

Нейросетевой блок ПИД-регулятора корректировки настройки параметров гидроагрегата лесной машины

Елена В. Головина, GolovinaEV@volgatech.net

Александр И. Павлов, PavlovAI@volgatech.net

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д.3, г. Йошкар-Ола, 424000, Российская Федерация

Аннотация

Корректировка настройки системы управления мощностью гидроагрегата лесной машины можно производить через ПИД-регулятор. В случае обнаружения неисправного состояния гидроагрегата блок вносит изменения в систему управления. Поэтому целью исследования стало повышение надежности гидроманипуляторов лесных машин путем внедрения нейросетевого блока ПИД-регулятора в управление гидроманипулятором форвардера. К методам исследования относятся методы моделирования системы автоматического управления в контурах с обратной связью для автоматического поддержания параметров процесса в гидроприводах лесных машин. Результатом исследования будет программа для управления работой гидроаппаратов манипулятора форвардера через управляющие сигналы, формируемые ПИД-регулятором. При выборе оптимальных коэффициентов ПИД-регулятора для оптимизации работы автоматической системы управления давлением сигналы будут контролировать, регулировать и изменять отклонения характеристик системы, что повышает надежность работы гидроманипулятора. Существуют различные подходы к моделированию и разработке интеллектуальных гидравлических систем, что может привести к трудностям в совместимости и взаимодействии различных компонентов и устройств. Очень часто ученые опираются в моделировании процессов через программаторы вида MATLAB. Но использование самого контроллера и его программного обеспечения в ПИД-регулировании параметров гидравлического привода лесной машины практически остается не исследованным, поэтому данная тема является актуальной. В данном исследовании возможность применимости ПИД-регулирования состояния параметров системы (давления через открытие дроссельного сечения) через программу контроллера ПЛК ОВЕН160 CODESYS V2.3 позволяет уменьшить колебания системы и увеличить скорость исправления ошибки в гидросистеме, подводя текущие значения давления к уставке, что повышает надежность лесной машины.

Ключевые слова: гидропривод, управляющая программа CODESYS V2.3, нейросетевой блок, надежность, коэффициенты ПИД-регулятора.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Головина, Е. В. Нейросетевой блок ПИД-регулятора корректировки настройки параметров гидроагрегата лесной машины / Е. В. Головина, А. И. Павлов // Лесотехнический журнал. – 2025. – № 2 (58). – С. 174-190. – Библиогр.: с. 186-190 (28 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/11>.

Поступила 12.02.2025. Пересмотрена 24.04.2025. Принята 26.05.2025. Опубликовано онлайн 26.06.2025.

Neural network block of PID controller for adjusting the control system settings of a forest machine hydraulic unit

Elena V. Golovina, GolovinaEV@volgatech.net

Alexander I. Pavlov, PavlovAI@volgatech.net

Volga Region State Technological University, Lenin Square, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

Abstract

The adjustment of the forest machine hydraulic unit power control system can be made through the PID controller. If a hydraulic unit malfunction is detected, the block makes changes to the control system. Therefore, the aim of the study was to increase the reliability of forest machine hydraulic manipulators by introducing a neural network PID controller block into the control of the forwarder hydraulic manipulator. The research methods include methods for modeling the automatic control system in feedback loops for automatically maintaining process parameters in forest machine hydraulic drives. The result of the study will be a program for controlling the operation of the forwarder manipulator hydraulic devices through control signals generated by the PID controller. When selecting the optimal PID controller coefficients to optimize the operation of the automatic pressure control system, the signals will monitor, regulate and change the deviations in the system characteristics, which increases the reliability of the hydraulic manipulator. There are various approaches to modeling and developing intelligent hydraulic systems, which can lead to difficulties in the compatibility and interaction of various components and devices. Very often, scientists rely on MATLAB-type programmers in modeling processes. But the use of the controller itself and its software in PID control of the parameters of the hydraulic drive of a forest machine remains practically unexplored, so this topic is relevant. In this study, the possibility of applicability of PID control of the state of the system parameters (pressure through the opening of the throttle section) through the PLC controller program OWEN160 CODESYS V2.3 allows to reduce system oscillations and increase the speed of error correction in the hydraulic system, bringing the current pressure values to the setpoint, which increases the reliability of the forest machine.

Keywords: hydraulic drive, control program CODESYS V2.3, neural network block, reliability, PID controller coefficients.

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Golovina E. V., Pavlov A. I. (2025) Neural network block of PID controller for adjusting the settings of forest machine hydraulic unit parameters. Forestry Engineering journal, Vol.15, No. 2 (58). pp. 174-190 (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.2/11>.

Received 12.02.2025. *Revised* 24.04.2025. *Accepted* 26.05.2025. *Published online* 26.06.2025.

Введение

ПИД-регулятор – это механизм, используемый в управляющих контурах с обратной связью для автоматического поддержания некоторого параметра процесса на определённом уровне.

На контроллер подается входной сигнал от датчиков, в результате на базе полученных данных происходит сравнение текущей регулируемой величины с заданным значением (уставкой). На основе их разницы алгоритм будет вычислять управляющий сигнал и отправлять его к исполнительному механизму.

Управляющий сигнал, формируемый ПИД-регулятором, представляет собой сумму трёх составляющих:

1) Пропорциональная составляющая. При разнице заданного значения параметра и его фактического устанавливается пропорциональный сигнал данному отклонению. Чем больше отклонение характеристики, тем выше формируемый сигнал.

2) Интегральная – пропорциональна интегралу по времени от отклонения величины контролируемой характеристики.

3) Дифференциальная, которая увеличивается и уменьшается пропорционально скорости изменения контролируемого параметра.

Функциональная схема измерителей–регуляторов представлена на рис. 1, где логические устройства формируют управляющие сигналы для выходных устройств, выходные устройства служат для передачи регистрирующих или управляющих сигналов на исполнительные механизмы.

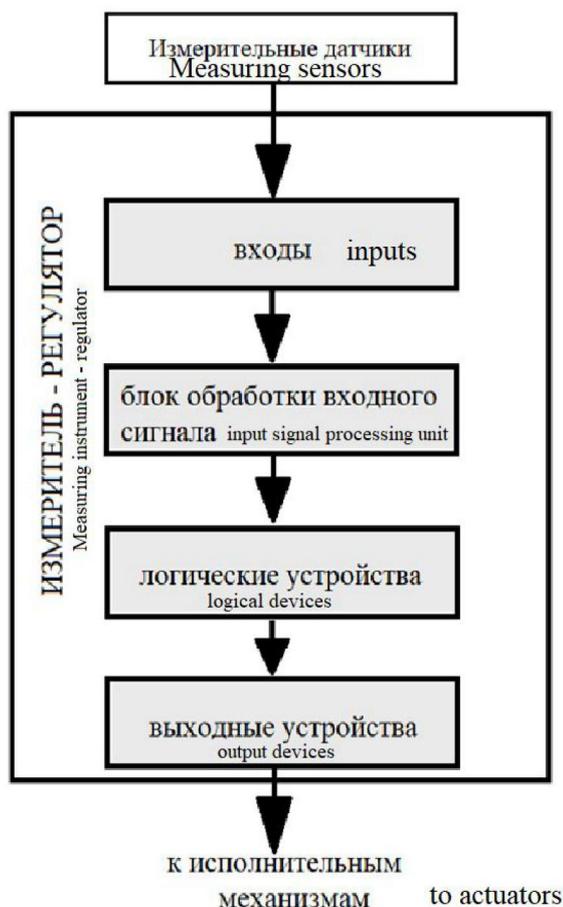


Рисунок 1. Функциональная схема измерителей–регуляторов

Figure. 1. Functional diagram of measuring controllers

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Исследованию применения нейронной сети на основе ПИД-регулирования в управлении гидравлических приводов посвящено множество проводимых исследований в рамках технических наук. А вопросы автоматизации и интеллектуализации привлекают внимание большого количества исследователей, среди которых есть как зарубежные (Э. Альмодареси, Ф. Зишан, Лю Сяозэр, М.Я. Кошкун и др), так и отечественные (А.Г. Баханович, В.В. Денисенко, М.В. Бураков, К.А. Труханов и др.). Причем, основное внимание зарубежных исследователей направлено на сравнительный анализ различных реализаций генетического алгоритма для оптимизации

