



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-2-226-236

EDN: LAGIXN

Научная статья / Research article

Сравнение модели и эксперимента синхронизации двух валов ПИД-регулятором с инкрементальными энкодерами и преобразователями частоты

М.И. Кухарский^a, А.О. Журавлёв^a, Д.А. Андриков^{a,b}

^a Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^b Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

mkukharskii@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 декабря 2025 г.

Доработана: 20 февраля 2026 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2026 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта

При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных

Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

Аннотация. Точная синхронизация вала основного двигателя и вала приводного языка спирального транспортера является важной задачей в промышленности, где от нее зависит работоспособность спирального транспортера в целом, а также сохранение приводных валов, звезд и ленты в работоспособном состоянии. В работе представлен сравнительный анализ экспериментального применения и результатов моделирования ПИД-регулятора для синхронизации вращения двух валов с использованием инкрементальных энкодеров и управляемых преобразователями частоты. В качестве методологической базы исследования выдвинуты современные методы управления автоматизированных систем управления, включая настройку параметров преобразователей частоты и ПИД-регулятора и цифровую обработку сигналов энкодеров. Цель исследования — провести сопоставление точности и динамических характеристик, полученных на этапе моделирования, с результатами, полученными на реальной системе. Задача исследования — разработать математическую модель системы, настроить оптимальные параметры ПИД-регулятора как для математической модели, так и для реальной системы и изучить полученные расхождения между данными, выявив их причины. По итогам исследования была разработана математическая модель системы синхронизации, определены оптимальные параметры ПИД-регулятора, проанализированы основные факторы, вызывающие расхождения между симуляцией и реальной работой системы, и сформулированы рекомендации для повышения ее точности.

Ключевые слова: обратная связь по положению, частотно-регулируемый привод, имитационное моделирование, переходный процесс, автоматизированные системы управления

Вклад авторов

Кухарский М.И. — написание исходного текста, разработка математической модели, пуско-наладочные работы; Журавлёв А.О. — анализ научной литературы, рекомендации; Андриков Д.А. — научное руководство, концепция исследования. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Кухарский М.И., Журавлёв А.О., Андриков Д.А. Сравнение модели и эксперимента синхронизации двух валов ПИД-регулятором с инкрементальными энкодерами и преобразователями частоты // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 226–236. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-226-236> EDN: LAGIXN

© Кухарский М.И., Журавлёв А.О., Андриков Д.А., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Comparison of the Model and the Experiment of Synchronizing Two Shafts with a PID Controller Using Incremental Encoders and Frequency Converters

Mikhail I. Kukharskii^a✉, Anton O. Zhuravlev^a, Denis A. Andrikov^{a,b}

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

✉ mkukharskii@mail.ru

Article history

Received: December 14, 2025

Revised: February 20, 2026

Accepted: February 25, 2026

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies

No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability

All data obtained during this study are included in the published article.

Abstract. The precise synchronization of the main drive shaft and the driven shaft of a screw conveyor is a critical industrial task, upon which the overall operability of the screw conveyor depends, as well as the maintenance of the drive shafts, sprockets, and belt in a functional state. This study presents a comparative analysis of the experimental application and simulation results of a PID controller for synchronizing the rotation of two shafts using incremental encoders and frequency converters. Modern methods of automated control systems are adopted as the methodological basis of the research, including the adjustment of parameters for frequency converters and PID controllers, and the digital processing of encoder signals. The objective of the study is to compare the accuracy and dynamic characteristics obtained during the simulation phase with the results obtained from the real system. The research task is to develop a mathematical model of the system, tune optimal PID controller parameters for both the mathematical model and the real system, and analyze the resulting discrepancies between the data, identifying their causes. As a result of the study, a mathematical model of the synchronization system was developed, optimal PID controller parameters were determined, the main factors causing discrepancies between simulation and the real system operation were analyzed, and recommendations were formulated to improve its accuracy.

Keywords: position feedback, variable-frequency drive, simulation modeling, transient process, automated control systems

Authors' contribution

Kukharskii M.I. — writing the source text, developing a mathematical model, and commissioning; Zhuravlev A.O. — analysis of scientific literature, recommendations; Andrikov D.A. — scientific management, research concept. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Kukharskii MI, Zhuravlev AO, Andrikov DA. Comparison of the model and the experiment of synchronizing two shafts with a PID controller using incremental encoders and frequency converters. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026; 27(2):226–236. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-2-226-236> EDN: LAGIXN

Введение

Современный прогресс в области теории автоматического управления, современных систем управления и цифровых технологий активно способствует развитию автоматизации технологических процессов в промышленности. Одной из ключевых задач в данной области является обеспечение точной синхронизации движущихся частей сложного технологического оборудования. К такому оборудованию относятся некоторые спиральные транспортеры, чья сложность обусловлена конструктивными особенностями и требова-

ниями к определенным габаритным размерам транспортера, из-за чего возникает необходимость второго мотор-редуктора. Практика эксплуатации подобных систем показывает, что даже незначительные ошибки могут привести к серьезным последствиям как для производителя оборудования, так и для заказчика.

