

УДК 681.51:007.52-026.26
DOI: 10.18799/29495407/2024/3/65
Шифр специальности ВАК: 2.3.1

Разработка системы управления двигателями шагающего робота

В.С. Манзаров✉, Н.И. Поберезкин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск

✉vsm17@tpu.ru

Аннотация. Статья описывает моделирование и практическую реализацию трехконтурной системы управления двигателями шагающего робота с шестью дугообразными движителями. В работе также проведено исследование влияния качества идентификации математической модели на коэффициенты системы регулирования.

Ключевые слова: робототехника, система управления, шагающий робот, гексапод, система подчиненного регулирования, двигатель постоянного тока, привод, трёхконтурная система управления

Для цитирования: Манзаров В.С., Поберезкин Н.И. Разработка системы управления двигателями шагающего робота // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2. – № 3. – С. 36–46. DOI: 10.18799/29495407/2024/3/65

UDC 681.51:007.52-026.26
DOI: 10.18799/29495407/2024/3/65

Development of a walking robot motor control system

V.S. Manzarov✉, N.I. Poberezkin

National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉vsm17@tpu.ru

Abstract. The paper describes the modeling and practical implementation of a three-loop motor control system for a walking robot with six arc-shaped thrusters. The paper also investigates the impact of the quality of identification of the mathematical model on the coefficients of the control system.

Keywords: robotics, control system, walking robot, hexapod, subordinate control system, DC motor, drive, three-loop control system

For citation: Manzarov V.S., Poberezkin N.I. Development of a walking robot motor control system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial cybernetics*, 2024, vol. 2, no. 3, pp. 36–46. DOI: 10.18799/29495407/2024/3/65

Введение

Шагающие роботы представляют собой робототехнические системы, осуществляющие движение за счёт пофазной смены точек опоры на поверхность и перемещением центра масс данными точками. Они находят применение в различных сферах, включая проведение исследований в сложных и неоднородных средах, спасательные операции, а также выполняют задачи индикации и анализа аварийных ситуаций в промышленности.

В данной работе предлагается реализация системы управления одним двигателем робототехнической системы, имеющей конфигурацию, представленную на рис. 1.

Передвижение робота-гексапода осуществляется за счёт поочередного переключения двух троек ног, такой тип походки называют «трипод», следовательно, при потере одной из трёх опор в любой момент времени робот потеряет устойчивость. Помимо этого, известно, что на скорость передвиже-

ния робота, помимо частоты вращения вала двигателя, влияет растров угла движителя, который необходимо задавать и выдерживать на протяжении движения. Исходя из этого, возникает необходимость точного позиционирования движителя. Поскольку робот предназначен для функционирования в условиях пересечённой местности, нередко движители робота будут сталкиваться с препятствиями разных высот и наклонов. Во время возникновения подобных ситуаций на двигатель будет действовать высокая нагрузка, которая сопровождается кратковременным многократным увеличением тока, протекающего по обмоткам двигателя. Учитывая этот факт, необходимо обеспечить ограничение тока двигателя. Вместе с этим ограничение тока позволит избежать поломок узлов привода при застревании движителя. В силу особенностей кинематики движителя его управление разбивается на две фазы – фаза свободного вращения, когда движитель находится в воздухе, и фаза номинального вращения, когда движитель соприкасается с поверхностью. При угле раствора движителя меньше 90° использовать одинаковую частоту вращения в обеих фазах нерационально, поскольку не будет времени для переключения троек ног. То есть во время фазы свободного вращения частота должна быть максимальной, в фазе номинального вращения частота будет зависеть от угла раствора движителя. Отсюда вытекает необходимость регулирования частоты вращения.

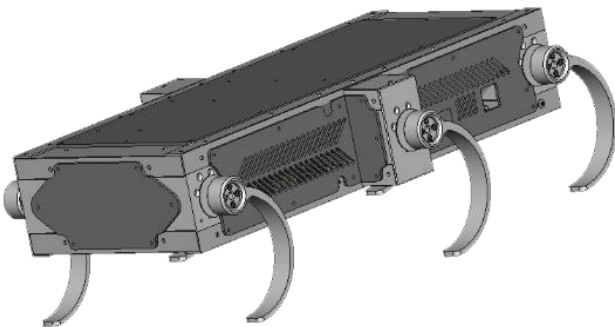


Рис. 1. Модель шагающей платформы
Fig. 1. Walking platform model

Регулировать описанные выше параметры можно с применением принципа подчинённого регулирования [1] с целью обеспечения быстродействия и высокой точности управления. Система подчинённого регулирования является эффективным средством для компенсации нестационарных усилий в задаче управления двигателями. Ее эффективность основана на использовании обратной связи по каждой регулируемой величине. Она непрерывно мониторит и анализирует состояние двигателя с по-

мощью датчиков обратной связи. Это позволяет системе быстро реагировать на изменения окружающей среды, например, рельефа.

Учитывая вышеописанное, к системе предъявляются высокие требования. В первую очередь, необходимо принять меры по ограничению тока, чтобы предотвратить возникновение ударного момента при вращении движителя, который является дугообразным эксцентриком, в обратную сторону.

Должны быть обеспечены следующие показатели качества переходного процесса для контура положения:

- перерегулирование, равное 0 % – любое перерегулирование может привести к непредсказуемым движениям и ошибкам в позиционировании, особенно на сложном рельефе;
- время переходного процесса длительностью менее секунды – в динамически изменяющихся условиях роботу требуется быстро реагировать на изменения в окружающей среде.

В данной работе будет рассмотрено проектирование системы подчинённого регулирования, которая позволяет адаптироваться к изменениям нагрузки на двигатели робота и реагировать на нестационарные усилия в реальном времени.

Обзор готовых решений

Научные статьи, посвященные моделированию системы управления, например [1], предлагают готовые решения на основе математических моделей или с использованием сред моделирования. В этих работах приводятся математические уравнения, блок-схемы и графики, которые представляют модель управления двигателями. Эти модели могут быть разработаны с использованием известных методов и теорий управления. Синтез системы управления можно разделить на следующие этапы:

- моделирование объекта управления;
- выбор структуры управления;
- синтез регуляторной системы управления;
- отладка системы на реальном объекте.

