



Научная статья
УДК 681.521
EDN: MBBRWI
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-664-681

Автоматизированная сборка изделий роботом-манипулятором с динамометрическим контролем процесса затягивания винтовых соединений

Я.Ю. Пикалов^{1✉}, Н.В. Штабель², М.В. Брунгардт³, С.Б. Ткачёв⁴

¹⁻⁴Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Россия

Резюме. Цель – разработать концепцию робототехнического комплекса, выполняющего установку деталей и их закрепление с использованием резьбовых соединений роботом-манипулятором. Экспериментальный стенд был реализован на базе промышленного робота-манипулятора KUKA KR6 R900. Управляющая программа для робота выполнена на языке Kuka Robot Language, предлагаемые исполнительные механизмы являются авторской разработкой. Предложены два варианта исполнительного устройства с контролем затяжки винтов. Первое устройство использует вращательное движение фланца кисти робота-манипулятора для затягивания винтов. Второе с одной стороны имеет захват для установки деталей на изделия, с другой стороны – приводной инструмент с заданным предельным моментом затяжки. Показано, что оба исполнительных устройства обеспечивают выполнение полного цикла завинчивания крепежного элемента в деталь от наживления до затяжки с требуемым усилием. В первом устройстве для контроля усилия затяжки используется тензобалка, сигнал с которой обрабатывается микроконтроллером Arduino Mini, расположенным во вращающемся устройстве. Сигнал отправляется по беспроводному интерфейсу на стационарный контроллер, посылающий стоп-сигнал на робота. Экспериментальным путем установлено, что из-за наличия беспроводного интерфейса при передаче сигнала наблюдается некоторая задержка между достижением предельного значения момента и остановкой вращения робота, в результате чего значение фактически достигаемого момента может превышать установленное на 60%. Во втором приспособлении, где ограничение крутящего момента происходит по току в двигателе привода, выявлено, что абсолютная погрешность установки момента затяжки не превышает 0,8 Н·м в диапазоне от 0 до 25 Н·м или 3,03% (погрешность стандартных динамометрических ключей составляет около 4%). С целью более полного соответствия современным киберфизическим производственным системам планируется интеграция в данный комплекс интеллектуальных функций контроля процесса затяжки винтовых соединений на основе методов машинного обучения.

Ключевые слова: робототехника, роботизированная сборка, захват, тензометрический контроль момента, беспроводная передача данных, силомоментный датчик

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственный контракт No. FEFE-2020-0017).

Для цитирования: Пикалов Я.Ю., Штабель Н.В., Брунгардт М.В., Ткачёв С.Б. Автоматизированная сборка изделий роботом-манипулятором с динамометрическим контролем процесса затягивания винтовых соединений // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 664–681. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-664-681>. EDN: MBBRWI.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Automated assembly of products by a robot-manipulator with dynamometric control of screw joint tightening

Yakov Yu. Pikalov^{1✉}, Nikolay V. Shtabel², Maxim V. Brungardt³, Stepan B. Tkachev⁴

¹⁻⁴Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. In this work, we develop a conceptual scheme for a robotic complex to perform the installation of parts and their fastening using threaded joints by a robot manipulator. A test bench was created on the basis of a KUKA KR6 R900 industrial robot-manipulator. The robot control software was implemented using the KUKA Robot Language. The proposed actuators are the authors' original development. Two variants of the actuator with screw tightening control are proposed. The

© Пикалов Я.Ю., Штабель Н.В., Брунгардт М.В., Ткачёв С.Б., 2023

first actuating device uses the rotational motion of the robot hand flange to tighten the screws. The second actuating device is equipped, on one side, with a gripper for mounting parts on the product and, on the other side, with a drive tool with a predetermined tightening torque limit. It is shown that both actuating devices ensure a complete cycle of screwing a fastener into a workpiece, from engaging to tightening with the required torque. In the first device, the tightening force is controlled with a strain gauge, the signal from which is processed by an Arduino Mini microcontroller located in a rotating device. The signal is forwarded wirelessly to a stationary controller that sends a stop signal to the robot. It was experimentally established that, due to the presence of the wireless interface, some delay is observed between reaching the torque limit value and stopping the robot rotation during signal transmission. As a result, the value of the actually reached torque may exceed the set value by 60%. In the second device, where torque limitation is based on the current in the drive motor, the absolute error of the torque setting does not exceed 0.8 N·m in the range from 0 to 25 N·m or 3.03% (the error of standard torque wrenches is about 4%). In order to meet the requirements of state-of-the-art cyber-physical production systems, the proposed complex should be complemented with intelligent functions of controlling the process of tightening screw joints on the basis of machine learning methods.

Keywords: robotics, robotic assembly, grasp, strain gauge torque control, wireless data transmission, force-torque sensor

Funding: The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Contract No. FEFE-2020-0017).

For citation: Pikalov Ya.Yu., Shtabel N.V., Brungardt M.V., Tkachev S.B. Automated assembly of products by a robot-manipulator with dynamometric control of screw joint tightening. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):664-681. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-664-681>. EDN: MBBRWI.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологических процессов сборки и отдельных ее операций является актуальным направлением исследования на пути к повышению эффективности производства изделий. Среди ряда различных сборочных операций наибольшее распространение получили резьбовые соединения. Резьбовые соединения в конструкциях разной техники и приборов составляют 15–25% от общего количества соединений. Использование такого вида соединений обусловлено его простотой, надежностью, а также возможностью разборки и повторной сборки без замены сборочных единиц⁵. При всех достоинствах резьбовых соединений трудоемкость операций по их сборке в различных отраслях производства может достигать 70% от общего объема сборочных операций⁶.

Одним из способов снижения трудозатрат на выполнение сборочных операций является применение специализированных робототехнических комплексов, позволяющих автоматизировать и ускорить процесс сборки изделия [1–5]. Однако многие принципиальные вопросы и инженерные проблемы по-прежнему препятствуют обеспечению высокой надежности при использовании средств автоматизации и роботизации для этих целей.

Использование робототехнических ком-

плексов для сборки резьбовых соединений может быть реализовано исключительно путем применения специальных исполнительных устройств, имеющих средства обратной связи для контроля технологических параметров. Именно средства обратной связи могут позволить выполнять операции сборки резьбовых соединений с заданной надежностью, определяемой качеством обеспечения заданных технологических параметров, среди которых требуется требуемое усилие затяжки.

В целях автоматизации сборочных операций наиболее часто применяют гибкие производственные системы. В общем случае гибкие производственные системы основаны на базе адаптивного робототехнического комплекса, включающего в себя робот-манипулятор, исполнительное устройство, датчики и различные периферийные устройства. Типовая структура робототехнического комплекса для сборки простых изделий раскрыта в статье [6, с. 74]. Описание истории автоматизации процесса сборки резьбовых соединений отражено в специализированном источнике [7, с. 10–11], авторами данной статьи изучены текущие наработки и выявлены проблемы, которые необходимо решить для полной автоматизации операций сборки резьбовых соединений

Цель исследования – автоматизация процессов узловой сборки изделий с использованием винтовых соединений.

⁵Рогов В.А. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2023. 351 с.

⁶Новиков М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1980. 592 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существующие робототехнические комплексы для сборки резьбовых соединений решают следующие основные задачи:

1. Перемещение робота-манипулятора по 6 степеням свободы для осуществления сборки изделий различной пространственной конфигурации. Одно из решений задачи выполнено методом (уравнением) прямой кинематики для робота-манипулятора Nachi в статье [1, с. 75–76].

2. Захват крепежного изделия исполнительным устройством из ложеента или подающего устройства. Для решения данной задачи применяются исполнительные устройства, оснащенные вакуумным адаптером и захватом^{7,8} [8–10].

3. Совмещение осей крепежного изделия и резьбового отверстия в детали путем коррекции позиционирования с использованием средств технического зрения [11]. Одно из решений задачи применительно к 4-осевому роботу отражено в статье [12].

4. Наживление крепежного изделия в резьбовое отверстие при помощи средств активной или пассивной адаптации движения, а также их комбинации [9].

5. Контроль требуемого усилия затяжки для различных крепежных изделий в деталь.

6. Обнаружение и предотвращение аварийных ситуаций, возникающих в процессе сборки, вызванных заклиниванием резьбы из-за ошибочного позиционирования крепежного изделия, а также дефектов резьб ответных частей. Решение данной задачи подробно описано в работе [7].

7. Повышение точности сборки и минимизация аварийных ситуаций на основе импедансной модели среды и динамической модели коллаборативного робота [13].

При рассмотрении различных роботизированных комплексов было выявлено, что все системы работают по одной схеме: робот-манипулятор осуществляет позиционирование и перемещение исполнительного устройства, а само исполнительное устройство непосредственно выполняет вращательное движение при закручивании. Контроль усилия затяжки при этой схеме происходит двумя путями: либо по показаниям изменения параметров тока вращающего привода, либо по показаниям

силомоментного датчика, установленного в качестве переходного адаптера между фланцем робота-манипулятора и исполнительным устройством.