Актуальность рассматриваемой темы и востребованность технологических решений обусловлены наличием проблем при проектировании и эксплуатации подобных систем. Инженерные ошибки, связанные с неправильной оценкой нелинейностей, возмущающих воздействий или дина-

мических характеристик, ведут к снижению эффективности оборудования и уменьшают срок его эксплуатации. Во избежание больших временных и материальных затрат необходима разработка формализованной математической модели для определения параметров и конфигурации системы синхронизации валов. Данная модель станет основой для последующего внедрения и запуска на реальном оборудовании.

В автоматизации широко распространены ПИД-регуляторы, чьи методы доказали свою эффективность. Для решения поставленной задачи синхронизации необходима тщательная настройка параметров ПИД-регулятора [1; 2]. Современные цифровые технологии, такие как программируемый логический контроллер (ПЛК), позволяют вести настройку данных о физических процессах и регуляторах виртуально и с минимальной задержкой, минимизируя временные затраты на эксперименты на реальном оборудовании [3].

В современной промышленности примерно 95 % контуров управления используют технологию ПИД-регулирования [4]. В Японии уровень использования ПИД-регулирования достиг 85,4 % [5], и этот показатель продолжает расти с каждым годом. В 2002 г. Десборо и Миллер провели исследование, которое показало, что в США насчитывается более 11 600 регуляторов со структурами ПИД-регулирования, применяемых в различных промышленных производствах, причем более 97 % контуров обратной связи используют алгоритм ПИД-регулирования [6].

Цель исследования — проведение сравнительного анализа полученных результатов моделирования и запуска реального оборудования с помощью ПИД-регулирования для синхронизации двух приводных валов с использованием инкрементальных энкодеров и преобразователей частоты, а также формулировка рекомендаций для повышения точности и стабильности системы синхронизации.

1. Теоретические основы

Данный раздел посвящен описанию теоретических принципов, лежащих в основе рассматриваемой системы. Описываются концепции синхронизации вращающихся валов, принцип работы и устройство измерительных датчиков и преобразователей частоты, а также алгоритм работы, использующийся для достижения синхронного вращения валов.

Задача синхронизации валов представляет собой задачу поддержания заданной зависимости их угловых скоростей или угловых положений. Синхронизация по угловой скорости требует совпадения угловых скоростей вращающихся валов или их пропорциональности, используется для обеспечения постоянного относительного положения механической части. Синхронизация по угловому положению требует поддержания постоянной разности угловых положений, используется для точного позиционирования механической части. В рамках данной работы решается задача поддержания нулевой разницы угловых скоростей вращающихся валов:

$$\omega_1 - \omega_2 = 0, \quad (1)$$

где ω_1, ω_2 — угловые скорости валов, об/мин.

Для поддержания данной зависимости в условиях внешних возмущающих факторов, таких как изменение нагрузки или трение, необходима автоматизированная система управления, осуществляющая корректировку скорости ведомого вала, в данном случае вала приводного языка.

Одним из наиболее распространенных датчиков, с помощью которого определяется угловое положение и измеряется скорость вращения, является инкрементальный энкодер. Принцип его работы основан на преобразовании механического вращения в последовательность электрических сигналов [7].

Инкрементальный энкодер генерирует два основных сигнала A и B и сигнал нулевой отметки Z . Сигналы A и B являются идентичными по частоте, но сдвинуты относительно друг друга на одну четверть периода [8]. Этот сдвиг позволяет определять направление вращения вала, а подсчет импульсов определяет величину угловой скорости. Сигнал Z генерирует один импульс за один полный оборот вала.

В рассматриваемой системе будут использоваться два инкрементальных энкодера на сто импульсов за один оборот вала и использоваться сигналы A и B для каждого. Для этого необходимо использовать четыре высокочастотных входа. Для данной системы будет использоваться ПЛК «Siemens S7-1214», первые шесть дискретных входов которого являются высокочастотными, с диапазоном до 100 кГц. Схема подключения энкодера к ПЛК представлена на рис. 1.

Для управления асинхронными двигателями с помощью ПЛК используются преобразователи

частоты — с их помощью происходит включение и регулировка скоростей. В рассматриваемой системе управление мотор-редукторами происходит с помощью скалярного управления (U/f) — метода, при котором поддерживается постоянное отношение напряжения к частоте. При этом скорость вала двигателя оценивается на основе частоты напряжения на его обмотках [9].

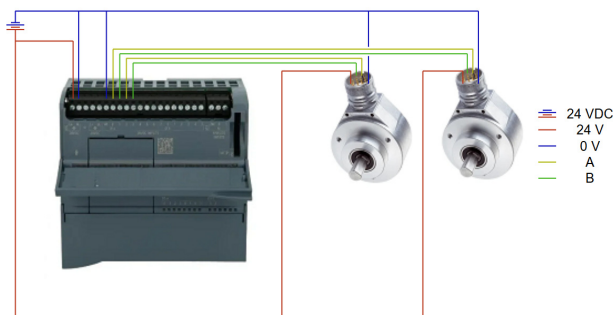


Рис. 1. Схема подключения энкодеров к ПЛК
Источник: выполнено М.И. Кухарским.