Научные статьи предоставляют теоретическую основу и предлагают возможные решения для системы управления двигателями под нестационарными усилиями.

Однако, несмотря на то, что моделирование позволяет предсказать поведение системы и оценить эффективность предлагаемых решений, в реальных условиях практической эксплуатации модель может не всегда полностью соответствовать физическому объекту, поэтому после моделирования системы управления необходимо провести эксперименты и, при необходимости, усовершенствовать работу системы.

Идентификация модели двигателя постоянного тока

Идентификация, то есть определение параметров и характеристик, необходима для упрощения синтеза системы управления движителями. В работе используется двигатель модели 36GP-36ZYT (24 В). Двигатель постоянного тока математически описывается следующей системой уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (i \cdot R - C_e \cdot \omega + U); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (i \cdot C_m - M_c). \end{cases}$$

Здесь U – напряжение якоря, i – ток якоря, R – сопротивление якоря, L – индуктивность обмотки возбуждения, ω – частота вращения ротора, J – момент инерции ротора, C_m – конструктивная составляющая ДПТ, C_e – электромеханическая составляющая ДПТ, M_c – момент сопротивления.

Исходя из уравнений, можно разработать модель двигателя в среде Matlab/Simulink. Данная модель принимает на вход напряжение, а на выходе – ток в якоре и скорость мотора. Идентификации подлежали следующие составляющие: R , L , J , C_m , C_e .

Постоянные в уравнении определяют переходные процессы в двигателе, их значения можно приблизительно определить с помощью встроенных средств среды моделирования (Parameter Estimation), зная вход-выходные характеристики двигателя (напряжение, скорость, ток). Данное приложение использует метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия и другие. Для научного эксперимента были проведены идентификации разной точности, чтобы проверить, насколько полученные постоянные отражают действительное поведение двигателя. Результаты идентификации с разной точностью помогут установить, какие методы и параметры идентификации наиболее подходят для данной системы. Такой подход позволяет более надежно моделировать и управлять двигателем, учитывая его фактические характеристики.

На рис. 3 представлен результат наиболее точной идентификации модели.

Качество идентификации было вычислено с помощью интегрального критерия и в данном случае равно примерно 85 %. Были найдены относительные отклонения по скорости, току, затем их среднее относительное отклонение.

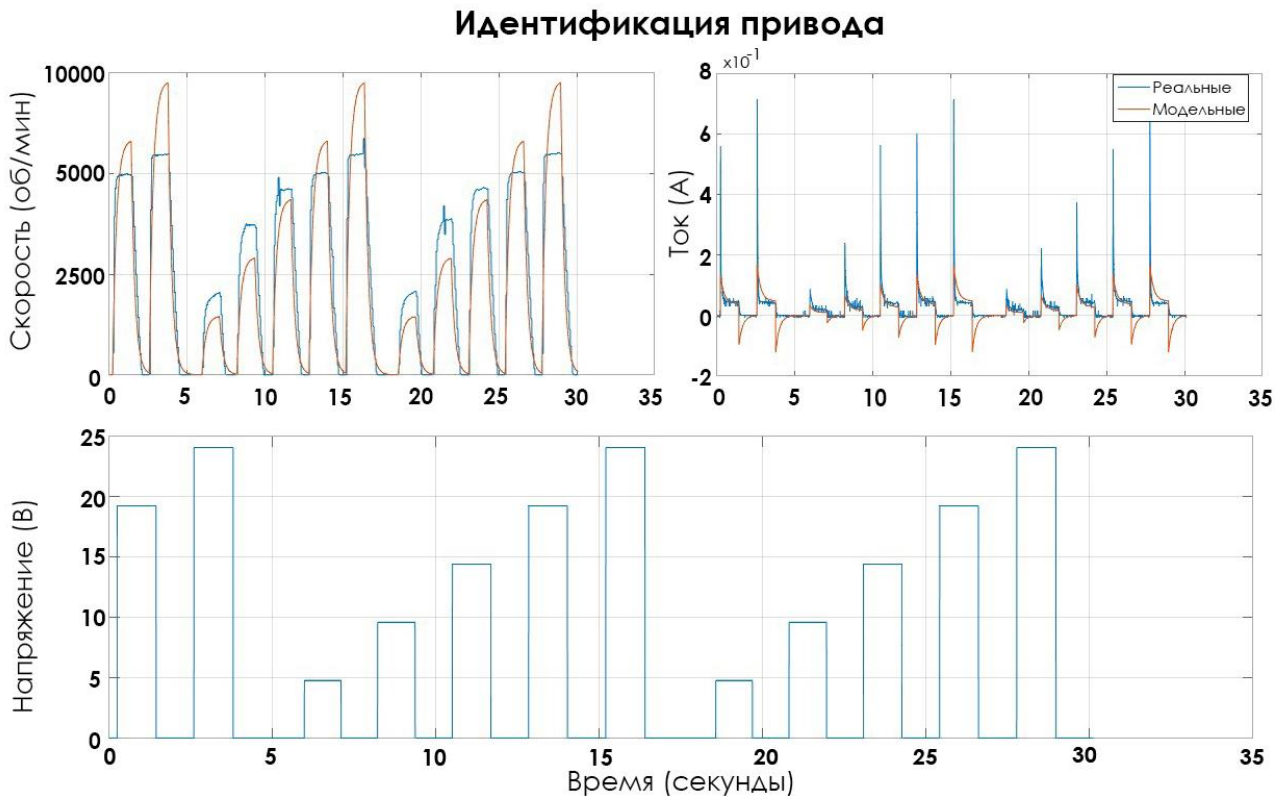


Рис. 3. Результат идентификации модели двигателя постоянного тока

Fig. 3. Result of identification of the DC motor model

Таблица 1. Модели разного качества идентификации
Table 1. Models of different identification quality

