

КОНСТРУКЦИИ

УДК 681.2.083

DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.44

МЕТОД И СРЕДСТВО ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СБОРКИ, ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОРТЕЗА НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ ЭКСОСКЕЛЕТА

**А. В. Егоров¹, В. Н. Белогусев¹, А. В. Капустин¹,
И. А. Кудрявцев¹, Т. С. Ливанова²**

¹Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

²Марийский государственный университет (г. Йошкар-Ола)

В данной статье представлены метод и средство для оценки качества сборки и технического состояния электропривода для экзоскелета, основанные на определении его момента трогания в качестве одного из важнейших показателей уровня деградации его компонентов. Существующие методы в основном базируются на определении момента трогания с помощью дополнительных устройств, которые требуют участия оператора в процессе измерения, что увеличивает его время и трудозатраты и усложняет автоматизацию. В отличие от существующих методов и средств, предлагаемые здесь метод и аппаратно-программный комплекс позволяют автоматизировать процесс измерения, не требуют дорогостоящего оборудования и могут контролировать техническое состояние без демонтажа привода из экзоскелета.

Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет проводить контроль технического состояния электропривода в автоматическом режиме с низким уровнем влияния человеческого фактора и с меньшими временными и трудовыми затратами, по сравнению с существующими методами контроля. Применение энкодера с высокой точностью измерения угла положения входного вала редуктора, встроенного в систему электропривода, потенциально может позволить проводить экспресс-испытания исследуемого объекта без применения дополнительного оборудования.

Данный метод может найти широкое применение на заводах-изготовителях и предприятиях, эксплуатирующих экзоскелеты, поскольку он сокращает временные и финансовые затраты на испытания и контроль качества их сборки и технического состояния за счет универсальности метода и массогабаритных показателей разработанного аппаратно-программного комплекса, а также отсутствия необходимости в калибровке измерительных органов.

В экспериментальной части данной статьи предлагаемый метод и средство были оценены на основе электрических приводов с редукторами для электромеханического ортеза экзоскелета нижней конечности. Согласно результатам эксперимента, расхождение между значениями момента трогания, полученными существующим и предлагаемым способами, находится в пределах 1,8 %, что подтверждает эффективность и применимость разработанного способа контроля технического состояния электроприводов для экзоскелетов как на стадии их производства, так и во время эксплуатации.

Ключевые слова: момент трогания; электропривод; контроль эффективности экзоскелета; эффективность электропривода; привод экзоскелета.

Введение. В последние несколько десятилетий процесс развития экзоскелета, представляющего собой мобильное бионическое устройство, которое расширяет возможности человека и снижает физическую усталость, обеспечивая активную или пассивную по-

мощь мышцам тела, значительно ускорился [1-3]. Его применение стало заметным во многих областях жизни человека [4-6], особенно широкое распространение данные устройства получили в медицине [7-10]. По сравнению с традиционной физической терапией, вспомогательная реабилитация с помощью экзоскелета имеет ряд преимуществ, заключающихся в сокращении времени работы терапевтов, позволяя пациенту проводить интенсивные восстановительные тренировки и обеспечивая количественную оценку уровня восстановления путем измерения силы и моделей движения [2, 11, 12].

Актуальность темы. При всей полезности и актуальности применения экзоскелета в жизни человека, для разработчика и производителя подобная многофункциональная роботизированная система является крайне сложным и ответственным устройством, которое требует обеспечения высокого уровня качества его сборки и своевременного технического обслуживания, особенно узлов, которые подвергаются частым переменным нагрузкам, для предотвращения внезапного выхода их строя, что может привести к пагубным последствиям для здоровья человека [2, 16].

