

Научная статья
УДК 631.3
doi:10.35694/YARCX.2024.66.2.013

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Артём Сергеевич Угловский

Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия
a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

Реферат. В данном исследовании представлен инновационный подход к созданию и внедрению каскадных систем управления, включающих в себя как пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД), так и пропорционально-интегральный (ПИ) регуляторы, предназначенных для синхронизированного контроля скорости вращения и токового режима якоря в двигателях постоянного тока. Для нахождения оптимальных параметров регуляторов применяется метод Циглера-Николса, обеспечивающий стабильность системы управления. Каскадная архитектура управления, основанная на разделении контуров регулирования, демонстрирует высокую эффективность благодаря устранению конфликтов между задачами управления скоростью и током. Этот подход значительно улучшает производительность и надёжность работы двигателя. Для оценки предлагаемой системы управления используется программное обеспечение, работающее в режиме реального времени и обеспечивающее связь между персональным компьютером и Arduino Mega через последовательный интерфейс. Модель двигателя постоянного тока разрабатывается в среде Simulink, а каскадный ПИД-ПИ регулятор реализуется на Arduino Mega. Интеграция модели двигателя с Arduino Mega осуществляется посредством последовательной связи, обеспечивая тем самым эффективное взаимодействие между программным и аппаратным обеспечением.

Ключевые слова: мобильный робот, электродвигатель, драйвер электродвигателя, ШИМ-сигнал, транзисторный H-мост

MOBILE ROBOT MOTION CONTROL SYSTEM

Artem S. Uglovskiy

Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia
a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID 0000-0002-5678-4786

Abstract. This study presents an innovative approach to the creation and implementation of cascade control systems, including both proportional-integral-differential (PID) and proportional-integral (PI) controllers, designed for synchronized control of the rotation speed and current mode of the armature in direct current motors. To find the optimal parameters of controllers, the Ziegler-Nichols method is used, which ensures the stability of the control system. The cascade control architecture based on control loop separation demonstrates high efficiency by eliminating conflicts between speed and current control tasks. This approach significantly improves engine performance and reliability. To evaluate the proposed control system, real-time software is used to provide communication between the personal computer and the Arduino Mega via a serial interface. The direct current motor model is developed in the Simulink environment, and the cascade PID-PI controller is implemented on the Arduino Mega. The integration of the motor model with the Arduino Mega is done through serial communication, thereby ensuring efficient interaction between software and hardware.

Keywords: mobile robot, electric motor, electric motor driver, PWM signal, transistor H-bridge

Введение. В области мобильной робототехники ключевые задачи, такие как создание карт, локализация и навигация мобильных роботов, обычно решаются с помощью микрокомпьютеров. Эти компьютеры обладают высокой способностью обработки значительных объёмов данных, однако не предназначены для управления периферийны-

ми компонентами системы. Для решения этой проблемы используется управляющая плата (локальный контроллер), который отвечает за обработку данных от датчиков и управление компонентами привода. Локальные контроллеры выполняют основные процедуры с высокой частотой дискретизации и обработки сигналов, что в конечном итоге

улучшает взаимодействие робота с окружающей средой, включая считывание характеристик через встроенные датчики и управление исполнительными механизмами на основе этих данных.

В качестве конечного этапа работы, после расчёта необходимой скорости на микрокомпьютере, полученные данные передаются на отдельный микроконтроллер. На этом этапе, с использованием обратных уравнений кинематики мобильного робота, рассчитываются опорные значения контролируемых величин. Локальный контроллер отвечает не только за управление электродвигателями, но и за оценку скорости вращения колёс с помощью датчиков, а также за расчёт поступательной и вращательной скорости робота с использованием уравнений прямой кинематики. Используя определённый протокол связи, текущие значения скорости передаются на микрокомпьютер, который использует их для мониторинга одометрии мобильного робота и расчёта новых эталонных значений скорости.

Целью данной статьи является представление и реализация каскадных систем управления, использующих комбинацию пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) и пропорционально-интегрального (ПИ) регуляторов для управления скоростью вращения в двигателях постоянного тока.

Статья продолжает цикл статей, посвящённых разработке робота для сельскохозяйственных работ.

Мобильные роботы в сельскохозяйственном производстве актуальны благодаря своей способ-

ности эффективно выполнять задачи, связанные с обработкой почвы, уборкой урожая и мониторингом растений, что повышает производительность труда и снижает затраты времени и сил. Их использование позволяет оптимизировать логистические процессы производства, уменьшить ущерб от вредителей и болезней, а также адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям, что особенно важно в современном мире с его высокими требованиями к продовольственной безопасности и экологической устойчивости.

Задачи исследования:

1. Описание метода настройки предела устойчивости Циглера-Николса для определения начальных коэффициентов усиления регулятора.
2. Исследование стратегии каскадного управления и её преимуществ в повышении производительности и надёжности работы двигателя.
3. Оценка эффективности предлагаемого регулятора с использованием программного обеспечения в реальном времени и последовательной связи между ПК и Arduino Mega.
4. Моделирование двигателя постоянного тока в Simulink и реализация каскадного ПИД-ПИ регулятора на Arduino Mega.
5. Обеспечение интеграции модели двигателя с Arduino Mega через последовательную связь для эффективного взаимодействия между программным и аппаратным обеспечением.

Общая структурная схема системы робототехнического комплекса показана на рисунке 1. В нём выделены основные компоненты, которые задействованы в проекте. Из рисунка видно, что