В качестве первого варианта устройства закручивания винтов с контролем усилия затяжки была предложена конструкция, в которой вращательное движение исполнительного устройства выполняется роботом-манипулятором за счет возможности бесконечного вращения оси A6 робота KUKA KR3 R540. Для контроля момента затяжки винтовых соединений применяется тензобалка. Так как исполнительное устройство вращается целиком, то возникла необходимость в предварительной обработке сигнала от тензобалки и дальнейшей его передаче по беспроводному интерфейсу в систему управления роботом.

На рис. 1 представлена схема исполнительного устройства.

На основании 1 динамометрической головки крепится один край тензобалки 2, микроконтроллер 3 с беспроводным модулем и аккумуляторная батарея 4. Второй конец тензобалки 2 закрепляется на крышке 5. Корпус 6 демпфера устанавливается на крышку 5. Благодаря пружине 7 держатель 8 и установленная в него бита 9 имеют свободный ход для компенсации погрешностей осевого перемещения.

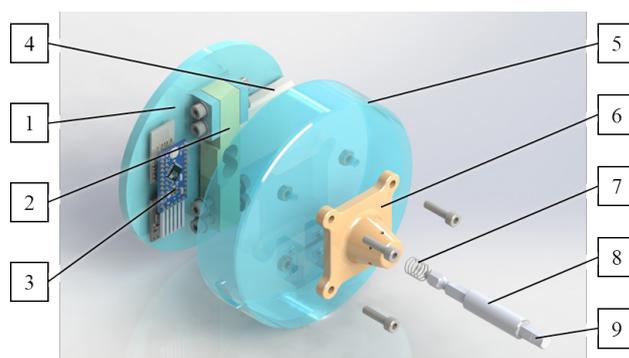


Рис. 1. Схема специального исполнительного устройства: 1 – основание, 2 – чувствительный элемент (балочный тензодатчик), 3 – аппаратная часть обработки и передачи данных, 4 – аккумулятор, 5 – крышка, 6 – корпус демпфера, 7 – пружина демпфирующая, 8 – держатель биты, 9 – сменная шестигранная бита

Fig. 1. Model of a special actuator: 1 – base, 2 – sensor (beam strain gauge), 3 – hardware for data processing and transmission, 4 – battery, 5 – cover, 6 – damper body, 7 – spring damper, 8 – bit holder, 9 – replaceable hex bit

⁷VS Inc. Drive Pro-Fuse Screw Tape Feeder. Режим доступа: <http://www.hp-vanguard.com/> (дата обращения: 28.06.2023).

⁸Electric screwdriver general catalog. Режим доступа: https://static.hios.com/catalog/HIOS_General-Catalog_22A_EN.pdf (дата обращения: 30.06.2023).

Реализованный прототип устройства затяжки представлен на фотографии рис. 2.

На рис. 3 представлена функциональная схема роботизированного комплекса сборки винтовых соединений с контролем усилия затяжки. На схеме можно выделить: робот-манипулятор KUKA KR3 R540 с контроллером робота, беспроводную передающую часть с датчиком усилия, установленную на фланце

робота, беспроводную принимающую часть с контроллером, соединенную по USB с управляющим компьютером и, по дополнительному интерфейсу входных сигналов, с контроллером робота. С управляющего компьютера устанавливаются предельно допустимые значения срабатывания датчика, а также принимаются данные о текущем значении крутящего момента.



Рис. 2. Прототип специального исполнительного устройства, установленный на роботе KUKA KR3 R540
Fig. 2. Prototype of a special actuator installed on the KUKA KR3 R540 robot



Рис. 3. Функциональная схема роботизированного устройства сборки винтовых соединений
Fig. 3. Function block diagram of a robotic device for screw connection assembly

В качестве чувствительного элемента для определения усилий затяжки крепежных изделий использовалась консольная тензометрическая балка с аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) НХ711. Данные с выхода АЦП поступают на микроконтроллер Arduino Pro Mini с частотой 80 Гц, где предварительно обрабатываются. Передача данных об усилии затяжки организована радиомодулями NRF24L01. Они обеспечивают быструю и качественную радиосвязь в заданных условиях эксплуатации, а также позволяют получать данные с радиоканала несколькими устройствами одновременно. Задержки радиопередачи составляют 10–15 мс, что меньше по сравнению с Bluetooth-передатчиками – 30–50 мс.

На передающем модуле реализованы следующие режимы работы, которые индицируются соответствующей световой индикацией:

1. Устройство запущено и ожидает



команды от стационарного микроконтроллера для установки предельных значений момента затяжки – разноцветная переливающаяся подсветка.

2. Устройство получило предельные значения момента и готово к переходу в режим трансляции текущего значения с тензобалки – белый цвет.

3. Устройство транслирует текущие значения с тензодатчика, данные значения меньше предельных – зеленый цвет.

4. Значение крутящего момента больше установленного предела – красный цвет.

Полученные по радиоканалу данные обрабатываются микроконтроллером Arduino Nano. При достижении предельных значений усилий затяжки на цифровой вход системы управления робота-манипулятора через гальваническую развязку подается сигнал.

Блок-схемы работы вышеописанных систем представлены на рис. 4.

После подачи питания беспроводное



Рис. 4. Блок-схемы алгоритмов разработанных систем: а – чувствительный элемент с передатчиком и индикацией; б – приемник, связанный с роботом-манипулятором
Fig. 4. Block diagrams of developed system algorithms: a – sensor with transmitter and indication; b – receiver connected to a manipulator robot

исполнительное устройство ожидает команды инициализации параметров (рис. 4 а). Команда поступает через приемник, связанный с контроллером робота от внешнего управляющего компьютера. Если инициализация прошла успешно, то от управляющего компьютера ожидается команда начала считывания данных с тензобалки и их отправки на приемник, связанный с контроллером робота. При поступлении данной команды беспроводной передатчик в исполнительном устройстве в циклическом режиме отправляет текущее значение усилия на тензобалке. В ходе циклической отправки выполняется вычисление момента, три последних значения которого сохраняются для определения среднего момента. Значение среднего момента сопоставляется с предельным, и в случае его превышения световая индикация устройства изменит цвет на красный.

При включении питания приемника, связанного с роботом-манипулятором, происходит инициализация начальных параметров (рис. 4 б). Затем проверяется, было ли установлено новое значение предельного момента со стороны управляющего компьютера. Если значение изменилось, то соответствующая информация отправляется на контроллер, расположенный на исполнительном устройстве. Далее в режиме бесконечного цикла происходит прием данных, вычисление на их основе момента, сохранения трех последних значений, вычисление по ним среднего момента и его сопоставление с предельным. В случае превышения предельного значения момента происходит отправка стоп-сигнала в контроллер робота. Условием выхода из данного цикла является нажатие кнопки выключения.

Для реализации циклов закручивания/выкручивания винтов на работе с помощью языка Kuka Robot Language (KRL) были разработаны алгоритмы, представленные на рис. 5.

На рис. 5 а показан алгоритм главной программы, в которой основная часть выполнена в виде цикла, в котором винт выкручивается из i -го отверстия и вкручивается в $i+1$ отверстие. При этом в начале цикла выполняется поиск шлицов головки винта с помощью биты, установленной в устройство робота. Если зацепление шлицов головки винта и биты не произошло (и было превышено значение крутящего момента), то поиск повторяется заново, при этом исполнительное устройство в начале цикла поворачивается на 90° .

На рис. 5 б приведен алгоритм выкручивания винтов. Выкручивание начинается с включения отслеживания прерывания, чтобы программа могла останавливать процесс в моменты превышения предельно допустимых значений усилий. Срабатывание прерывания на стадии «Поиск головки винта» свидетельствует о неудачной попытке, и дальнейшая часть алгоритма не выполняется, управление передается на вышестоящий уровень, в котором происходит изменение начального состояния и запуск повторной попытки. При удачном нахождении головки винта выполняются следующие процедуры «Медленное выкручивание...», «Разгон...», «Основной цикл выкручивания...», «Замедление...». После всех процедур выполняется отключение отслеживания прерываний.

Алгоритм цикла вкручивания винта (рис. 5 с) похож на ранее описанный цикл выкручивания, однако он не содержит поиска винта, т.к. винт уже находится на бите устройства. Следует выделить процедуру затяжки, которая выполняется до срабатывания прерывания, что свидетельствует о благополучном выполнении задачи.

В алгоритмах выкручивания (рис. 5 б) и вкручивания (рис. 5 с) имеются следующие процедуры, при выполнении которых срабатывание прерываний свидетельствует об аварийной ситуации: «Медленное выкручивание/вкручивание...», «Разгон...», «Основной цикл выкручивания/вкручивания...», «Замедление...». Срабатывание прерывания в процедурах «Поиск головки» и «Затягивание винта до предельного момента» является нормальным и не вызывает остановку программы.