Одной из функций преобразователей частоты является плавный пуск — постепенный набор и снижение частоты. Для ведущего вала время набора 5 с, время остановки 7 с. Для ведомого время набора и остановки 1 с. Медленный разгон и остановка ведущего вала обусловлены необходимостью плавности хода, а ведомый вал должен обладать высоким быстродействием для оперативного сведения значения рассинхронизации к нулю.

Обмен связи между ПЛК и преобразователями частоты будет происходить с помощью промышленного протокола связи RS-485 Modbus RTU [10]. Для обеспечения быстрой смены установки (задания скорости) преобразователя частоты ведомого вала необходимо использовать импульсный вход. В ПЛК «Siemens S7-1214» первые четыре дискретных выхода являются импульсными. Также необходимы быстрый запуск и остановка каждого из преобразователей частоты. Схема подключения преобразователей частоты «Danfoss FC51» с ПЛК представлена на рис. 2.

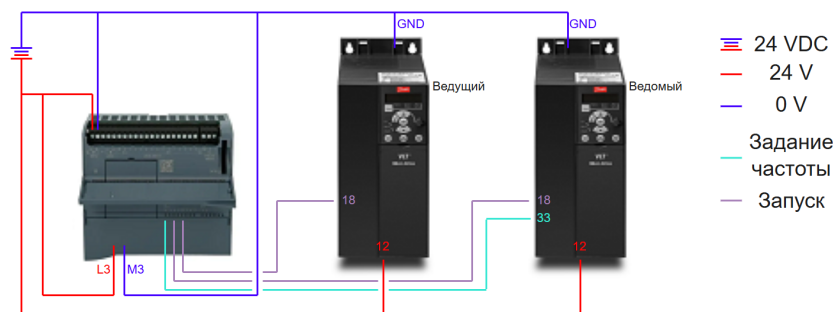


Рис. 2. Схема подключения ПЧ к ПЛК
Источник: выполнено М.И. Кухарским.

ПИД-регулятор — алгоритм обратной связи теории автоматического управления, широко использующийся в автоматизации производств. Он предназначен для минимизации ошибки между фактическим значением и желаемым (уставкой). Данный алгоритм рассчитывает управляющее воздействие при помощи трех компонентов: пропорциональная составляющая (P) — чем больше ошибка, тем больше пропорциональный вклад; интегральная составляющая (I) — устраняет установившуюся ошибку, накапливая ее со временем; дифференциальная составляющая (D) — предсказывает будущую ошибку, уменьшает перерегулирование и колебания [11, с. 64–70].

Для написания программы для ПЛК «Siemens» используется программное обеспечение Tia Portal V17. Данное программное обеспечение содержит в себе большое количество встроенных библиотек, в том числе и ПИД-регулятор в функции «PID_Compact» [12]. Настройка регулятора будет происходить вручную итерационным методом через изменение следующих параметров технологического объекта: K_P — пропорциональный коэффициент; T_I — время интегрирования; T_D — время дифференцирования; $pror_weight$ — вес пропорциональной составляющей; $sampling_time$ — частота вычисления управляющего воздействия.

Совокупность высокой производительности ПЛК серии «S7-1200», оперативного изменения параметров ПИД-регулятора в реальном времени и эмпирического подхода позволит быстро и точно определить оптимальные коэффициенты регулятора для математической модели, а также существенно сократит время ввода реальной системы в эксплуатацию.

2. Реализация и тестирование математической модели в среде Tia Portal V17

Математическая модель синхронизации двух валов основана на характеристиках реального оборудования, а именно шильдиках моторов и передаточных числах редукторов, указанных производителями данного оборудования. Скорость вала ведомого мотора — 900 об/мин при скорости 50 Гц, передаточное число редуктора 40. Скорость вала ведущего мотора — 1400 об/мин, передаточное число редуктора составляет 8,98. Но данный спиральный транспортер спроектирован таким образом, что ведущий мотор приводит в движение карданную систему, а уже кардан приводит в движение саму ленту. Поэтому для ведущего мотора необходимо учитывать передаточное число редуктора кардана, которое составляет 7,97. Чтобы найти количество оборотов вала, приводящих спиральный транспортер в движение при скорости, равной 50 Гц, необходимо воспользоваться формулами (2) [13]:

$$N_{\text{вала}} = \frac{N_{\text{мотора}}}{N_{\text{передат}} \cdot N_{\text{кардан}}}, N_{\text{кардан}} > 0;$$

$$N_{\text{вала}} = \frac{N_{\text{мотора}}}{N_{\text{передат}}}, N_{\text{кардан}} = 0. \quad (2)$$

Подставляя параметры моторов и редукторов в выражение (2), получаем следующие данные: $N_{\text{вала}}$ ведущего мотора 19,56 об/мин, $N_{\text{вала}}$ ведомого мотора 22,5 об/мин.