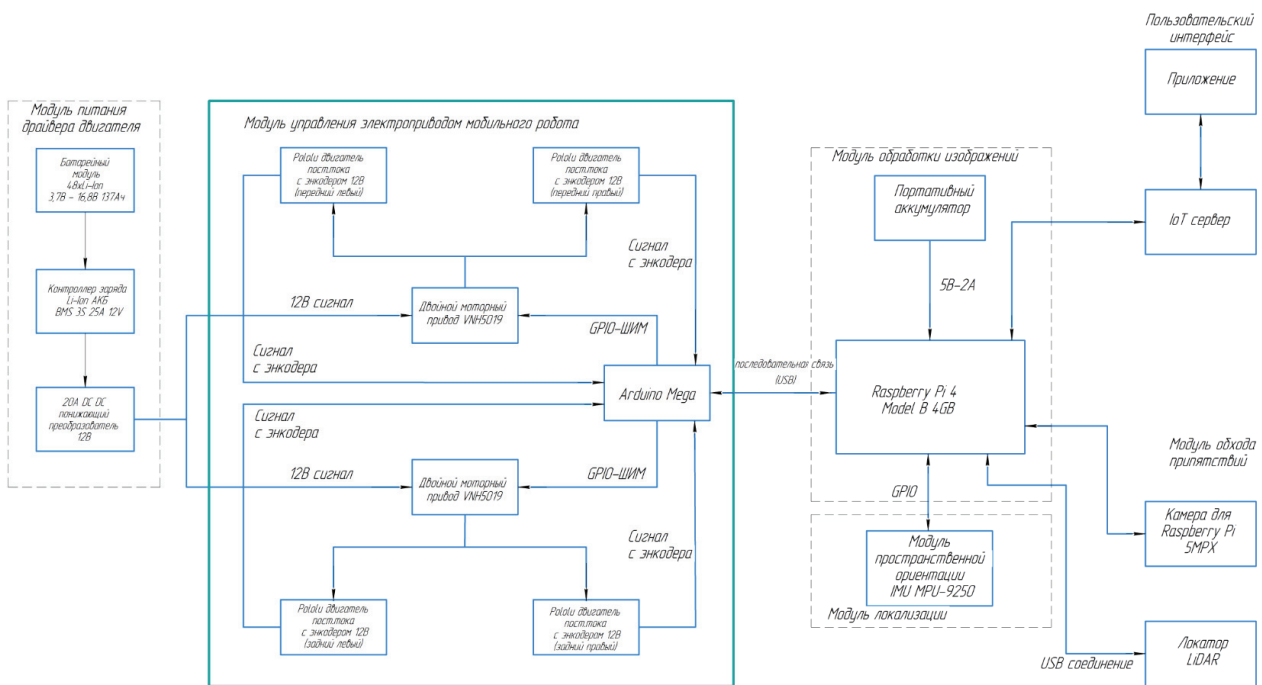


Рисунок 1 – Состав мобильного робототехнического комплекса

имеются три основные модульные подсистемы, а именно: модуль передвижения, модуль обработки изображений и модуль предотвращения препятствий. В данной работе реализована модульность, поскольку эти подсистемы изменяемы внутри себя, учитывая, что другие подсистемы обмениваются данными с теми же входами и выходами.

На основании предложенной структуры (рис. 1) автором представлен макет мобильного

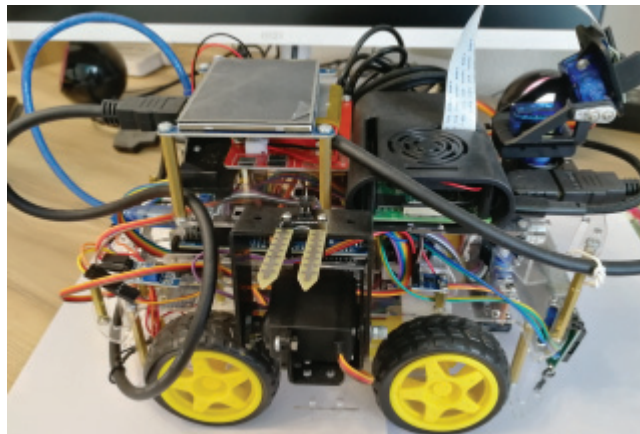


Рисунок 2 – Макет мобильного робота

микроконтроллер, который регулирует напряжение источника питания в зависимости от требуемой скорости.

Поскольку двигатели требуют значительной мощности, которой не хватает у микроконтроллера, для управления ими используются транзисторные преобразователи частоты или отдельные устройства – драйверы. Эти драйверы получают инструкции от микроконтроллера и регулируют напряжение, подаваемое на двигатель [2; 3].

При выборе компонентов для робота необходимо учитывать их совместимость, а также мощность, потребляемую двигателями, чтобы она соответствовала ограничениям драйвера и источника питания. Выбранные детали описаны ниже.

Однако стоит помнить, что робот с новыми компонентами не сможет перевозить большие грузы, так как его общая масса уменьшится за счёт меньших по размеру двигателей. Для проверки работоспособности робота предлагается примерный расчёт ускорения в зависимости от крутящего момента двигателей.

$$a_t = \frac{T_1 - T_2}{m_{uk} \frac{D_k}{2}}, \quad (1)$$

где T_1 и T_2 – крутящие моменты двигателя; D_k – диаметр ведущих колёс; m_{uk} – общая масса робота.

Если принять максимальные рабочие моменты и общую массу робота 8 кг, поступательное ускорение получается:

робота (рис. 2). Цель данной разработки заключается в получении и анализе изображений роботом о росте сельскохозяйственных растений и распознавании их заболеваний [1].

В мобильном роботе используются четыре электродвигателя, которые управляются независимо друг от друга. Скорость этих двигателей напрямую зависит от напряжения питания. Для управления скоростью двигателей используется

$$a_t = \frac{0,39 + 0,39}{8 \cdot \frac{0,165}{2}} = 1,18 \frac{м}{с^2}.$$

Скорость, которую может достичь робот, зависит от максимальной скорости вращения двигателя. Предполагается, что из-за относительно большой массы скорость будет ограничена:

$$v_t = \frac{2\omega\pi D_k}{2}, \quad (2)$$

$$v_t = \frac{160}{60} \cdot \frac{2\pi \cdot 0,165}{2} = 1,38 \frac{м}{с} = 4,98 \frac{км}{ч}.$$

Согласно приведённым расчётам, робот сможет передвигаться со скоростью ходьбы человека, что удобно, если он будет работать в среде с людьми. Также из-за своей сложности алгоритмы навигации, локализации и картографирования обычно не дают хороших результатов при высоких скоростях движения. Время разгона до максимальной скорости получается равным 1,17 секунды, что в ряде случаев будет не оптимальным, но для нужд такого рода робота будет удовлетворительным. Более того, из-за значительной массы, т.е. инерционности робота, большой крутящий момент может привести к проскальзыванию колёс по поверхности, что не подходит с точки зрения одометрии мобильного робота.

$$t = \frac{v_t}{a_t} = \frac{1,56}{1,18} = 1,17 с.$$

Материалы и методы исследований.