В общем смысле, экзоскелет представляет собой механизм с подвижными соединениями звеньев, прикрепленный к телу человека для облегчения его физических перемещений [17-19]. Данное устройство оснащено мощными исполнительными механизмами, которые поддерживают работу суставов человека и передают крутящий момент к контролируемым конечностям пользователя и, следовательно, обеспечивают его мобильность [20, 21]. При этом наиболее ответственным узлом, подвергающимся разнонаправленным переменным нагрузкам, является передаточный механизм и привод, как правило, электропривод, который потребляет малое количество энергии и обладает низким уровнем удельной мощности. Данные узлы требуют повышенного качества сборки и контроля технического состояния в процессе как производства, так и

эксплуатации. Большое количество сопряжений в данных узлах приводит к повышенной скорости деградиционных процессов, таких как износ и контактная выносимость, которые оказывают значительное влияние на их срок службы. Поэтому разработка методов и средств, позволяющих контролировать их техническое состояние и остаточный ресурс с высокой точностью и при малых затратах времени и финансовых средств, является важной задачей на пути к безопасной эксплуатации экзоскелетов.

При выборе средств оценки качества сборки и технического состояния передаточного механизма, в частности редуктора, и электропривода, особое внимание уделяется показателям, характеризующим уровень деградиционных процессов их отдельных элементов, которые в наибольшей степени обусловлены моментом трения в узлах сопряжения. Одним из таких показателей является момент трогания, который в ряде научных работ определяется как один из важнейших показателей качества сборки и изготовления редукторов. Многие производители разрабатывают уникальные стенды для определения момента трогания [22-24].

Сегодня определение момента трогания производят как на входном, так и на выходном звеньях редуктора, однако предпочтение отдается измерениям момента трогания на входном звене, поскольку он оказывает непосредственное воздействие на электродвигатель [25, 26].

Известны два основных метода для определения момента трогания на входном звене. Согласно первому методу создается плечо, один конец которого прикреплен к входному звену редуктора, а другой – нагружается тарированными гирьками, создавая при этом силу тяжести [26]. Конец плеча нагружается гирьками до момента трогания входного вала редуктора, после чего определяется момент трогания на входном звене редуктора, который равен произведению силы тяжести и длины плеча. Основным недостатком данного

метода являются высокие требования к аккуратности проведения эксперимента и его трудоемкость.

Второй метод отличается от первого тем, что ко второму концу плеча крепится граммометр, который показывает усилие, необходимое для страгивания входного звена редуктора [25]. Это усилие умножается на длину плеча, в результате чего определяется момент трогания электропривода. Описанный метод более точен, однако нуждается в тарировке граммометра, аналогично первому методу требует аккуратности проведения эксперимента и обладает повышенной трудоемкостью. Момент трогания на выходном звене чаще всего измеряют, когда нет возможности определить момент трогания на входном звене редуктора (когда демонтаж редуктора вызывает трудности). Например, в редукторах *pabtesco* момент трогания на выходном звене приводится к моменту трогания на входном звене через передаточное отношение. Основным недостатком данного метода является пренебрежение КПД редуктора при расчетах.

На основании проведенного анализа методов и средств определения момента трогания редукторов можно заключить, что существующие методы либо обладают низкой точностью измерения, либо требуют значительных трудовых и временных ресурсов, что является препятствием для экспресс-диагностики исследуемых объектов в период их эксплуатации и проведения технического обслуживания по состоянию. Кроме того, совершенствование существующих методов в плане автоматизации процесса измерения является трудоемкой задачей вследствие присутствия большого количества факторов, влияющих на результат измерения.

Целью исследования является разработка метода, методики и средства измерения момента трогания редуктора и электропривода для экзоскелетов, которые лишены недостатков существующих методов и средств измерения, а также их экспериментальное обоснование.