технологической системы. Ф. Зишан и Э. Акбари и др. (2022) [1] при исследовании эффективной системы ПИД-регулирования для стабилизации частоты в независимой микросети применили гибридный алгоритм PSO-GSA. Данный метод позволяет определить целевую функцию с учетом времени и изменений частоты системы, а поиск параметров сводится в задачу оптимизации. Аналогичное исследование провел Barakat M. (2022) [2], предложив двухзональный блок без повторного нагрева, который был протестирован в условиях нелинейности нечувствительной зоны регулятора.

Chotikunann P. и Chotikunann R. (2023) [3] представили архитектуру ПИД-контроллера с двойным контуром, которая направлена на повышение производительности системы за счет уменьшения перерегулирования и экономии электроэнергии. Использование ошибки в реальном времени и однократной задержки приводит к корректировке коэффициентов регулятора и появляется возможность более четкой работы системы.

Almodaresi E. и Vozorg M. (2017) [4] в своих исследованиях предложили метод Д-разложения для ПИД-регулирования процессов разомкнутой системы через теоретические модели. Применяя метод пространственных параметров для вычисления устойчивых областей коэффициентов регулятора. Преимуществом данного метода является то, что для построения границ устойчивости нет необходимости изменения коэффициента усиления ПИД-регулятора.

Интеллектуальный ПИД-регулятор, представленный в исследованиях Coskun M.Y. и İtik M. (2023) [5], превосходит даже оптимизированный ПИД-регулятор для позиционного управления нелинейной электрогидравлической системой с неопределенными характеристиками клапанов и колебаниями давления в системе подачи. Также было предложен контроллер ANFIS для отслеживания усилия с помощью численного моделирования.

В исследовании же отечественных авторов в области нейронных сетей и ПИД-регуляторов в компьютерном управлении технологическим процессом, экспериментом и оборудованием можно выделить работу Посметьева В.И., Никонова В.О.

(2023) [6]. В своей статье «Компьютерное моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда» через математическую модель и компьютерную программу работы гидравлического манипулятора позволили оценить рекуперированную энергию и амплитуду раскачивания перемещаемого груза. Это позволило повысить точность и автоматизацию процессов управления гидроприводом. Палкин Г.А. и Гайсин А.Ф. (2021) [7] в своей работе выделяют важным фактором для поддержания оптимальной уставки подачи насоса использование ПИД-регулятора, имитационная модель которого была эффективно проверена, а предложенная концепция управления участком первого подъема показали высокую технико-экономическую эффективность. Баханович А.Г. и др. (2017) [8] в своем исследовании по применению программно-аппаратной платформы пневматического привода регулятора топливного насоса высокого давления реализовали использование ПИД-регулятора непрерывного действия. Разработанная стратегия дает возможность в режиме реального времени отследить отклонение регулируемого параметра от заданной величины и практически мгновенно выработать управляющее воздействие на исполнительные механизмы для устранения этого отклонения.

Балобанов Е.Н. и Емельянова М.С. (2022) [9] в своей исследовательской работе «К вопросу разработки системы управления гидравлической машиной для проведения циклических испытаний металлических образцов» на базе 32-битного микроконтроллера разработали ПИД-регулятор, контролирующий циклические процессы при работе пары «гидроцилиндр – сервоклапан», а также дали практические рекомендации по быстродействию ПИД-регулятора.

Куликова И.В. (2021) [10] в своем исследовании для нечеткого регулирования параметрами системы предложила математическую модель регулятора типа Такаги-Сугено-Канга нулевого и первого порядков. С помощью генератора случайных чисел реализуются некоторые операции генетического алгоритма через авторскую программу.

Для повышения энергетической эффективности объемных гидроприводов технологических машин и оборудования Кожухова А.В. и Невзорова М.Ю. (2016) [11] также предложили применение частотного преобразователя для бесступенчатого регулирования скорости движения выходного звена, что предопределяет легкое регулирование, экономичность и возможность создания авторегулируемого гидропривода

Труханов К.А. (2018) [12] в своем исследовании «Цифровой ПИД–регулятор для пневмо- и гидросистем» доказал эффективность реализации цифрового ПИД–регулятора для управления пневмо/гидросистемой. В его исследовании приведена блок-схема аналоговой и цифровой систем управления с пропорциональным пневмораспределителем. Качество данных систем оценивалось во временной области переходного процесса и максимальной динамической ошибкой.

В своей статье «Идентификация нелинейной системы управления с ПИД–регулятором» Прокопьев А.П., В.И. Иванчура и др. (2015) [13] на основе модального метода разработали методику синтеза ПИД–регулятора нелинейной системы управления. В их исследовании было доказано, что в системе управления с гидравлическим приводом с имеющимися признаками нелинейности необходимо отсутствие перерегулирования.

Как говорилось ранее, существуют различные подходы к моделированию и разработке интеллектуальных гидравлических систем, отраженные в исследованиях Алёхина М. В., Петросяна А. Е. и др. (2017) [14], Гулай В. А., Дубовик А. В и др. (2024) [15], Filo G (2023) [16], Мирзалиева С. А. и Шарипова К.Л. (2019) [17], Пастухова И. С. и Целищева В. А (2020) [18], Санталова А. А. (2021) [19], Фрянова В. Н. и Павловой Л. Д. (2016) [20], Хиникадзе Т. А., Рыбак А. Т. и др. (2021) [21], Яковлева А. Ю., Красной А. А. и др. (2021) [22], Thai N. H. (2022) [23], Yang X. и др. (2024) [24], что может привести к трудностям в совместимости и взаимодействии различных компонентов и устройств. В исследованиях ученых Хропакова Д. И. (2019) [25], Голякевич С. А., Горонковский А. Р. и др. (2019) [26] говорится о моделировании данных процессов через программаторы вида MATLAB.

В данной работе цель исследования достигается через решение задачи поиска коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора. Наиболее приемлемым методом нахождения считается метод Циглера–Никольса, о котором говорится в исследованиях Попадьяина А.Н. в статье «Автоматизированная настройка ПИД–регулятора для управления следящим приводом с использованием программного пакета MATLAB SIMULINK» [27].

Предполагается осуществлять ПИД–регулирование через управляющую программу в среде программирования CODESYS V2.3 для ПЛК ОВЕН160 на языке программирования SFC. Согласно этой программе нейросетевой блок ПИД–регулятора способен корректировать настройки системы управления мощностью гидроагрегата лесной машины через изменение давления.

В случае обнаружения неисправного состояния гидроагрегата блок вносит изменения в систему управления, повлияв на ошибку. Тем самым ПИД–регулятор, внедренный в систему управления гидравлическим приводом, позволяет улучшить его динамические свойства и повысить надежность всей системы.