Блоки управления электродвигателями

Драйвер двигателя играет главную роль при подаче энергии на двигатель на основе управляющего сигнала. Управление электродвигателями осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции или ШИМ-сигналов. Драйвер представляет собой транзисторный H-мост, подающий на контакты двигателя необходимое напряжение от источника постоянного напряжения в зависимости от комбинации переключающихся транзисторов. Эта схема работает в зависимости от тактового генератора, определяющего частоту переключения, а выходное напряжение зависит от коэффициента заполнения заданного ШИМ-сигнала.

Драйвер может использоваться для управления коллекторными двигателями постоянного тока с напряжением питания 10–47 В. В работе применяется двухканальный драйвер, это означает, что он содержит два независимых H-моста (рис. 3). Режим работы, как и направление напряжения, определяется двумя отдельными сигналами на контактах преобразователя.

Помимо микроконтроллера, мобильный робот также оснащён однопалатным компьютером, который позволяет выполнять сложные алгоритмы навигации, картографирования и локализации. Для такого компьютера, помимо высокой производительности процессора, желательно, чтобы он имел возможность беспроводного подключения к сети и

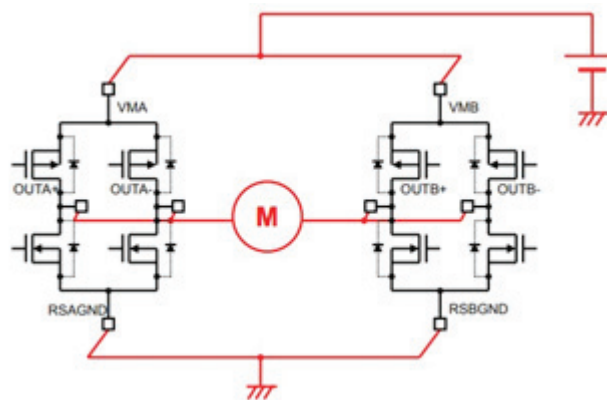


Рисунок 3 – Драйвер Pololu TB67H420FTG со схемой одноканального режима работы

Bluetooth коммуникации. Также немаловажно, что его можно питать от аккумуляторного источника. В связи с этим был выбран компьютер Raspberry PI 4B, который соединён с подчинённым компьютером последовательным каналом связи.

Поскольку это двигатели постоянного тока малой мощности, в качестве регулируемой переменной будет использоваться напряжение питания двигателя или напряжение якоря двигателя. Запишем основные уравнения, характеризующие процессы в двигателе. Второй закон Кирхгофа для цепи якоря имеет вид:

$$u_a(t) = R_a i_a(t) + \frac{L_a di_a(t)}{dt} + e(t). \quad (3)$$

Связь между переменными в цепи якоря выражает следующее:

$$e(t) = K_e \omega(t), \quad (4)$$

где K_e – конструктивная постоянная двигателя; ω – угловая скорость; L_a – индуктивность якорной цепи; R_a – сопротивление якорной цепи; i_a – ток якорной цепи; e – противо-ЭДС двигателя; u_a – напряжение питания якорной цепи.

Запись дифференциальных уравнений представим с применением преобразования Лапласа. Из преобразованных таким образом уравнений (3)

и (4) получается передаточная функция тока по отношению к напряжению якоря, выражение (5).

$$G_i(s) = \frac{i_a(s)}{u_a(s) - e(s)} = \frac{1}{L_a s + R_a} = \frac{\frac{1}{R_a}}{\frac{L_a}{R_a} s + 1} = \frac{K_a}{T_a s + 1}. \quad (5)$$

Передаточная функция скорости вращения в зависимости от напряжения якоря имеет вид [2]:

$$G_w(s) = \frac{\omega(s)}{u_a(s)} = \frac{K_a K_m K_e}{J T_a s^2 + J s + K_a K_e}. \quad (6)$$

Полученная система имеет второй порядок и также может быть представлена структурной схемой согласно рисунку 4.

В случае, когда напряжение подаётся на клеммы двигателя постоянного тока без дополнительных средств регулирования скорости, мы сталкиваемся с методом управления, известным как «разомкнутый контур». Однако, когда в систему интегрируется контур обратной связи, где параметры двигателя, такие как скорость, отслеживаются и передаются обратно в систему управления, име-

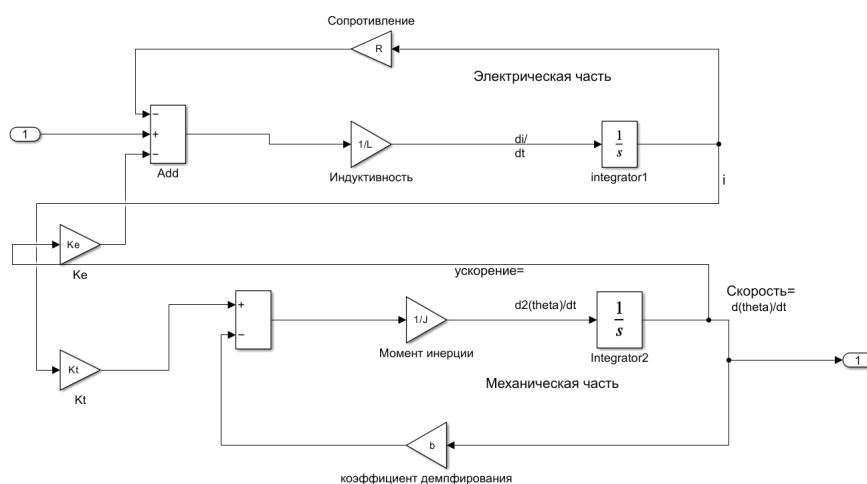


Рисунок 4 – Динамическая модель двигателя постоянного тока

ем дело с более сложным и эффективным подходом – управлением «замкнутым контуром». Этот метод позволяет более точно и динамично реагировать на изменения в работе двигателя, обеспечивая оптимальное управление его рабочими характеристиками.

Описанную таким образом систему, при знании характерных параметров, можно смоделировать с помощью одного из соответствующих инструментов, при этом в данной работе используется MATLAB в среде Simulink. Двигатель постоянного тока моделируется в среде Simulink, а каскадный ПИД-ПИ-регулятор реализован на Arduino Mega. Моделирование проводится с целью выбора стратегии управления и регулирования двигателя, настройки регулятора и прогнозирования других

возможных явлений в реальной системе [4].