Качество идентификации, % Quality of identification, %	60	75	85
Метод идентификации Identification method	Метод наименьших квадратов Least squares method	Минимизация абсолютной ошибки Minimizing absolute error	Метод наименьших квадратов Least squares method
Число итераций Number of iterations	6	9	13
Абсолютная ошибка Absolute mistake	180,023	89,234	64,1239
Примечание Note	Моделируемый ток в два раза больше, скорость верна Simulated current is twice as large, the speed is correct	Моделируемый ток на высоких оборотах в два раза больше реального, скорость верна Simulated current at high speeds is twice the real one, the speed is correct	Моделируемый ток близок к реальным значениям, скорость верна Simulated current is close to real values, the speed is correct

$$\left| \frac{\int_0^t F1_{\text{Реальная_скорость}} - \int_0^t F2_{\text{Модельная_скорость}}}{\int_0^t F1_{\text{Реальная_скорость}}} \cdot 100 \% \right| = \left| \left(\frac{1,0622 \cdot 10^8 - 1,0610 \cdot 10^8}{1,0622 \cdot 10^8} \right) 100 \% \right| \approx 11,29 \%$$

$$\left| \frac{\int_0^t F1_{\text{Реальный_ток}} - \int_0^t F2_{\text{Модельный_ток}}}{\int_0^t F1_{\text{Реальный_ток}}} \cdot 100 \% \right| = \left| \left(\frac{7,4593 \cdot 10^3 - 6,0125 \cdot 10^3}{7,4593 \cdot 10^3} \right) 100 \% \right| \approx 19,39 \%$$

Среднее относительное отклонение равно 15,34 %.

Полного совпадения графиков добиться не удается в связи с нелинейными процессами в обмотке двигателя.

Чтобы определить, достаточно ли такой точности, необходимо синтезировать систему управления, подобрать коэффициенты регуляторов и проверить систему на физическом стенде, сравнив модельный переходный процесс с реальным. В табл. 1 представлена информация о моделях разного качества идентификации.

Как видно из таблицы, скорость идентифицируется верно во всех случаях, потому что это относительно простой параметр для измерения и идентификации, а моделируемый ток становится близок к реальным значениям только после большого числа последовательных итераций.

Синтез системы управления

На вход системы управления подается угол, на который движитель должен повернуться. Исходя из входной уставки система должна подавать на силовой драйвер необходимые значения скважности

ШИМ-сигнала, при этом удовлетворяя заданные требования к системе управления.

Система подчиненного регулирования является системой с последовательным подключением регуляторов, а число контуров в ней равно числу регуляторов. Каждый контур отвечает за регулирование одной переменной и настраивается независимо от других. Если число регулируемых величин не более трех, такая система позволяет обеспечить достаточное быстродействие и энергоэффективность и может решать сложные задачи, такие как навигация по сложным маршрутам, взаимодействие с окружающей средой и выполнение точных манипуляций. Трехконтурная система регулирования представлена на рис. 4.

Как видно из операторно-структурной схемы, выход одного регулятора последовательно подключается на вход последующего регулятора. Каждый регулятор ограничивается некоторым диапазоном выходного сигнала в зависимости от динамических характеристик и корректируется по отдельности, потому что изолированная настройка упрощает задачу и уменьшает риск ошибок. Например, контур тока обычно настраивается на быстродействие, чтобы обеспечить быстрый отклик на изменение нагрузки, тогда как контур положения может иметь более медленную динамику, но более точное следование заданной траектории. Также настройка каждого контура изолированно позволяет гарантировать его устойчивость перед тем, как вводить другие контуры. Это обеспечивает стабильное и надежное функционирование всей системы.

При настройке контура тип и параметры регуляторов выбираются таким образом, что регулятор компенсирует большие инерционности объекта и приводит передаточную функцию контура к нормированному виду с учетом значения эквивалентной малой постоянной времени и выбранного критерия оптимизации [3]. Данная методика была впервые предложена С. Кесслером в 50-е гг. XX в.

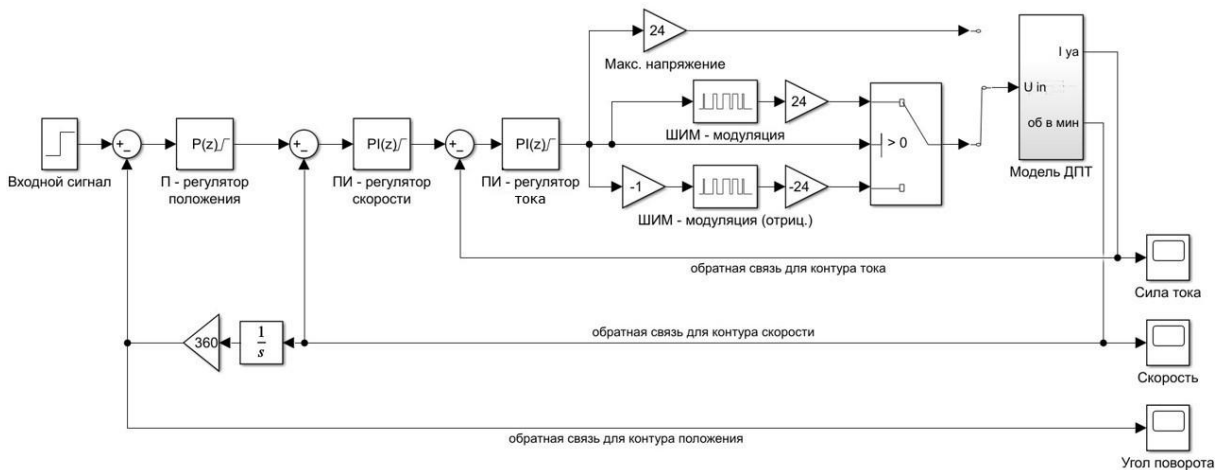


Рис. 4. Система подчиненного регулирования в Matlab/Simulink
Fig. 4. Subordinate control system in Matlab/Simulink

Параметры регуляторов выбирались с учетом критерия модульного оптимума (МО). Простейший разомкнутый контур, оптимизированный по МО, представляет собой апериодическое звено второго порядка:

$$W(p)_{\text{раз}} = \frac{y(t)}{x_{\text{зад}}(t)} = \frac{1}{aT_u s(T_u s + 1)},$$

где $x_{\text{зад}}(t)$ – задающее воздействие, $y(t)$ – выходная координата, T_u – постоянная времени объекта, s – оператор дифференцирования, a – коэффициент оптимизации.

Также исходя из источника [4] можно сделать вывод, что параметры регуляторов выбираются таким образом, чтобы переходные процессы в системе обладали высоким быстродействием и малым перерегулированием. Для решения данной задачи были выбраны ПИД-регуляторы, которые являются наиболее распространенными и универсальными в промышленной автоматике.

