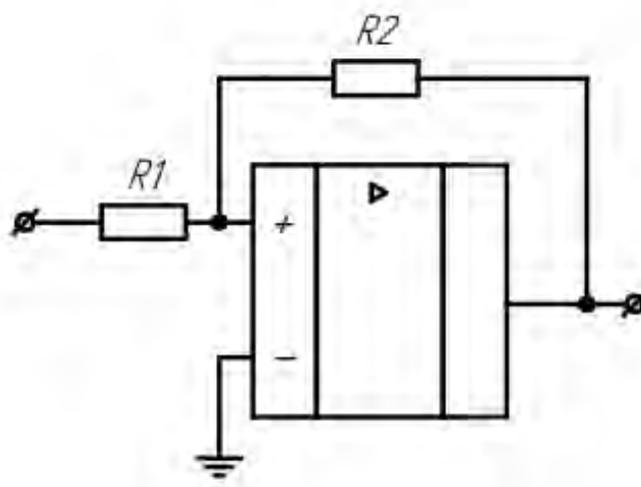


Рис. 2. Схема П-регулятора

Пропорционально-интегрирующий регулятор (ПИ-регулятор) – это самый распространенный тип регуляторов, поскольку он может использоваться в абсолютно различных системах за счет своей универсальности. Имеет в себе пропорциональное и интегрирующие звенья или одно пропорционально-интегрирующее звено, что позволяет ему ликвидировать статическую ошибку, при этом оставаясь в стабильном состоянии. Передаточная функция ПИ-регулятора описывается математи-

ческим уравнением (по преобразованию Лапласа)

$$W(p) = K_{II} + K_{II} \frac{1}{p}, \quad (3)$$

где K_{II} – коэффициент интегрирования.

Схема И-регулятора имеет следующую структуру интегрирующей части (рис. 3).

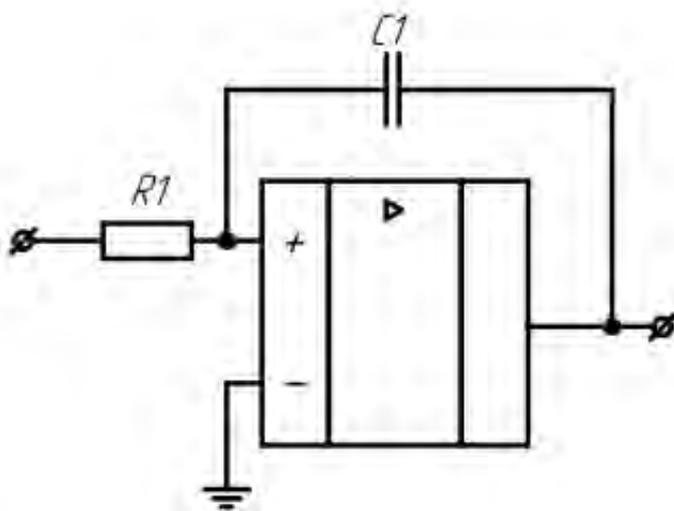


Рис. 3. Схема И-регулятора

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД-регулятор) – это регулятор, обеспечивающий максимальную производительность и точную настройку системы. Применяется реже, чем предыдущие два регулятора, по следующим причинам:

- 1) сложность настройки;
- 2) избыточность (заключается в том, что некоторые системы не требуют регулирования вплоть до идеально точных значений, ввиду чего использование в данных системах этого типа регулятора излишне и приводит только к усложнению самой системы в целом, что нежелательно);
- 3) чувствительность (к помехам и неидеальным входным сигналам с датчи-

ков, из-за чего в системах, где присутствуют данные помехи, требуется дополнительно устанавливать фильтры).

Передаточная функция ПИД-регулятора описывается следующими преобразованиями по Лапласу [5]:

$$W(p) = K_{II} + K_{II} \frac{1}{p} + K_{\delta} \cdot p, \quad (4)$$

где K_{δ} – коэффициент дифференцирования.

Формула без преобразований Лапласа для ПИД-регулятора

$$K_{II} \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_\delta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}. \quad (5)$$

Схема ПИД-регулятора имеет следующую структуру дифференцирующей части (рис. 4).

