

УДК 681.513.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.57.6.003](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.57.6.003)

Автоматическое управление вальцовым станком

А.В. Кудрявцев^{1,2✉}, Э.Э. Анцупов³

¹Научно-исследовательский технологический университет МИСиС, Москва,
Российская Федерация

²ООО «Промтехпродукт», Самара, Российская Федерация

³Независимый исследователь, Новосибирск, Российская Федерация

Резюме. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания и внедрения конкурентоспособных отечественных решений по автоматизации в технологических процессах и трудностями решения данной задачи в некоторых зрелых отраслях, например, в мукомольной отрасли. В этом контексте в настоящей работе рассмотрен вальцовый станок с целью его моделирования как объекта управления и исследования параметров устройств управления разных типов. В данном исследовании выбран вальцовый станок, который идентифицирован как объект управления, создана его математическая модель, рассмотрены устройства управления различных типов и методами имитационного моделирования исследованы их характеристики применительно к задаче регулирования выбранным объектом управления. Также в работе определены параметры управляемости и устойчивости, определены наиболее предпочтительные подходы для управления станком. В результате сделаны выводы: важна корректная идентификация станка; хотя ПИ-регулятор имеет лучшие показатели для регулирования отдельного станка, но для управления комплексом из нескольких станков, наиболее эффективным может быть регулятор на нечеткой логике. Результаты, полученные в данном работе, могут быть использованы как для модернизации существующих производств и при производстве нового отечественного оборудования, так и для дальнейших исследований.

Ключевые слова: вальцовый станок, система автоматического управления, управление рабочим зазором, моделирование в MATLAB, ABCD-представление.

Для цитирования: Кудрявцев А.В., Анцупов Э.Э. Автоматическое управление вальцовым станком. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(6). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2337> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.57.6.003

Automated control of a roller mill

A.V. Kudriavtsev ^{1,2✉}, E.E. Antsupov³

¹National Research University of Technology "MISIS", Moscow, the Russian Federation

²PROMTECHPRODUCT LLC, Samara, the Russian Federation

³Independent researcher, Novosibirsk, the Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is driven by the need to develop and implement competitive domestic automation solutions in technological processes, as well as by the difficulties in solving this problem in certain mature industries, such as the flour milling industry. In this context, this paper examines a roller mill to model it as a control plant and to study the parameters of various types of control devices. In this study, the roller mill is identified as a control plant, its mathematical model is developed, various types of controllers are considered, and their characteristics for controlling the selected plant are investigated using simulation methods. The parameters of controllability and stability are determined, and the most preferable approaches for controlling the mill are identified. The conclusions are as follows: correct identification of the mill is important; although a PI controller has better performance for controlling a single mill, a fuzzy logic controller may be more effective for controlling a multi-mill system. The results obtained in this work can be used both for modernizing

existing production facilities and for manufacturing new domestic equipment, as well as for further research.

Keywords: roller mill, automatic control system, grinding gap adjustment, modeling in MATLAB, ABCD representation.

For citation: Kudriavtsev A.V., Antsupov E.E. Automated control of a roller mill. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(6). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2337> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.57.6.003

Введение

Рост экономики напрямую зависит от внедрения передовых технологий, средств автоматизации, промышленных роботов, от использования цифровых решений. Хотя в некоторых отраслях можно наблюдать достаточно высокий уровень автоматизации и роботизации, вплоть до создания автономных производств, являющихся высшей ступенью развития в рамках сегодняшней парадигмы¹, в мукомольной и комбикормовой промышленности наблюдается заметное отставание, при том, что производство и переработка продукции сельского хозяйства являются фактором продовольственной безопасности и экспорта. В последние годы актуальны поиск и внедрение отечественных решений, учитывая ограничения по работе с импортной техникой.

В настоящий момент можно констатировать увеличение интереса у руководителей предприятий в ускорении внедрения и использования систем промышленной автоматизации и роботов, которые должны соответствовать лучшим мировым образцам. В частности, один из лидеров отрасли компания Bühler уже предлагает коммерческие решения по автоматизации и роботизации, что устраняет трудоемкие ручные процедуры, обеспечивая более быструю настройку с меньшими потерями продукта².

В настоящей работе рассмотрен вальцовый станок как элемент технологической линии, которым необходимо управлять в режиме реального времени, который был идентифицирован как объект управления, задана модель системы автоматического управления (САУ) станком начального уровня, исследованы некоторые типовые решения и определены подходы для дальнейших исследований в данном направлении.

До настоящего времени при проектировании новых и модернизации старых комплексов оборудования часто применяются методики определения величин материальных потоков методом физического моделирования процесса размола зерна на основе количественного баланса помола³. Определение величин потоков по аналогии, по таблицам Правил ведения технологического процесса на мукомольных заводах, дает весьма приблизительный результат, что, в итоге, приводит к использованию так называемого коэффициента запаса (неравномерности), значение которого может достигать 1,5. Это обуславливает рост затрат и снижение эффективности производства [1]. Современные проекты нуждаются в более точных и гибких моделях, описывающих зависимость выходов муки и зольности от свойств зерна и конструкции оборудования, являясь трудновыполнимой задачей. Так при изменении регулировок рабочего межвальцового зазора, заметно меняется состав продуктов на выходе, в частности, при уменьшении межвальцового зазора снижается количество крупной крупки, возрастает

¹ Воробьева А., Гоголев С., Евсеев К. и др. *Исследование рынка промышленной робототехники 2025. Основные показатели*. Университет Иннополис. URL: https://innopolis.university/filespublic/Industrial_Robotics_Market_Research_2025.pdf (дата обращения: 15.12.2025).

² *AutoGap retrofit package*. Bühler. URL: <https://www.buhlergroup.com/global/en/services/upgrades/AutoGap-retrofit-package.html> (дата обращения: 07.11.2025).

³ Чеботарёв О.Н., Шаззо А.Ю., Мартыненко Я.Ф. *Технология муки, крупы и комбикормов*. Москва: Издательский центр «МарТ»; 2004. 688 с.

количество средней и мелкой крупки, что необходимо учитывать при настройке дальнейших технологических процессов (обогащение, шлифование и проч.) [2]. При моделировании результатов работы вальцового станка был изучен подход к моделированию на основе аппроксимации с помощью полинома первого и второго порядков [3]. Однако процессы, происходящие в реальном станке, работающем в составе линии существенно отличаются от задач моделирования условий для получения как можно однородного продукта помола – как раз необходимо управлять таким образом станком, чтобы последующие системы были загружены оптимально в соответствии с их характеристиками. В процессе исследований часто встречалась ситуация, когда исследователи упрощали модели, например, принимая величину насыпной плотности продукта на входе станков (γ) как постоянную в работах по моделированию работы станков [4] или рассматривая модели только одного или первых двух станков В1 и В2 [5]. Проводя эксперименты, было установлено, что это не совсем отражает ситуацию, особенно если рассматривать не дранные станки в начале линии, а в размольные: если вальцы работают в режиме, когда рабочий зазор образуется потоком продукта, который противодействует силам сжатия вальцов и раздвигает их, образуя рабочий зазор, то в процессе затягивания продукта вальцами, происходит уплотнение продукта до плотностей более близких к физическим плотностям.