Существуют различные методы настройки ПИД-регуляторов [5], которые базируются на эмпирических правилах (метод Циглера–Никольса, Куна и т. п.) или на анализе частотной области. Внося коррективы в полином, можно изменить динамические характеристики переходного процесса.

Встроенный инструмент PID Controller использует множество методов, включая эвристическую настройку, настройку на основе правил и на основе самого объекта управления. Он был использован для ускорения процесса подбора коэффициентов регулятора, позволяя существенно сократить время на достижение желаемых рабочих параметров. Также для корректировки переходного процесса использовался Check Step Response Characteristics, который позволяет оценить различные параметры отклика системы, такие как время перехода, перерегулирование и

установившееся значение, чтобы оценить и улучшить производительность системы управления. Изначально в системе использовались два пропорционально-интегральных регулятора для управления током и скоростью и один пропорциональный регулятор для контроля положения двигателя.

Предполагалось, что пяти составляющих (П, И – для контура тока, П, И – для контура скорости и П для угла поворота) достаточно для точного регулирования системы на реальном объекте. Результаты моделирования после настройки всех контуров представлены на рис. 5.

Частота регулирования для контура положения и скорости равна 30 Гц, а для контура тока – 3 кГц. Такой выбор постоянных времени регулирования основан не только на постоянной времени самого объекта управления [6], его природе, а также и на вычислительных способностях управляющего устройства.

Получив необходимые значения регуляторов, можно перейти к проверке работы системы управления на реальном двигателе.

Проверка работы моделируемой системы на реальном объекте

Испытание на реальном стенде показало, что коэффициенты регуляторов, определенные в среде Matlab, не обеспечивают ожидаемый характер переходного процесса. При изолированной проверке контуров было выяснено, что для токового и углового контуров оптимальные коэффициенты должны быть меньше. Это можно объяснить низкой инерционностью протекания тока в цепи, неточной идентификацией, нелинейностью процессов, протекающих в двигателе, а также погрешностью в измерениях датчика тока и энкодера. Сравнение переходных процессов, работающих по отдельности, представлено на рис. 6.

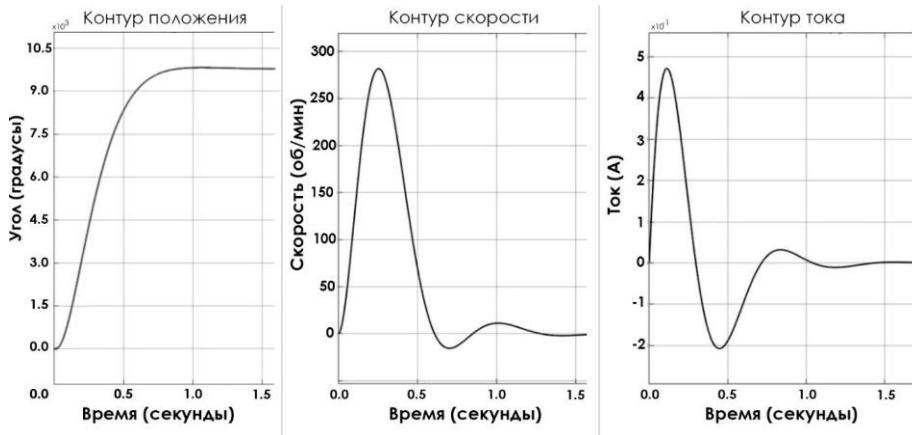


Рис. 5. Переходные процессы каждого контура системы подчиненного регулирования
Fig. 5. Transient processes of each slave control system circuit