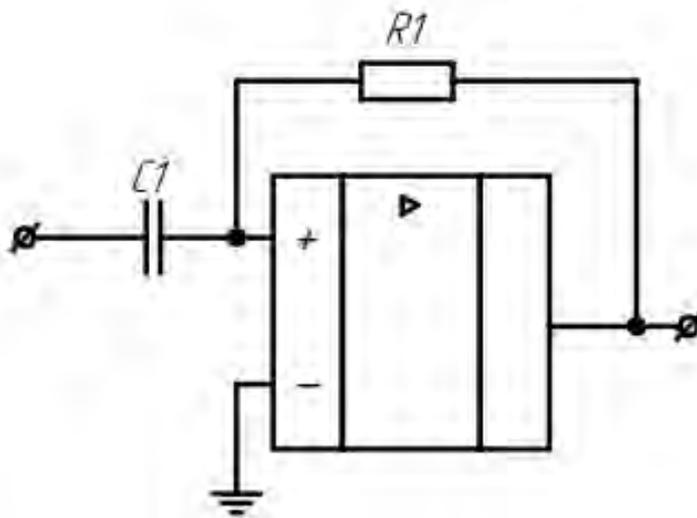


Рис. 4. Схема ПИД-регулятора

Фаззификация, или же использование Fuzzy-контроллера, означает применение нечеткой логики, которая заключается в том, что оператору системы управления не требуется глубокое знание теории автоматического управления и математического моделирования.

Регулятор с нечеткой логикой (Fuzzy Logic Controller, FLC) – это мощный инструмент для управления сложными, нелинейными системами, где традиционные методы (например, ПИД-регуляторы) работают неэффективно [6].

Данный тип регулирования широко применяется в авиационных системах, таких как квадрокоптеры, беспилотники, экспериментальные модели летательных аппаратов. В задачах обработки сигналов, которая сейчас активно применяется в «поисках по изображению» и тяговых двигателях, объединяет все эти системы то, что в них требуется малое время отклика, чаще всего миллисекунды, и тут этим контроллерам сложно найти замену. Данный тип регу-

ляторов является более сложной моделью ПИД-регулятора и используется как раз там, где не справляется ПИД-регулятор или же система слишком сложная.

AI (расшифровка аббревиатуры artificial intelligence – искусственный интеллект/разум) – способность компьютера имитировать человеческие действия и навыки. К примеру, возможность обучаться, решать задачи и т. д. В электроприводе и энергетике подобное применяется с помощью созданных ранее моделей, которые обучаются необходимой информацией для того, чтобы осуществлять регулирование системы. Для данного обучения искусственный интеллект может брать информацию как из сети Интернет, так и только ту информацию, которую ему предоставили на производстве. Все зависит от пожеланий и требований к созданию регулятора или проекта в целом.

Примером данного регулирования будет ИИ-ПИД-регулятор асинхронного двигателя. В то время как

настройка классического ПИД-регулятора выполняется единоразово после первичной установки, наладки и проверки работоспособности при номинальных характеристиках электропривода, а ИИ-ПИД-регулятор способен менять значения отдельно П, И, Д и осуществлять эти замены во времени, базируясь на новых данных, полученных от электропривода на основе ошибки и датчиков, результат которых приходит на ИИ-ПИД-регулятор. Измерения производятся в точности до тысячных, что показывает максимальный коэффициент полезного действия регулирования, который можно получить. Используется чаще всего в системах, где требуется мгновенный отклик и момен-

тальное, точное регулирование, которое может выполняться в реальном времени, но обязательно на базе уже готовых моделей и информации.

Моделирование регуляторов систем управления

Для моделирования характеристик систем необходимо получить передаточные функции и с их помощью численные значения, которые нужны для корректной работы схемы за счет рассчитанного регулятора [7].

На рис. 5–7 представлены структурные схемы П-, ПИ- и ПИД-регуляторов соответственно.