На рис. 5 д представлен алгоритм обработки прерываний, вызываемый при достижении заданного значения момента. Вначале происходит остановка всех движений робота, далее отключается отслеживание прерываний. Так как существует определенная задержка между срабатыванием прерывания и фактической остановкой, то следующим шагом является перемещение в точку срабатывания прерывания. Чтобы идентифицировать ситуацию срабатывания прерывания (является ли она аварийной или штатной), в процедуре «Определение стадии закручивания/выкручивания винта» происходит вычисление предельных координат исполнительного звена, соответствующих положениям начала и конца вкручивания винта, начала затяжки,

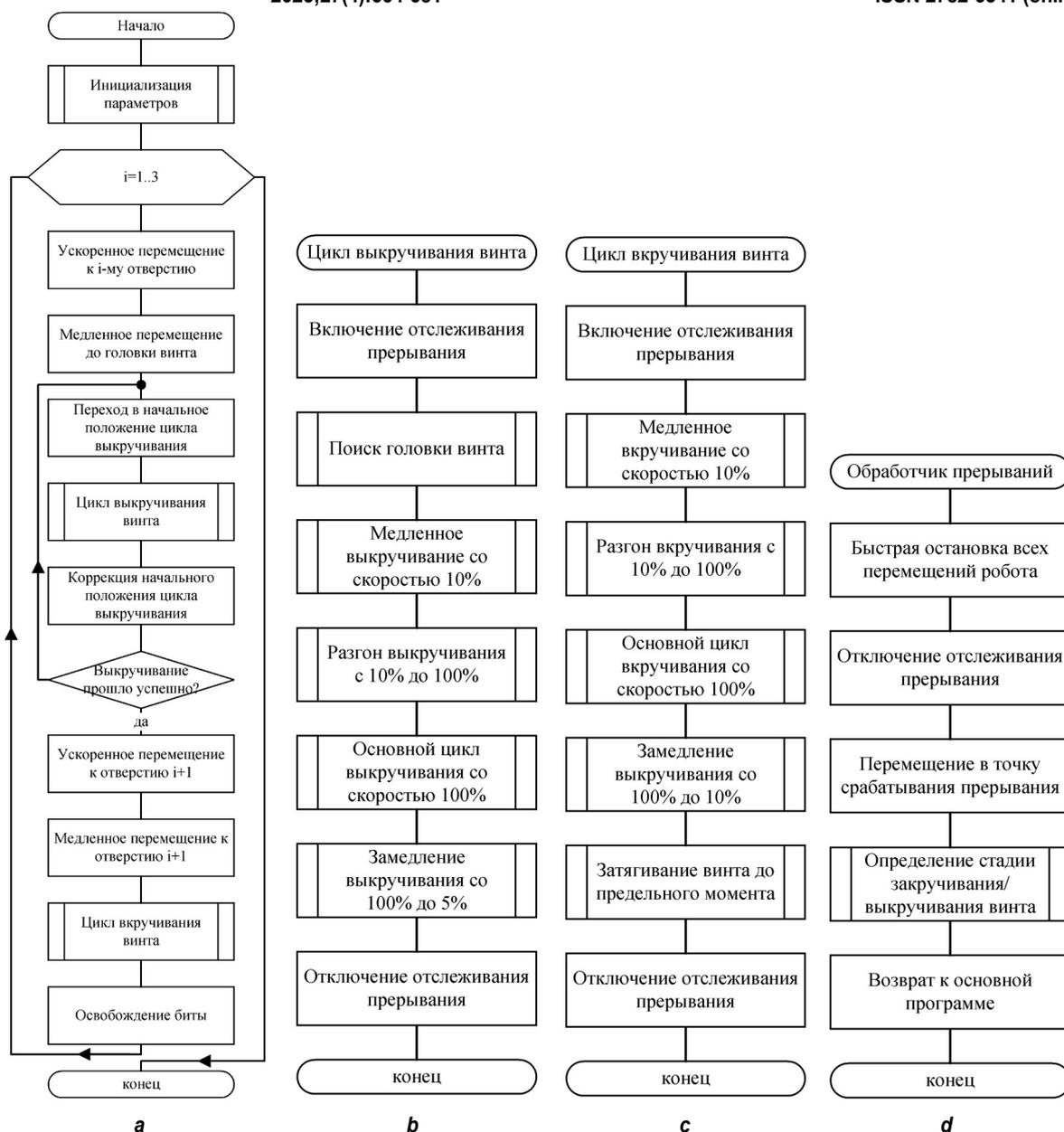


Рис. 5. Блок-схемы алгоритмов работы робота (a, b, c, d)
Fig. 5. Block diagrams of robot operation algorithms (a, b, c, d)

начала и конца поиска головки (при выкручивании).

Из-за погрешностей изготовления устройства существует эксцентриситет между осью вращения робота АБ и осью биты-винта (рис. 6).

Для компенсации этого эксцентриситета, после монтажа устройства на роботе, производились измерение фактического положения вершины инструмента биты относительно центральной точки фланца робота и программирование вращения с помощью команды относительного перемещения в системе координат инструмента. Вращение осуществлялось итерационно на треть оборота (т.е. угловой шаг – 120°, а линейное перемещение биты – треть шага резьбы). Направления вращения и линейного перемещения определяются двумя

соответствующими переменными DIR_A и DIR_Z. Для предотвращения остановок между шагами использовалась команда сглаживания перемещения C_DIS.

Процесс завинчивания разделяется на три этапа (рис. 6 b): 1 – наживление (медленный вход в резьбу, при котором достижение предельного значения момента будет являться аварийной ситуацией), 2 – завинчивание (основной цикл, происходит с максимальной скоростью, при которой событие превышения предельного момента также будет аварийной ситуацией), 3 – затяжка винта (медленное закручивание винта, при котором ожидается, что значение с датчика достигнет предельного момента).

Рассмотренное устройство плохо под-

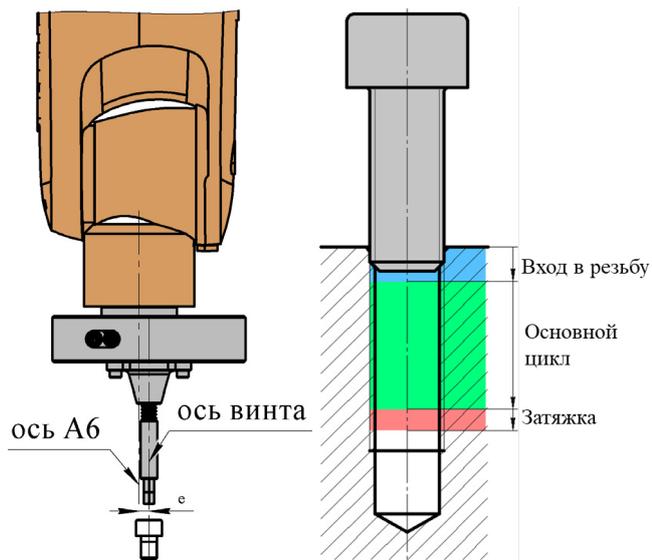


Рис. 6. Схема эксцентриситета между осью винта и осью А6 (а) и этапы закручивания винта (б)
 Fig. 6. Diagram of eccentricity between the screw axis and the A6 axis (a) and the stages of screw tightening (b)

ходит для промышленного использования, т.к. привод шестой оси робота при работе в таком режиме быстро исчерпает свой ресурс, а использование аккумулятора в качестве источника питания подразумевает его периодическую подзарядку. Данная проблема частично решена в работе [14], однако такой метод подходит не для всех режимов работы инструмента.

По этим причинам было разработано и изготовлено новое устройство (рис. 7). Устройство состоит из вращающейся сменной

биты 1, привода 2 вращения биты с контролем момента затягивания, рычажного захвата 3 и блока управления 4. При выполнении сборочной операции захват 3 берет собираемый модуль 5 с ложеента 6 и устанавливает его на базовую панель 7. Затем с помощью биты 1 из ложеента 6 захватывается винт, который фиксирует модуль 5 на базовой панели 7 с установленным моментом затяжки.

Для управления моментом затяжки и скоростью вращения необходимо независимо контролировать ток и напряжение на двигателе. Для этого применялась схема источника питания с прямоугольной характеристикой. Подобные схемы широко применяются в лабораторных источниках питания, где требуется раздельная настройка тока и напряжения [15].