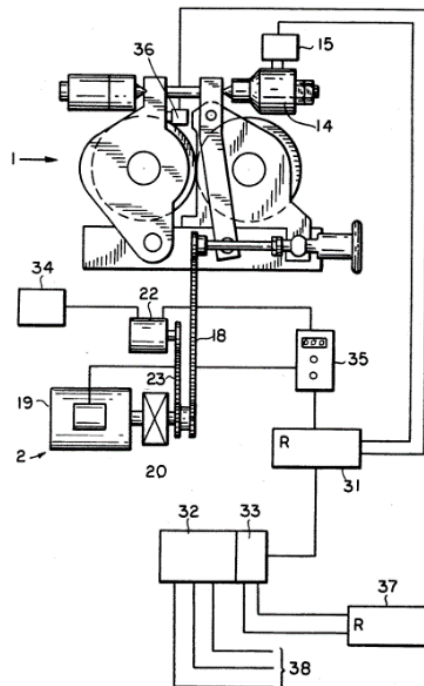


Рисунок 1 – Устройство автоматического регулирования рабочего зазора вальцов:
 1 – мелющие вальцы, 2 – устройство регулирования, 14 – тензодатчик давления,
 15 – индикатор давления, 18, 23 – приводная цепь, 19 – регулировочный двигатель,
 20 – скользящая муфта, 22 – датчик положения (энкодер), 31 – контроллер управления
 автоматом, 32 – центральный процессор комплекса, 33 – память контроллера

Figure 1 – Automatic roller working gap control system: 1 – grinding rolls, 2 – control unit,
 14 – pressure sensor, 15 – pressure indicator, 18, 23 – drive chain, 19 – adjustment motor, 20 – sliding
 clutch, 22 – position sensor (encoder), 31 – controller (automatic control unit), 32 – central processing
 unit (CPU), 33 – controller memory

Одним из применяемых способов исполнения устройства регулировки рабочего зазора в станках начального уровня осуществляется актуаторами с энкодерами с каждой

из сторон (Рисунок 1)⁴. Задача устройства управления (УУ) в данном случае была определена следующим образом: отслеживание уровня продукта в приемном бункере станка (колбе), который должен сохраняться в рабочем диапазоне независимо от величины входящего потока продукта (в пределах допустимых значений).

Несмотря на очевидный способ регулировки зазора, в реальных станках он встречается нечасто. Одной из причин этого предположительно является отсутствие как качественных моделей отдельных станков, так и модели всей линии. В данном исследовании будет показано, что наличие модели отдельного станка есть необходимое, но недостаточное условие использования автоматического управления для линии, а для отдельного станка это не имеет смысла. Для преодоления некоторых трудностей при моделировании работы мукомольного оборудования и было проведено данное исследование.

Материалы и методы

Для исследований в данной работе был выбран вальцовый мукомольный станок PROKOP PM5 (Чехия), который используется на реальном мукомольном заводе ООО «Промтехпродукт» в городе Самара и конструктивно схож с большинством современных станков. Он представляет из себя систему, состоящую условно из двух подсистем: системы питания/подачи (питателя) с вращающимися валками и мелющих вальцов⁵. Для более точной идентификации объекта исследования, рассматриваемый станок можно отнести к начальному уровню применяемых систем управления.

Одной из задач, которую необходимо решить при выборе объекта управления (ОУ), является идентификация ОУ и выбор стратегии управления [6]. Задачей для данного типа оборудования, которое имеет ручное регулирование рабочего зазора между вальцами, перейти к автоматическому электронно-регулируемому рабочему зазору с системами обеспечения параллельности (одинаковой величины рабочего зазора по всей длине вальцов).

В автоматических станках начального уровня импортного производства, система управления (СУ) станков решает данную локальную задачу автоматической подстройки систем станка при помощи изменения производительности питателя и рабочего зазора.

Рассматриваемая СУ должна решать относительно простые локальные задачи: отслеживание и регулировку взаимодействия подсистем конкретного станка, при том, что рабочий зазор задается и регулируется технологом. По сути, УУ станка данного поколения решает задачу отслеживания уровня продукта в приемном бункере (часто в иностранных источниках обозначается как *bulb* – колба). Следовательно, можно сформулировать цель управления: поддерживать уровень продукта (h) в приемном бункере в заданном диапазоне $\Delta h = (h - h_0) \rightarrow 0$ при наличии возмущений (отклонений) входящего потока продукта на станок.

В данной работе были приняты некоторые ограничения: функционирование сепаратора (рассева) не изучается и считается идеальным – если продукты помола попали на сепаратор, то значит, они будут разделены на фракции в зависимости от их размера с минимальной погрешностью. Также в данной работе все потоки измеряются в граммах в секунду. Это связано с тем, что при экспериментах более удобно измерять потоки именно в этих величинах.

⁴ Ketting L. *Grinding gap adjusting device for milling roller mills*. US Patent, No. 5154364A. 1992. URL: <https://patents.google.com/patent/US5154364A/en> (дата обращения: 21.11.2025).

⁵ *Roller Mill type P-GTV Single*. Prokop Technology. URL: <https://prokop.cz/products/roller-mill-type-m5-p-m5-a/> (дата обращения: 06.01.2026).

Исходя из модели ОУ, которым является станок, модель определена, когда определены в виде матриц его состояние $X(t)$, входы $U(t)$ и выходы $Y(t)$ ⁶. В данном случае система задана, если описаны все виды сигналов в виде матриц (1)–(3):

$$\dot{X}(t) = A(t) \cdot X(t) + B(t) \cdot U(t), \quad (1)$$

$$Y(t) = C(t) \cdot X(t) + D(t) \cdot U(t), \quad (2)$$

$$\Sigma^{(n)}: A, B, C, \quad (3)$$

где $X(t)$, $U(t)$, $Y(t)$ – матрицы параметров состояния системы, входных управляющих и возмущающих воздействий, откликов системы соответственно, $X(0)$ – матрица начальных состояний; матрица $D(t)$ задается и определяет координаты отклика в тех случаях, если отклик системы зависит не только от координат состояния, но и от координат входного управления. Для рассматриваемого случая станка вектора были заданы следующим образом:

а) вектор состояния $X(t)$ – эти переменные характеризуют состояние системы:

$$X(t) = [h(t)], \quad (4)$$

где $h(t)$ – уровень продукта в приемном бункере, мм.