Для математической модели предполагается линейная зависимость скорости вала от частоты преобразователя частоты.

Расчет совершенного количества оборотов валами выполняется в блоке циклических прерываний с периодом выполнения $T = 10$ мс. Такое требование обусловлено необходимостью постоянного времени между вычислениями, что является необходимым условием минимизации ошибки

для корректной работы системы в целом. Количество совершенных оборотов вычисляется по формуле

$$N[k] = N[k-1] + \Delta N, \quad (3)$$

где ΔN — приращение вала за 10 мс.

При увеличении времени приращения ошибка начинает нарастать, что приводит к снижению точности мгновенного положения вала. Для вычисления приращения ΔN используется текущее значение скорости вращения вала, рассчитанное в об/мин:

$$\Delta N = \frac{N_{\text{вала}}}{60 \cdot 100}. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой часть оборота, совершаемую валом за 10 мс, которая накапливается в счетчике, формируя точное абсолютное положение вала.

Инкрементальные энкодеры имеют разрешение 100 импульсов на один оборот. Преобразование абсолютного положения вала в счетчик импульсов энкодера происходит согласно выражению

$$N[k]_{\text{энк}} = N[k]_{\text{вала}} \cdot 100. \quad (5)$$

Полученное целочисленное значение количество импульсов $N[k]_{\text{энк}}$ позволяет с высокой точностью имитировать сигналы, которые сгенерировал бы реальный энкодер выходными сигналами A и B . Данные сигналы и значения общего количества импульсов необходимы для работы алгоритма синхронизации.

Плавный и пуск и стоп являются стандартными функциями современных преобразователей частоты. Данные функции снижают динамические нагрузки на механические элементы оборудования и исключают резкие скачки скорости. Учет данных характеристик в математической модели необходим для оценки динамических процессов, приближенных к практическим, а также для корректной настройки ПИД-регулятора

Для имитации данных функций разработана модель изменения выходной частоты. Алгоритм реализован в блоке циклических прерываний с периодом выполнения $T = 10$ мс. Основой модели является суждение, согласно которому время достижения заданной скорости линейно зависит от ее величины. Заданное время разгона соответствует времени набора максимальной скорости с

нуля, для достижения произвольной заданной скорости требуется время прямо пропорционально отношению данной скорости к максимальной.

Приращение скорости за момент времени 10 мс рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta f = \frac{100}{t \cdot 100} = \frac{1}{t}, \quad (6)$$

где t — заданное время разгона/замедления.

Для решения задачи синхронизации двух вращающихся валов в среде разработки TI Portal был применен функциональный блок из встроенной библиотеки «PID_Compact». «PID_Compact» — оптимизированная реализация ПИД-регулятора, адаптированная под ПЛК «Siemens», которая включает необходимые функции для устойчивой работы.

Настройка технологического объекта «PID_Compact» осуществлялась путем настройки следующих параметров: K_P — величина пропорционального коэффициента; T_I — время интегрирования; T_D — время дифференцирования; $prop_weight$ — вес пропорциональной составляющей; $sampling_time$ — время вычисления алгоритма ПИД-регулятора.

2.1. Настройка методом СНР

Для настройки параметров ПИД-регулятора с помощью метода Чина — Хронеса — Ресвика необходимо определить время задержки L и время выравнивания T [14].

Желаемый график переходного процесса представлен на рис. 3.

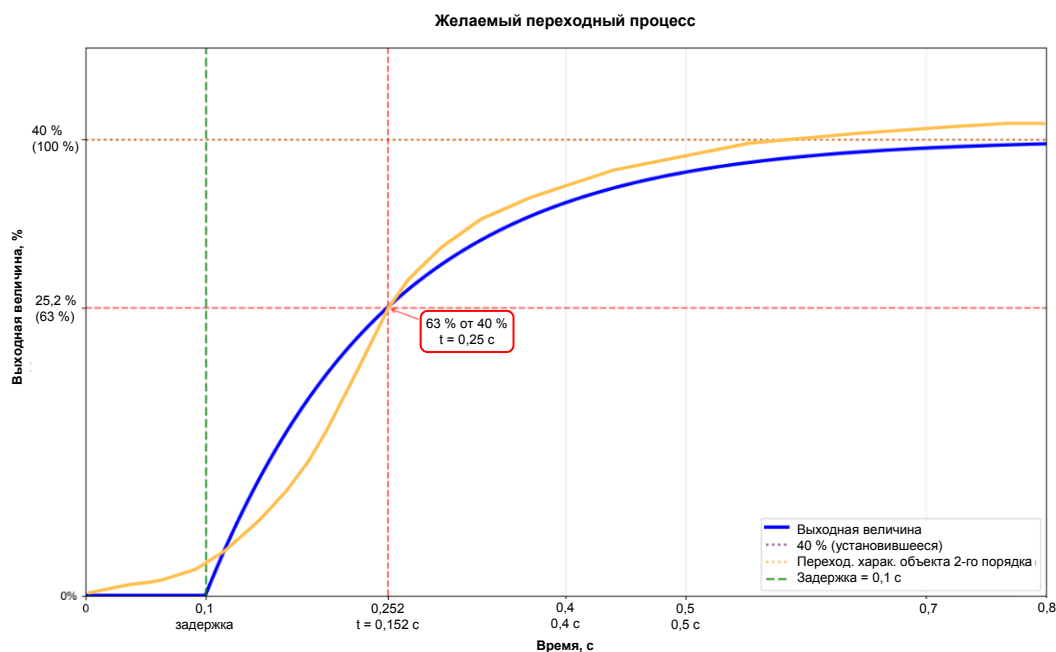


Рис. 3. Желаемый переходный процесс

Источник: выполнено М.И. Кухарским.