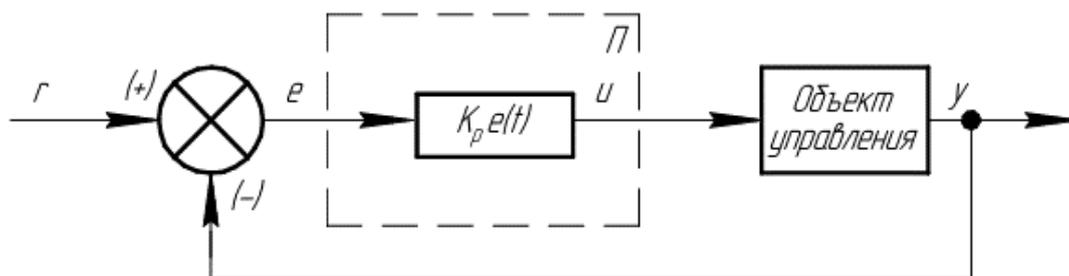


Рис. 5. Структурная схема П-регулятора

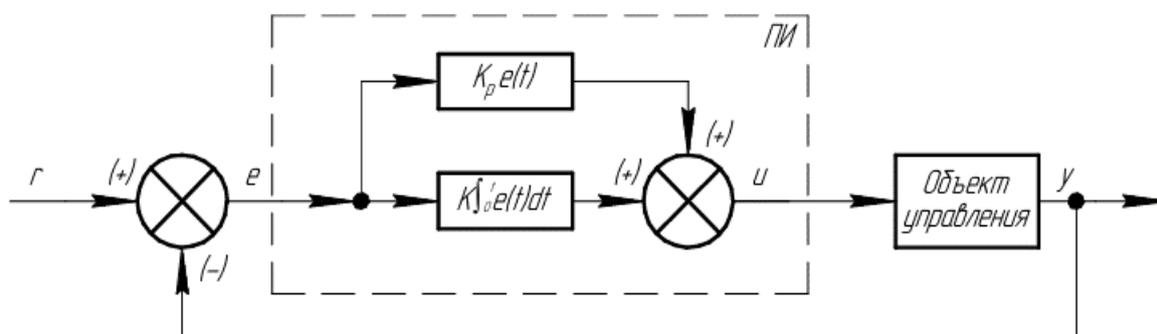


Рис. 6. Структурная схема ПИ-регулятора

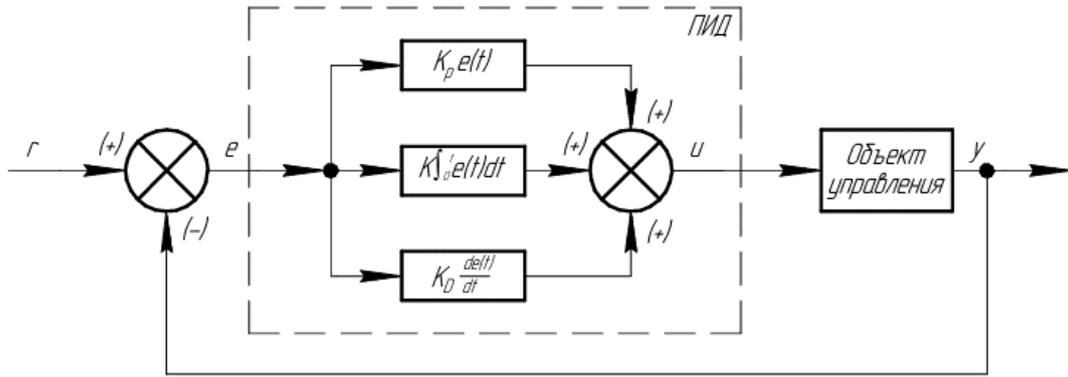


Рис. 7. Структурная схема ПИД-регулятора

Таким образом, расчет и моделирование регуляторов с построением их структурных схем – неотъемлемая часть разработки систем управления, благодаря чему обеспечивается баланс между точностью, устойчивостью и быстродействием замкнутых систем.

На основе рис. 7 произведем мо-

делирование ПИД-регулятора с помощью блоков программного обеспечения MATLAB R2023b (рис. 8).

Получим следующий вид регулятора с уже рассчитанными настройками звеньев для стабилизации системы (рис. 9).