В данном ОУ интересовало условие, чтобы уровень сырья в приемном бункере был в пределах допуска, или в идеале, постоянным не смотря на увеличение или уменьшение входящего потока сырья, изменение которого $|\Delta Q_{in}| > 0$ в данном случае является возмущающим воздействием;

б) вектор входного воздействия $U(t)$ – это внешние управляющие и возмущающие сигналы, влияющие на систему:

$$U(t) = \begin{bmatrix} f(t) \\ \Delta Q_{вх}(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\Delta Q_{вх}(t)$ – изменение потока сырья на входе в систему, г/с. Для данного случая имеется только одно возмущающее воздействие: изменение входного потока сырья $\Delta Q_{вх}(t)$ и одно управляющее: частота вращения валков питателя $f(t)$;

в) вектор выходных переменных $Y(t)$ – результат работы системы, который наблюдается или измеряется – интересует только состояние уровня сырья в приемном бункере:

$$Y(t) = [h(t)]. \quad (6)$$

Уравнения, описывающие работу станка, можно записать следующим образом:

$$Q_{in}(t) = L \cdot v_{пр} \cdot \psi \cdot k_{press} \cdot \gamma \cdot b(t) = \alpha \cdot \gamma \cdot b(t), \quad (7)$$

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{Q_{in}(t) - P(t)}{S_{\gamma}} = \frac{1}{S_{\gamma}} Q_{in}(t) - \frac{p}{S} f(t), \quad (8)$$

$$P(t) = B \cdot l \cdot \psi \cdot \xi \cdot \gamma \cdot V_{л} = p \cdot \gamma \cdot f(t), \quad (9)$$

$$f(t) = \alpha \cdot p^{-1} \cdot b \cdot k_{press}(t), \quad (10)$$

где $P(t)$, $Q_{in}(t)$ – производительности питателя и вальцов соответственно, г/с; B ; b – толщины слоя в зоне контакта с вальцами (толщина слоя продукта на вальцах), задаётся рабочим зазором, и между питающим валком и заслонкой соответственно, мм; L , l – длины валцов и питающих валков соответственно, мм; S – площадь приемного бункера, мм²; $v_{пр}$ – средняя линейная скорость поверхности пары валцов или скорость

⁶ Певзнер Л.Д. Теория систем управления. Санкт-Петербург: Лань, 2013. 424 с.

прохода продукта через вальцы, мм/с; γ – насыпная плотность слоя продукта на вальцах (объемный вес), г/мм³.

После экспериментов был введен безразмерный параметр k_{press} , который находится в диапазоне значений [1,0;1,6], что более точно описывало происходящие процессы. Однако это предмет дальнейших исследований, поэтому в моделях далее данный коэффициент равен 1 и его изменения не учитываются. ψ – коэффициент использования поверхности вальцов, показывает, насколько продукт занимает всю длину вальцов, здесь для целей моделирования принят равным от 0,65 до 0,95 – производительность питающих валков, задающих количество продукта, подаваемого на помол и производительность всего станка. V_d – линейная скорость поверхности валка, мм/с; она равна $2\pi r f$, где r – радиус питающего валка, а f – его частота вращения (об/с). ξ – коэффициент сцепления продукта с поверхностью (для упрощения задано 1). Коэффициенты α и p – введены для удобства записи и объединяют константы, названы конструкционными составляющими подсистемы помола и питателя.

Выражение (10) верно в стационарном режиме работы и описывает зависимость между частотой вращения валков питателя и величиной рабочего зазора вальцов. Далее из выражений (4)–(6), (7)–(10) было сформулировано ABCD-представление для рассматриваемого станка:

– матрица A (динамика текущего состояния системы): изменение уровня продукта в приемном бункере зависит от потока на входе и производительности питателя и не зависит от текущего состояния:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

– матрица B (влияние входных сигналов на состояние): описывает влияние входных параметров управления $\Delta f(t)$ и возмущающего параметра $\Delta Q_{вх}$ на переменную состояния ОУ $h(t)$.

Из уравнения системы (8) $dh(t)/dt$ можно записать:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{s\gamma} & 0 \\ 0 & -\frac{p}{s} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

– матрица C (влияние состояния на отклик): связь между переменными состояния и выходными параметрами $y = \Delta h(t)$. Выходной отклик формируется только $\Delta h(t)$:

$$C = [1 \quad 1]; \quad (13)$$

– матрица D (влияние входных сигналов на отклик): влияние входных параметров на выходные сигналы (состояние ОУ не меняется от входных сигналов):

$$D = [0 \quad 0]. \quad (14)$$

В результате модель ОУ была выражена в форме Коши, т. е. представляла собой пространство состояний или фазовых координат объекта управления, которые приведены в следующих выражениях:

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} X(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{s\gamma} & 0 \\ 0 & -\frac{p}{s} \end{bmatrix} U(t), \quad (15)$$

$$Y(t) = [1]X(t) + [0]U(t). \quad (16)$$

При $X(0) = 0$ можно утверждать, что ОУ определен. Для создания математической модели УУ данным станком методом прямого программирования, необходимо найти передаточную функцию.

Далее было произведено преобразование Лапласа для матриц ABCD. Отсюда передаточная функция $H(s)$ принимает вид:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}, \quad (17)$$

где $Y(s)$ – отклик системы, $U(s)$ – воздействие на систему, s – некоторая комплексная переменная. Отсюда было выражено $W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$, подставив значения матриц ABCD (11)–(14), была вычислена передаточная функция ОУ:

$$W(s) = \left[\frac{1}{s s_Y} - \frac{p}{s s} \right]. \quad (18)$$

Данная передаточная функция была интерпретирована следующим образом:

1. Элемент матрицы $W_{упр}(s) = -\frac{p}{s s}$ – соответствует входу $u(t) = \Delta f(t)$, т. е. влиянию на уровень продукта в колбе от управляющего воздействия, где $-\frac{p}{s}$ – коэффициент.

2. Элемент матрицы $W_{возм}(s) = \frac{1}{s s_Y}$ соответствует входу $u(t) = \Delta Q_{in}(t)$, т. е. влиянию на уровень продукта в колбе от возмущающего воздействия, где $\frac{1}{s_Y}$ – коэффициент.

3. Элемент $\frac{1}{s}$ является стандартным интегрирующим звеном, что готовит о том, что влияние $Q_{in}(t)$ на $h(t)$ происходит с отставанием по фазе на 90 градусов, и отражает инерционный характер поведения. То же касается и зависимости изменений $\Delta h(t)$ от изменения скорости вращения вала питателя $\Delta f(t)$.

4. В целом имеется контур управления: отслеживание уровня продукта в приемном бункере посредством управления вращением питающего вала.

5. При построении САУ надо учитывать условие, заданное выражением (18).

Инерционности отдельных элементов конструкции для простоты не учитывались. Дополнение модели инерционным звеном будет сделано в дальнейших исследованиях, где данный параметр будет заметно влиять на работу модели. Структурная схема САУ вальцового станка изображена на Рисунке 2, где пунктиром обозначена подсистема мелющих вальцов, и в качестве УУ изображен ПИ-регулятор.