Адекватность работы модели нейросетевого блока ПИД–регулятора через среду программирования CODESYS проверяется в режиме эмуляции в авторской компьютерной программе, а реализацию проекта в лабораторных условиях предполагается выполнить в ближайшее время.

Материалы и методы

В данной работе подразумевается применение нейронной сети через определение текущего состояния гидроагрегата и через прогнозирование технического состояния для уменьшения или увеличения управляющего сигнала, поддерживающего параметры гидроагрегата. Именно таким образом, в случае обнаружения неисправного состояния производится корректировка настроек системы управления гидравлическим распределителем.

В качестве входных параметров ПИД–регулятора выступают данные от датчиков давления

и расхода жидкости. В качестве выходных параметров – управляющие сигналы на электромагниты пропорционального гидравлического распределителя с электромагнитным управлением РЭМ120. Регулятор формирует выходной управляющий сигнал для электромагнита распределителя.

ПИД-регулятор, отмеченный в Глоссарии [28] вырабатывает выходной сигнал, который рассчитывается по следующей формуле:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \cdot \left[E_i + \tau_d \cdot \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{\text{изм}}} + \frac{1}{\tau_i} \sum_{i=0}^n E_i \Delta t_{\text{изм}} \right] \cdot 100\%, \quad (1)$$

где X_p – полоса пропорциональности; E_i – рассогласование; τ_d – постоянная времени дифференцирования; ΔE_i – разность между двумя соседними измерениями E_i и E_{i-1} ; $\Delta t_{\text{изм}}$ – время между двумя соседними измерениями t_i и t_{i-1} ; τ_i – постоянная времени интегрирования; $\sum_{i=0}^n E_i$ – накопленная в i -й момент времени сумма рассогласований (интегральная сумма).

Внедрение в систему управления гидравлического привода манипулятора лесной машины ПЛК ОВЕН, а также датчиков обратных связей, позволяет внести высокую точность в регулировании давления гидроаппаратуры.

Из формулы (1) пропорциональное регулирование (П-закон) раскрывает пропорциональную зависимость выходного сигнала Y_i регулятора от величины рассогласования E_i , представлена в формуле:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \cdot E_i \cdot 100\%. \quad (2)$$

Полоса пропорциональности X_p , как и отклонение E_i , выражается в единицах контролируемого параметра (в нашем случае это давление). Чем шире полоса пропорциональности X_p , тем меньше величина выходного сигнала Y_i при одном и том же отклонении E_i .

Дифференциальная часть в формуле (1) отвечает за единичное возмущение внутри импульса ШИМ-сигнала.

Перед исследованием была поставлена задача, решить ее предполагается через составление кода программы управления.

Гидравлический распределитель РЭМ120 с электроприводом и пропорциональным управлением. С открытием дроссельного сечения канала распределителя увеличивается давление рабочей жидкости в системе. Чем больше сечение пропускного канала, тем выше давление в системе, и тем выше усилие, создаваемое рабочим гидроцилиндром.

Время полного открытия или закрытия сечения – 0,5 с.

Измерения усилия штока цилиндра производятся с помощью тензOMETрического датчика.

Оператор вручную выводит систему на нужную ступень нагружения, используя для управления необходимые кнопки.

Но вместо оператора создан автоматический ввод на заданную точку с помощью ПЛК ОВЕН160.

С увеличением давления рабочей жидкости отклик системы становится более динамичным. При этом для нагружения 1500, 3000, 4500 кгс необходимо достаточно долго удерживать кнопку на закрывание сечения, это дает максимальное приближение к требуемой точке.

На последних ступенях нагружения (12000, 13500, 15000 кгс) даже быстрое нажатие приводит к существенному увеличению усилия в гидроцилиндре.

Основное усилие в изменение сигнала управления давлением в гидросистеме дает пропорциональное управление. Именно его считают главной движущей силой в контроллере. Сигнал на выходе контроллера изменяется пропорционально ошибке. Необходимо обратить внимание на то, что увеличение ошибки, приведет к пропорциональному возрастанию управляющего действия сигнала и при слишком большом усилии регулятора X_p произойдут резонансные колебания системы, возникнет угроза неустойчивости системы. Но и низкое усиление регулятора тоже может дать неадекватную реакцию контроллера на изменение параметра регулирования и уставки.

Для получения графиков ПИД-регулятора и оценки соответствия программы управления гидравлическим приводом использовалась среда программирования MATLAB Simulink. В этой среде

есть универсальный блок PID Controller, позволяющий в режиме визуализации наблюдать за изменением свойств объекта. Изменив параметры системы через значения переменной процесса, а также сигналы контроллера, можно увидеть с помощью графиков поведение ПИД – регулятора на данное возмущение.

На рисунке 2 показано как при изменении параметра и действия в результате контроллера величина ошибки не уменьшается до величины уставки (заданного значения, которое должен поддерживать регулятор в автоматическом режиме, т.е. число, к которому регулятор должен привести текущее значение с датчика).

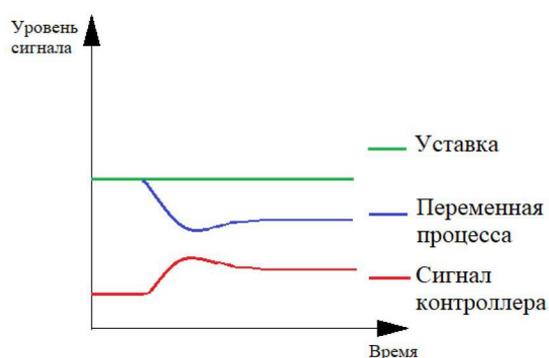


Рисунок 2. Отклик П–регулятора на возмущение
Figure 2. Response of the P-controller to disturbance
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

На рисунке 2 видно, что пропорциональная часть контроллера не дает автоматически сбросить ошибку, поэтому используют интегральный режим управления. Как только переменная процесса будет находиться в заданном интервале значений, интегральная часть контроллера без участия человека сбросит имеющуюся ошибку через увеличение или уменьшение выходного сигнала. Как показано на рисунке 3 контроллер через интегральную часть увеличивает выходной сигнал и стремится вернуть параметр давления к заданному значению на выходе. Увеличение или уменьшение сигнала будет происходить с высокой скоростью, если ошибка

принимает большое значение, и медленно – при малом значении ошибки.

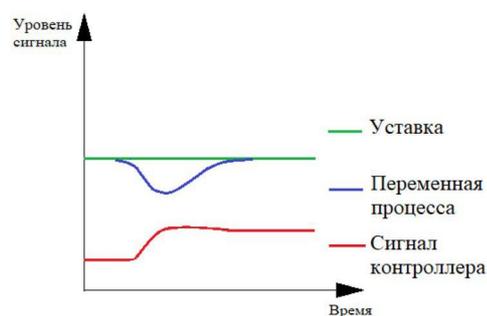


Рисунок 3. Отклик ПИ–контроллера на возмущение
Figure 3. PI controller response to disturbance
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Для ПИ–контроллера нужно учитывать интервалы времени интегрирования, потому что при длительных – контроллер будет реагировать медленно, а короткие приведут к колебаниям контура и к нестабильности системы. Автоматически контроллер будет исправлять сигнал до тех пор, пока смещение не исчезнет полностью.

Дифференциальный контроль приведет к более быстрой реакции системы на исправление ошибки. Это так называемое управление по скорости. На случай, если ошибка не меняется во времени, дифференциальная составляющая формулы (1) будет равна нулю. Поэтому для управления давлением системы данную составляющую контроллера применяют редко. Как и для ПИ–регулятора у дифференциальной части есть свои исключения: если настройка τ_d будет установлена слишком большой, то будут возникать колебания и контур управления станет нестабильным.