Аналитическое моделирование. Как отмечалось выше, одним из основных параметров, определяющих качество сборки редукторов, электродвигателей и электроприводов, является момент трогания, который характеризует уровень статического трения в сопряжениях их элементов. Поэтому для его определения требуется выявить условия, при которых уровень статического трения будет преодолен, то есть силу или величину, порождающую ее, которые позволят исследуемой системе вращающихся масс и ее элементам прийти во вращение. Для пояснения сущности предлагаемого в настоящей статье метода необходимо провести аналогии с последовательностью действий, которые совершаются при определении момента трогания с помощью существующих методов.

На предприятиях, изготавливающих исследуемые объекты, для определения искомой величины создается плечо, один конец которого крепится к входному звену редуктора, а на другой конец плеча действуют силы, создаваемые силой тяжести тарированных гирек. Нагрузка на плечо увеличивается до тех пор, пока исследуемая система не приходит в движение. Произведение полученной силы тяжести и длины плеча определяет момент трогания на входном звене редуктора. На рисунке 1 представлена схема реализации описываемого способа.

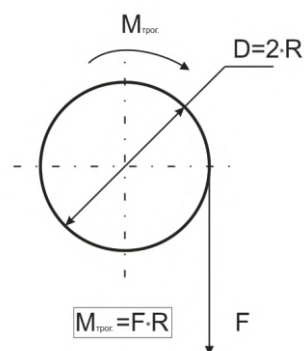


Рис. 1. Схема приложения сил для тестирования момента трогания редуктора

Для определения момента трогания $M_{трос}$ редуктора входное звено нагружают силой F

через плечо R , создаваемого радиусом дополнительного фланца, до тех пор, пока момент трогания $M_{\text{трое}}$ не преодолеет силы внутреннего сопротивления редуктора, вследствие чего начнется равноускоренное вращение его входного вала.

Для определения момента трогания $M_{\text{трое}}$ необходимо знать значение радиуса фланца R и определить силу F . Сила F равна произведению общей массы измерительной чаши и тарированных гирек, находящихся в ней, m и ускорения свободного падения $g = 9.8 \text{ м/с}^2$. Проще говоря, в данном случае сила статического трения в узлах сопряжения редуктора и электропривода преодолевается за счет силы тяжести тарированных гирек и чаши измерительных весов.

Описанная методика достаточно точно определяет техническое состояние и качество сборки редукторов и электроприводов на этапе из изготовления. Однако ее применение ограничивается достаточно трудоемким процессом измерения для редукторов с большим передаточным числом, а также присутствием человеческого фактора.

С другой стороны, преодоление сил статического трения в узлах сопряжения исследуемых объектов возможно с помощью приводного двигателя, входящего в состав рассматриваемого электропривода. При этом в зависимости от уровня трения в них для начала вращения электродвигателю необходимо потратить определенное количество энергии, индикатором значения количества которой может являться ток (ток трогания), изменяющийся в зависимости от нагрузки входного вала редуктора. Данный подход сводит к минимуму влияние человеческого фактора и позволяет проводить оценку качества сборки в автоматическом режиме, что способствует его применению не только на стадии сборки исследуемых объектов, а также на стадии их эксплуатации.

Сущность предлагаемого метода схематично представлена на рисунке 2.

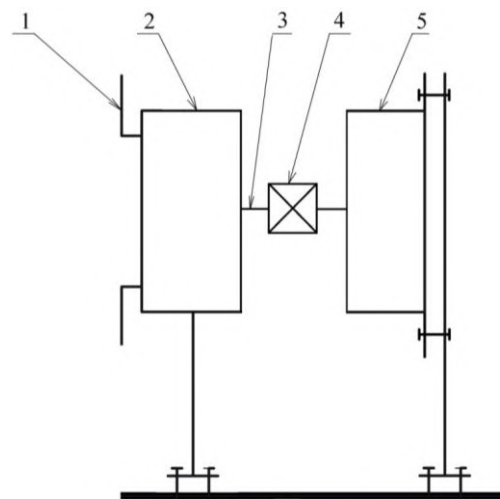


Рис. 2. Схема реализации метода измерения момента трогания электропривода: 1 – входное звено редуктора, 2 – редуктор; 3 – выходное звено редуктора; 4 – абсолютный энкодер; 5 – электродвигатель