В данной системе параметр $sampling_time$ всегда равен 0,1 с, а скорость возрастает линейно, поэтому время задержки равняется этому параметру.

Исходя из показаний графика 3, при ступенчатом воздействии в 40 % это время равняется 0,152 с.

Для расчета параметров ПИД-регулятора необходимо воспользоваться формулами, представленными в табл. 1 [15].

Таблица 1. Формулы вычисления параметров ПИД-регулятора методом СНР

K_p	T_i	T_d
$0,95 \times T/L$	$2,4 \times L$	$0,42 \times L$

Источник: выполнено М.И. Кухарским

Параметры ПИД-регулятора: $K_p = 1,444$, $T_i = 0,24$, $T_d = 0,042$; переходный процесс представлен на рис. 4.

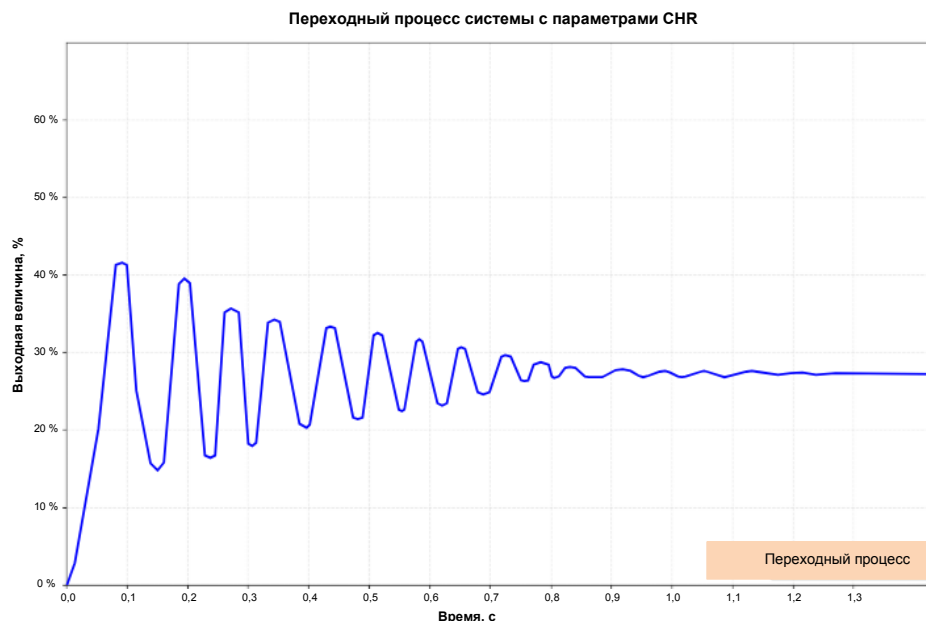


Рис. 4. Переходный процесс ПИД-регулятора математической модели с параметрами CHR-метода
И с т о ч н и к: выполнено М.И. Кухарским.

Метод CHR показал неудовлетворительное качество регулирования: время регулирования, примерно равное 60 с, а также значительное перерегулирование требуют ручной донастройки параметров ПИД-регулятора.

2.2. Настройка эмпирическим итерационным методом

Настройка включала в себя подбор оптимальных параметров с визуальным контролем переходных характеристик реализованной математической модели.

На начальном этапе была произведена настройка параметра K_P при отключенных интегральной и дифференциальной составляющих он оказался равен 9,7. Данное значение пропорциональной части необходимо для обеспечения мощного управляющего значения даже при малом значении рассинхронизации.

Вторым шагом настройки регулятора стало введение интегральной составляющей T_I , равной 1 с. Данное значение позволяет накапливать корректирующее воздействие, необходимое для компенсации возмущений, и не вызывать замедления переходного процесса.

Следующим шагом стала коррекция дифференциальной составляющей для подавления колебаний, $T_D = 0,1$. При заданном значении диф-

ференциальной составляющей система демонстрирует общую устойчивость.

Четвертым шагом стал подбор веса пропорциональной составляющей, $prop_weight = 0,3$. Данная конфигурация необходима для снижения резкости реакции на скачок задания скорости и обеспечения плавности работы. Параметр $sampling_time = 0,1$ для жесткой привязки к циклу выполнения основной программы.

Переходный процесс представлен на рис. 5.