Контроль момента затяжки винтовых соединений осуществляется за счет ограничения максимального тока двигателя. Управление двигателем и захватом осуществляет электронный блок управления. В настоящее время широко применяются методы теоретического определения зависимости момента от тока двигателя, в том числе с применением нейронных сетей, так в работе [16] рассматривается определение зависимости получаемого момента затяжки от геометрии двигателя. Однако в случае применения серийно выпускаемых двигателей такой расчет не представляется возможным. Также существуют методы, опирающиеся на экспериментальное

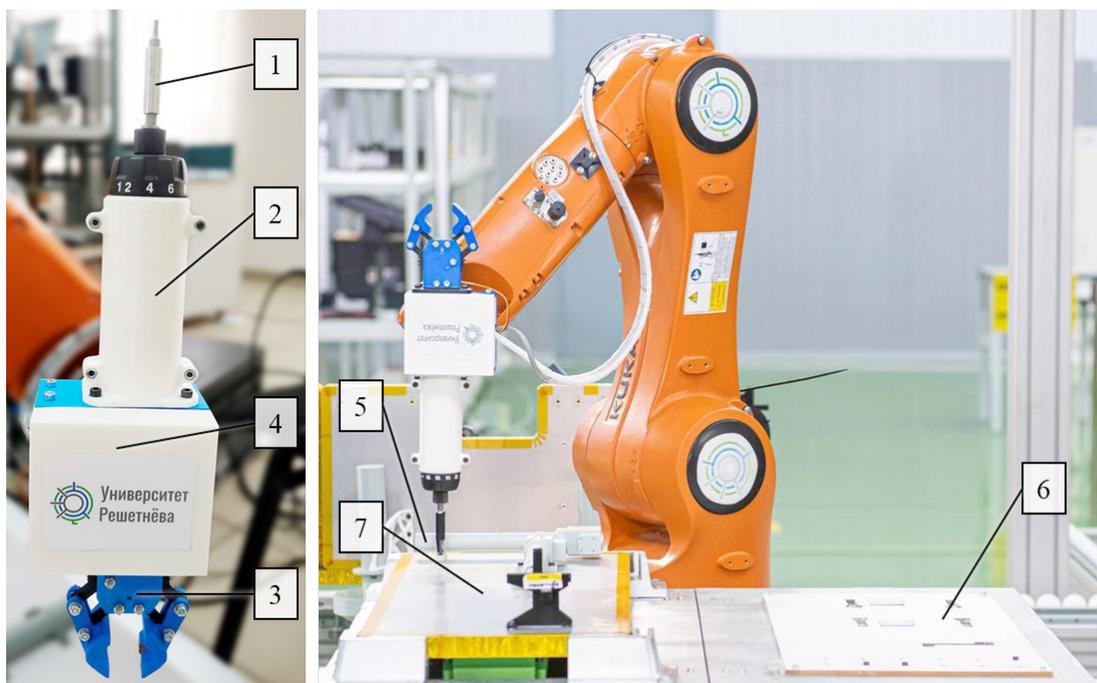


Рис. 7. Исполнительное устройство и роботизированный стенд для винтовой сборки изделий
 Fig. 7. Actuator and robotic test bench for screw assembly of work products

определение момента отворачивания винтов, составления табличной зависимости и последующей аппроксимации [17], однако это применимо только для серийных производств с высокой степенью унификации и фиксированным техпроцессом. Существуют исследования измерения момента в пневматическом инструменте⁹, однако такой принцип не позволяет сделать инструмент полностью беспроводным.

Благодаря отсутствию необходимости реализации безграничного вращения оси А6 робота-манипулятора появилась возможность использовать проводную связь для передачи простых двоичных команд управления от системы управления роботом-манипулятором через гальваническую развязку. Цифровые входы и выходы на контроллере робота-манипулятора использовались следующим образом:

- один выход – для включения привода вращения биты;
- один выход – для управления направлением вращения привода вращения;
- два выхода – для выбора позиции раскрытия захвата (открыт/закрыт на 30%/закрыт на 60%/закрыт на 100%);
- один вход – для получения тактовых импульсов, соответствующих оборотам привода вращения.

Задание уставок на скорость вращения и на ограничение момента завинчивания винта по-прежнему выполняется по беспроводному

интерфейсу.

В качестве управляющего контроллера в электронном блоке управления применен модуль ESP32-CAM. На борту этого модуля есть двухмегапиксельная камера OV-2640, слот под карту памяти MicroSD и контроллер беспроводного интерфейса Wi-Fi. Также имеются выходы GPIO для подключения дополнительных устройств и сигналов.

В разработанном устройстве на этот модуль возложены следующие функции: задание уставки по максимальному току двигателя, задание уставки по напряжению двигателя, отслеживание направления вращения двигателя, измерение и обработка сигнала с датчика тока двигателя, измерение и обработка сигнала с датчика напряжения на двигателе, измерение и обработка сигнала с датчика оборотов двигателя, обработка команд управления с интерфейсов робота-манипулятора, управление сервомотором устройства захвата.

Для управления двигателем разработана схема импульсного преобразователя с прямоугольной вольт-амперной характеристикой. Преобразователь построен на ШИМ-контроллере TL494¹⁰ (широтно-импульсная модуляция), который управляет мостом на силовых MOSFET транзисторах, в диагональ которого включен коллекторный двигатель постоянного тока (рис. 8).

Применение мостовой схемы позволяет

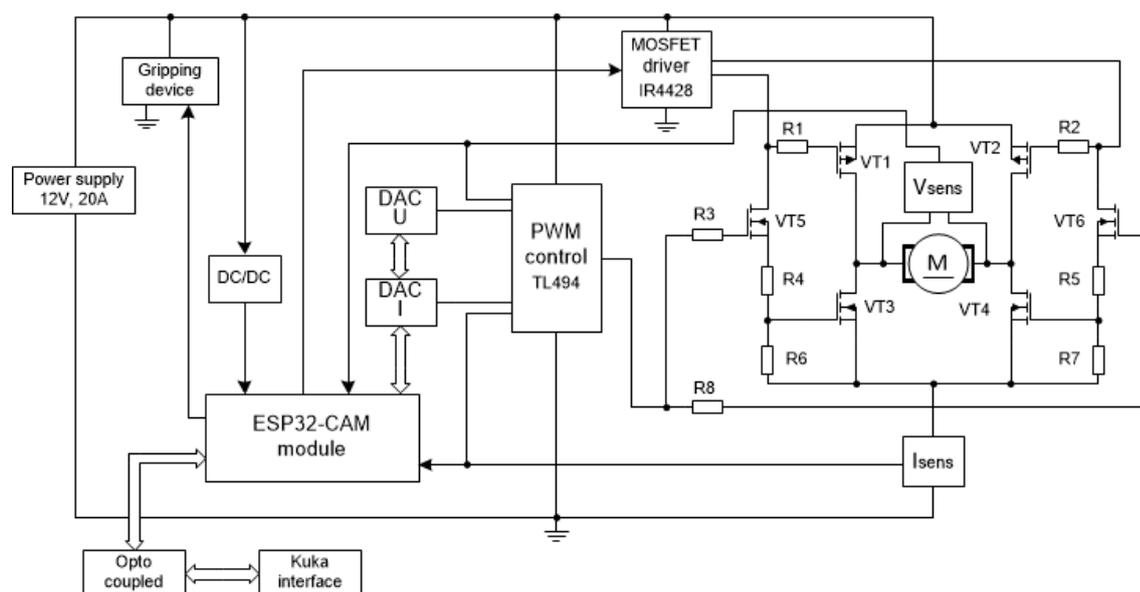


Рис. 8. Схема электронного блока управления
Fig. 8. Electronic control unit diagram

⁹Dacell TRB series torque sensors. Режим доступа: http://danaloadcell.com/portfolio_page/shaft-type-torque-sensors/?ckattempt=1 (дата обращения: 30.06.2023).

¹⁰TL494. Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/657/DOC027657782.pdf> (дата обращения: 30.06.2023).

реверсировать двигатель, изменяя только уровень логического сигнала на входе MOSFET драйвера.

Сигналы обратной связи с датчика тока и датчика напряжения замыкаются в схеме ШИМ управления, а модуль ESP32-CAM эти сигналы измеряет для контроля корректности работы устройства и передачи значений достигнутого момента затяжки на управляющий компьютер.

Для начала цикла завинчивания винта с робота-манипулятора должен прийти сигнал на включение привода вращения биты. В этот момент цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) по току уже выдает уставку, соответствующую требуемому моменту затяжки винта, а ЦАП по напряжению начинает плавно увеличивать свое выходное напряжение, тем самым обеспечивая плавный запуск привода вращения биты. Ближе к концу резьбы обороты двигателя уменьшаются путем понижения напряжения на выходе ЦАП по напряжению для уменьшения инерционной составляющей в итоговом моменте затяжки винта. На финальном цикле закручивания винта ток в двигателе начинает возрастать, соответственно, увеличивается сигнал обратной связи по току двигателя, и при достижении им уставки с ЦАП по току схема ШИМ управления начинает поддерживать этот уровень тока путем снижения напряжения на двигателе, что приводит к его остановке. Это состояние фиксирует модуль ESP32-CAM, убирает уставку с ЦАП по напряжению и вырабатывает сигнал на интерфейс робота-манипулятора о завер-

шении цикла завинчивания.

Для экспериментальной отработки устройства использовались определенные винты с известной длиной и шагом резьбы. Поэтому скорость вращения двигателя на каждом шаге цикла завинчивания была запрограммирована. Для реализации серийной сборки, где возможно применение винтов различной номенклатуры, планируется для определения требуемой циклограммы завинчивания использовать видеокамеру, которая уже установлена в модуле ESP32-CAM для распознавания меток, нанесенных на ложементы для винтов, в которых будут зашифрованы параметры винта, используемого в данном цикле.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В первом устройстве из-за наличия беспроводного интерфейса при передаче сигнала наблюдается некоторая задержка между достижением предельного значения момента и остановкой вращения робота. Для изучения задержки в ходе эксперимента было выполнено по пять циклов завинчивания винтов со скоростями 50, 75 и 100% от максимальной скорости.

Последовательность значений, передаваемых устройством затягивания, представлена в виде графиков на рис. 9–11 для разных скоростей закручивания. Красной линией на графиках показано значение установленного предельного момента.