При заданных параметрах численное решение представленных уравнений даёт ответ на скачок возбуждения 12 В, согласно которому система выйдет на заданную скорость за 0,14 с, а ток якоря достигнет пикового значения – 3,86 А. Значение тока на холостом ходу, согласно рисунку 4, падает до 0,2 А, и соответственно при моделировании задаётся эквивалентный момент трения (рис. 5). Дополнительно учитывалась динамика транзисторного преобразователя, а также переходная функция тока якоря.

Результаты.

Управление и ограничения

Реальная система, в отличие от моделирования, ещё не столь точна и легко предсказуема, и

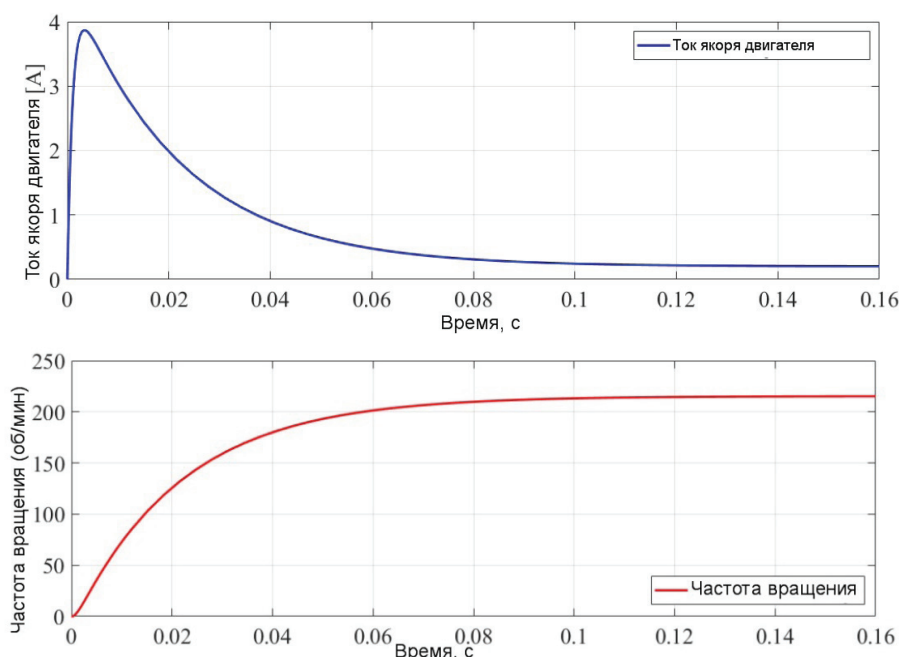


Рисунок 5 – Характеристики пускового тока двигателя и скорости вращения

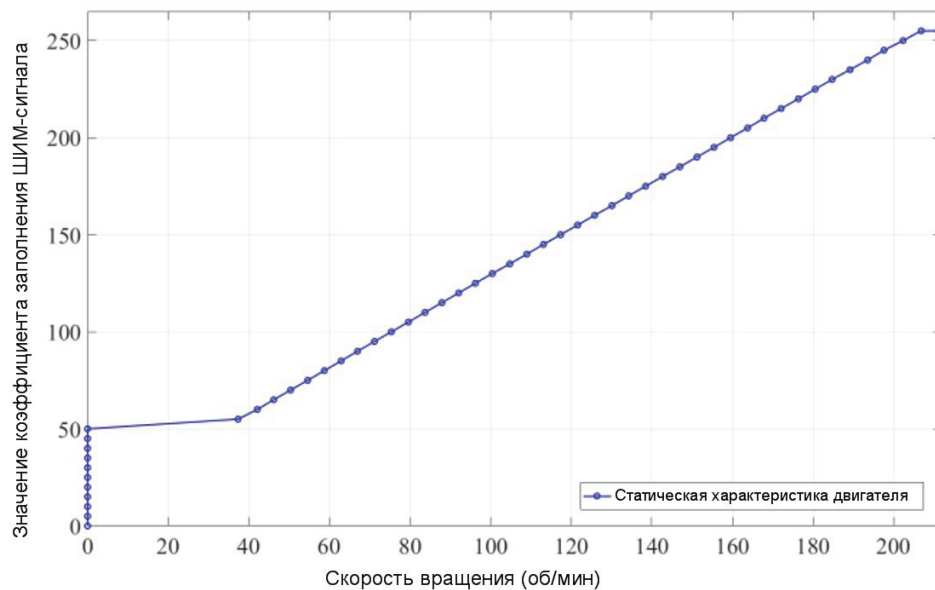


Рисунок 6 – Статические характеристики электродвигателя Pololu 4845

при её тестировании обязательно проявятся многие недостатки и отклонения. Поскольку классический синтез регулирующего действия предполагает, что регулируемая система является линейной, необходимо рассматривать статическую характеристику и ограничивать работу регулятора только подходящей областью. Одной из нелинейностей является так называемая «мёртвая» зона, являющаяся следствием статического трения в щётках редуктора или коллектора. В результате потерь на трение двигатель останавливается в определённом интервале напряжений, при котором не может быть достигнут достаточный пусковой момент.

Статическая характеристика двигателя, полученная путём измерения скорости по отношению к заданному сигналу ШИМ, показана на рисунке 6. Здесь видна нелинейность «мёртвой» зоны, где двигатель начинает вращаться только после значения ШИМ, равного 50, которое, преобразованное в напряжение, составляет 2,35 В.