Время регулирования составляет 5,5 с, что соответствует требованиям поставленной задачи, учитывая инерционность системы. Полученное значение перерегулирования 7 % является оптимальным для промышленных систем. Также присутствуют незначительные затухающие колебания в пределах 3–4 % до истечения времени регулирования. Значение рассинхронизации не превышало значения 3, а по истечении времени регулирования после запуска системы стало статичным и равным нулю.

Найденная конфигурация параметров соответствует требованиям к быстродействию, устойчивости и плавности работы ведомого преобразователя частоты с учетом ее динамических свойств. Данные параметры ПИД-регулятора, полученные при помощи математической модели, станут основой для реализации синхронизации реальной системы.

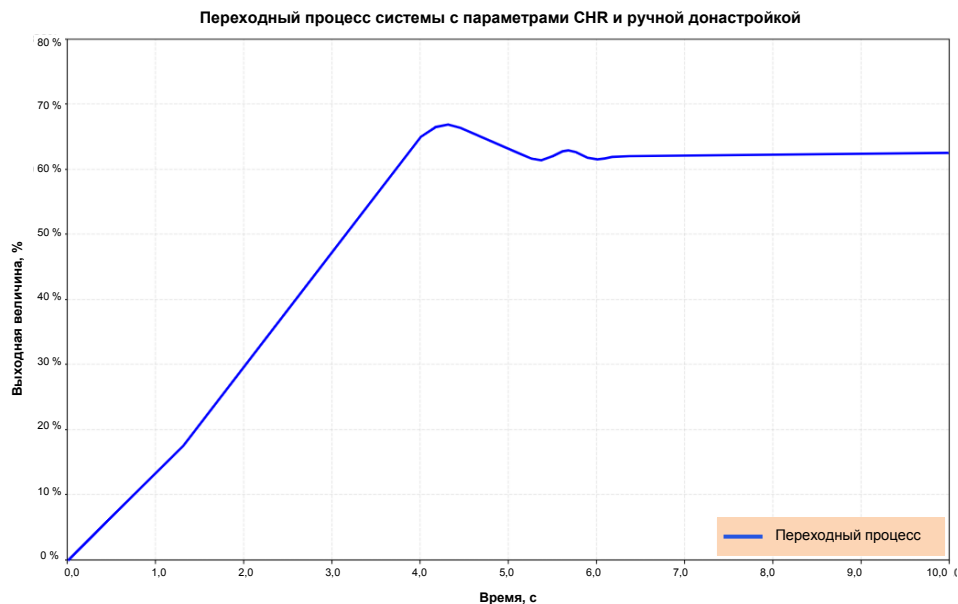


Рис. 5. Переходный процесс ПИД-регулятора математической модели с параметрами эмпирического метода
И с т о ч н и к: выполнено М.И. Кухарским.

3. Реализация и тестирование реальной системы

3.1. Пусконаладочные работы

Параметры ПИД-регулятора, полученные при математической модели, были интегрированы в реальную систему.

Однако неучтенные нелинейности, такие как плавный стоп и пуск, а также погрешности исполнительных механизмов, привели к колебаниям системы без установившегося значения.

В результате эмпирической настройки были подобраны окончательные значения параметров ПИД-регулятора: $K_P = 6$; $T_D = 0,195$. Переходный процесс изображен на рис. 6.

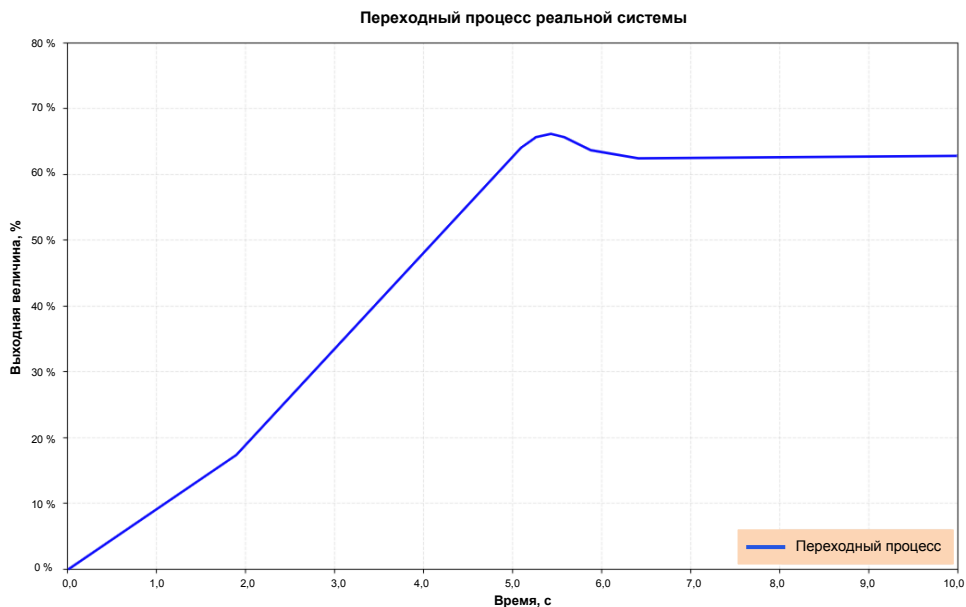


Рис. 6. Переходный процесс ПИД-регулятора реальной системы
И с т о ч н и к: выполнено М.И. Кухарским.