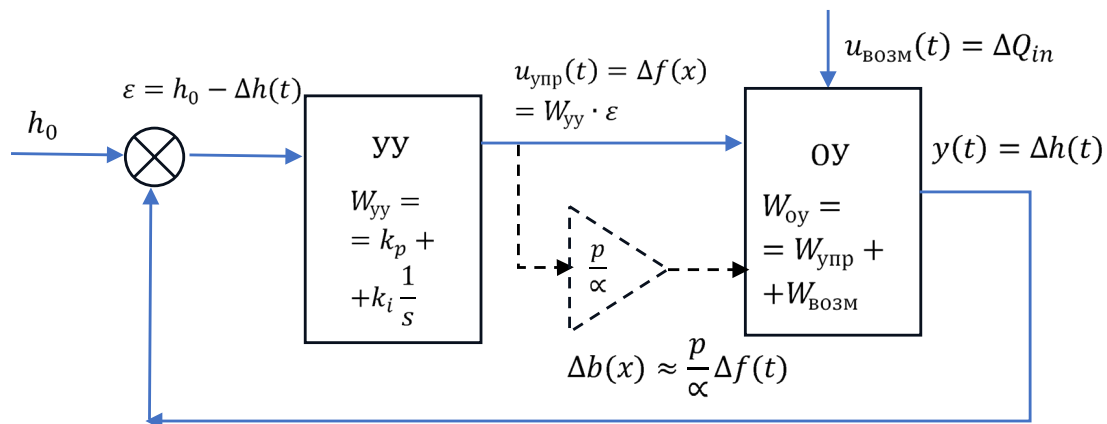


Рисунок 2 – Структурная схема САУ вальцового станка
 Figure 2 – Block diagram of the automatic control system of a roller mill

В станках данного типа решается достаточно простая задача – отслеживание изменений входящего потока продуктов и перестройка механизмов станка для поддержания стационарного режима работы. В рассматриваемой задаче решается проблема увеличения рабочего зазора для увеличения пропускной способности пары мелющих валцов и не стоит задачи регулирования параметров помола и, соответственно, автоматической регулировки рабочего зазора между мелющими валцами. Для этого управление рабочим зазором валцов происходит управляющим сигналом (Δb), пропорциональным Δf , при том, что примем для упрощения, что данная пара валцов практически безынерционная. Данное обстоятельство отражено на Рисунке 3 в виде пунктирных связей и устройства с коэффициентом p/α .

Важным шагом была проверка модели станка. Для этого достаточно было построить графики переходной характеристики модели до и после преобразований (Рисунок 3).

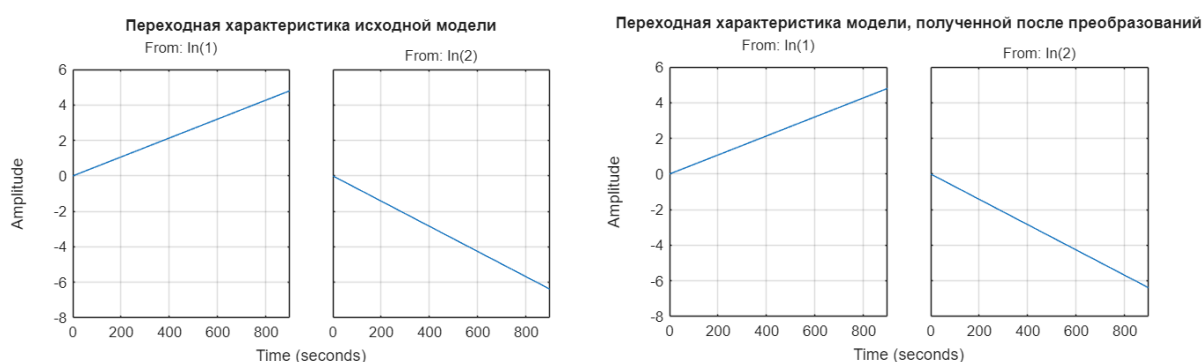


Рисунок 3 – Переходная характеристика модели до и после преобразований
 Figure 3 – The model’s transient response before and after transformations

Из графиков можно заметить, что они полностью совпали, что подтверждает корректное описание реакций ОУ на возмущающие и управляющие воздействия, что позволило сделать вывод о правильной идентификации и описании объекта управления в пространстве состояний.

На основе полученных моделей были исследованы несколько разных типов УУ, реализующих данную модель: пропорциональный регулятор (П-регулятор или Gain), пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор или PI), регулятор на нечёткой логике (FLC-регулятор). Используя платформу Simulink (MATLAB), были сгенерированы три регулятора, произведены их настройки с подбором и уточнением коэффициентов. После этого исследована система автоматического управления (УУ+ОУ) и построены ЛАЧХ, ЛФЧХ и годографы.

Модель САУ в общем виде в системе Simulink изображена на Рисунке 4а.

На вход станка подается поток продукта (зерно) Q_{01in} . Первоначально установлено стационарное значение входного потока продукта на уровне 650 г/с ($0,65 \text{ кг/с} \pm 0,3 \text{ кг/с}$), что соответствует производительности 56 т/сутки . Модель САУ вальцевого станка делится на 2 подсистемы:

- 1) приемный бункер с механизмом питателя (Machine, Рисунок 5а);
- 2) валцы с сепаратором (Separator) (Рисунок 4б).

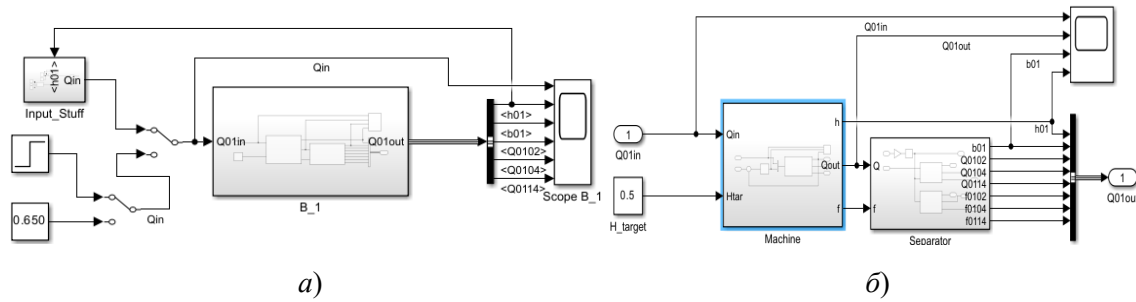


Рисунок 4 – Модель вальцового станка в Simulink: *a* – модель в общем виде; *б* – подсистемы модели станка

Figure 4 – Simulink model of a roller mill: *a* – general model; *b* – machine model subsystems

На вход *Machine* подается входной поток и задается высота столба продукта в приемном бункере (по умолчанию задано $h_0 = 0,5$ м при общей высоте 1 м). На вход *Separator* подается поток из бункера через питатель и значение потока есть функция от частоты вращения валков питателя (f). В контексте данного исследования работа подсистемы *Separator* рассмотрена не была.