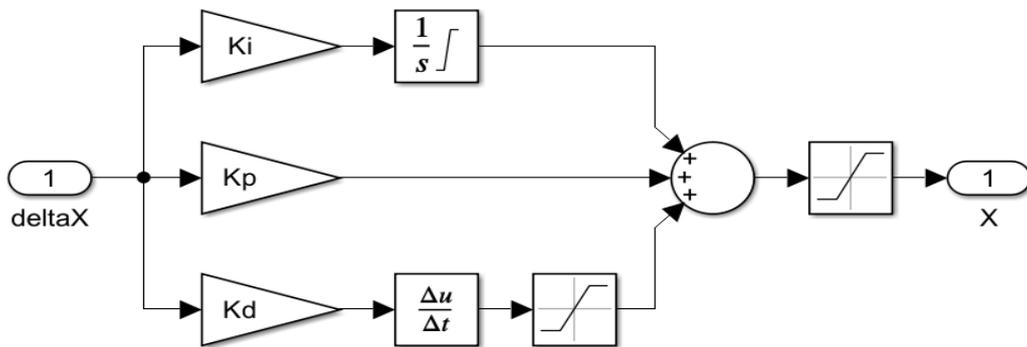


Рис. 8. Модель ПИД-регулятора

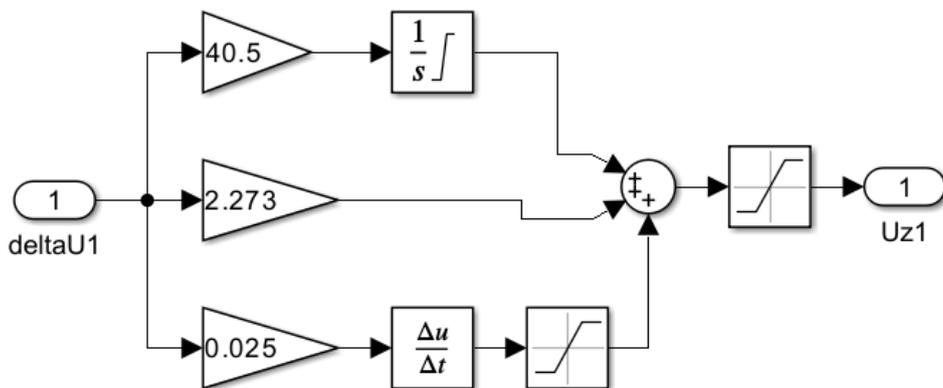


Рис. 9. Модель ПИД-регулятора с выполненной настройкой

Модель системы, в которой используется ПИД-регулятор, представлена на рис. 10.

В данной системе происходит стабилизация скорости асинхронного двигателя посредством применения

ПИД-регулятора, обратных связей по скорости и току [8].

Графики скорости двигателя с настроенным регулятором и без его настройки приведены на рис. 11.

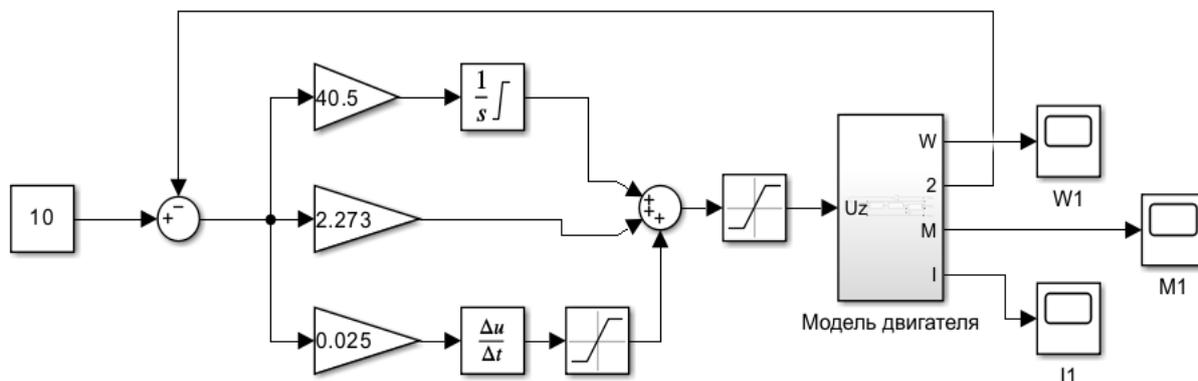
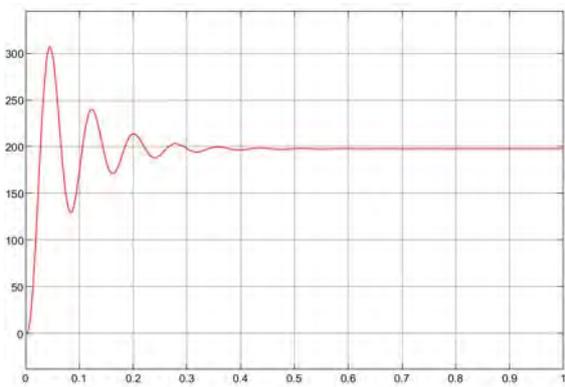