Следующая проблема управления касается частоты ШИМ-сигнала. Управление питанием ШИМ основано на принципе, согласно которому преобразователь включает и выключает транзисторы в зависимости от заданного коэффициента заполнения (скважности). Это работает при условии, что реакция тока якоря, как минимум, в десять раз медленнее постоянной времени инвертора. Частота ШИМ-сигнала выбранного микроконтроллера по умолчанию составляет 4480 Гц. Отклик с постоянной времени якоря $T_a = 1$ мс, с указанной частотой показан на рисунке 7. При увеличении частоты переключения, как показано на рисунке 7, колебания тока уменьшаются, что, помимо более тихой работы двигателя, также сни-

жает его нагрев. Кроме того, при выборе частоты выше 20 кГц происходит превышение уровня слышимости, что также устраняет слуховые шумы. С другой стороны, слишком высокая частота влияет на нагрев частотного переключателя и искажение прямоугольного сигнала. Рекомендуемое производителем верхнее значение составляет 70 кГц, и соответственно частота переключения устанавливается равной 40 кГц. Моделирование было выполнено с использованием показанной ранее модели электродвигателя с добавленным блоком, моделирующим транзисторный преобразователь с ШИМ-сигналом при 50% скважности.

Регулирование скорости вращения

Управление скоростью вращения электродвигателя осуществляется с использованием методов косвенной компенсации возмущений. Это означает, что воздействие на систему компенсируется заранее установленными параметрами, независимо от источника возмущения. Для достижения регулирования создаётся замкнутый контур, в котором измерительное устройство сравнивает прогнозируемые и реальные значения. В зависимости от полученных отклонений, система корректирует управляемый параметр для устранения ошибок.

Зная процесс и поведение системы, можно приступить к разработке алгоритма управления. В случае регулирования скорости вращения электродвигателя, как правило, используются две конфигурации регулятора: одноконтурный регулятор и каскадный регулятор. При каскадном регулировании система электродвигателя разделяется на отдельные блоки, где каждый регулятор влияет на свой управляемый параметр. Имитационная модель каскадного регулятора представлена на

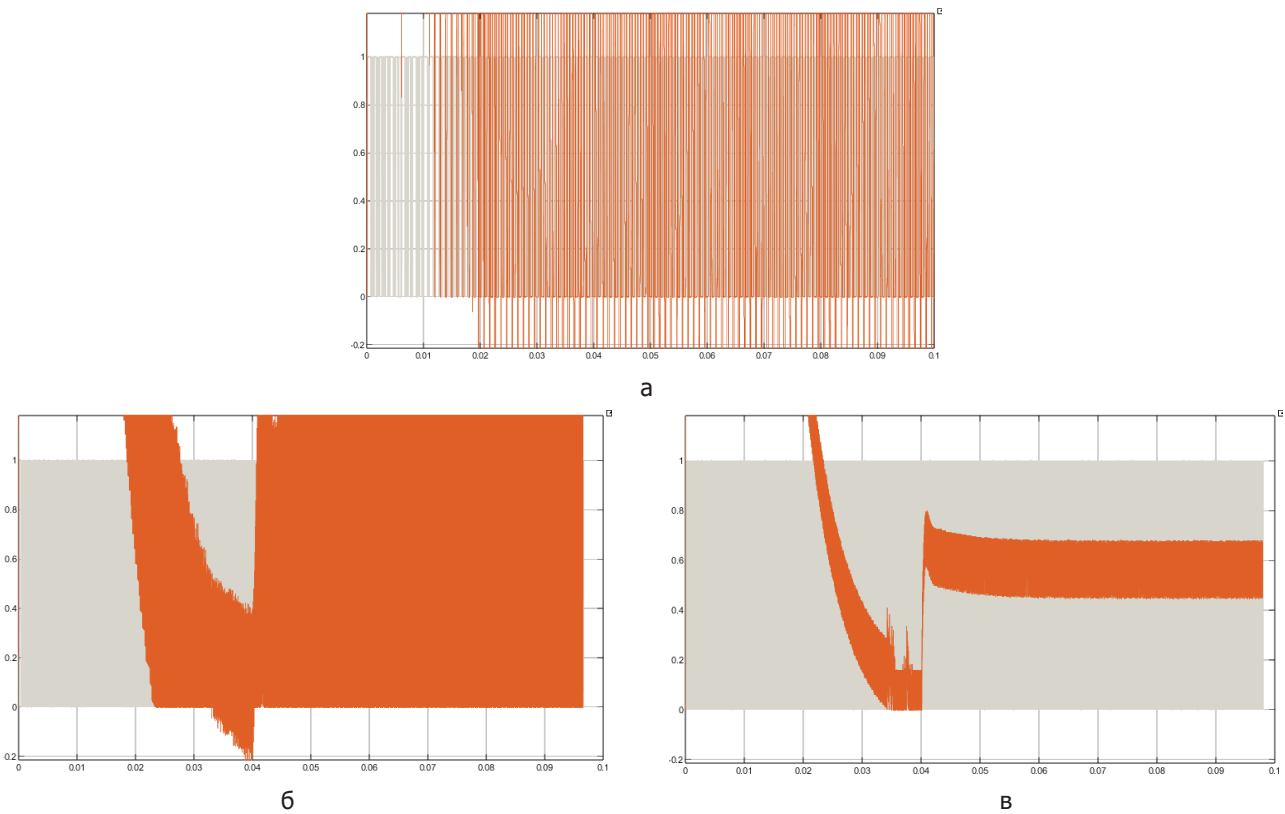


Рисунок 7 – Реакция модели электродвигателя в зависимости от частоты переключения

рисунке 8. В данном случае имеется подчинённая цепь (рис. 9 а), передающая величину тока в якоре на основную цепь, регулирующую скорость вращения (рис. 9 б).

Чтобы определить необходимое время выборки для каскадных ПИД-ПИ-регуляторов, необходимо измерить время реакции на переход, и это значение будет временем выборки регуляторов