С помощью электродвигателя, включенного в состав исследуемого электропривода, входное звено редуктора приводится во вращение. Датчики тока и напряжения регистрируют их значения при повороте редуктора на заданный угол α , принятый за начало движения объекта исследования. Вращение электродвигателя прекращается при достижении заранее заданного угла β , принятого за окончание движения редуктора. Приращение угла поворота условно рассчитывается согласно следующему уравнению:

$$\Delta = \frac{360}{i}, \quad (1)$$

где i – передаточное отношение редуктора.

Затем, после остановки электродвигателя, с некоторой выдержкой по времени продолжается процесс измерения тока питания электродвигателя, где начальный угол поворота входного звена редуктора равен конечному углу его поворота при предыдущем измерении:

$$\beta = \alpha + \frac{360}{i}. \quad (2)$$

Измерения тока и напряжения на обмотках приводного электродвигателя продолжают до момента совершения j оборотов входного звена редуктора, что соответствует одному полному обороту его выходного зве-

на. При этом полученное приращение Δ позволяет завершить процесс измерения в начальной фазе движения выходного звена редуктора.

Таким образом, во время испытания электропривода согласно предложенному методу редуктор и электродвигатель работают в режиме «старт-стоп», что позволяет определять токи трогания при различных углах выходного звена редуктора. Определив коэффициент, устанавливающий зависимость момента трогания и тока трогания электродвигателя (указанный в паспортных данных электродвигателя или рассчитанный экспериментально), имеем возможность без применения дополнительных нагрузочных устройств и приспособлений (граммометр, набор гирек и т.д.) определять момент трогания исследуемого объекта, а следовательно, качество его сборки при производстве, и проводить оценку технического состояния при его эксплуатации.

Количество измерений тока можно определить согласно следующему уравнению:

$$N = i^2. \quad (3)$$

В свою очередь, следует учитывать, что заданное приращение угла поворота не полностью покрывает весь поворотный диапазон редуктора. Поэтому дополнительным этапом разрабатываемой методики является проведение измерения изменения тока на обмотках электродвигателя (или на контроллере) при

постоянном напряжении и равномерном вращении электропривода при совершении j оборотов входного звена редуктора. Скорость вращения входного звена выбирается из расчета максимально допустимого значения тока трогания электропривода. Таким образом, при превышении данного значения тока выше допустимых отклонений можно судить о недопустимом увеличении уровня трения в зацеплении передаточных звеньев, а следовательно, о неудовлетворительном техническом состоянии электропривода.

В ходе статистической обработки получаемых значений момента трогания определяются выборочная дисперсия, среднеквадратичное отклонение, абсолютная и относительная погрешности результатов серии измерений при заданной доверительной вероятности, а также выявляются грубые наблюдения (промахи), которые подлежат исключению из выборки.

Техника эксперимента и методика обработки полученных результатов

Для оценки предлагаемого метода контроля технического состояния электропривода, а также исследования зависимости момента трогания от коэффициента полезного действия и остаточного ресурса электропривода для электромеханического ортеза нижней конечности разработан аппаратно-программный комплекс (рис. 3).