В результате интегральная составляющая сохранила прежнее значение, и, несмотря на незначительное увеличение времени регулирования до 7 с, оно является допустимым в рамках данного технологического процесса с учетом плавного пуска ведущего вала длительностью 7 с. Перерегулирование снизилось до 6 %, а увеличение времени дифференцирования снизили амплитуду затухающих колебаний до 2 %. Значение рассинхронизации не превышало значение 2, а по истечении времени регулирования после запуска системы стало статичным и равным нулю.

Система демонстрирует плавные и устойчивые переходные процессы, подтверждая готовность к промышленной эксплуатации.

3.2. Рекомендации для повышения точности

Для повышения точности системы синхронизации целесообразно заменить существующие энкодеры с характеристиками 100 импульсов на оборот на энкодеры с большим количеством импульсов (500, 1000), что позволит снизить ошибку положения ведомого вала [16].

Отдельное внимание следует уделить аппаратной части — заменить частотные преобразователи на сервоприводы и использовать встроенные в сервоприводы энкодеры. Необходимо отметить, что сервоприводы управляют не только скоростью валов, но и точным угловым положением ротора, что обеспечивает более высокую динамику и жесткость [17]. Сервоприводы позволяют мгновенно реагировать на возмущения и поддерживать точную фазовую связь между валами [18–19].

4. Сравнительный анализ динамических характеристик реальной системы и математической модели

Переход от математической модели к реальной системе потребовал корректировки ПИД-регулятора, что отразилось на динамических характеристиках системы. Сравнительный анализ представлен в табл. 2.

Необходимость в снижении пропорциональной составляющей свидетельствует о более высокой чувствительности реальной системы, чем предполагала математическая модель. Это связано с наличием нелинейностей в реальной системе, возникающих из-за трения, люфтов и нелинейностей плавного пуска и остановки.

Таблица 2. Сравнение параметров

Параметр	Математическая модель	Реальная система
K _P	9,7	6
T _D , с	0,1	0,195
Время регулирования, с	5,5	7
Перерегулирование, %	7	6
Амплитуда колебаний, %	3–4	<=2

Источник: выполнено М.И. Кухарским.

В реальной системе присутствуют дополнительные запаздывания, такие как жесткость валов при вращении и задержка обработки сигналов преобразователем частоты. Для их компенсации существенно увеличено время дифференцирования почти в 2 раза.

После корректировки параметров время регулирования увеличилось на 1,5 с до 7 с, при этом снизив перерегулирование до 6 %. Увеличение времени регулирования остается в пределах технологического процесса разгона ведущего вала, не оказывая негативного влияния на процесс.

Прямым следствием увеличения времени дифференцирования является снижение амплитуды колебаний с 3–4 до 2 %, что свидетельствует о повышении устойчивости системы.

Корректировка параметров ПИД-регулятора является закономерным и обязательным условием при переходе к реальной системе от математической модели. Конечные параметры следует считать оптимальными для данных условий эксплуатации в связи с демонстрацией системой значения рассинхронизации валов равным нулю, приемлемым быстродействием и высокой стабильностью, соответствующим требованиям процесса синхронизации двух валов спирального транспортера.

Заключение

В ходе проведенного исследования была успешно разработана математическая модель и запущена реальная система синхронизации двух валов спирального транспортера на базе программируемого логического контроллера «Siemens S7-1214». Переход от математической модели к реализации системы на практике позволил создать устойчивую систему управления, соответствующую требованиям реальных условий эксплуатации.

График переходного процесса подтверждает эффективность регулятора: время регулирования не превышает время разгона ведущего вала, а перерегулирование не превышает 7 %. Практическая значимость работы заключается в создании методики адаптации математической модели в идеальных условиях к реальному промышленному оборудованию с учетом его нелинейностей и погрешностей.

Перспективы дальнейших исследований включают в себя расширение функциональности до системы с большим количеством валов и оптимизацию системы для работы с переменной нагрузкой. Будущее дальнейшего развития системы синхронизации связано с реализацией рекомендаций по замене преобразователей частоты и отдельных энкодеров на сервоприводы со встроенными энкодерами с большим количеством импульсов на один оборот вала. Представленная в данном исследовании система может быть успешно внедрена в смежных областях промышленной автоматизации, требующих синхронизации вращательных движений.