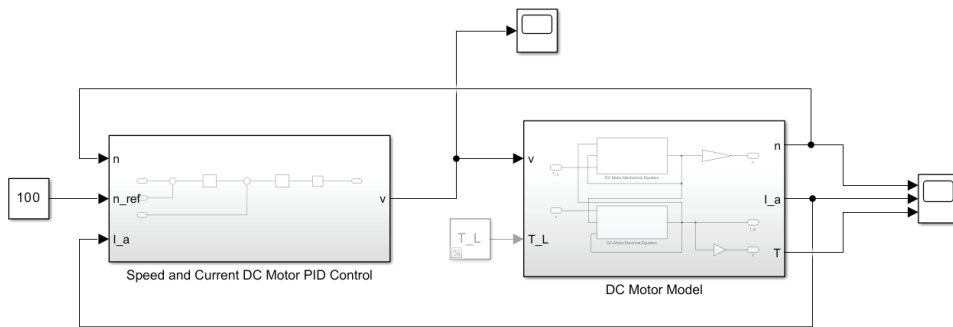


Рисунок 8 – Имитационная модель каскадного регулятора

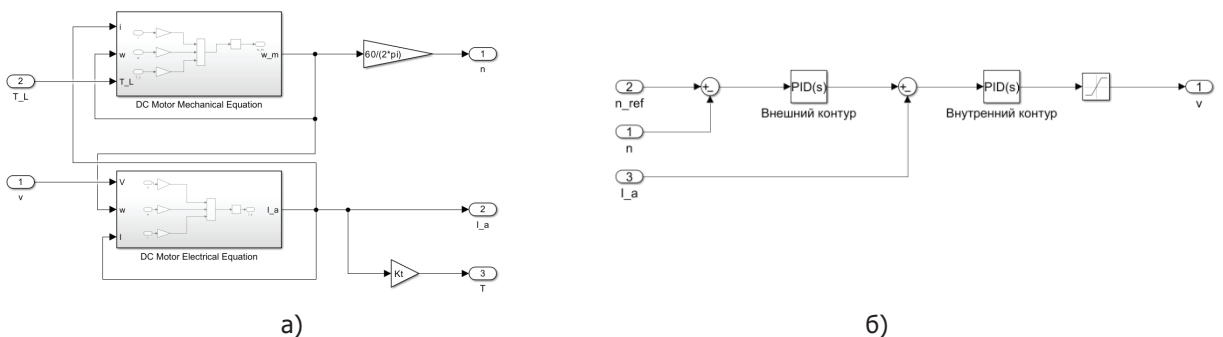


Рисунок 9 – Подсистемы двигателя постоянного тока (а) и контура ПИД-регулирования (б)

[5; 6]. На рисунке 10 видно, что измеренное время отклика составляет около 1 секунды, когда к модели двигателя постоянного тока подаётся шаговый сигнал (12 В). Следовательно, можно установить

время выборки на то же значение, что и время отклика на переход.

Поскольку регулируемые системы имеют меньшие размеры, преимущество каскадного ре-

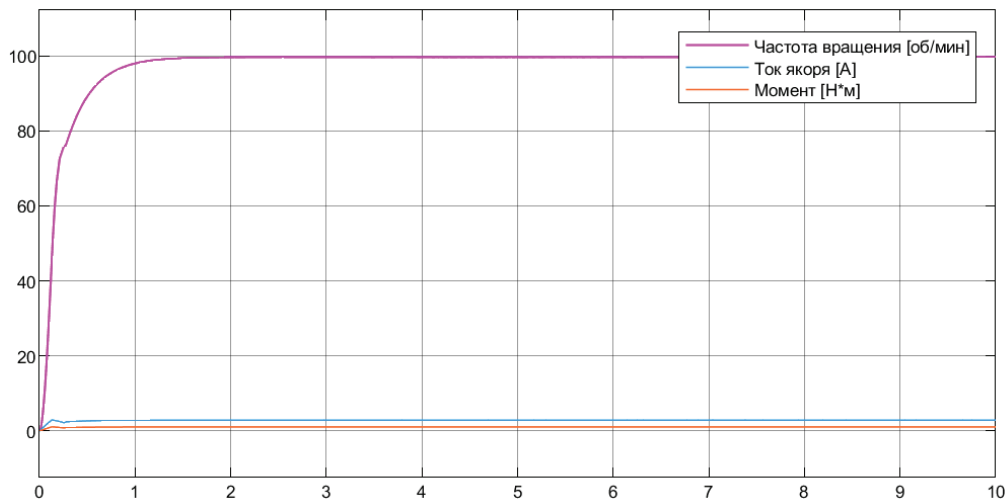


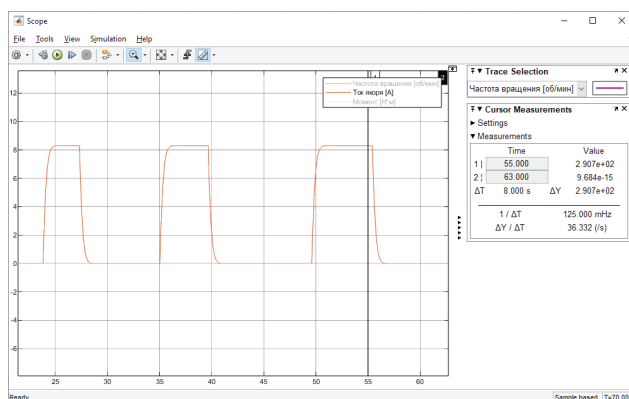
Рисунок 10 – Переходная характеристика модели двигателя постоянного тока

гулятора заключается в более простой и лучшей настройке параметров, связанные с ними возмущения устраняются локально в подсистеме, и возможно немедленное ограничение регулируемых переменных [7–11].

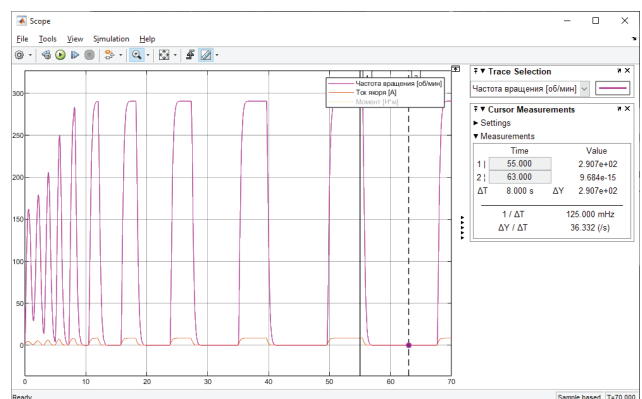
Одним из хорошо известных методов настройки ПИД является метод предела устойчивости Циглера-Николса. Этот метод является популярным и широко используемым подходом для настройки ПИД-регуляторов. Он обеспечивает систематическую процедуру определения констант K_p , T_i и T_d на основе характеристик устойчивости системы. Метод Циглера-Николса предусматривает различные правила настройки в зависимости от реакции управления: П-регулятор: $K_p = 0,5 \cdot K_o$; PI-регулятор: $K_p = 0,4 \cdot K_o$, $T_i = 0,8 \cdot K_o$; ПИД-регулятор: $K_p = 0,6 \cdot K_o$, $T_i = 0,5 \cdot T_o$, $T_d = 0,12 \cdot K_o$.