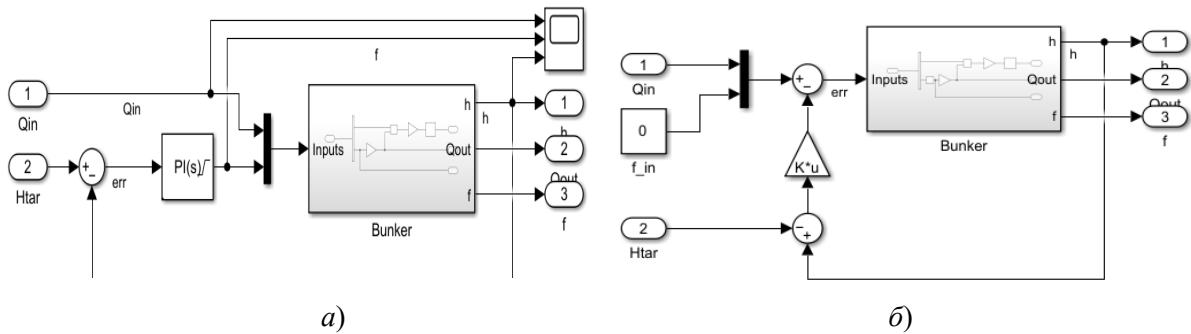


Рисунок 5 – Схемы: *a* – устройства подсистемы приемного бункера и питателя (*Machine*); *б* – П-регулятора

Figure 5 – Schematics of: *a* – the grinding rolls and feeder subsystem (*Machine*); *b* – the proportional (P) controller

Работа контроллера УУ *Machine* заключается в следующем: сигнал с сумматора, который представляет из себя ошибку (err), между заданным значением высоты продукта и текущим измеренным датчиком значением высоты столба продукта в приемном бункере, подается на вход контроллера, который стремится ее минимизировать путем регулирования частоты вращения питательных валков, работа которых отводит продукт из приемного бункера. Частота вращения валцов ограничена диапазоном от 0,1 до 1,5 Гц. Несколько вариантов контроллеров изображены на рисунках: П-регулятор (Рисунок 5*б*), ПИ-регулятор (Рисунок 6*а*) и FLC-регулятор (Рисунок 6*б*).

Пропорциональный регулятор представляет собой коэффициент усиления (KU) в контуре обратной связи. В данном случае был выбран KU со значением 10. Такой KU был выбран исходя из решения оптимизационной задачи для стандартного линейно-квадратичного контроллера (LQR контроллера), который обычно используется если в модель большая – много входных и выходных состояний [7]. Но так как вход Q_{out} не может управляться по условию задачи, то матрица усиления имеет только (1,1) элемент, поэтому будем считать, что мы рассматриваем обычный П-регулятор с $KU = 10$.

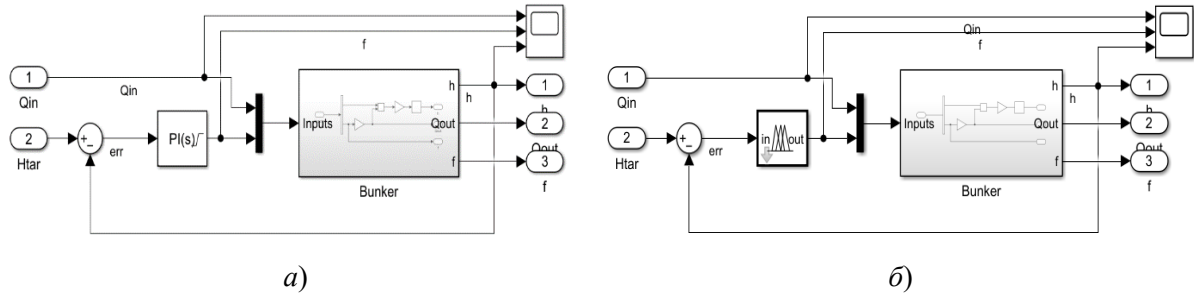


Рисунок 6 – Регуляторы: *a* – ПИ; *б* – FLC
 Figure 6 – Controllers: *a* – PI, *b* – FLC

ПИ-регулятор имеет П-коэффициент (K_p) равным 40,7 и И-коэффициент (K_i) равным – 7,8. Эти коэффициенты получены с помощью автоматической настройки регулятора в контуре управления.

Результаты

Основные настройки FLC-регулятора были связаны со входной и выходной функциями принадлежности (Рисунок 7). Была выбрана функция принадлежности по входу, но можно добавить еще одну дополнительную функцию для учета скорости роста ошибки для дальнейших исследований.

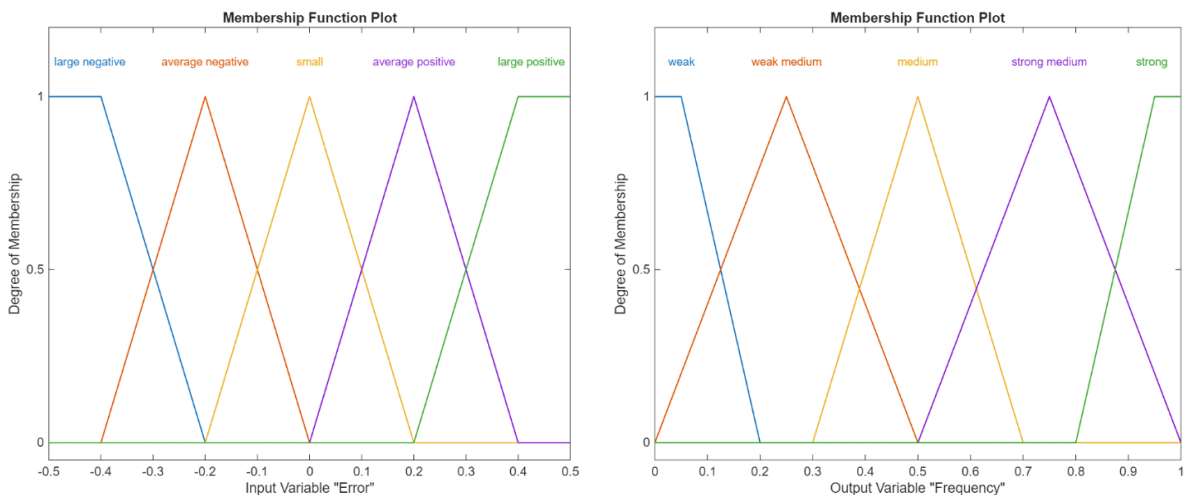


Рисунок 7 – Входная и выходная функции принадлежности
 Figure 7 – Input and output fuzzy membership functions

Для входной функции принадлежности был задан диапазон от –0,5 до 0,5 – это возможная ошибка уровня продукта в колбе в метрах. Для выходной функции принадлежности был задан диапазон от 0 до 1 – возможные значения частоты работы двигателя в Гц. Для фаззификации и дефаззификации выбраны треугольные функции принадлежности, как наиболее простые и наглядные. После настройки моделей разных УУ, на вход был подан сигнал в виде синусоиды с изменением амплитуды в пределах $\pm 50\%$ от установленного значения h_0 , и с разной частотой изменения амплитуды. Это сделано для того, чтобы исследовать качество управления в более широком диапазоне.