Список литературы

1. Паздникова А.А. Методы ручной настройки ПИД-регулятора // День науки : материалы XXXIV научной конференции Амурского государственного университета, Благовещенск, 13 марта 2025 года. Благовещенск, 2025. С. 120–121. EDN: RNWOVX
2. Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Сухорукова И.Г., Оробей И.О. Настройка ПИД-регулятора через dead-beat-регулятор с различными интегральными критериями // Актуальные проблемы науки и техники : материалы I Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в городе Сарапуле. Сарапул, 2020. С. 258–265. EDN: LSIIQI
3. Nguyen V.K., Tran V.K., Pham H., Nguyen H.D., Nguyen C.N. Design and implementation of fuzzy-based fine-tuning PID controller for programmable logic controller // International Journal of Integrated Engineering. 2024. Vol. 16. No. 5. P. 359–372. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.05.027>
4. Cha J.H., Roh M.I., Lee K.Y. Dynamic response simulation of a heavy cargo suspended by a floating crane based on multibody system dynamics // Ocean Engineering. 2010. Vol. 37. No. 14–15. P. 1273–1291. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.06.008>
5. Hong J.W., Roh M.I., Ham S.H., Ha S. Dynamic simulation of subsea equipment installation using an offshore support vessel based on flexible multibody system dynamics // Journal of Marine Science and Technology. 2016. Vol. 24. No. 4. P. 807–821. <https://doi.org/10.6119/JMST-016-0323-1>
6. Desborough L., Miller R. Increasing customer value of industrial control performance monitoring — honeywell's experience. *AIChE Symposium Series*. 2002. Vol. 326. P. 169–189.
7. Уляшев А.Е., Старцев А.Э. Математическая модель инкрементального энкодера // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 4. С. 102–106. EDN: YLYDVE
8. Келдибеков Ж.К., Яковлев С.Г., Горбаченко И.М. Создание программного обеспечения для управления вентиляционно-фильтрующей установкой с шиной EtherCAT // Наука и инновации в современном мире. 2020. Т. 5. С. 127–131. EDN: PKYQHA
9. Khudier K.H., Mohammed K.G., Ibrahim M.S. Design and implementation of constant speed control system for the induction motors using programmable logic controller (PLC) and variable frequency derive (VFD) // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Diyala, Iraq, 2021. Vol. 1076. No. 1. Article no. 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1076/1/012007>
10. Marzuki A., Muzakkir T., Arief M.S. Three-phase induction motor control and monitoring using VFD and ESP32 based on modbus RTU protocol // American Journal of Electrical and Computer Engineering. 2024. Vol. 8. No. 2. P. 71–80. <https://doi.org/10.11648/j.ajece.20240802.15>
11. Aström K.J., Hagglund T. PID controllers, 2nd Edition. USA: Instrument Society of America; 1995. 343 p. ISBN 1-55617-516-7
12. Genctor S.B., Soydemir M.U., Sahin S. Design of a process control experimental setup for temperature control with PID controller using TIA portal // 13th International Conference on Applied Sciences. Izmir Katip Celebi University, 2025. p. 1073–1086. ISBN 978-625-5962-78-2
13. Yao Z., Lin T., Chen Q., Ren H. Dynamic response of electromechanical coupled motor gearsystem with gear tooth crack // Machines. 2024. Vol. 12. No. 12. Article no. 918. <https://doi.org/10.3390/machines12120918>
14. Bashishtha T.K., Singh V.P. Chien-Hrones-Reswick method-based PID control strategy for mitigation of frequency deviation of islanded microgrid // Electrical Engineering. 2025. Vol. 107. P. 8085–8099. <https://doi.org/10.1007/s00202-025-02959-2>
15. Singh A., Yadav S., Tiwari N., Nishad D.K., Khalid S. Model order reduction of boiler system using nature-inspired metaheuristic optimization of PID controller // Discover Applied Sciences. 2025. Vol. 7. No. 5. Article no. 402. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06927-0>
16. Robinson L.B., Kibrick R.I., Osborne J., Cowley D.J. Tests of incremental rotary encoders // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engi-

neering. San Diego, CA, United States, 1997. Article no. 3112. <https://doi.org/10.1117/12.278837>

17. *Kalyashina A.V., Smirnov Yu.N.* Study of proportional control process of industrial robot servo drive // Herald of Technological University. 2025. Vol. 28. No. 5. P. 99–104. https://doi.org/10.55421/3034-4689_2025_28_5_99 EDN: SYLNRX

18. *Полющенков И.С.* Разработка следящего электропривода с векторным управлением вентильным

электрическим двигателем // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2025. № 5. С. 68–80. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2025.5.068-080> EDN: GCHDVI

19. *Tarczewski T., Grzesiak L.M., Lisiński H.* Performance analysis of PMSM servo-drive with state feedback and hybrid position controllers // Power Electronic Devices and Components. 2025. Vol. 12. Article no. 100116. <https://doi.org/10.1016/j.pedc.2025.100116>

Сведения об авторах

Кухарский Михаил Игоревич, магистрант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0004-4813-6051; e-mail: mkukharskii@mail.ru

Журавлёв Антон Олегович, аспирант кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 4134-6061, ORCID: 0009-0002-2900-6767; e-mail: 1142220875@rudn.ru

Андриков Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; доцент кафедры автоматических систем управления, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; eLIBRARY SPIN-код: 8247-7310; ORCID: 0000-0003-0359-0897; e-mail: andrikovdenis@mail.ru