Алгоритм неинтерактивного (идеального) ПИД–регулятора представлен на рисунке 4 и соответствует работе согласно формуле (1). Благодаря дифференциальному режиму обеспечивается большее и быстрое управляющее воздействие, чем при управлении только П– или ПИ–регулированием.

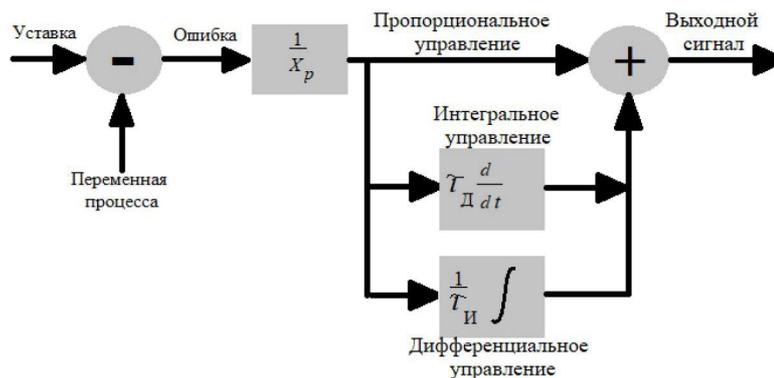


Рисунок 4. Алгоритм работы идеального ПИД–регулятора

Figure 4. Algorithm of operation of an ideal PID controller

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Результат применения ПИД–управления параметрами системы для уменьшения влияния возмущения и сокращения времени возврата к заданному значению продемонстрирован на рис. 5.

Алгоритм работы ПИД–регулятора:

1. ПИД–регулятор с определенной периодичностью опрашивает текущее значение и вычисляет рассогласование. Ошибка (рассогласование) вычисляется как разность задания и текущего значения усилия.

При написании программы управления, часть которой представлено на рисунке 6, использовались функциональные блоки для таймера временных ШИМ–сигналов и для нахождения разницы между соседними измерениями рассогласования.

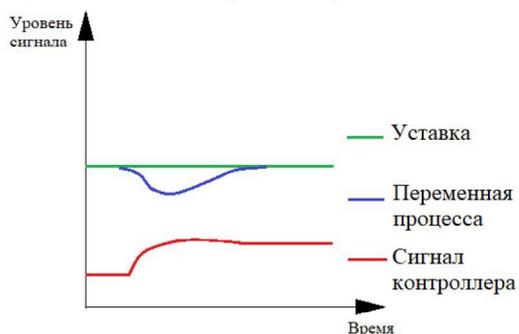


Рисунок 5. Реакция ПИД–контроллера на возмущение

Figure 5. PID controller response to disturbance

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Функции памяти опираются на блоки триггеров по заднему и переднему фронтам для включения и выключения переменной, когда происходит прекращение сигнала.

Блоки «Delta» и «Delta_last» – это рассогласования на данном и предыдущем шаге. Они в программе продемонстрированы функциональными блоками на вычитание, что показано на рисунке 7.

Через остальные блоки программируются остановки и разрешения интегрирования переменной.

Дифференциальная часть уравнения представлена на рисунке 8.

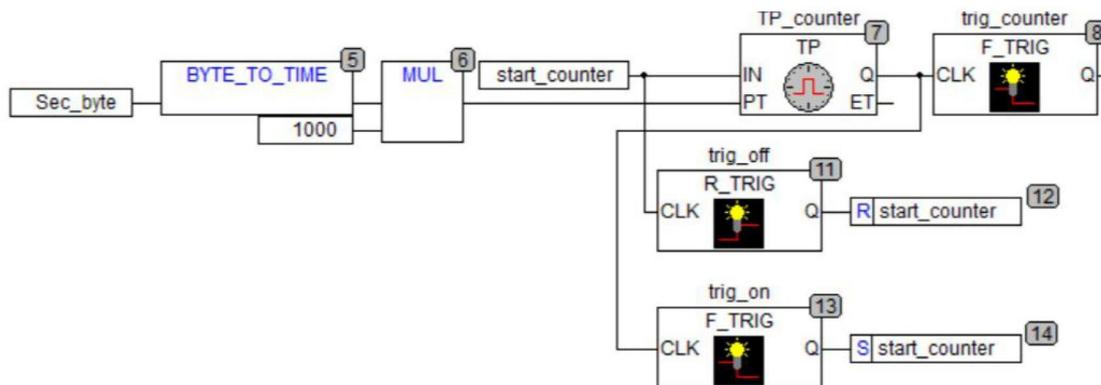


Рисунок 6. Часть управляющей программы для нахождения разницы между соседними рассогласованиями и таймера временных сигналов

Figure 6. Part of the control program for finding the difference between adjacent mismatches and the timer of time signals

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

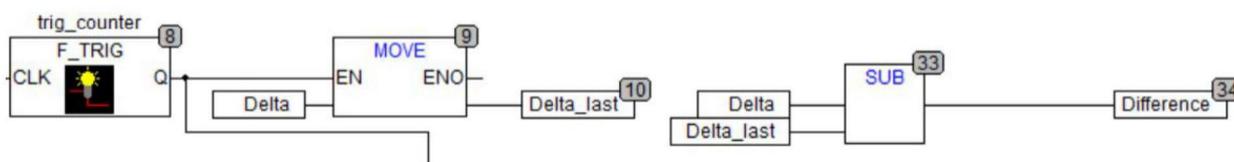


Рисунок 7. Часть программы с функциональными блоками рассогласования

Figure 7. Part of the program with functional blocks of mismatch

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

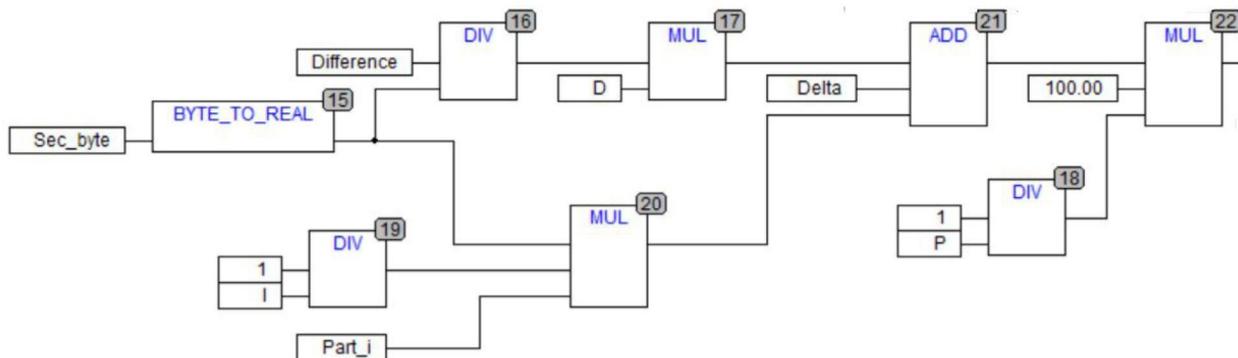


Рисунок 8. Дифференциальная часть управляющей программы

Figure 8. Differential part of the control program

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

2. Если рассогласование не находится в зоне нечувствительности, то вычисляется пропорциональная составляющая.