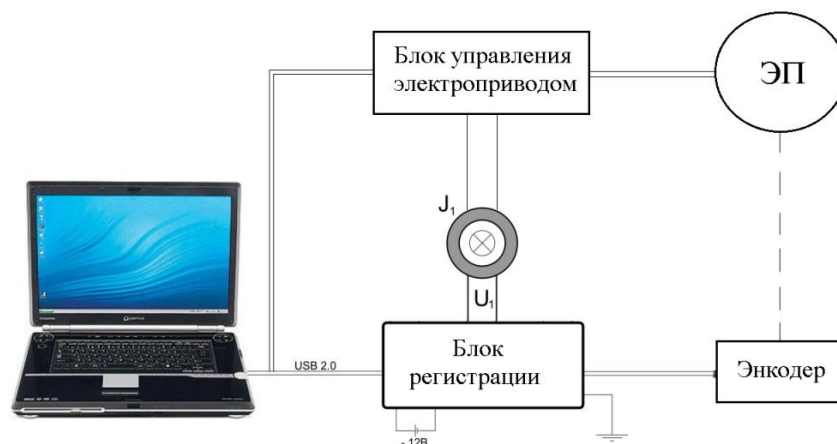


Рис. 3. Структура аппаратно-программного комплекса для контроля момента трогания электропривода при различных углах поворота входного звена редуктора

С помощью представленного аппаратно-программного комплекса производится регистрация углов поворота входного звена редуктора и токов (токов трогания) при достижении заданных значений углов поворота. На основании данных, измеряемых разработанным комплексом, производится расчет мгновенного и среднего значений искомых величин.

Для измерения углов поворота входного звена редуктора с достаточной точностью применяется абсолютный магнитный энкодер с SSI интерфейсом. Конструктивно он представляет собой электронный чип с небольшим количеством вспомогательных компонентов и вращающийся на небольшом расстоянии от чипа постоянный магнит. Магнит при повороте обеспечивает переменное магнитное поле, улавливаемое датчиком Холла. Датчик Холла выполнен по MEMS технологии и интегрирован в чип энкодера. Используемый микросхемный энкодер AS5040 способен работать в

режиме абсолютного и полноценного скоростного инкрементного энкодера. Это позволяет использовать его на входном звене мотор-редуктора для точного контроля абсолютного положения вала редуктора. Для энкодера реализована компактная круглая плата, встраиваемая в мотор-редуктор. Для связи с микроконтроллером используется SSI (Synchronous Serial Interface – синхронно-последовательный интерфейс). Его преимущества заключаются в простоте и в высокой частоте опроса.

АПК имеет один аналоговый измерительный канал (резисторы низких сопротивлений) и один цифровой измерительный канал (энкодер). Цифровой и аналоговый сигналы с датчиков поступают на вход блока регистрации, в котором через гальваническую развязку сигналов и фильтр попадают в измерительный микроконтроллер Atmega 640 с тактовой частотой 16 МГц (рис. 4).

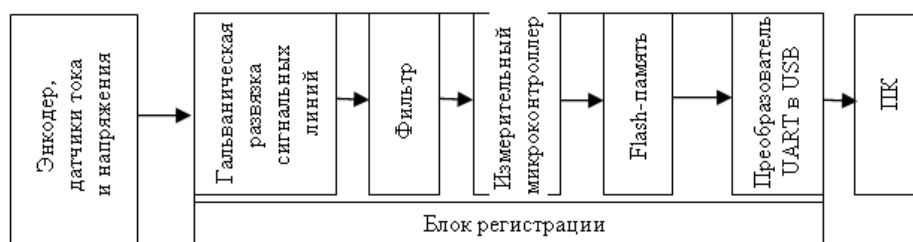


Рис. 4. Структура блока регистрации АПК для контроля момента трогания электропривода для электромеханического ортеза нижней конечности

Система гальванической развязки состоит из двух блоков: блока развязки питания и блока развязки сигнальной линии. Цифровой сигнал из микроконтроллера поступает на Flash-память до конца измерения. После окончания измерения данные из Flash-памяти поступают в персональный компьютер (ПК) и обрабатываются терминальной программой, установленной на жестком диске ПК.

В терминальной программе на ПК осуществляются математическая обработка массива данных, определение момента трогания для каждого угла поворота входного звена редуктора, статистическая обработка полу-

ченных значений, их сравнение с допустимым уровнем значений и определение остаточного ресурса электропривода. Полученные результаты представляются графически. Терминальная программа имеет встроенные часы реального времени, что позволяет сохранять время и дату проведения контроля параметров. Комплекс выполнен в экранированном алюминиевом корпусе.