По трем графикам видно, что значение

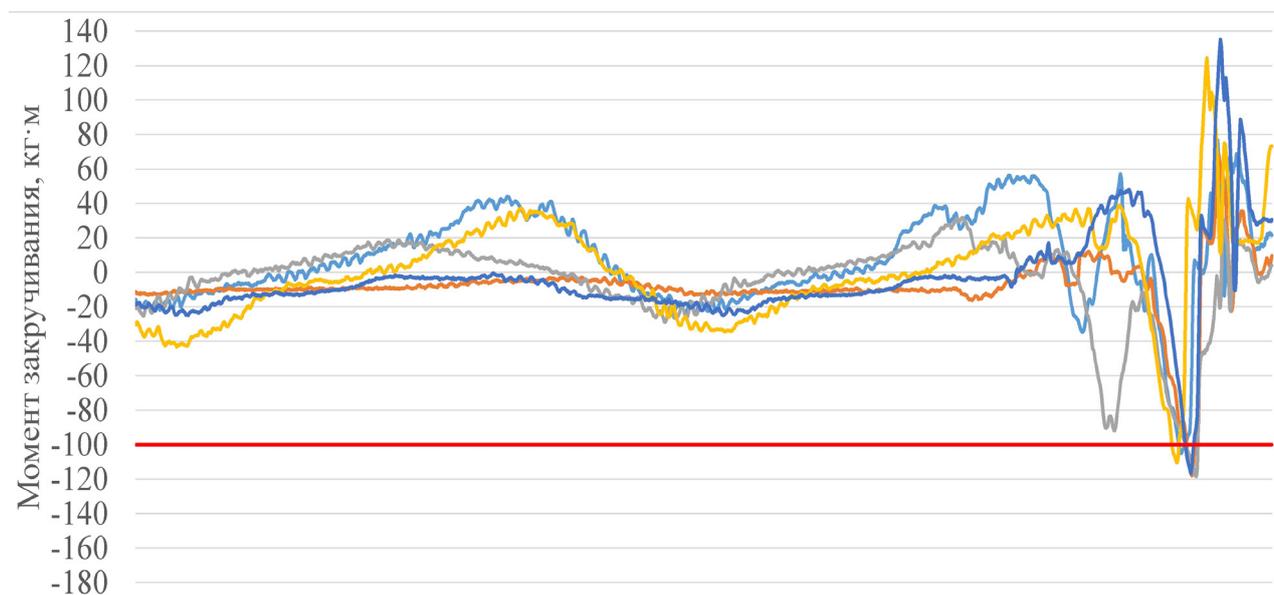


Рис. 9. Изменение значений момента при 50% скорости
Fig. 9. Changing torque values at 50% speed

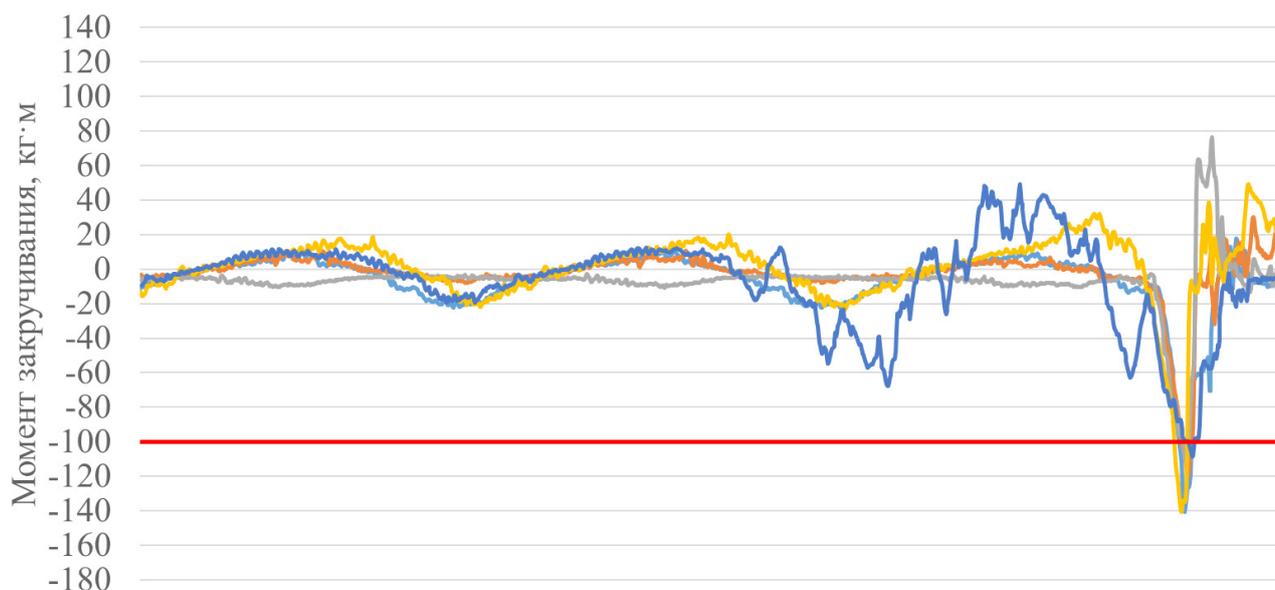


Рис. 10. Изменение значений момента при 75% скорости
Fig. 10. Torque values variation at 75% speed

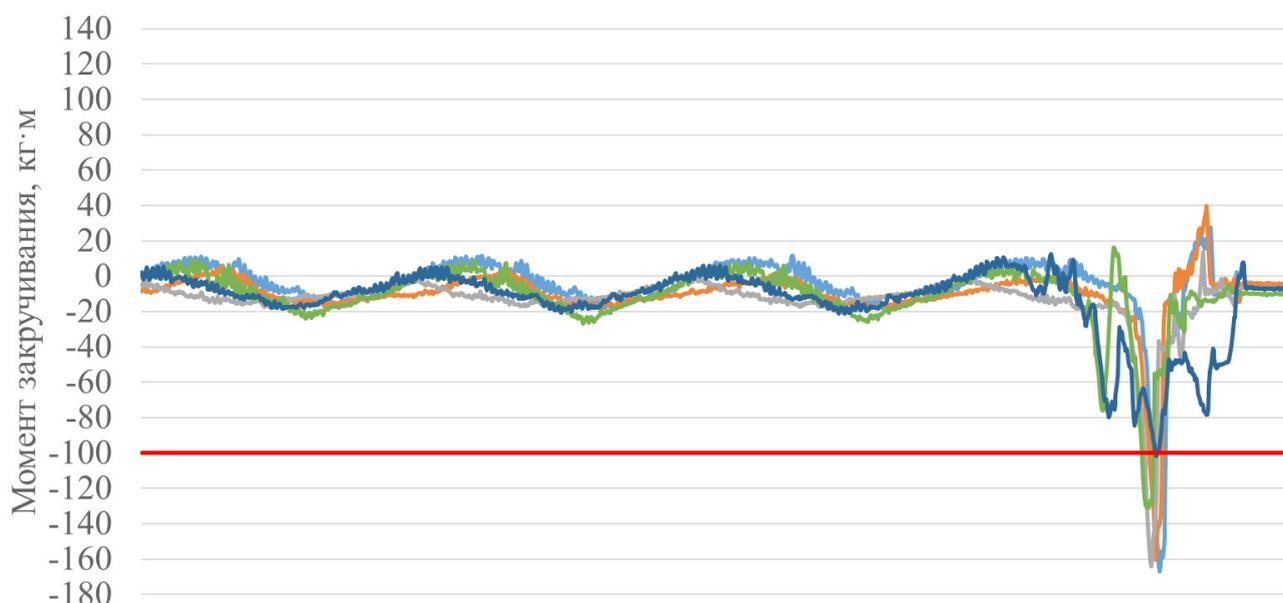


Рис. 11. Изменение значений момента при 100% скорости
Fig. 11. Torque values variation at 100% speed

максимального достигнутого момента увеличивается с ростом скорости закручивания. Если для каждого из экспериментов вынести максимальное значение достигнутого при закручивании момента в зависимости от скорости закручивания (рис. 12), то можно увидеть, что среднее значение по пяти экспериментам увеличивается с ростом скорости, также наблюдается увеличение разброса значений.