Для П-регулятора если рассогласование находится в зоне нечувствительности, то пропорциональная составляющая и выход равны нулю. В программе эту функцию выполняют блоки LT и GT, а

также блок LIMIT, представленные в части программы на рисунке 9. Поэтому при высоком значении параметра, интегральная часть отключается. Блок LIMIT в программе COESYS используется для ограничения значений. Если значение входного сигнала выше верхнего предела, то LIMIT «возвращает» max предел, а если меньше нижнего предела – min.

Блок преобразования сигнала LIN_TRAFO, представленный на рисунке 10, который линейно преобразует значения входных величин для линейного приближения выходного значения. С его помощью преобразуются значения с датчика давления в вольтах (вход IN) в значения давления в МПа (выход OUT).

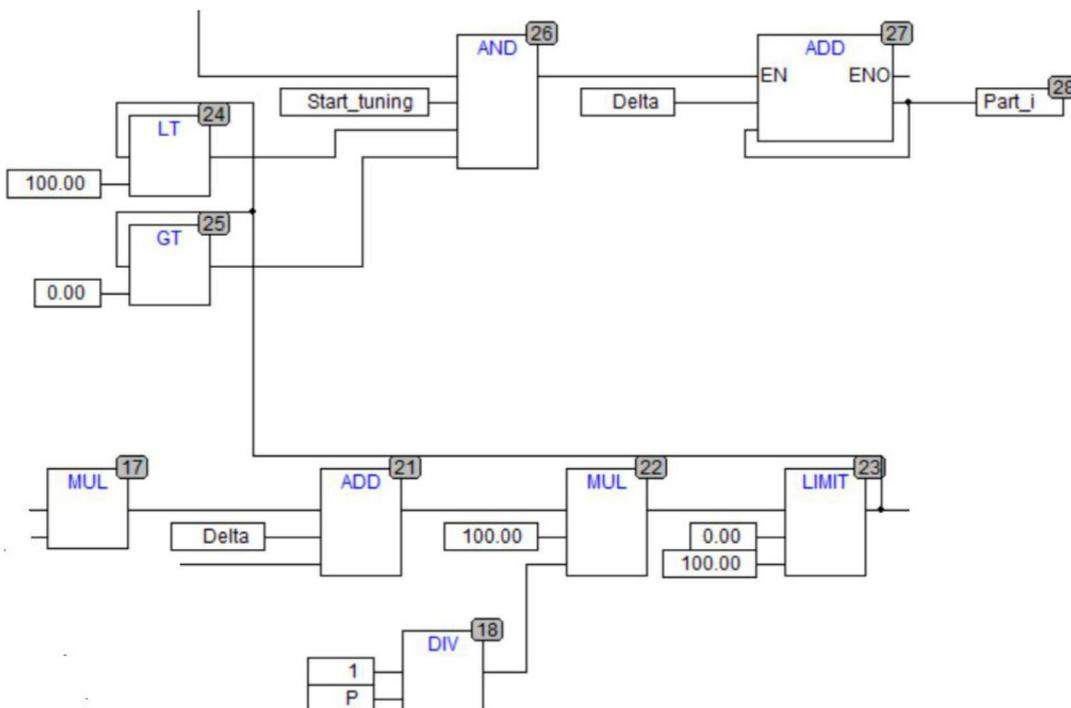


Рисунок 9. Часть программы, влияющая на работу интегральной части уравнения с зонами чувствительности
 Figure 9. Part of the program that affects the operation of the integral part of the equation with sensitivity zones

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



Рисунок 10. Функциональный блок LIN_TRAFO в программе по преобразованию сигнала

Figure 10. Functional block LIN_TRAFO in the signal conversion program

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

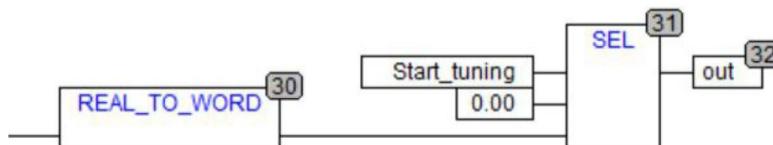


Рисунок 11. Функциональный блок SEL в управляющей программе

Figure 11. SEL functional block in the control program

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

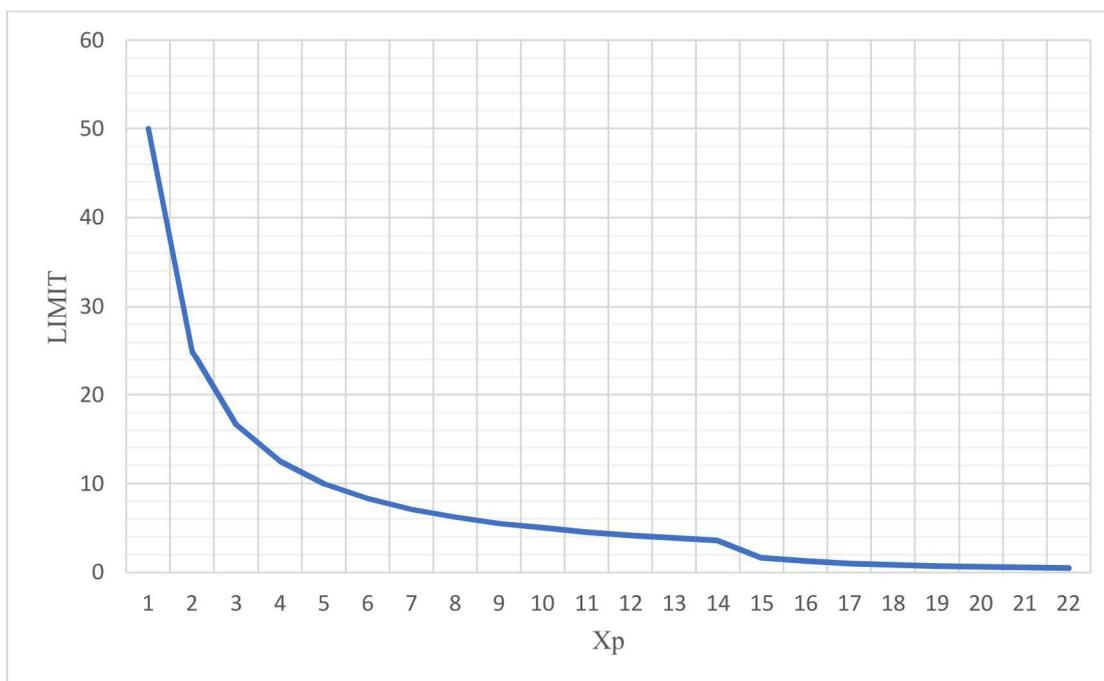


Рисунок 12. График зависимости отклонения от коэффициента X_p

Figure 12. Graph of the dependence of the deviation on the coefficient X_p

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

3. В зависимости от знака, запускается таймер открытия или закрытия дроссельного отверстия распределителя, где задание таймеров – модуль (абсолютное значение) Y_i . Если $Y_i = 0$, то таймеры не запускаются.

В качестве предохранителя будет играть функциональный блок SEL, представленный на рисунке 11. Эта функция, которая выбирает один из двух входов в зависимости от значения первого входа.

4. Выходы таймеров связаны выходными битами на открытие и закрытие канала распределителя.

Настройка коэффициентов ПИД-регулятора.

Подбор коэффициентов можно провести через метод Циглера–Никольса. Для этого необходимо обнулить все коэффициенты регулятора τ_d и τ_i , задать целевое значение регулируемого параметра (его взяли 25 МПа).