Тестируемый электропривод приводится во вращение при помощи электродвигателя ЕС flat фирмы Maxon Motors. Данные электродвигатели отличаются высоким КПД и компактным плоским исполнением.

Точность управления электродвигателем обеспечивается сигналами с датчиков тока компании Honeywell на основе эффекта Холла, которые формируют цифровой сигнал. К главным достоинствам датчиков на основе эффекта Холла можно отнести отсутствие вносимых в систему потерь мощности и, как следствие, выделение теплоты, хорошую электрическую изоляцию, широкий диапазон частот и возможность измерения постоянных токов.

Для возможности автоматического проведения измерения моментов трогания при j оборотах входного звена редуктора был разработан быстродействующий пульт управления, который состоит из отладочной платы *escon module motherboard* и быстродействующего контроллера с высоким КПД *ESCON Module 50/5* фирмы *Maxon Motors*. Вместе с обратной связью по датчикам Холла, интегрированным в электродвигатель *Maxon Motors EC 90*, они образуют надежный и гибкий в управлении синхронный электропривод. Для драйвера *ESCON Module 50/5* применяется программное обеспечение *Escon Studio*, которое позволяет создавать различные варианты алгоритмов управления, например поддержание равномерной скорости на завершающем этапе диагностики электропривода, согласно предложенному методу и методике. Программирование осуществляется после подключения *Escon Module 50/5* к USB порту ПК и установки необходимых драйверов в системе. Панель регулировок пульта управления электродвигателем состоит из тумблера выбора направления вращения электродвигателя *Maxon Motors EC 90*, регулировочного резистора для регулировки частоты вращения электродвигателя и тумблера выбора режима «Пуск» и «Стоп». Блок питания электродвигателя *mean well HRPG-600-36* рассчитан на 36 вольт постоянного напряжения.

Редуктор для электромеханического ортеза нижней конечности изготавливается в лаборатории «Мехатронные системы» По-

вожского государственного технологического университета в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства многофункционального роботизированного экзоскелета медицинского назначения». Его общий вид с встраиваемым в него абсолютным энкодером представлен на рисунке 5.

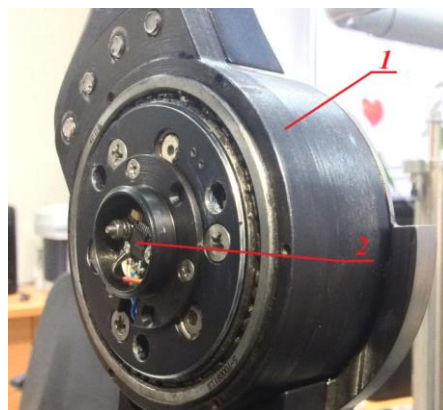


Рис. 5. Общий вид редуктора и абсолютного энкодера для оценки качества сборки и технического состояния электромеханического ортеза нижней конечности

С целью обоснования достоверности данных, получаемых с помощью разработанных метода, методики и аппаратно-программного комплекса, был предложен и собран стенд для тестирования момента трогания материального макета редуктора электромеханического ортеза нижней конечности. Схема разработанного испытательного стенда представлена на рисунках 6 и 7.

В состав устройства для измерения момента трогания редуктора входят следующие элементы:

- фланец с диаметрами 100 мм (рис. 6), которые изготовлены из легких материалов, для уменьшения момента инерции;
- два подшипника марки 1000802 (15×24×5) ГОСТ 8338-75;
- уплотнительное кольцо;
- два куса металлической проволоки диаметром 0,3 мм ГОСТ 3282-74 длиной мм и 1,3 м;
- чаша от лабораторных весов часового типа;
- набор гирь КЗФ Г-4-210 и МГ-4-1100-10.