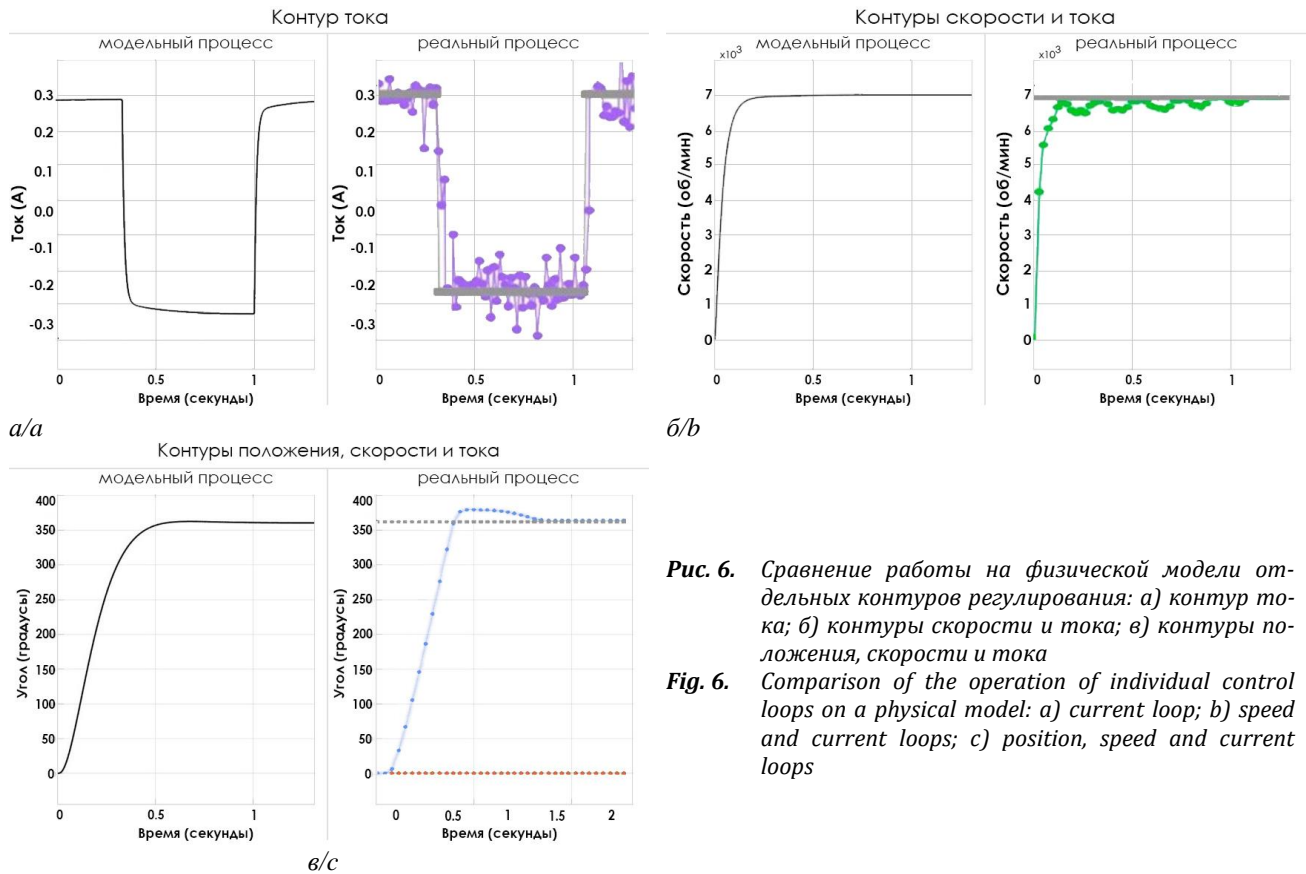


Рис. 6. Сравнение работы на физической модели отдельных контуров регулирования: а) контур тока; б) контуры скорости и тока; в) контуры положения, скорости и тока

Fig. 6. Comparison of the operation of individual control loops on a physical model: а) current loop; б) speed and current loops; в) position, speed and current loops

Следует упомянуть, что коэффициенты были откорректированы таким образом, чтобы обеспечить наибольшую схожесть реального переходного процесса с модельным. Видно, что с модельными коэффициентами наблюдается колебательность процесса и выходное значение флуктуирует около уставки.

Как видно на сравнительных графиках, модельный и реальный переходный процесс различаются. Перерегулирование реального процесса равно 5,45 %, а время регулирования – 1,25 секунд. С по-

мощью интегральной оценки было выяснено, что относительное отклонение равно 11,4 %:

$$\left| \frac{\int_0^t F1 - \int_0^t F2}{\int_0^t F1} \cdot 100\% \right| = \left| \left(\frac{462,6111 - 515,4091}{462,6111} \right) 100\% \right| \approx 11,4\%.$$

Здесь $F1$ – эталонная (модельная) функция переходного процесса, $F2$ – действительная функция переходного процесса.

Усовершенствование системы управления двигателями

Поскольку необходимо добиться минимального перерегулирования и максимально быстрого переходного процесса, как у математической модели, было принято решение внести корректировки в работу системы управления.

Было увеличено число составляющих регулирования – к внешнему контуру были подключены интегральная и дифференциальная составляющие. Алгоритм всей системы был также подкорректирован. Не было учтено, что ошибка регулирования по углу и скорости обновлялась намного позже (в 100 раз медленнее) и контур тока за это время регулировал систему, основываясь на одном и том же значении ошибки. На рис. 7 представлено сравнение переходных процессов.

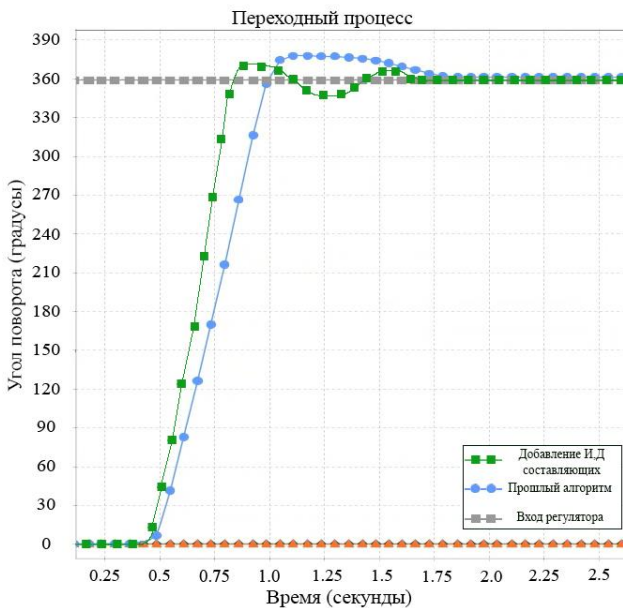


Рис. 7. Сравнение переходных процессов систем с добавлением I, D составляющих и без них

Fig. 7. Comparison of transient processes of systems with the addition of I, D components and without them

Был также усовершенствован алгоритм защиты от интегрального насыщения [7, 8]. Ранее интегральная составляющая была ограничена лишь максимальным значением выходного сигнала, однако этот принцип защиты является наиболее простым и примитивным. Новый алгоритм защиты: от значения интегральной составляющей отнимается некоторое число процентов от ошибки регулирования. Это улучшает динамику системы, поскольку

выходной сигнал становится более зависимым от пропорциональной составляющей при насыщении. На рис. 8 представлено очередное сравнение переходных процессов.

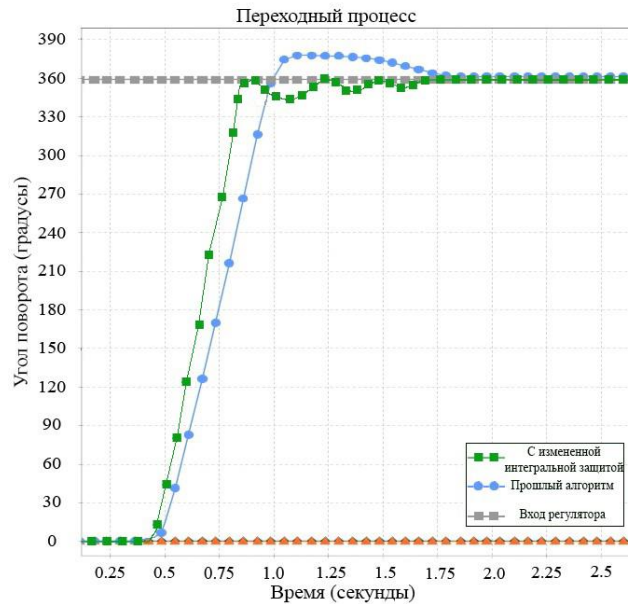


Рис. 8. Сравнение переходных процессов систем с измененной интегральной защитой

Fig. 8. Comparison of transient processes of systems with modified integral protection

На реальном стенде была обнаружена проблема, которая возникала при резком изменении выходного сигнала СПР. Из-за этого периодически возникают отсечки по току, которые негативно влияют на двигатели и показатели качества переходного процесса. С этой целью был введен вспомогательный алгоритм плавного изменения ШИМ сигнала при его резком изменении.