Рис. 10. Модель системы, стабилизированной ПИД-регулятором

а)



б)

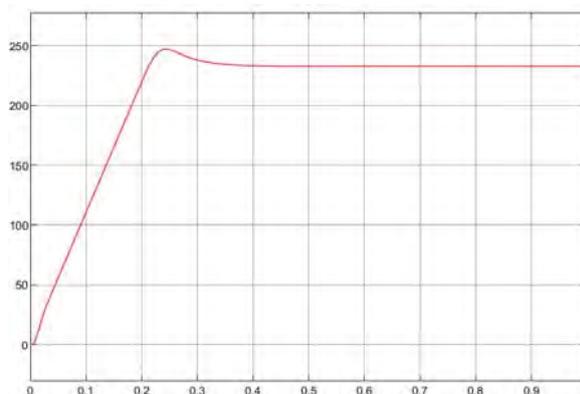


Рис. 11. График скорости двигателя: а – без регулирования; б – с регулированием

По графикам видно, что регулирование позволяет произвести набор скорости до необходимого значения, хоть и происходит длительность переходного процесса, а без регулирования двига-

тель набирает только 1/2 от своей номинальной скорости.

В табл. 1 представим сравнение всех регуляторов.

Табл. 1. Сводная таблица по свойствам регуляторов

| Тип регулятора | Принцип работы | Преимущество | Недостаток | Основная область применения | Типичная отрасль |
|--|--|--|--|--|--|
| Релейный | Формирует ограниченное число управляющих воздействий (2–6 уровней). Работает по принципу включения/выключения при отклонении от уставки | Простота, надежность, низкая стоимость, устойчивость к шумам | Отсутствие плавности регулирования, большие колебания вблизи уставки, износ исполнительных органов | Стабилизация напряжения, защита аккумуляторов, регулирование температуры | Электроэнергетика, автотехника, бытовая техника |
| Кубический | Управляющее воздействие пропорционально кубу ошибки. Используется для малых отклонений | Высокая точность при малых ошибках, устойчивость при слабых возмущениях | Сложность реализации, нестабильность при больших ошибках, редкое применение | Роботизированные системы, позиционирование, управление маломощными приводами | Логистические роботы, сортировщики, манипуляторы |
| П-регулятор | Управляющее воздействие пропорционально ошибке: $u = Kp \cdot e(t)$ | Простота, быстрое реагирование, легко настраивается | Сохраняется статическая ошибка, возможны колебания при большом коэффициенте усиления | Системы с малой инерцией, где допустима остаточная ошибка | Электроприводы постоянного тока, вентиляторы, насосы |
| ПИ-регулятор | Сочетает пропорциональное и интегральное звенья: $u = Kp(e + 1/Ti \int e \cdot dt)$ | Устраняет статическую ошибку, высокая устойчивость, универсальность | Замедленный переходный процесс, возможен эффект насыщения интегратора | Системы с постоянной нагрузкой, процессы стабилизации | Электроприводы, станки с ЧПУ, HVAC, насосные станции |
| ПИД-регулятор | Объединяет пропорциональное, интегральное и дифференциальное звенья: $u = Kp(e + 1/Ti \int e \cdot dt + Td \cdot de/dt)$ | Высокая точность и быстродействие, подавление колебаний, гибкость настройки | Требует сложной настройки, чувствителен к шумам, избыточен для простых систем | Быстродействующие динамические системы, высокоточные приводы | Робототехника, авиация, станочные системы, энергетика |
| Fuzzy-регулятор (нечеткий) | Использует лингвистические правила вида «ЕСЛИ – ТО». Работает на принципах фаззификации и дефаззификации | Не требует точной модели, устойчив при неопределенностях, понятен технологам | Сложность построения базы правил, необходимость настройки функций принадлежности | Нелинейные системы, объекты со сложной динамикой | Авиация, робототехника, тяговые электроприводы, интеллектуальные системы управления |
| AI-регулятор (нейросетевой, нейронечеткий, RL) | Использует методы искусственного интеллекта (нейросети, генетические алгоритмы, reinforcement learning). Обучается по данным и адаптируется в реальном времени | Самообучение, адаптивность, высокая точность, прогнозирование | Требует больших вычислительных ресурсов, сложность интерпретации, необходимость обучения | Интеллектуальные адаптивные системы, предиктивное управление | Электроэнергетика, возобновляемые источники, электромобили, БПЛА, промышленные комплексы |