Процедура настройки каскадных ПИД-ПИ-регуляторов начинается с первоначальной настройки внутреннего контура, который управляет током якоря. Такой последовательный подход гарантирует, что внутренний контур обеспечивает стабильный отклик, сводя к минимуму помехи для внешнего контура. Далее настраивается внешний контур, отвечающий за регулирование скорости двигателя. Оба ПИД-регулятора настраиваются с использованием метода предела устойчивости Циглера-Николса.

На рисунке 11 представлен полученный колебательный отклик при $K_o = 2,23$ и $T_o = 7,691$ для внутренней петли и $K_o = 50,5 \cdot 10^{-3}$ и $T_o = 27,982$ – для внешней. Имея эти значения, можем рассчитать K_p , T_i и T_d на основе правила Циглера-Николса (рис. 12).

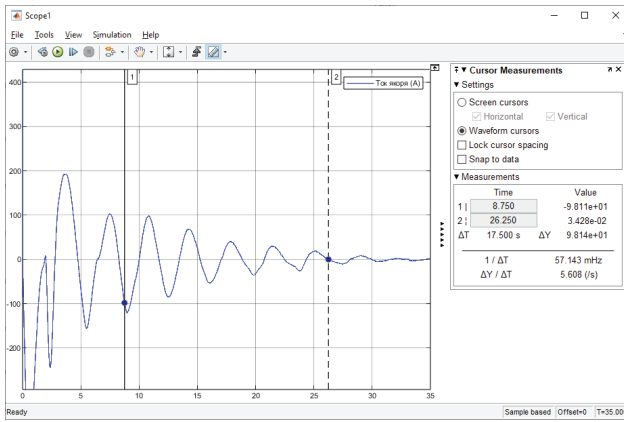


а)

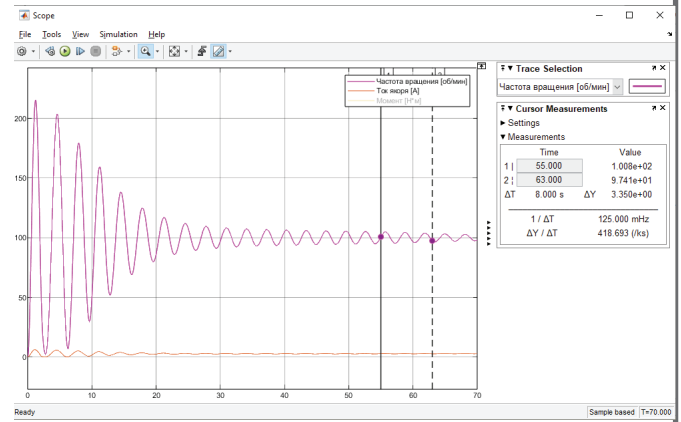


б)

Рисунок 11 – Отклики колебаний для внутреннего контура (а) и внешнего контура (б)



а)



б)

Рисунок 12 – Реакция внутреннего контура (а) и внешнего контура (б) со значениями K_p , T_i , T_d , соответствующими правилу Циглера-Николса

Правило Циглера-Николса даёт значения K_p , T_i и T_d , которые приводят к нестабильному отклику со значительными колебаниями. Эти значения не соответствуют критериям стабильного регулятора двигателя постоянного тока. Следовательно, необходимо скорректировать эти значения, соответствующие правилу Циглера-Николса. Скорректированные значения K_p , T_i и T_d для обоих контуров представлены в таблице 1.

На рисунке 13 показано, что каскадные ПИД-ПИ-регуляторы обеспечивают надёжный и стабиль-

ный отклик. Регуляторы способны обрабатывать возникающие небольшие пульсации. Кроме того, регуляторы могут отслеживать изменение задания, хотя и со значительным перерегулированием.

Выводы. В результате выполнения данной работы можно отметить следующие ключевые моменты:

1. Процесс настройки каскадных ПИД-ПИ-регуляторов должен начинаться с внутреннего контура, который имеет более быстрое время отклика, чтобы обеспечить стабильность отклика внутрен-

Таблица 1 – Скорректированные значения K_p , T_i и T_d для внутреннего и внешнего контуров

Внутренняя петля (регулятор контура управления током)		Внешняя петля (регулятор контура управления скоростью)	
Константы	Значения	Константы	Значения
K_p	0,7491	K_p	0,1957
T_i	4,3450	T_i	0,3746
T_d	0	T_d	0,0255

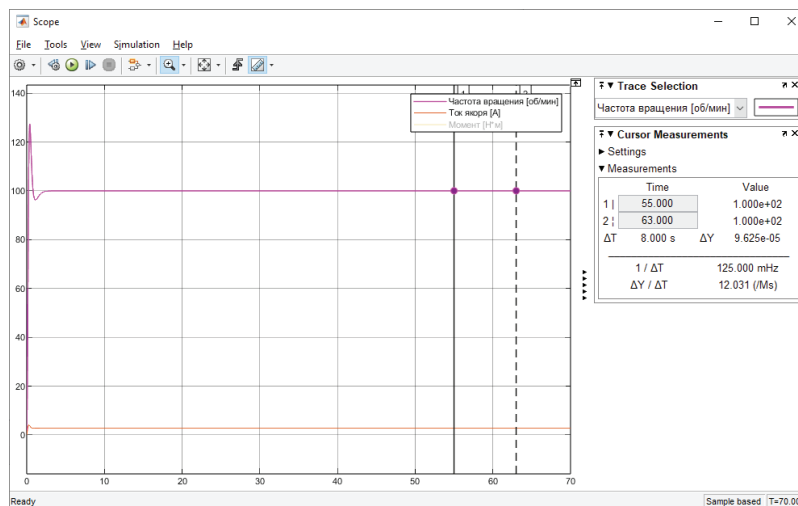


Рисунок 13 – Реакция скорости двигателя при скорректированных значениях K_p , T_i и T_d для обоих контуров

него контура. После этого, используя полученные значения K_p , T_i , T_d внутреннего контура, можно выполнить процесс настройки внешнего контура.