Для подтверждения существующей статистически значимой зависимости максимального момента от скорости закручивания был использован Н-Критерий Крускала-Уоллиса. Данный критерий предназначен для оценки различий одновременно между тремя и более

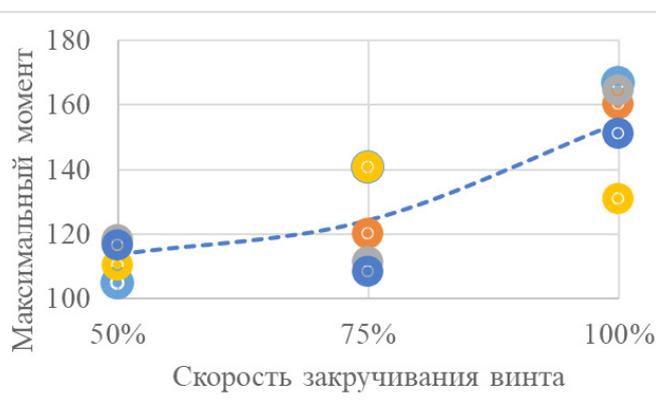


Рис. 12. Зависимость максимального момента от скорости закручивания
Fig. 12. Maximum torque vs tightening speed

Таблица 1. Обоснование различий в значениях достигнутого при закручивании момента по H-Критерий Крускала-Уоллиса
Table 1. Justification of differences in values of the torque achieved during tightening according to the Kruskal-Wallis H test

№	Скорость закручивания					
	100%		75%		50%	
	Значение	Ранги (R1)	Значение	Ранги (R1)	Значение	Ранги (R1)
1	-166,91	15	-140,82	11	-104,89	1
2	-160,29	13	-120,06	8	-117,91	6
3	-164,38	14	-111,44	4	-118,3	7
4	-130,74	9	-140,58	10	-110,38	3
5	-151,01	12	-108,39	2	-116,64	5
$R_{\Sigma i}$	63		35		22	
$\frac{R_{\Sigma i}^2}{n_i}$	793,8		245		96,8	
$H_{эмп}$	8,78					
$H_{крит}$	$H_{эмп}(0,01) = 7,98, H_{крит}(0,05) = 5,78$					

выборками по уровню признака:

$$H_{эмп} = \frac{12}{N(N+1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{R_{\Sigma i}^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (1)$$

где N – общее число членов в обобщенной выборке; n_i – число членов в каждой отдельной выборке; $R_{\Sigma i}^2$ – квадраты сумм рангов по каждой i -й выборке.

Значения промежуточных вычислений и итоговое значение критерия представлены в табл. 1.

Из табл. 1, видно, что по данному критерию различия между значениями максимального

крутящего момента, полученные для разных скоростей закручивания, являются значимыми.

Для подтверждения гипотезы о зависимости разброса максимального значения крутящего момента от скорости закручивания был использован также H-Критерий Крускала-Уоллиса. Оценка проводилась по модулям отклонений, достигнутых при закручивании моментов от среднего значения для каждой скорости (табл. 2):

$$\Delta M_{\max i}(V\%) = \left| M_{\max \text{cp}}(V\%) - M_{\max i}(V\%) \right| \quad (2)$$

Таблица 2. Обоснование различий в диапазонах достигнутого при закручивании момента по H-Критерию Крускала-Уоллиса
Table 2. Justification of differences in the ranges of the torque achieved during tightening according to the Kruskal-Wallis H test

№	Скорость закручивания					
	100%		75%		50%	
	$\Delta M_{\max i}$	Ранги (R1)	$\Delta M_{\max i}$	Ранги (R1)	$\Delta M_{\max i}$	Ранги (R1)
1	12,244	10	16,562	14	8,734	8
2	5,624	7	4,198	4	4,286	5
3	9,714	9	12,818	11	4,676	6
4	23,926	15	16,322	13	3,244	2
5	3,656	3	15,868	12	3,016	1
$M_{\max \text{cp}}(V\%)$	-154,666		-124,258		-113,624	
$R_{\Sigma i}$	44		54		22	
$\frac{R_{\Sigma i}^2}{n_i}$	387,2		583,2		96,8	
$H_{эмп}$	5,36					
$H_{крит}$	$H_{крит}(0,01) = 7,98, H_{крит}(0,05) = 5,78$					

где $M_{\max \text{cp}}(V_{\%})$ – среднее значение достигнутого момента при фиксированной скорости $V_{\%}$ (50, 75 и 100%); $M_{\max i}(V_{\%})$ – значение достигнутого момента i -го испытания при фиксированной скорости закручивания $V_{\%}$.

Результаты вычисления критерия показывают, что существующие различия между отклонениями достигнутого момента от среднего значения (разброс) для разных скоростей затягивания являются статистически незначимыми.

Для подтверждения гипотезы о зависимости среднего значения максимального момента от скорости закручивания был использован χ^2 -критерий Пирсона:

$$\text{эмп2} = (M_{\max \text{cp}}(V_{\%}) - M_{\max \text{cp}}) \cdot 2M_{\max \text{cp}}, \quad (3)$$

где $M_{\max \text{cp}}$ – среднее значение достигнутого момента при закручивании, по всем значениям.

Результаты вычисления χ^2 -критерия Пирсона показывают, что среднее значение достигнутого момента, возможно, имеет статистически значимые различия при разных

скоростях закручивания, но для выявления статистической значимости требуется дополнительное исследование.

Для второго устройства экспериментальные исследования момента затягивания проводились на макете, представленном на рис. 13. Установка запитывалась от источника питания Power DC модель S-150-12 (на рис. 13 не показан). Для измерения момента на валу привода 1 использовался преобразователь 2 TRB-5K [18], выходной вал которого был зафиксирован и измерялся статический момент затяжки. Сигнал с преобразователя 2 через модуль 3 ввода-вывода поступал в шасси 4 с модулем сбора данных. Интерпретированная информация передавалась в ноутбук 5.

В ходе эксперимента напряжение на двигателе и ток задаются независимо при помощи двух ЦАП. Целью исследования было изучить фактическую зависимость момента на двигателе от тока и от напряжения.

Графики статического момента затяжки при постоянном ограничении тока и меняющемся напряжении показаны на рис. 14.

Таблица 3. Обоснование различий в средних значениях достигнутого при закручивании момента по χ^2 -критерий Пирсона
Table 3. Justification of differences in the average values of the torque achieved during tightening according to Pearson's chi-squared test (χ^2)

$V_{\%}$	$M_{\max \text{cp}}(V_{\%})$	$M_{\max \text{cp}}$	$\frac{(M_{\max \text{cp}}(V_{\%}) - M_{\max \text{cp}})^2}{ M_{\max \text{cp}} }$	χ^2
100%	-154,666	-130,849	4,335	$\chi^2_{\text{амп}} = 6,935$ $\chi^2_{\text{амп}}(0,01) = 9,21$ $\chi^2_{\text{амп}}(0,05) = 5,991$
75%	-124,258	-130,849	0,332	
50%	-113,624	-130,849	2,268	

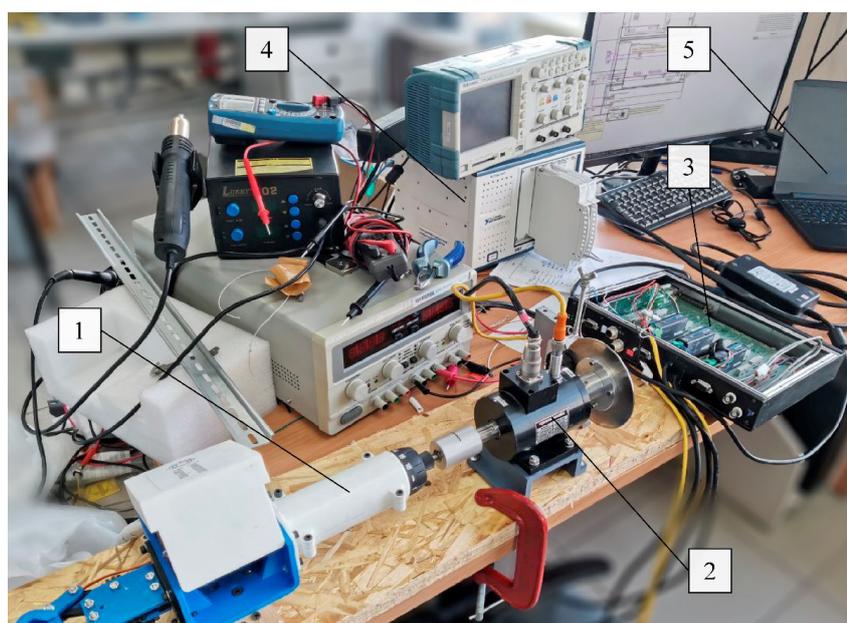


Рис. 13. Экспериментальный стенд исследования момента затяжки
Fig. 13. Experimental test bench to study the tightening torque

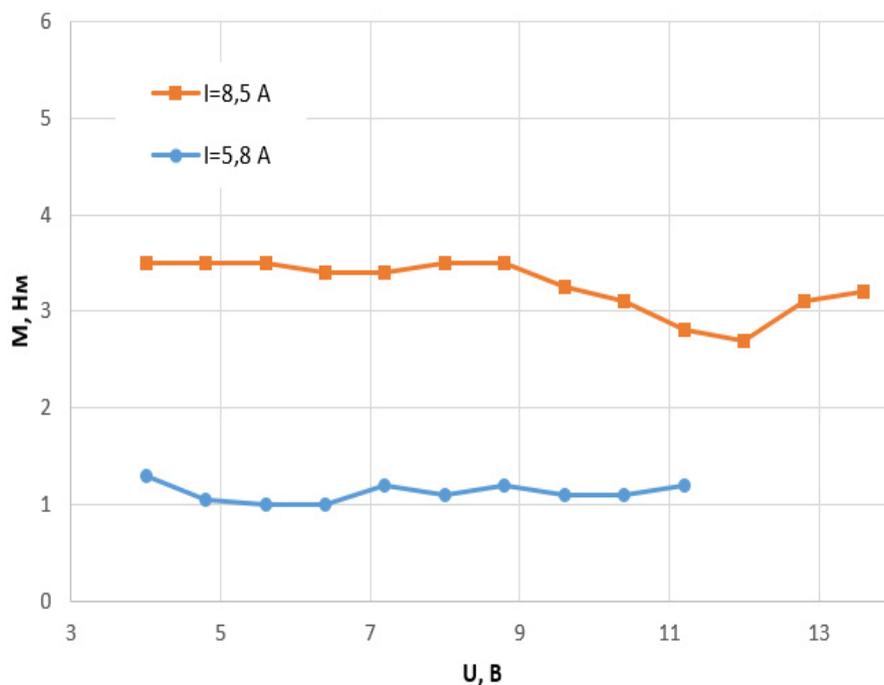


Рис. 14. Зависимость статического момента затяжки от напряжения при постоянном токоограничении
 Fig. 14. Static tightening torque vs voltage under constant current limiting

Из рис. 14 видно, что при постоянном токоограничении изменение напряжения на двигателе практически не влияет на выдаваемый момент. Небольшие отклонения, вероятнее всего, вызваны изменением КПД двигателя, который максимален на низких оборотах (соответствует меньшему значению напряжения) и уменьшается на высоких (соответствует высокому значению напряжения).