Заключение

Рассмотрены основные типы регуляторов, используемых в системах автоматического управления, а также их особенности, преимущества и области применения. Проведенный сравнительный анализ показал, что выбор типа регулятора определяется требованиями к точности, быстродействию, устойчивости и сложности управляемого объекта. Простые регуляторы, такие как релейные, кубические и пропорциональные, сохраняют актуальность в технических системах с невысокими требованиями к качеству регулирования и там, где важна надежность и простота конструкции, а также возможность адаптации к новым условиям за счет простой настройки данных регуляторов, но при этом которая влечет временный выход системы из рабочего состояния, в отличие от ПИ- и ПИД-регуляторов. ПИ-

и ПИД-регуляторы остаются наиболее распространенными в промышленности благодаря их универсальности и способности обеспечивать удовлетворительное качество регулирования при сравнительно небольшой сложности настройки.

Нечеткие и AI-регуляторы представляют собой следующий этап развития автоматического управления. Они позволяют решать задачи регулирования в условиях неопределенности, нелинейности и изменяющихся параметров объекта, которые все чаще возникают в современных системах, где контроль параметров является важнейшей задачей. Использование таких систем особенно эффективно в электроприводах, энергетических установках, робототехнических комплексах и других высокотехнологичных отраслях, где требуется адаптивное и интеллектуальное управление.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Медведев, А. М.** Сборка и монтаж электронных устройств / А. М. Медведев. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 328 с.
2. **Чиликин, М. Г.** Теория автоматизированного электропривода : учеб. пособие / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М. : Энергия, 1979. – 616 с. : ил.
3. **Кувшинов, А. А.** Теория электропривода / А. А. Кувшинов. – М. : Академия, 2009. – 352 с.
4. **Чижиков, В. И.** Модели управления техническими системами на основе нечеткой логики : учеб. пособие / В. И. Чижиков, Е. В. Курнасов. – М. : РГУ МИРЭА, 2023. – 77 с.
5. **Демидова, Г. Л.** Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами : учеб. пособие / Г. Л. Демидова, Д. В. Лукичев. – СПб. : НИУ ИТМО, 2017. – 81 с.
6. **Хабаров, С. П.** Основы моделирования технических систем. Среда Simintech : учеб. пособие / С. П. Хабаров, М. Л. Шилкина. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2024. – 120 с. : ил.
7. **Аполонский, В. В.** Методы структурно-параметрического синтеза робастных систем управления состоянием линеаризуемых динамических объектов : монография / В. В. Аполонский, С. В. Тарарькин. – Иваново : ИГЭУ, 2018. – 168 с.
8. **Тугашова, Л. Г.** Моделирование объектов управления в MatLab / Л. Г. Тугашова, А. В. Затонский. – 3-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2023. – 144 с.

Статья сдана в редакцию 29 октября 2025 года

Контакты:
tatyana.larkina.2015@yandex.ru (Ларькина Татьяна Сергеевна);
radua.nono.00@gmail.com (Казakov Павел Васильевич);
danila.studnev@gmail.com (Студнев Даниил Юрьевич).

T. S. LARKINA, P. V. KAZAKOV, D. Y. STUDNEV

ON THE ISSUE OF PID CONTROLLER TUNING TO OPTIMAL PARAMETERS FOR REGULATING MULTI-LOOP SYSTEMS

Abstract

The article considers options for calculating PID controller settings for further regulation of automatic control systems and its placement in the models. The Matlab Simulink and KOMPAS-3D software programs were used to implement this task.

Keywords:

automatic control system, modeling, MATLAB Simulink, PID controller.

For citation:

Larkina, T. S. On the issue of PID controller tuning to optimal parameters for regulating multi-loop systems / T. S. Larkina, P. V. Kazakov, D. Y. Studnev // *Belarusian-Russian University Bulletin*. – 2026. – № 1 (90). – P. 65–75.