2. Метод Циглера-Николса можно использовать в качестве отправной точки процесса настройки. Постоянные значения, основанные на правилах, не обязательно дают хороший отклик, поэтому корректировки постоянных значений по-прежнему необходимы.

3. Каскадная конфигурация ПИД-ПИ очень хорошо работает с точки зрения стабильности и надёжности для двигателей постоянного тока. Однако он производит очень медленный отклик. Для преодоления данного недостатка в будущем планируется рассмотреть использование более про-

двинутых алгоритмов управления, таких как адаптивные ПИД, нечёткая логика, нейронные сети. Эти методы позволят повысить быстродействие системы при сохранении устойчивости.

4. Программно-технологическую настройку можно использовать для проверки алгоритма управления, реализованного на микроконтроллерах. Это может предотвратить возможность подачи алгоритмом управления команд, которые могут нанести вред реальным приводам/установкам.

5. Из-за недостатка медленной последовательной связи программное обеспечение, работающее в цикле, использующее последовательную связь, может использоваться только с процессами, имеющими медленное время отклика.

Список источников

1. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Моделирование работы мобильного робота для обоснования его функциональных параметров и алгоритма управления // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. № 4 (117). С. 57–72. DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-57-71. EDN NNUDIN.
2. Короткий О. А., Лоскутов С. А., Корнеев А. А. Системы управления мобильным роботом // *Известия Института инженерной физики*. 2023. № 1 (67). С. 11–15. EDN BOZDQO.
3. Лариошкин И. Н., Акименко Т. А. Система управления робототехническим комплексом на базе мобильного робота с локальными контурами управления // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 9. С. 260–265. EDN YRVKHX.
4. Omidvar M. N., Rahmani R., Zohoori M., Tafazzoli F. Autonomous Navigation of Mobile Robots using Computer Vision and Control Theory // In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020. P. 8786–8792.
5. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: A review of literature // *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT)*. 2021. Vol. 6, Is. 3. P. 48–53. DOI 10.32628/IJSRCSEIT.0639.
6. Corke P. Robot Arm Kinematics // In book: *Robotics, Vision and Control*. 2nd ed. Cham : Springer, 2017. P. 191–226. DOI 10.1007/978-3-319-54413-7_7.
7. Kim S. J., Kim B. H., Cho H. G. Vision-Based Obstacle Avoidance of Autonomous Mobile Robots using Deep Learning // *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*. 2018. Vol. 24, Is. 5. P. 420–427. DOI 10.5302/J.ICROS.2018.18.0056.
8. Shahbazi M. Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: A review // *Expert Systems With Applications*. 2021. 172:114535. DOI 10.1016/j.eswa.2021.114535.
9. Leca D., Cadenat V., Sentenac T. Sensor-based algorithm for collision-free avoidance of mobile robots in complex dynamic environments // *European Conference on Mobile Robot (ECMR)*. Prague, Czech Republic, 2019, P.1–6.
10. Hua Y., Wang R., Qiao H. Sim-to-Real Reinforcement Learning for Robotics: A Comprehensive Review // *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*. 2022. P. 1–16. DOI 10.1109/TCDS.2022.3153253.
11. Aguilera Hernández M. I., Bautista M. A., Iruegas J. Diseño y Control de Robots Móviles. Instituto Tecnológico Nuevo Laredo. URL: <https://mecamex.net/anterior/cong02/papers/art24.pdf> (access date: 31.03.2024).

References

1. Uglovskij A. S., Semerenko N. Yu. Modelirovanie raboty mobil'nogo robota dlya obosnovaniya ego funkcional'nyh parametrov i algoritma upravleniya // *AgroEkoInzheneriya*. 2023. № 4 (117). S. 57–72. DOI 10.24412/2713-2641-2023-4117-57-71. EDN NNUDIN.
2. Korotkij O. A., Loskutov S. A., Korneev A. A. Sistemy upravleniya mobil'nym robotom // *Izvestiya Instituta inzhenernoj fiziki*. 2023. № 1 (67). S. 11–15. EDN BOZDQO.
3. Larioshkin I. N., Akimenko T. A. Sistema upravleniya robototekhnicheskim kompleksom na baze mobil'nogo robota s lokal'nymi konturami upravleniya // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020. № 9. S. 260–265. EDN YRVKHX.
4. Omidvar M. N., Rahmani R., Zohoori M., Tafazzoli F. Autonomous Navigation of Mobile Robots using Computer Vision and Control Theory // In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020. P. 8786–8792.

5. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: A review of literature // International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT). 2021. Vol. 6, Is. 3. P. 48–53. DOI 10.32628/IJSRCSEIT.0639.

6. Corke P. Robot Arm Kinematics // In book: Robotics, Vision and Control. 2nd ed. Cham : Springer, 2017. P. 191–226. DOI 10.1007/978-3-319-54413-7_7.

7. Kim S. J., Kim B. H., Cho H. G. Vision-Based Obstacle Avoidance of Autonomous Mobile Robots using Deep Learning // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. 2018. Vol. 24, Is. 5. P. 420–427. DOI 10.5302/J.ICROS.2018.18.0056.

8. Shahbazi M. Machine learning-based approaches for obstacle detection and avoidance in autonomous vehicles: A review // Expert Systems With Applications. 2021. 172:114535. DOI 10.1016/j.eswa.2021.114535.

9. Leca D., Cadenat V., Sentenac T. Sensor-based algorithm for collision-free avoidance of mobile robots in complex dynamic environments // European Conference on Mobile Robot (ECMR). Prague, Czech Republic, 2019, P.1–6.

10. Hua Y., Wang R., Qiao H. Sim-to-Real Reinforcement Learning for Robotics: A Comprehensive Review // IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems. 2022. P. 1–16. DOI 10.1109/TCDS.2022.3153253.

11. Aguilera Hernández M. I., Bautista M. A., Iruegas J. Diseño y Control de Robots Móviles. Instituto Tecnológico Nuevo Laredo. URL: <https://mecamex.net/anterior/cong02/papers/art24.pdf> (access date: 31.03.2024).

Сведения об авторе

Артем Сергеевич Угловский – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный аграрный университет», spin-код: 3717-5731.

Information about the author

Artem S. Uglovskiy – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Yaroslavl State Agrarian University”, spin code: 3717-5731.