Наиболее серьезной проблемой стал «статичный» режим работы двигателя, когда угол поворота двигателя уже приблизился к задающему значению, однако из-за шумов с датчиков иногда возникали низкоамплитудные колебания около уставки. С этой целью был введен программный гистерезис, который уменьшает выходное значение СПР при попадании в зону гистерезиса.

На рис. 9 представлено финальное сравнение переходных процессов прошлой и новой систем управления двигателями.

Благодаря всем нововведениям и корректировкам удалось полностью избавиться от перерегулирования и значительно уменьшить время переходного процесса. Статическая ошибка менее 0,005 %. На рис. 10 представлена работа данной системы при постоянно меняющихся входных значениях.

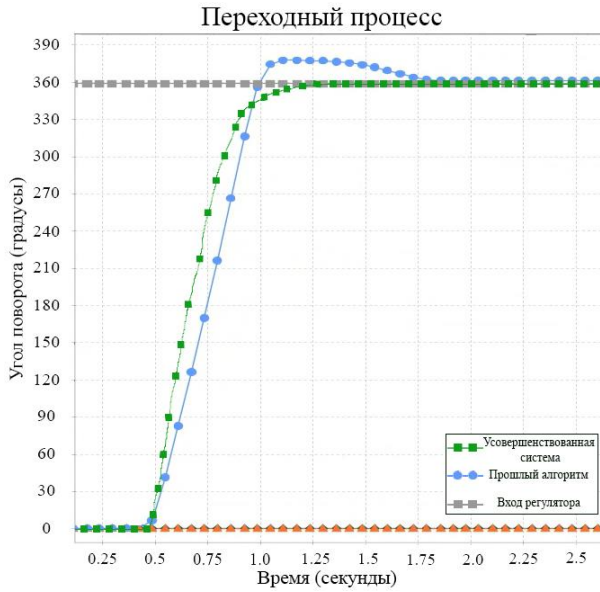


Рис. 9. Сравнение переходных процессов
Fig. 9. Comparison of transient processes

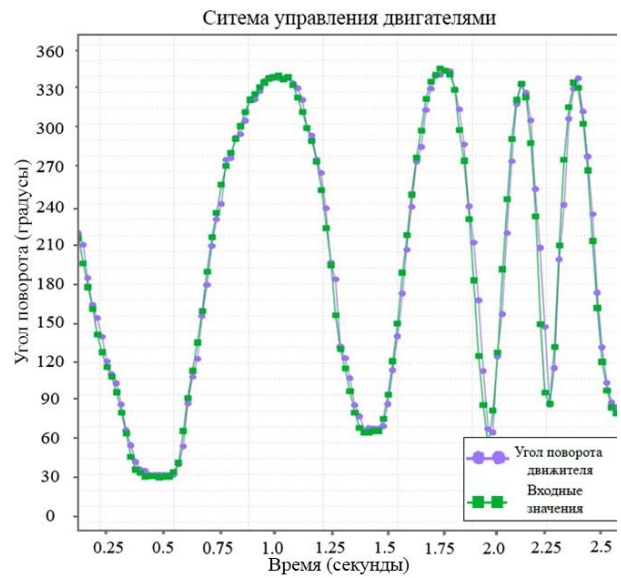


Рис. 10. Работа системы управления при постоянно меняющихся входных значениях
Fig. 10. Operation of the control system with constantly changing input values

После корректировки системы управления моделируемая система в среде Matlab/Simulink выглядит следующим образом (рис. 11). Модель учитывает интегральное насыщение, а также программный гистерезис.

В табл. 2 указаны коэффициенты регуляторов, которые обеспечивают схожие переходные процессы, а также коэффициенты, которые использовались на реальном двигателе.

С помощью таблицы были сделаны выводы о значениях регуляторных коэффициентов в зависимости от качества идентификации.

Для контура положения: чем выше качество идентификации, тем больше становится пропорциональный коэффициент для контура положения и тем меньше становятся интегральные и дифференциальные. Коэффициенты, использованные на стенде, приблизительно равны коэффициентам у моделей с качеством 75 и 85 %.

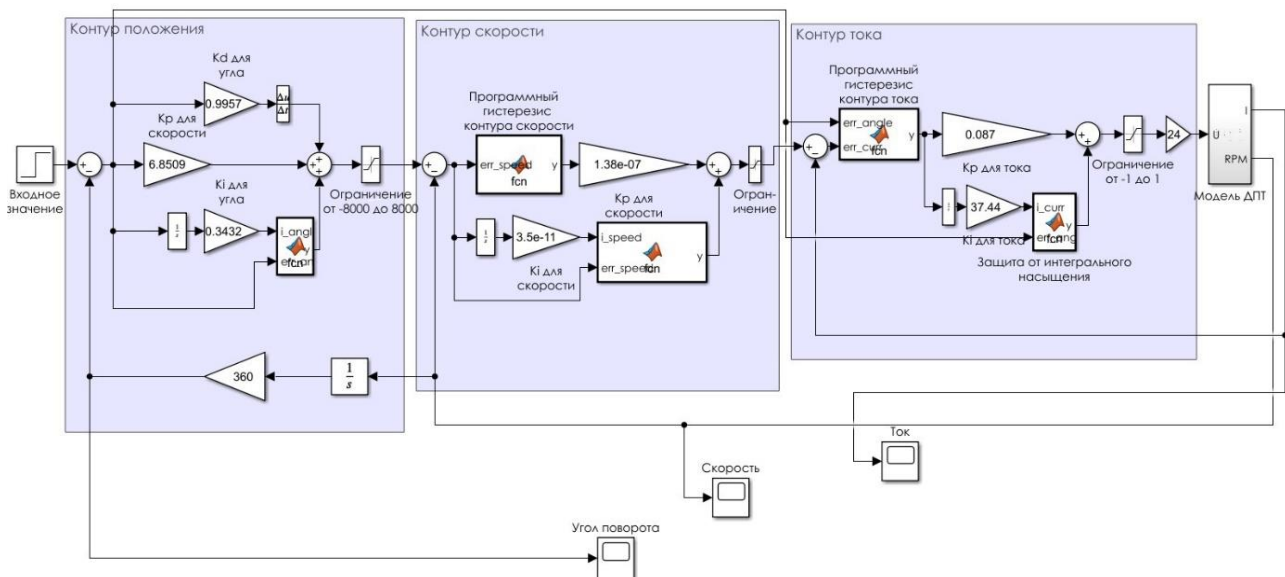


Рис. 11. Усовершенствованная система подчиненного регулирования в Matlab
Fig. 11. Improved subordinate control system in Matlab