Были также рассмотрены частотные характеристики модели с разными вариантами контроллеров для зависимости высоты столба продукта в бункере h в модели от амплитуды и частоты потока поступающего продукта Q . Построены ЛАЧХ и ЛФЧХ

для входа Q (Рисунок 8а). Модель с PI-регулятором ведет себя как полосовой фильтр и ослабляет и низкочастотные и высокочастотные колебания входного потока. Остальные модели ведут себя как интеграторы по отношению к потоку, ослабляя высокочастотную часть. Все модели стабильны для потока любой амплитуды и частоты. Видно, что модель с FLC контроллером на низких частотах ослабляет сигнал сильнее остальных, порядка 65 дБ. Для оценки частотных характеристик для входа Q была построена диаграмма Найквиста (Рисунок 8б).

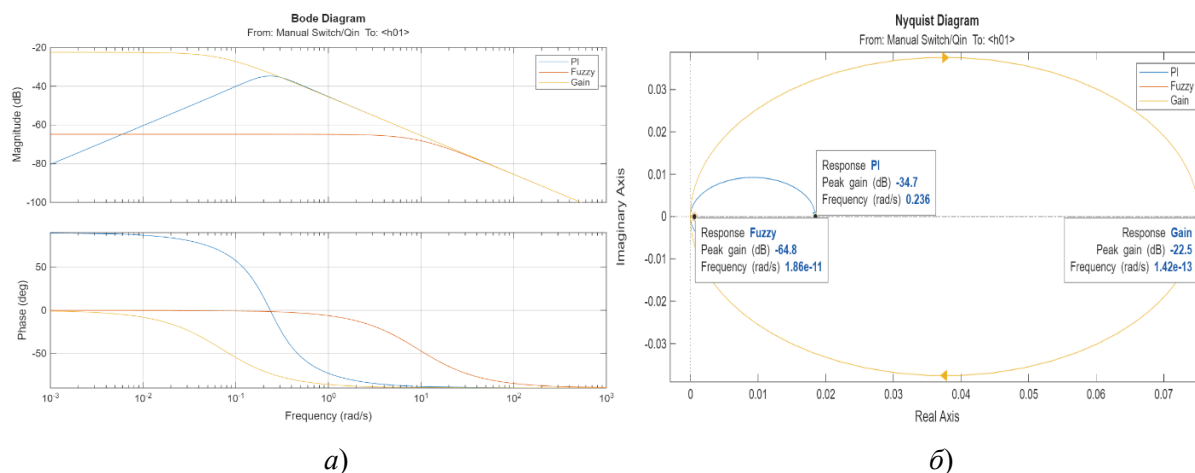


Рисунок 8 – Частотный анализ моделей САУ по каналу возмущения Q : а – частотные характеристики; б – диаграмма Найквиста

Figure 8 – Frequency analysis of the control system models for the disturbance channel Q : а – frequency characteristics; б – Nyquist diagram

Годографы всех моделей находятся в правой полуплоскости и не пересекают точку $(-1,0)$, что говорит об их бесконечном запасе устойчивости. Модель с П-регулятором (Gain) имеет пиковое усиление $-22,5$ дБ, модель с FLC-регулятором $-64,8$ дБ на частоте близкой к 0. Модель с PI-регулятором имеет пиковое усиление $-34,7$ дБ на частоте $0,236$ рад/с.

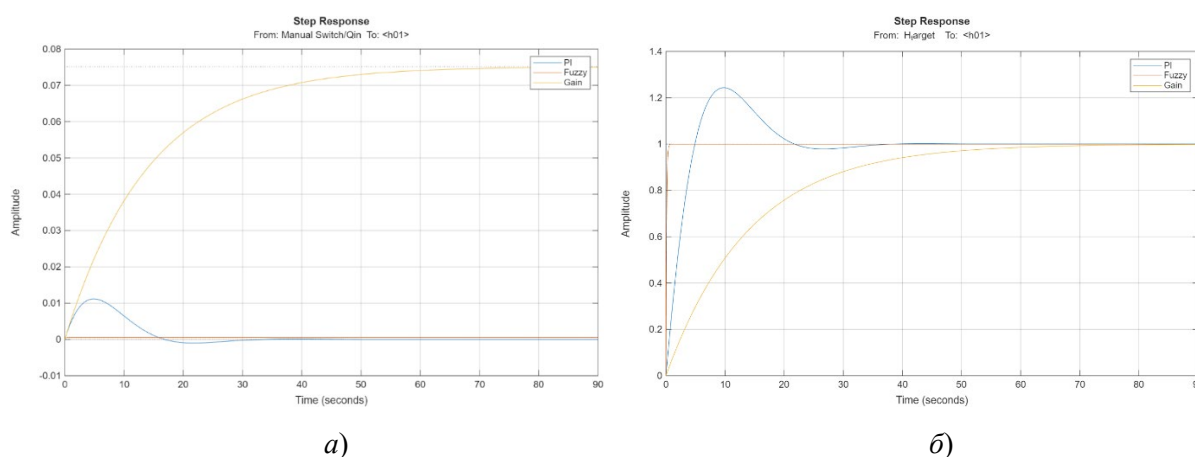


Рисунок 9 – Переходные характеристики: а – по потоку Q ;
б – по потоку высоте столба продукта h_{01}
Figure 9 – Transient response characteristics: а – for the flow rate Q ;
б – for the product bed height h_{01}

Переходные характеристики по потоку Q , построенные на Рисунке 9а, показывают влияние входного потока на высоту столба продукта в приемном бункере и позволяют оценить переходные характеристики моделей. По графику можно сделать вывод, что ПИ-регулятор наилучшим образом регулирует высоту столба в приёмном бункере и устремляет ошибку к нулю, FLC-регулятор имеет незначительную устоявшуюся ошибку, а П-регулятор не может нейтрализовать ошибку, порядка 0,075 м. На Рисунке 9б изображены переходные характеристики по высоте столба продукта в приемном бункере h , которые показывают реакцию системы при изменении желаемой высоты столба продукта в приемном бункере.