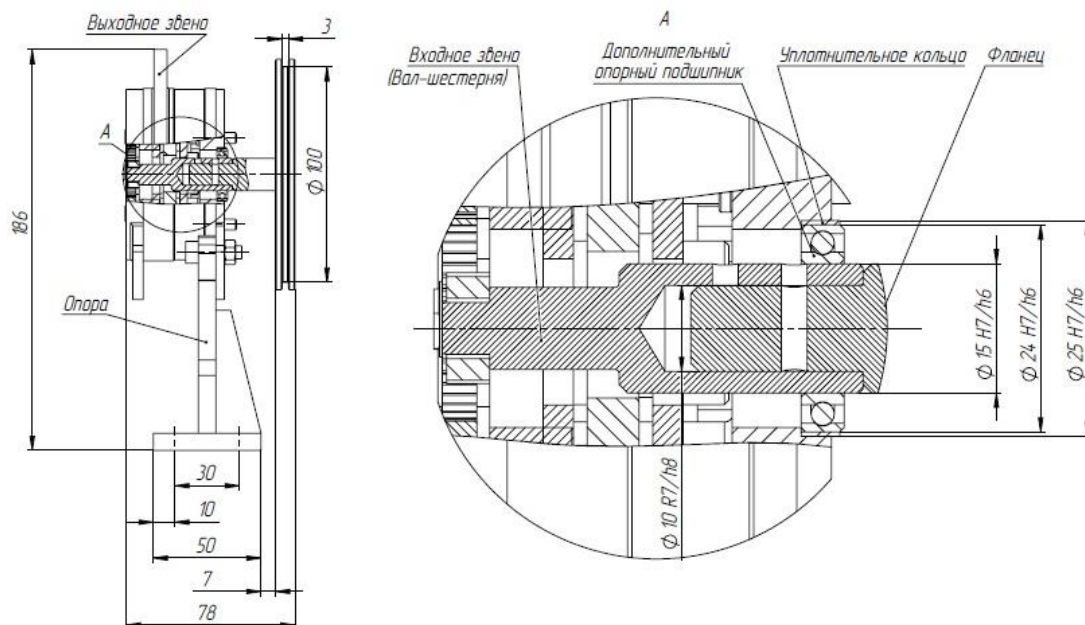


Рис. 6. Общий вид испытательного стенда для тестирования момента трогания материального макета редуктора электромеханического ортеза нижней конечности (главный вид)