Таблица 2. Коэффициенты для регуляторов каждого контура

Table 2. Coefficients for regulators of each circuit

Качество идентификации Quality of identification	I (60 %)	II (75 %)	III (85 %)	Исп. на стенде Used on stand
П. коэф. положения/P. position coefficient	0,0176	1,6896	6,8509	4,0
И. коэф. положения/I. position coefficient	0,99962	0,2429	0,2412	0,3
Д. коэф. положения/D. position coefficient	1,00013	0,8196	0,7957	0,5
П. коэф. скорости/P. speed coefficient	0,00049	0,0003	1,38e-7	0,0002
И. коэф. скорости/I. speed coefficient	0,0	0,0096	3,5e-11	0,0002
П. коэф. тока/P. current coefficient	0,0018	2,6496	0,087	0,05
И. коэф. тока/I. current coefficient	9,4915	2,9624	37,44	15,0

Для контура скорости: чем выше качество идентификации, тем меньше становится пропорциональный коэффициент для контура скорости. Для интегрально-го коэффициента явной зависимости не обнаружено.

Для контура тока явной зависимости также не было обнаружено. Наиболее вероятно, что это произошло из-за иного метода идентификации у второй модели. Если сравнивать первую и третью модели (60 и 85 %), можно сделать следующий вывод: чем выше качество идентификации, тем больше становится пропорциональный и интегральный коэффициенты для контура тока.

Увеличение качества идентификации привело к более точному подбору регуляторных коэффициентов, что позволяет системе лучше соответствовать желаемым характеристикам. Это особенно заметно в контуре положения и контуре тока, где коэффициенты у наиболее точной модели обеспечивают более стабильное и предсказуемое управление на реальном двигателе.

Коэффициенты для каждой модели были откорректированы таким образом, чтобы обеспечить вышеупомянутые требования к переходным про-

цессам, однако для идентификации со сходимостью 60 % не удалось добиться необходимых показателей качества. Сравнительные графики представлены на рис. 12.

Для дополнительной верификации был проведен эксперимент, в ходе которого был подключен второй двигатель той же модели. Несмотря на небольшие различия в электромеханических параметрах между двигателями одной и той же модели, было обнаружено, что регуляторные коэффициенты, настроенные для первого двигателя, обеспечили практически идентичные переходные процессы у второго двигателя. Это интересное наблюдение подтверждает эффективность внедренных ограничений, таких как гистерезис и автоматическое обнуление ошибки, в программном коде. На рис. 13 можно увидеть параллельные переходные процессы углов поворота обоих двигателей, что свидетельствует о сходстве их управляемых характеристик. Дополнительное подключение второго двигателя на физическом стенде позволило провести более глубокий анализ и убедиться в надежности и точности полученных результатов.

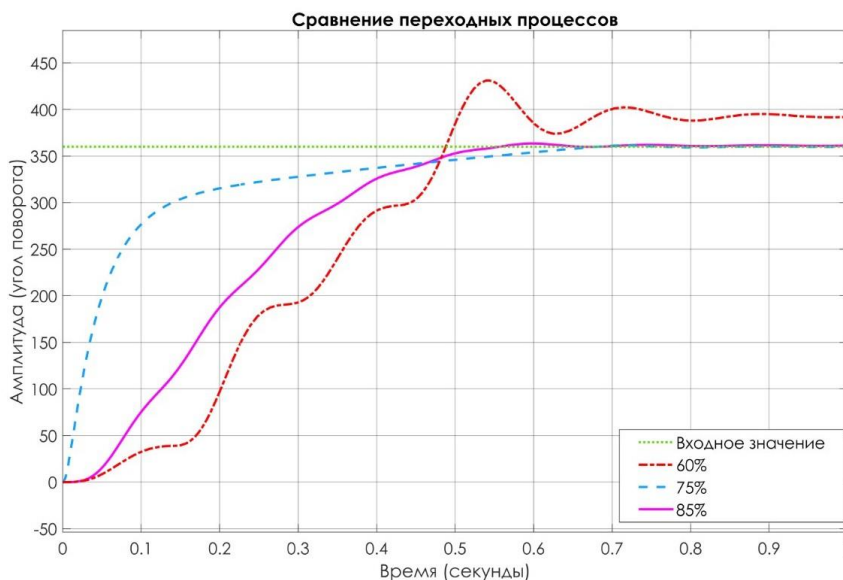


Рис. 12. Переходные процессы трехконтурной системы с разной точностью идентификации модели
Fig. 12. Transient processes of a three-loop system with different model identification accuracy