По полученному графику можно сделать вывод, что FLC-регулятор почти мгновенно обрабатывает входное воздействие и не имеет перерегулирования. Это связано с параметрами линеаризации FLC-контроллера, которые не учитывают такие нелинейности как пределы регулирования модели. ПИ-регулятор обрабатывает воздействие за примерно 30 секунд, но имеет перерегулирование порядка 25 %, чего лишены П- и FLC-регуляторы. Время отработки сигнала для П-регулятора составляет около 55 секунд. Но для рассматриваемой задачи скорость регулирования не так важна, как его плавность. Была также рассмотрена реакция модели на несколько типовых воздействий, свойственных поставленной выше задаче. Типовое воздействие в виде «ступеньки» высотой 100 г/с (0,1 кг/с). Рабочее состояние модели задано при $h = 0,5$ м, поток 0,55 кг/с. Реакция системы на это воздействие изображена на Рисунке 10. Как видно из графика, ПИ-регулятор справился лучше всех и практически не отклонил уровень продукта в бункере. FLC и P регуляторы показали себя хуже, но ошибка уровня осталась в разумных пределах.

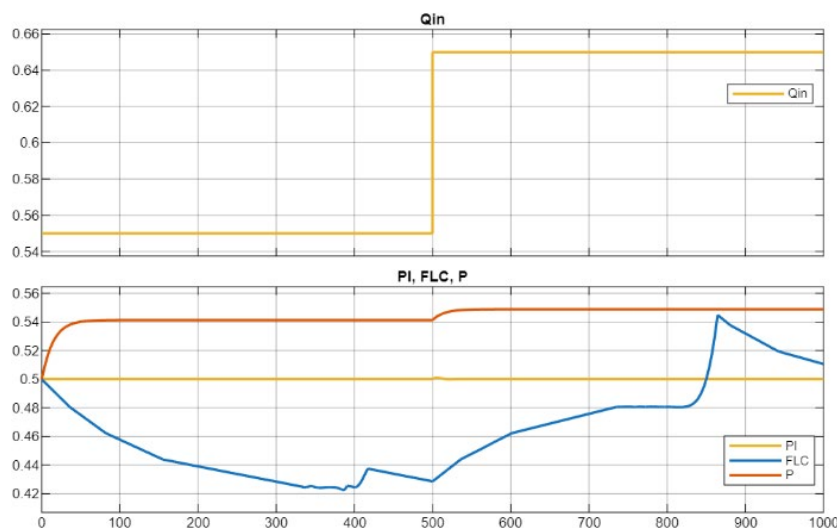


Рисунок 10 – Реакция системы на скачкообразное изменение потока продукта
 Figure 10 – System response to a step change in product flow

Рассмотрим воздействие в виде гармонически изменяющегося сигнала амплитудой 650 г/с \pm 300 г/с (0,65 г/с \pm 0,3 кг/с) (Рисунок 11а). Данное отклонение по амплитуде превышает отклонения, считающимися допустимыми для данного вида оборудования, однако, было важно увидеть поведение САУ в режимах, близких к граничным.

Из полученного графика можно увидеть, что ПИ-регулятор справился ожидаемо лучше остальных и подавил амплитуду колебаний на выходе практически полностью. FLC- и П-регуляторы подавили амплитуду заметно хуже. Сравним рабочий зазор во

время работы САУ при воздействии, заданном выше (Рисунок 11б). Как видно из Рисунок 11а, рабочий зазор для ПИ- и для П-регуляторов изменяется с той же частотой, что и входное возмущающее воздействие, что в итоге негативно сказывается на стабильности работы всей системы, когда необходимо регулировать работу сразу нескольких станков. Однако, этот вопрос остается за рамками данного исследования.

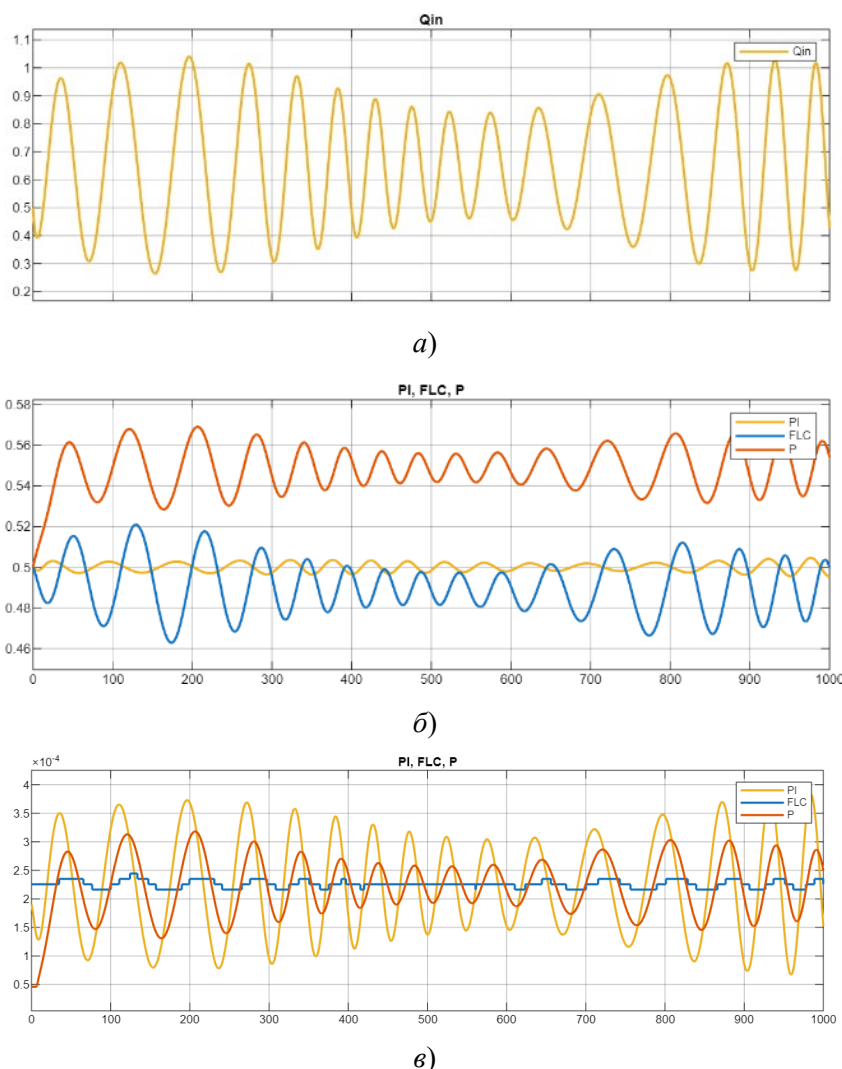


Рисунок 11 – Поведение системы при гармоническом возмущении: а – изменение входного сигнала (потока продукта на входе – Q_{in}); б – реакция системы на гармоническое изменение потока продукта, в – изменение рабочего зазора системы во время работы разных регуляторов
 Figure 11 – System behavior under harmonic disturbance: a – change in the input signal (inlet product flow – Q_{in}); b – system response to a harmonic change in product flow, c – change in the system working clearance during operation of different controllers

В то же время, благодаря нелинейной природе, использование FLC-регулятора позволило привести ОУ в устойчивое положение и при этом практически не изменяется величина рабочего зазора. Максимальное отклонение для ПИ-регулятора составляет 0,16 мм, П-регулятора 0,11 мм, а FLC-регулятора всего лишь 0,03 мм, что практически не заметно и меньше точности установки рабочего зазора, которая составляет 0,05 мм⁷, –

⁷ How to adjust a roller mill? LK Mixer. URL: <https://www.lkmixer.com/blog/how-to-adjust-a-roller-mill/> (дата обращения: 13.02.2026).