Постепенно увеличивая пропорциональный коэффициент X_p и контроль за реакцией системы, дал результаты, представленные на рис. 12 в виде

графика зависимости отклонения от подбора коэффициента X_p .

Как видно на графике при значении $X_p=14$ возникло резкое падение регулируемой величины. Зафиксировали это значение, а также период колебаний системы.

Максимальное количество корректировок коэффициентов ограничено 10. При настройке учитывается шаг корректировки коэффициентов.

Значение коэффициента интегральной компоненты $\frac{1}{\tau_i}$ должно быть мало по сравнению с X_p . В качестве начального значения рекомендуется брать число от 0,0001 до 0,01. При проведении эксперимента был найден подходящий коэффициент $\tau_i = 30$, при котором начинаются устойчивые незатухающие колебания.

На базе этих коэффициентов и ввели дифференциальную компоненту. Для начала установили небольшое значение (например, $\tau_d = 1$), а после подбирали такое, после которого проявились ошибочные колебания, вызванные малыми шумами. Это как раз получилось значение равное $\tau_d = 1$.

Обсуждение

ПИД-регулятор достаточно прост в реализации управления работой гидравлическим распределителем.

Найденные коэффициенты позволяют работать ПИД-регулятору со входными величинами (сигналом ошибки и значением выходного сигнала), принимающими непрерывные значения.

Таким образом, управляя ШИМ-сигналом по заданной программе, контроллер изменяет величину открытия дроссельного сечения золотникового пропорционального распределителя для управления давлением на выходе.

При использовании в системе П-компонента давление нарастает без ограничений и контроллер не успевает уменьшить выходной сигнал. При использовании ПИ-компонента в программе позволяет устранять систематические ошибки в расхождении, но при этом возникают колебания в контуре управления, это видно при запуске программы в режиме эмуляции. Программа записана в авторском исполнении. ПИД-регулятор уменьшает колебания системы и увеличивает скорость исправления

ошибки в гидросистеме, подводя текущие значения давления к уставке.

Для реализации настройки ПИД-регулятора частотного преобразователя для гидравлических систем лесных машин предполагается использовать эмпирический метод. На физической модели гидравлического манипулятора – это исследовательского комплекса «Гидравлический перегрузочный манипулятор» СГУ-ГПМ ФГБОУ ВО «ПГТУ» г. Йошкар-Ола. Из полученной модели ПИД-регулятора можно иметь уже представление о том, как система функционирует и как реагирует на изменения, чтобы манипуляции не носили хаотичный случайный

Заключение

Универсальность ПИД-регулятора дает широкий круг его применения в тех областях, в которых требуется автоматизированное управление.

Хотя существует множество других регуляторов, ПИД, в отличие от них, обладает стабильностью и адаптивностью к управляемой системе. Кроме этого, он имеет простую настройку и универсальность для любого изменяющегося процесса.

1) Для реализации настройки коэффициентов ПИД-регулятора частотного преобразователя гидравлических систем лесных машин эффективно применяются нейронные сети, которые для каждого набора сигналов вырабатывают коэффициенты регулятора.

2) Из полученной модели ПИД-регулятора можно иметь уже представление о том, как система функционирует и как реагирует на изменения, чтобы манипуляции не носили хаотичный случайный характер.

3) В качестве перспективы предполагается использовать исследовательский комплекс «Гидравлический перегрузочный манипулятор» СГУ-ГПМ ФГБОУ ВО «ПГТУ» г. Йошкар-Ола как физическую модель манипулятора, работающую на программе ПИД-регулирования и использующую нейронные сети.

Список литературы

1. Zishan F., Montoya, O.D.; Giral-Ramírez, D.A.; Molina-Cabrera, A. Efficient PID Control Design for Frequency Regulation in an Independent Microgrid Based on the Hybrid PSO-GSA Algorithm. *Electronics*, 2022; 11: 3886. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11233886>.
2. Barakat, M. Optimal design of fuzzy-PID controller for automatic generation control of multi-source interconnected power system. *Neural Comput & Applic*, 2022; 34: 18859–18880. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07470-4>.
3. Chotikunnan P., Chotikunnan R. Dual design PID controller for robotic manipulator application. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2023; 4 (1): 23-34. DOI: <https://doi.org/10.18196/jrc.v4i1.16990>.
4. Almodaresi E., Bozorg M. Stable regions in the space of PID controller coefficients. *IET Control Theory & Applications*. 2017; 11: 1642–1647. DOI: <https://doi.org/10.1049/ict-cta.2016.0685>.
5. Coskun M.Y., İtik M. Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system. *ISA transactions*, 2023; 139: 484–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.04.005>.
6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Зеликов В.А., Колодий П.П. Компьютерное моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда. *Лесотехнический журнал*. – 2023; – Т.13. – №2 (50). – С. 158–178. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>. Режим доступа: <http://lestehjournal.ru/journal/2023/no-2-50/kompyuternoe-modelirovanie-rekuperativnogo-krivoshipnogo-mehanzima-povorota>
7. Палкин Г.А., Гайсин А.Ф. Исследование оптимального метода управления электроприводами насосов первого подъема, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – №23. – Т. 3. – С. 194-208. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208>. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-optimalnogo-metoda-upravleniya-elektroprivodami-nasosov-pervogo-podema-ekspluatiruemyh-v-usloviyah-otritsatelnyh>.
8. Баханович Г. и др. Электронное управление топливopодачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования. *Наука и техника*. – 2017. – Т. 1. – С. 28–37. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37>. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnnoe-upravlenie-toplivopodachey-dizelnogo-dvigatelya-na-osnove-programmnogo-pid-regulirovaniya>.
9. Балобанов Е.Н., Емельянова М.С. Приборы в промышленности, неразрушающем контроле, здравоохранении и экологии. *Организационный комитет конференции*. – 2022. – С. 166. Режим доступа: http://pribor21.istu.ru/doc/2021/PribXXI-2021_Prog_RU.pdf?ysclid=m6xn0encez248277063.
10. Куликова И.В. Моделирование синтеза нечетких регуляторов типа Такаги – Сугено – Канга в некоторых системах управления. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. – 2021. – Т. 7. – №2 (26). – С. 147-169. DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2021-7-2-147-169>. Режим доступа: https://vestnik.utmn.ru/energy/vypuski/2021-tom-7/2_26/1064300/.
11. Кожухова А.В., Невзорова М.Ю. Проектирование стенда для исследования частотного регулирования объемного насоса. *Символ науки*. – 2016. – №3 (3). – С. 53-56. Режим доступа: http://pribor21.istu.ru/doc/2021/PribXXI-2021_Prog_RU.pdf?ysclid=m6vqyos2zz576468933.
12. Труханов К.А. Цифровой ПИД-регулятор для пневмо-и гидросистем. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. – 2018. – Т. 3. – С. 65–75. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66853>. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_35670015_10323769.pdf
13. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т. Идентификация нелинейной системы управления с ПИД-регулятором. *System identification and control problems. Sicpro'15*. – 2015. – С. 387–396. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_23316545_72934853.pdf.