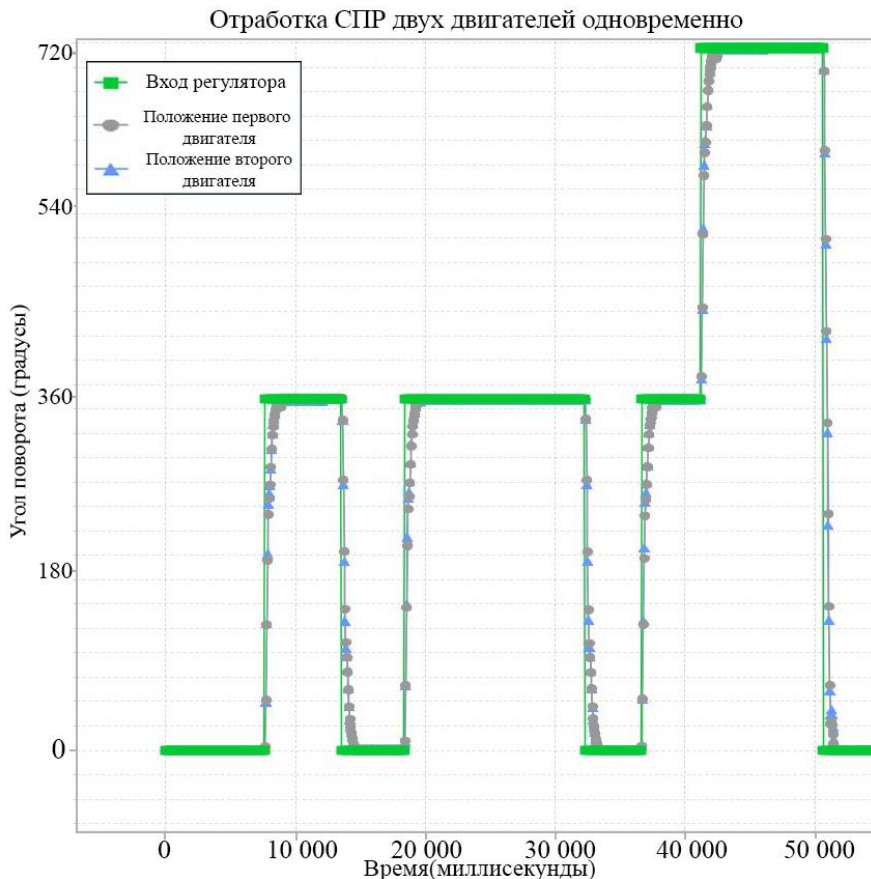


Рис. 13. Работа системы управления двух двигателей
Fig. 13. Operation of the control system of two engines

Как видно из графика, система подчиненного регулирования с высокой точностью и скоростью устанавливает положение движителя на требуемый угол поворота.

Заключение

Путем проведения моделирования и экспериментальных исследований удалось оптимизировать работу системы управления двигателями на нижнем уровне таким образом, что модельный переходный процесс практически совпадает с реальным.

Разработанная система позволяет адаптироваться к изменениям нагрузки на двигатели и эффек-

тивно реагировать на нестационарные воздействия в реальном времени.

Результаты работы показывают, что проведение идентификации высокого качества не всегда обеспечивает модель параметрами, приближенными к реальности, и не всегда по такой модели полученное программное управление совпадает с программным управлением на реальном объекте.

Таким образом, дальнейшее развитие и усовершенствование системы управления двигателями на шагающих платформах позволит обеспечить более точное и эффективное управление в условиях естественной среды, что является важным шагом в развитии робототехнических систем данного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сероченков Д.А. Методика синтеза подчиненного регулирования электропривода с учетом ограничений фазовых координат // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов. – 2020. – № 18. – С. 196–205. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46345561> (дата обращения: 09.07.2024).
2. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Математические модели двигателей постоянного тока для задач управления. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 161 с. URL: https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/18340/1/5-230-06585-0_1999.pdf (дата обращения: 09.07.2024).
3. Кояин Н.В., Мальцева О.П., Удуг Л.С. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 120–125.
4. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Синтез системы подчиненного регулирования электромагнитным подвесом ротора. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-sistemy-podchinennogo-regulirovaniya-elektromagnitnym-podvesom-rotora> (дата обращения: 09.07.2024)

5. Методы настройки ПИД регуляторов. URL: <http://www.ural-asutp.ru/articles/14-articles/112-metody-nastrojki-pid-regulyatorov> (дата обращения: 09.07.2024).
6. Система подчиненного регулирования. URL: <https://studfile.net/preview/4545333/page:5> (дата обращения: 09.07.2024).
7. Толочко О.И. Трёхконтурная система подчиненного регулирования скорости двухмассового электромеханического объекта. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38772/1/Tolochko_KGPI_1998.pdf (дата обращения: 09.07.2024).
8. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие для вузов. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат – Екатеринбург: Изд-во УГППУ, 1997. – 277 с.

Информация об авторах

Владимир Сергеевич Манзаров, магистрант Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; vsm17@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8723-549X>

Никита Иванович Побережкин, аспирант, ассистент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; nip6@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8956-0033>

Поступила: 15.06.2024

Принята: 23.09.2024

Опубликована: 30.09.2024

REFERENCES

1. Serochenkov D.D. Synthesis methodology of slave regulation of electric drive with account of phase coordinate limitations. *Technology of the 21st century through the eyes of young scientists and specialists*, 2020, no. 18, pp. 196–205. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46345561> (accessed: 9 July 2024).
2. Polyakov V.N., Shreiner R.T. *Mathematical models of DC motors for control problems*. Ekaterinburg, USTU Publ., 1999. 161 p. (In Russ.) Available at: https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/18340/1/5-230-06585-0_1999.pdf (accessed: 9 July 2024).
3. Koyain N.V., Maltseva O.P., Udu L.S. Optimization of control loops of electric drive systems using standard methods. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 120–125. (In Russ.)
4. Makarichev Yu.A., Starikov A.V., Tkachenko I.S. *Synthesis of a subordinate control system for electromagnetic rotor suspension*. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-sistemy-podchinennogo-regulirovaniya-elektromagnitnym-podvesom-rotora> (accessed: 9 July 2024).
5. *Methods of tuning PID controllers*. (In Russ.) Available at: <http://www.ural-asutp.ru/articles/14-articles/112-metody-nastrojki-pid-regulyatorov> (accessed: 9 July 2024).
6. *Subordinate regulation system*. (In Russ.) Available at: <https://studfile.net/preview/4545333/page:5> (accessed: 9 July 2024).
7. Tolochko O.I. *Three-loop system of subordinate speed control of a two-mass electromechanical object*. (In Russ.) Available at: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38772/1/Tolochko_KGPI_1998.pdf (accessed: 9 July 2024).
8. Shreiner R.T. *Systems of subordinate control of electric drives: a textbook for universities. Part 1. DC electric drives with subordinate control of coordinates*. Ekaterinburg, UGPPU Publ. house, 1997. 277 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir S. Manzarov, Master's Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; vsm17@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8723-549X>

Nikita I. Poberezkin, Postgraduate Student, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; nip6@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8956-0033>

Received: 15.06.2024

Revised: 23.09.2024

Accepted: 30.09.2024