было измерено, что это соответствует повороту штурвала на 5 минут. Это создает хорошую возможность для использования данного подхода к регулированию при работе станка в составе линии, т. к. к особенности работы станка вальцового типа относится то, что точность настройки постоянство значений рабочего зазора позволяют эффективно контролировать диапазоны значений размеров получаемых частиц [8]. Хотя при данном методе регулирования имеются минимальные отклонения – в реальной схеме устройства управления данные отклонения можно убрать с помощью разного рода фильтрации. Эта особенность FLC-регулятора выделяет относительно остальных рассмотренных контроллеров и позволяет считать его перспективным для применения в устройствах данного типа.

Обсуждение

На основе проведенного моделирования можно сделать некоторые выводы. Полученный результат по использованию FLC-регулятора для управления вальцовым станком, согласуется с работающими подобными устройствами в других отраслях [9]. Хотя ПИ-регулятор более точно осуществляет поддержание уровня продукта, но более предпочтительно использовать FLC-регулятор, т. к. сам характер процессов предполагает, что может быть некоторый допустимый диапазон изменения продукта в приёмном бункере относительно заданного значения, а также важно контролировать скорость изменения уровня продукта. Это комплиментарно логике работы FLC-регулятора, где задаются значения по диапазонам. Отмечено в работе данного регулятора то, что он плавно обрабатывает изменение потока на вальцы. Напротив, постоянные подстройки рабочего зазора в случае с ПИ-регулятором и перерегулирование затрудняет приведение станка в стационарный режим, особенно когда станок работает в составе линии. Для FLC-регулятора свойственен заметный сдвиг по фазе, но в данном случае это не влияет на качество регулирования. Понимание, в какой точке пространства состояний находится станок в данный момент позволяет определить состояние станка, что важно, при управлении всей линией. Данный вопрос – предмет дальнейших исследований.

Заключение

В настоящем исследовании был идентифицирован вальцовый станок как объект управления и описана модель вальцового станка, на основе которой были предложены и изучены разные устройства управления. Также был сделан вывод о возможности устойчивого и управляемого автоматического регулирования вальцового станка на основе оценки реакций на основные типы возмущений. Применения САУ отдельных станков отслеживает параметры и определяет только состояние одного станка, что необходимо, но недостаточно для управления системой станков. Важно отметить, что при таком подходе не отслеживается ни величина потока на выходе, ни получаемые фракции на выходе, а также не регулируется поток на входе. Это существенно ограничивает применение таких станков без дополнительных контуров управления в линии из нескольких станков. С ростом сложности производственной системы переход многоуровневому управлению обеспечивает более эффективное использование ресурсов, в целях упорядочения процесса выпуска готовой продукции [10]. Для осуществления данного исследования использовались данные реального оборудования, что позволяет применить результаты исследования на практике как для создания систем автоматического управления отдельных станков, так и в перспективе систем управления мукомольной линией в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Панкратов Г.Н. Анализ закономерности распределения по размерам частиц продуктов размола зерна. *Хлебопродукты*. 2016;(9):58–61.
2. Кандроков Р.Х., Панкратов Г.Н., Кусова И.У., Рындин А.А. Влияние межвальцового зазора на крупобразующую способность и гранулометрический состав промежуточных продуктов измельчения зерна тритикале. *Хлебопродукты*. 2021;(6):36–38.
3. Албагачиев А.Ю., Карцев И.С. Моделирование разрушения зерна в мельнице. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2024;(4):100–104. https://doi.org/10.52261/02346206_2024_4_100
Albagachiev A.Yu., Kartsev I.S. Simulation of grain destruction in a mill. *Problems of Mechanical Engineering and Automation*. 2024;(4):100–104. (In Russ.). https://doi.org/10.52261/02346206_2024_4_100
4. Campbell G.M., Bunn P.J., Webb C., Hook S.C.W. On predicting roller milling performance – Part I: The breakage equation. *Powder Technology*. 2001;115(3):234–242. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00348-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00348-X)
5. Kalitsis J., Minasny B., Quail K., McBratney A. Application of response surface methodology for optimization of wheat flour milling process. *Cereal Chemistry*. 2021;98(6):1215–1226. <https://doi.org/10.1002/cche.10474>
6. Эйкхофф П. *Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния*. Москва: Мир; 1975. 685 с.
Eykhoff P. *System Identification. Parameter and State Estimation*. Moscow: Mir; 1975. 685 p. (In Russ.).
7. Tedrake R. Linear Quadratic Regulators. In: *Underactuated Robotics: Algorithms for Walking, Running, Swimming, Flying, and Manipulation*. URL: <https://underactuated.mit.edu/lqr.html> [Accessed 26th October 2025].
8. Zhang Ch., Hu J., Xu Q., et al. Mechanical modeling and powder characteristics of wheat milling process: A comparative study of roller, hammer and stone mills. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025;23. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102166>
9. Navia D., Bruna R., Fernández F., et al. *Digital twin with automatic disturbance detection for real-time optimization of a semi-autogenous grinding (SAG) mill*. [Preprint]. SSRN. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4930275> [Accessed 26th October 2025].
10. Баркалов С.А., Белоусов В.Е., Дорофеев Д.В., Нижегородов К.А., Серебрякова Е.А. Информационная модель поддержки процессов управления производственными потоками автоматизированного производства. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2023;23(4):47–56. <https://doi.org/10.14529/ctcr230405>
Barkalov S.A., Belousov V.E., Dorofeyev D.V., Nizhegorodov K.A., Serebryakova E.A. Information model of support of processes of management of production flows of the automated production. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics"*. 2023;23(4):47–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/ctcr230405>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кудрявцев Александр Викторович, аспирант научно-исследовательского технологического университета МИСиС, Москва, Российская Федерация. **Aleksander V. Kudriavtsev**, Postgraduate of National Research University of Technology "MISIS", Moscow, the Russian Federation.

e-mail: alex.kud@mail.ru

ORCID: [0009-0004-4986-4982](https://orcid.org/0009-0004-4986-4982)

Анцупов Эрик Эрикович, независимый **Eric E. Antsupov**, Independent Researcher, исследователь, Новосибирск, Российская Федерация. Novosibirsk, the Russian Federation.

e-mail: antsupoverik@yandex.ru

ORCID: [0009-0004-2650-0203](https://orcid.org/0009-0004-2650-0203)

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 28.05.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 07.04.2026; approved after reviewing 28.05.2026; accepted for publication 09.06.2026.