14. Алёхин М.В., Петросян А.Е., Шаховцев К.В. Промышленные манипуляционные роботы. Прорывные научные исследования как двигатель науки. – 2017. – С. 117-119. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_30663663_23533456.pdf.
15. Гулай В.А., Дубовик А.В., Богданова Е.А. Интеллектуальные, сенсорные и мехатронные системы. – 2024. Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/147397/Intellektualnye_sensornye_i_mekhatronnye_sistemy.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
16. Filo G. Artificial intelligence methods in hydraulic system design. *Energies*, 2023; 16 (8): 3320. DOI: <http://doi.org/10.3390/en16083320>.
17. Мирзалиев С.А., Шарипов К.Л. Моделирование функции гидропривода программой «LMS AMESIM». Материалы V Международной научно-практической конференции «Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве». – 2019. С. 308–311. Режим доступа: <https://ejournal.tsuc.uz/index.php/archive/article/view/3137>
18. Пастухов И.С., Целищев В.А. Гидросистема валочно-пакетирующей машины (харвестера), перспективы развития. Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. – 2020. – С. 201–206. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_44348266_38594338.pdf
19. Санталов А.А. Нейросетевая настройка адаптивного ПИД–регулятора мощности гидроагрегата. Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2021. – №3 (95). С. 30–34. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevaya-nastroyka-adaptivnogo-pid-regulyatora-moschnosti-gidroagregata>
20. Фрянов В.Н., Павлова Л.Д. Имитационное моделирование и определение оптимальной траектории движения исполнительного органа роботизированного выемочного агрегата. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 3. – № 2. – С. 202–210. Режим доступа: <http://www.jfams.ru/index.php/JFAMS/article/view/238>
21. Хиникадзе Т.А., Рыбак А.Т., Попиков П.И. Моделирование гидравлической системы устройства с самоадаптацией по силовым и кинематическим параметрам на рабочем органе. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. – 2021. – Т. 21. – № 1. – С. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-1-55-61>. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-gidravlicheskoj-sistemy-ustroystva-s-samoadaptatsiej-po-silovym-i-kinematicheskim-parametram-na-rabochem-organe>
22. Яковлев А.Ю., Красная А.А., Медведев С.Н. Применение Q-обучения для интеллектуального вывода стрелы манипулятора в заданное положение. Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. – 2021. – С. 1639–1647. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_46235784_68390633.pdf.
23. Thai N.H. et al. Trajectory tracking control for differential-drive mobile robot by a variable parameter PID controller. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2022; 11 (8): 614–621. DOI: <http://doi.org/10.18178/ijmerr.11.8.614-621>
24. Yang X. et al. Adaptive fuzzy PID control of high-speed on-off valve for position control system used in water hydraulic manipulators. *Fusion Engineering and Design*, 2024; 203: 114437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuseng-des.2024.114437>.
25. Хропаков Д.И. Моделирование многодвигательных гидросистем в программной среде Matlab-Simulink. Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2018. – С. 85–88. Режим доступа: <https://elib.gstu.by/handle/220612/19742>.
26. Голякевич С.А., Гороновский А.Р., Мохов С.П. Результаты имитационного моделирования работы гидравлической системы форвардера в MatLab/Simulink/Simscape. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. Минск: Труды БГТУ. – 2019. – № 1 (216). – С. 126–131. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-imitatsionnogo-modelirovaniya-raboty-gidravlicheskoj-sistemy-forvardera-v-matlab-simulink-simscape>

27. Попадьян А.Н. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора для управления следящим приводом с использованием программного пакета MATLAB SIMULINK. Морской вестник. – 2019. – № 3(71). – С. 93–96. EDN GHBFQI. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_39282319_87700478.pdf.
28. Измерители–регуляторы. Глоссарий (Электронный ресурс). Режим доступа: <https://kurl.ru/xqroy>

References

1. Zishan F., Montoya, O.D.; Giral-Ramírez, D.A.; Molina-Cabrera, A. Efficient PID Control Design for Frequency Regulation in an Independent Microgrid Based on the Hybrid PSO-GSA Algorithm. *Electronics*. 2022; 11: 3886. <https://doi.org/10.3390/electronics11233886>.
2. Barakat M. Optimal design of fuzzy-PID controller for automatic generation control of multi-source interconnected power system. *Neural Comput & Applic*. 2022; 34: 18859–18880. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07470-4>.
3. Chotikunnan P., Chotikunnan R. Dual design PID controller for robotic manipulator application // *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2023; 4 (1): 23-34. DOI: : <https://doi.org/10.18196/jrc.v4i1.16990>.
4. Almodaresi E., Bozorg M. Stable regions in the space of PID controller coefficients. *IET Control Theory & Applications*. 2017; 11; 10: 1642-1647. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.0685>.
5. Coskun M.Y., İtik M. Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system. *ISA transactions*. 2023; 139: 484–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.04.005>.
6. Posmet'ev V.I., Nikonov V. O., Posmet'ev V.V., Zelikov V.A., Kolodii P.V. Komp'yuternoe modelirovanie reku-perativnogo krivoshipnogo mekhanizma povorota kolonny manipulyatora lesovoznogo avtopoezda. [Computational modeling of a recuperative ship mechanism for turning a column manipulator of a timber truck]. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry journal]*. 2023; 13; 2 (50): 158–178. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>. URL: <http://lestehjournal.ru/journal/2023/no-2-50/kompyuternoe-modelirovanie-rekuperativnogo-krivoshipnogo-mehanizma-povorota>
7. Palkin G.A., Gaisin A.F. Issledovanie optimal'nogo metoda upravleniya elektroprivodami nasosov pervogo pod"ema, ekspluatiruemykh v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur [Study of the optimal method of controlling electric drives of first-stage pumps operated under subzero temperature conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki [News of higher educational institutions. Problems of energy.]*. 2021; 23(3): 194–208. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208>. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-optimalnogo-metoda-upravleniya-elektroprivodami-nasosov-pervogo-podema-ekspluatiruemyh-v-usloviyah-otrivalsatelnyh>
8. Bahanovich G. i drugie. Jelektronnoe upravlenie toplivopodachej dizel'nogo dvigatelja na osnove programmno PID-regulirovaniya [Electronic control of fuel supply of diesel engine based on software PID regulation]. *Nauka i tehnika [Science and Technology]*. 2017; 1: 28-37. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37>. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnoe-upravlenie-toplivopodachej-dizelnogo-dvigatelya-na-osnove-programmnogo-pid-regulirovaniya>.
9. Balobanov E.N., Emel'janova M.S. Sekcija 3 [Section 3]. Pribory v promyshlennosti, nerazrushajushhem kontrole, zdavoohranenii i jekologii [Devices in industry, non-destructive testing, healthcare and ecology]. *Organizacionnyj komitet konferencii [Conference Organizing Committee]*. 2022; 166. (In Russ.). URL: http://pribor21.istu.ru/doc/2021/PribXXI-2021_Prog_RU.pdf?ysclid=m6xn0encez248277063.
10. Kulikova I.V. Modelirovanie sinteza nechetkih reguljatorov tipa Takagi – Sugeno – Kanga v nekotoryh sistemah upravlenija [Modeling the synthesis of fuzzy controllers of the Takagi-Suzeno-Kang type in some control systems]. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Tyumen State University]*. *Fiziko-matematicheskoe modelirovanie [Physical and mathematical modeling]*. *Neft', gaz, jenergetika [Oil, gas, energy]*. 2021; 7; 2