Графики достигнутого момента затяжки при постоянном напряжении и различных значениях тока показаны на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что момент зависит только от уровня токоограничения с практически линейной зависимостью (зеленый график).

На рис. 16 приведен график погрешности момента затяжки от линейной аппроксимации.

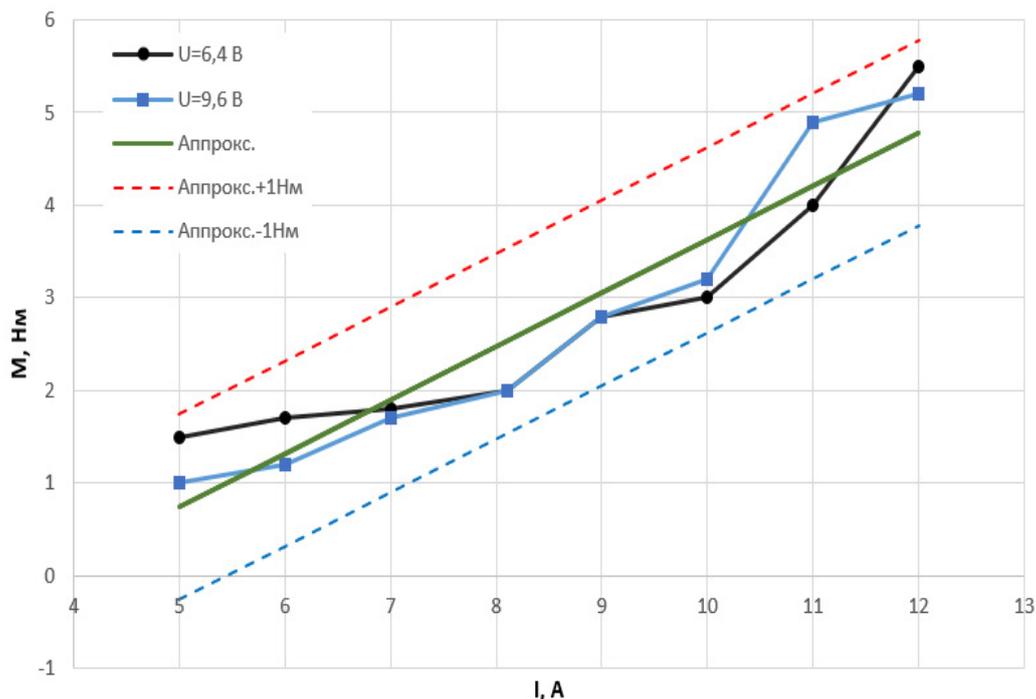


Рис. 15. Зависимость статического момента затяжки от токоограничения при постоянном напряжении
 Fig. 15. Static tightening torque vs current limiting at constant voltage

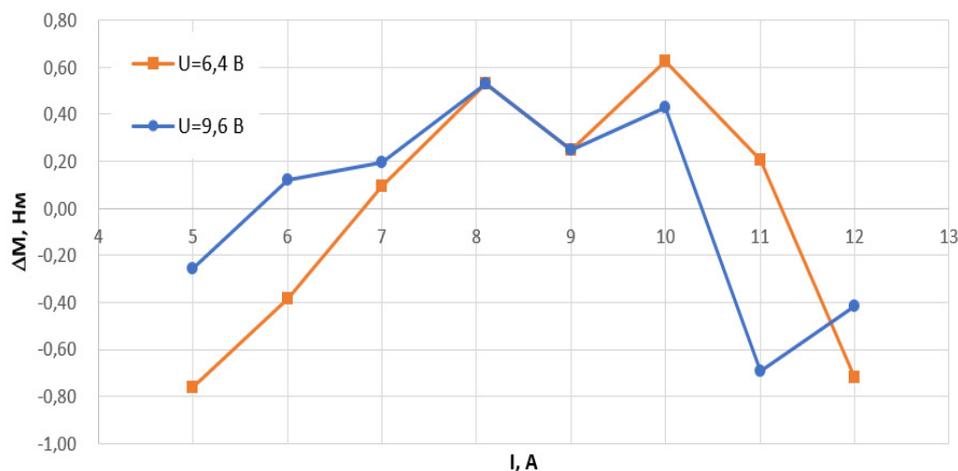


Рис. 16. Погрешность задания момента затяжки при использовании линейной аппроксимации
Fig. 16. Error in tightening torque setting when using linear approximation

Из рис. 16 видно, что абсолютная погрешность задания момента затяжки не превышает 0,8 Н·м во всем диапазоне или 3,03% (приведенная относительно максимального значения момента 25 Н·м). Данный результат сопоставим с погрешностью 4%, полученной в работе [19], и меньше, чем 2 Н·м, полученные в эксперименте [20].

Полученные результаты показывают, что представленные схемотехническое решение и зависимость могут быть использованы для реализации инструмента с контролируемым моментом затяжки. Применение цифрового управления позволяет производить затяжку в несколько этапов – вначале ограничиваясь небольшими значениями момента на этапе завинчивания резьбы, затем устанавливая точное значение момента на этапе затяжки.

При этом также возможна реализация дополнительных функций – аварийной остановки при закусывании резьбы, контроль центровки винтового соединения и т.п., что планируется к реализации в серийной версии устройства затяжки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в статье система автоматизированной сборки изделий роботом-манипулятором с динамометрическим контролем процесса затягивания винтовых соединений позволяет дополнить функционал робота-манипулятора интеллектуальными функциями для обеспечения обратной связи в процессе сборки и реализации контроля винтовых соединений.

Система обеспечивает погрешность контроля, соответствующую современным стандартам, и позволяет автоматизировать операции, прежде выполняемые рабочими, сокращая количество необходимого времени и повышая качество сборки.

В дополнение к автоматизации могут обеспечиваться функции телеметрии в реальном времени, записи журналов сборки, включая подробные графики затяжки каждого соединения, что может быть использовано в сборочных линиях, реализующих идеологию цифровых двойников.

Список источников

1. Hsue Albert Wen-Jeng, Tsai Chih-Fan. Torque controlled mini-screwdriver station with a SCARA robot and a machine-vision guidance // International Symposium on Computer, Consumer and Control (Taichung City, 13–16 November 2020). Taichung City: IEEE, 2020. P. 465–468. <https://doi.org/10.1109/IS3C50286.2020.00127>.
2. Hwang Joo-Yeon, Jung Doo-Hee, Roh Young-Jun, Nam Kee-Jun, Hwang Dal-Yeon. Low-cost automatic screw machine using a commercial electric screwdriver // 12th International Conference on Control, Automation and Systems (Jeju, 17–21 October 2012). Jeju: IEEE, 2012. P. 1055–1060.
3. Wu Zhimin, Du Wenjuan, Zhang Guigang, Wang Jian. Fuzzy control based on torque and angle method for bolt assembling system // Prognostics and Health Management Conference (Besancon, 4–7 May 2020). Besancon: IEEE, 2020. P. 214–218. <https://doi.org/10.1109/PHM-Besancon49106.2020.00042>.
4. Мубаракшин Р.М., Мубаракшин М.Р., Сотников П.С. Адаптивное управление и автоматизация процессов обработки деталей с целью обеспечения требуемых эксплуатационных показателей ответственных узлов и машин в

производстве 4.0 // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4. С. 3–10. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-4-3-10>.

5. Яковлева Е.А., Моторкин А.С., Капустин Д.Р. Выбор системы роботизированной автоматизации процессов на производстве // *SAEC*. 2023. № 3. С. 357–362. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id23-499>.

6. Hu Kaixiang, Cao Qixin, Zhang Haoruo. A compliant robotic assembly system based on multiple sensors // *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ARSO.2016.7736259>.

7. Matsuno T., Huang J., Fukuda T. Fault detection algorithm for external thread fastening by robotic manipulator using linear support vector machine classifier // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2013. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631058>.

8. LiZexiang. Robotics research for 3C assembly automation. Режим доступа: <https://app.box.com/s/zcg8qqxt6fw6v4xz22h6> (дата обращения: 28.06.2023).

9. Трифионов А.С. Разработка робототехнического комплекса для сборки изделий с применением резьбовых соединений // *BE FIRST: сб. ст. Междунар. науч.-исследовательского конкурса (г. Пенза, 15 сентября 2021 г.)*. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 16–21. EDN: FQHXCXV.

10. Aivaliotis P., Michalos G., Makris S. Cooperating robots for fixtureless assembly: modelling and simulation of tool exchange process // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2018. Vol. 31. Iss. 12. P. 1235–1246. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1512011>.

11. Wang Rui, Guo Xiangyu, Li Songmo. Automatic assembly technology of dense small screws for flat panel parts // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 14. <https://doi.org/10.3390/app13148309>.

12. Pitipong S., Pornjit P., Watcharin P. An automated Four-DOF robot screw fastening using visual servo // *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. 2010. <https://doi.org/10.1109/SII.2010.5708355>.

13. Zeng Fan, Xiao Juliang, Liu Haitao. Force/torque sensorless compliant control strategy for assembly tasks using a 6-DOF collaborative robot // *IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2019. Vol. 7. P. 108795–108805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931515>.

14. Volkov I., Makarov A., Kukhtik M. Research of magnetic supply unit of wireless torque sensor // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Sochi, 16–20 May 2022)*. Sochi: IEEE, 2022. P. 874–879. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787209>.

15. Yuan Zhibao, Xu Haiping. Pulse power supply with faster response and low ripple current using inductive storage and interleaving technology // *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2020. Vol. 5. Iss. 1. P. 54–62. <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2020.00005>.

16. Aoyagi T., Otomo Y., Igarashi H., Sasaki H., Hidaka Y., Arita H. Prediction of current-dependent motor torque characteristics using deep learning for topology optimization // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022. Vol. 58. No. 9. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3167254>.

17. Попов А.В., Чудинов В.А., Шаякбаров И.Э. Повышение качества контроля моментов затяжек резьбовых соединений методом отворачивания // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 2. С. 315–322.

18. Lee Young Gu, Talluri Teresa, Chung Hee Tae. Development of impact wrench torque measurement system // *IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics (Xiamen, 20–22 December 2019)*. Xiamen: IEEE, 2019. P. 33–36. <https://doi.org/10.1109/ICACEH48424.2019.9042104>.

19. Fan Xuewei, Wang Xiaowu, Xie Feng, Tang Nan. Research on control system of electric tightening wrench based on rotational speed difference method // *7th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems (Guangzhou, 13–15 November 2020)*. Guangzhou: IEEE, p. 797–801. <https://doi.org/10.1109/ICCSS52145.2020.9336824>.

20. Li Te, Liu Kuo, Tuo Guiben, Zhang Jiali, Ma Yue. Assemble torque measurement of aero-engine rotor blisk inside deep and confined cavity // *IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (Turin, 19–21 June 2019)*. Turin: IEEE, 2019. P. 238–242. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869615>.

References

1. Hsue Albert Wen-Jeng, Tsai Chih-Fan. Torque controlled mini-screwdriver station with a SCARA robot and a machine-vision guidance. In: *International Symposium on Computer, Consumer and Control*. 13–16 November 2020, Taichung City. Taichung City: IEEE; 2020, p. 465–468. <https://doi.org/10.1109/IS3C50286.2020.00127>.

2. Hwang Joo-Yeon, Jung Doo-Hee, Roh Young-Jun, Nam Kee-Jun, Hwang Dal-Yeon. Low-cost automatic screw machine using a commercial electric screwdriver. In: *12th International Conference on Control, Automation and Systems*. 17–21 October 2012, Jeju. Jeju: IEEE; 2012, p. 1055–1060.

3. Wu Zhimin, Du Wenjuan, Zhang Guigang, Wang Jian. Fuzzy control based on torque and angle method for bolt assembling system. In: *Prognostics and Health Management Conference*. 4–7 May 2020, Besancon. Besancon: IEEE; 2020, p. 214–218. <https://doi.org/10.1109/PHM-Besancon49106.2020.00042>.

4. Mubarakshin R.M., Mubarakshin M.R., Sotnikov P.S. Adaptive control and automation of the workpiece machining

- processes in order to provide the required performance of critical components and machines in the industry 4.0 production. In: *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2019;4:3-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-4-3-10>.
5. Iakovleva E.A., Motorkin A.S., Kapustin D.R. Selecting a robotisation tool in manufacturing. *SAEC*. 2023;3:357-362. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id23-499>.
6. Hu Kaixiang, Cao Qixin, Zhang Haoruo. A compliant robotic assembly system based on multiple sensors. In: *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ARSO.2016.7736259>.
7. Matsuno T., Huang J., Fukuda T. Fault detection algorithm for external thread fastening by robotic manipulator using linear support vector machine classifier. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2013. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631058>.
8. Li Zexiang. Robotics research for 3C assembly automation. Available from: <https://app.box.com/s/zcg8qqxt6fw6v4xz22h6> [Accessed 28th June 2023].
9. Trifonov A.S. Development of a robotic complex for assembling products using threaded connections. In: *BE FIRST: sbornik statej Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa = BE FIRST: collected articles of the International scientific and research competition*. 15 September 2021, Penza. Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2021, p. 16-21. EDN: FQHXCX.
10. Aivaliotis P., Michalos G., Makris S. Cooperating robots for fixtureless assembly: modelling and simulation of tool exchange process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2018;31(12):1235-1246. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1512011>.
11. Wang Rui, Guo Xiangyu, Li Songmo. Automatic assembly technology of dense small screws for flat panel parts. *Applied Sciences*. 2023;13(14). <https://doi.org/10.3390/app13148309>.
12. Pitipong S., Pornjitt P., Watcharin P. An automated Four-DOF robot screw fastening using visual servo. In: *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. 2010. <https://doi.org/10.1109/SII.2010.5708355>.
13. Zeng Fan, Xiao Juliang, Liu Haitao. Force/torque sensorless compliant control strategy for assembly tasks using a 6-DOF collaborative robot. *IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2019;7:108795-108805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931515>.
14. Volkov I., Makarov A., Kukhtik M. Research of magnetic supply unit of wireless torque sensor. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 16–20 May 2022, Sochi. Sochi: IEEE; 2022, p. 874-879. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787209>.
15. Yuan Zhibao, Xu Haiping. Pulse power supply with faster response and low ripple current using inductive storage and interleaving technology. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2020;5(1):54-62. <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2020.00005>.
16. Aoyagi T., Otomo Y., Igarashi H., Sasaki H., Hidaka Y., Arita H. Prediction of current-dependent motor torque characteristics using deep learning for topology optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2022;58(9):1-4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2022.3167254>.
17. Popov A.V., Chudinov V.A., Shayakbarov I.E. Improving control quality of tightening torques of threaded connections by the unscrewing method. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University. Engineering Sciences*. 2018;2:315-322. (In Russ.).
18. Lee Young Gu, Talluri Teressa, Chung Hee Tae. Development of impact wrench torque measurement system. In: *IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics*. 20–22 December 2019, Xiamen. Xiamen: IEEE; 2019, p. 33-36. <https://doi.org/10.1109/ICACEH48424.2019.9042104>.
19. Fan Xuewei, Wang Xiaowu, Xie Feng, Tang Nan. Research on control system of electric tightening wrench based on rotational speed difference method. In: *7th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems*. 13–15 November 2020, Guangzhou. Guangzhou: IEEE; p. 797-801. <https://doi.org/10.1109/ICCSS52145.2020.9336824>.
20. Li Te, Liu Kuo, Tuo Guiben, Zhang Jiali, Ma Yue. Assemble torque measurement of aero-engine rotor blisk inside deep and confined cavity. In: *IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace*. 19–21 June 2019, Turin. Turin: IEEE; 2019, p. 238-242. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869615>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пикалов Яков Юрьевич,

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические системы», Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия
✉ yapibest@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7171-8154>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakov Yu. Pikalov,

Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Robotic Systems Research Laboratory,
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk 660037, Russia
✉ yapibest@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7171-8154>

Штабель Николай Владимирович,

научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические системы», Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия
shtabnik@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-4373-4754>

Nikolay V. Shtabel,

Researcher of the Robotic Systems Research Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk 660037, Russia
shtabnik@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-4373-4754>

Брунгардт Максим Валерьевич,

к.т.н., доцент,
научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические системы», Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия
maxbrung@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4288-2550>

Maxim V. Brungardt,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Researcher of the Robotic Systems Research Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk 660037, Russia
maxbrung@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4288-2550>

Ткачёв Степан Борисович,

научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические системы», Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Россия
steep_st@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5749-6324>

Stepan B. Tkachev,

Researcher of the Robotic Systems Research Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
31, Krasnoyarsky Rabochy pr., Krasnoyarsk 660037, Russia
steep_st@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5749-6324>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.10.2023 г.; принята к публикации 11.11.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 23.10.2023; accepted for publication 11.11.2023 .