- (26): 147–169. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2021-7-2-147-169>. URL: https://vestnik.utmn.ru/energy/vypuski/2021-tom-7/2_26/1064300/
11. Kozhuhova A.V., Nevzorova M.Ju. Proektirovanie stenda dlja issledovanija chastotnogo regulirovanija obemnogo nasosa [Design of a test bench for studying frequency control of a volumetric pump]. Simvol nauki [Symbol of science]. 2016; 3 (3): 53–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66853>. URL: http://pribor21.istu.ru/doc/2021/PribXXI-2021_Prog_RU.pdf?ysclid=m6vqyos2zz576468933
 12. Truhanov K.A. Cifrovoj PID–reguljator dlja pnevmo- i gidrosistem. Izvestija Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta MAMI [Digital PID controller for pneumatic and hydraulic systems. News of the Moscow State Technical University MAMI]. 2018; 3: 65–75. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66853>. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_35670015_10323769.pdf
 13. Prokop'ev A.P., Ivanchura V.I., Emel'janov R.T. Identifikacija nelinejnoj sistemy upravlenija s PID-reguljatorom [Identification of a nonlinear control system with a PID controller]. System identification and control problems. Siepro'15. 2015; 387–396. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_23316545_72934853.pdf.
 14. Aljohin M.V., Petrosjan A.E., Shahovcev K.V. Promyšlennye manipulacionnye roboty .Proryvnye nauchnye issledovanija kak dvigatel' nauki [Industrial manipulation robots. Breakthrough scientific research as the engine of science]. 2017; 117–119. (In Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_30663663_23533456.pdf.
 15. Gulaj V.A., Dubovik A.V., Bogdanova E.A. Intellektual'nye, sensornye i mehatronnye sistemy [Intelligent, sensory and mechatronic systems]. 2024 (In Russ). URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/147397/Intellektualnye_sensornye_i_mekhatronnye_sistemy.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
 16. Filo G. Artificial intelligence methods in hydraulic system design //Energies. 2023; 16(8): 3320. DOI: <http://doi.org/10.3390/en16083320>.
 17. Mirzaliev S.A., Sharipov K.L. Modelirovanie funkicii gidroprivoda programmoj " LMS AMESIM"[Modeling of hydraulic drive functions using the LMS AMESIM program.]. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii " Metody i tehnologii v selekcii rastenij i rastenievodstve" [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Methods and Technologies in Plant Breeding and Plant Growing"]. 2019; 308-311. (In Russ). URL: <https://ejournal.tsue.uz/index.php/archive/article/view/3137>.
 18. Pastuhov I.S., Celishhev V.A. Gidrosistema valочно-paketirujushhej mashiny (harvestera), perspektivy razvitiya. Gidravličeskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmoavtomatika [Hydraulic system of feller-buncher (harvester), development prospects. Hydraulic machines, hydraulic drives and hydropneumatic automation]. 2020; 201-206. (In Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44348266_38594338.pdf.
 19. Santalov A.A. Nejrosetevaja nastrojka adaptivnogo PID–reguljatora moshhnosti gidroagregata. Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Neural network tuning of adaptive PID-controller of hydroelectric power unit. Bulletin of Ulyanovsk State Technical University]. 2021; 3 (95): 30–34. (In Russ). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrosetevaya-nastroyka-adaptivnogo-pid-regulyatora-moschnosti-gidroagregata>.
 20. Frjanov V.N., Pavlova L.D. Imitacionnoe modelirovanie i opredelenie optimal'noj traektorii dvizhenija ispolnitel'nogo organa robotizirovannogo vyemochnogo agregata [Simulation modeling and determination of the optimal trajectory of movement of the executive body of a robotic mining unit]. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk [Fundamental and applied issues of mining sciences]. 2016; 3(2): 202–210. (In Russ). URL: <http://www.jfams.ru/index.php/JFAMS/article/view/238>.
 21. Hinikadze T.A., Rybak A.T., Popikov P.I. Modelirovanie gidravličeskoj sistemy ustrojstva s samoadaptaciej po silovym i kinematičeskim parametram na rabochem organe [Modeling of a hydraulic system of a device with self-adaptation according to power and kinematic parameters on the working element]. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2021; 21(1): 55-61. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-1-55-61>. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-gidravličeskoy-sistemy-ustrojstva-s-samoadaptatsiej-po-silovym-i-kinematičeskim-parametram-na-rabochem-organe>.

22. Jakovlev A.Ju., Krasnaja A.A., Medvedev S.N. Primenenie Q-obuchenija dlja intellektual'nogo vyvoda strely manipulatora v zadannoe polozhenie [Using K-learning to intelligently position a manipulator boom]. Aktual'nye problemy prikladnoj matematiki, informatiki i mehaniki [Current issues in applied mathematics, computer science and mechanics]. 2021; 1639–1647. (In Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46235784_68390633.pdf.
23. Thai N.H. et al. Trajectory tracking control for differential-drive mobile robot by a variable parameter PID controller. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2022; 11(8): 614–621. DOI: <http://doi.org/10.18178/ijmerr.11.8.614-621>.
24. Yang X. et al. Adaptive fuzzy PID control of high-speed on-off valve for position control system used in water hydraulic manipulators. Fusion Engineering and Design. 2024; 203: 114437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114437>.
25. Hropakov D.I. Modelirovanie mnogodvigatel'nyh gidrosistem v programmnoj srede Matlab-Simulink [Modeling of multi-engine hydraulic systems in the Matlab-Citylink software environment]. Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroenija, jenergetiki i upravlenija: materialy XVIII Mezhdunar. nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh [Research and development in the field of mechanical engineering, energy engineering and management: materials of the XVIII International scientific-technical conference of students, postgraduates and young scientists]. Gomel': Gomelevskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet [Gomel State Technological University], 2018; 85–88. (In Russ). URL: <https://elib.gstu.by/handle/220612/19742>.
26. Goljakevich S.A., Goronovskij A.R., Mohov S.P. Rezul'taty imitacionnogo modelirovanija raboty gidravlicheskoj sistemy forvardera v MatLab/Simulink/Simscape [Results of simulation modeling of the forwarder hydraulic system operation in MatLab/Cimulink/Simscape]. Serija 1 [Episode 1]: Lesnoe hozjajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovljaemyh resursov [Forestry, nature management and processing of renewable resources]. Minsk: Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta [Proceedings of the Belarusian State Technological University]. 2019; 1 (216):126–131. (In Russ). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-imitatsionnogo-modelirovaniya-raboty-gidravlicheskoj-sistemy-forvardera-v-matlab-simulink-simscape>.
27. Popad'in A.N. Avtomatizirovannaja nastrojka PID-reguljatora dlja upravlenija sledjashhim privodom s ispol'zovaniem programmnoho paketa MATLAB SIMULINK [Automated tuning of PID controller for control of servo drive using MATLAB SIMULINK software package]. Morskoy vestnik [Marine Herald]. 2019; 3(71): 93–96. (In Russ). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_39282319_87700478.pdf.
28. Izmeriteli–reguljatory. Glossarij (Jelektronnyj resurs) [Measuring instruments-regulators. Glossary (Electronic resource)]. (In Russ)]. URL: <https://kurl.ru/xqpoy>

Сведения об авторах

Головина Елена Витальевна – старший преподаватель, аспирант ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д.3, г. Йошкар-Ола, 424000, Российская Федерация, e-mail: GolovinaEV@volgatech.net.

Павлов Александр Иванович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедры транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», пл. Ленина, д.3, г. Йошкар-Ола, 424000, Российская Федерация, e-mail: PavlovAI@volgatech.net.

Information about the authors

Elena V. Golovina – Senior Lecturer, Postgraduate Student, Volga Region State Technological University, Lenin Square, 3, Yoshkar-Ola, Russia, 424000, Russian Federation, e-mail: GolovinaEV@volgatech.net.

Aleksandr I. Pavlov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport and Technological Machines, Volga Region State Technological University, Lenin Square, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation, e-mail: PavlovAI@volgatech.net.