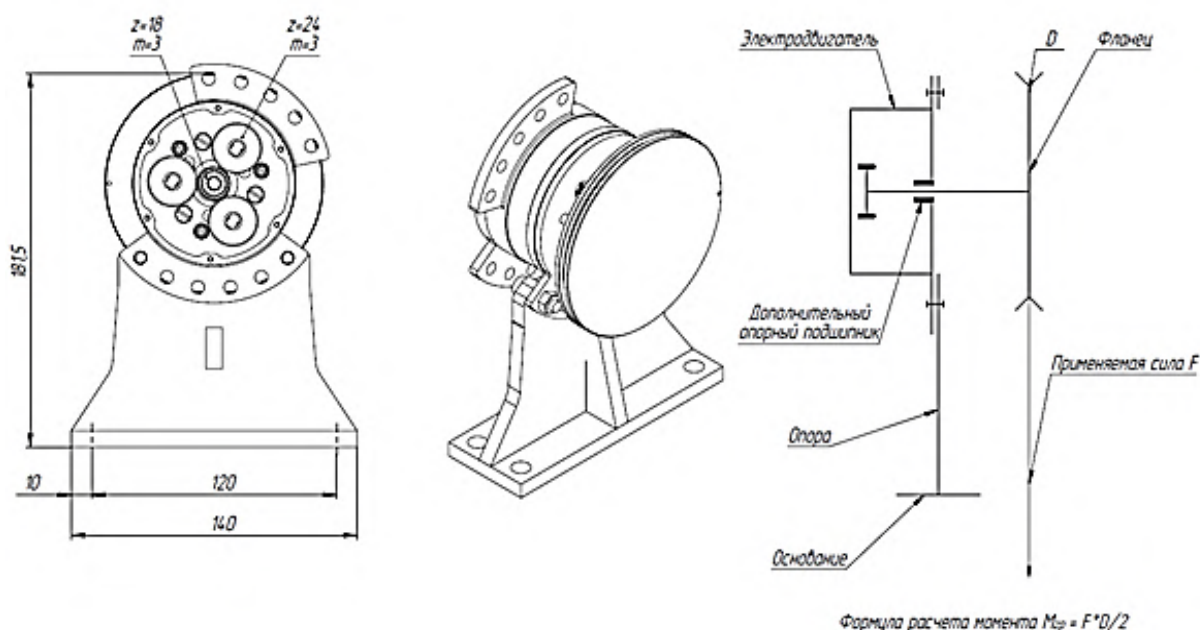


Рис. 7. Общий вид испытательного стенда для тестирования момента трогания материального макета редуктора электромеханического ортеза нижней конечности (вид сбоку и кинематическая схема)

Для определения момента трогания редуктора электропривод разбирается. Редуктор крепится на опору электропривода, в посадочное место прессуется уплотнительное кольцо. На входное звено редуктора (вал шестерня) устанавливается подшипник 1000802 (15x24x5) ГОСТ 8338-75, затем на него устанавливается фланец диаметром 100 мм, рав-

ным значению плеча R . Затем входное звено с подшипником и фланцем устанавливаются с помощью уплотнительного кольца. На фланец наматывается металлическая проволока диаметром 0,3 мм ГОСТ 3282-74. Один конец проволоки крепится к фланцу с помощью отверстий на торце, другой крепится к измерительной чаше от подвесных чашечных весов.

При исследовании определялся момент трогания в начальных фазах каждого из двух оборотов входного звена редуктора, при этом его выходное звено совершало один полный оборот при количестве оборотов входного звена, равном передаточному отношению. Таким образом, в нашем случае один оборот выходного звена редуктора с передаточным отношением 100 соответствует пятидесяти измерениям момента трогания для каждого из двух фланцев.

На рисунке 8 представлена описанная установка для проведения измерений момента трогания редуктора с передаточным отношением, равным 100. С помощью разработанного аппаратно-программного комплекса определены значения моментов трогания электропривода для различных углов поворота входного звена редуктора согласно блок-схеме, представленной на рисунке 3. Из паспорта электродвигателя было взято значение отношения момента к тока, равное 109. На основании полученных данных рассчитаны значения моментов трогания редуктора для каждого положения его выходного звена, соответствующего двум оборотам его входного звена.

Значения моментов трогания, полученные с помощью разработанного и существующего методов, представлены в таблице.



Рис. 8. Установка для проведения измерений момента трогания редуктора с передаточным отношением, равным 100

Результаты эксперимента

Угол положения выходного звена редуктора, град.	Момент трогания, полученный с помощью существующего метода, Н·м	Момент трогания, полученный с помощью разработанного метода, Н·м
0	0,01225	0,01207
7,2	0,04361	0,04306
14,4	0,01225	0,01229
21,6	0,04312	0,04259
28,8	0,01176	0,01168
36	0,04361	0,04396
43,2	0,01078	0,01091
50,4	0,04410	0,04432
57,6	0,01225	0,01202
64,8	0,04410	0,04489
72	0,01176	0,01197
79,2	0,04263	0,04242
86,4	0,01127	0,01112
93,6	0,04263	0,04314
100,8	0,01078	0,01096
108	0,04263	0,04323
115,2	0,01078	0,01073
122,4	0,04263	0,04314
129,6	0,01127	0,01109
136,8	0,04165	0,04198
144	0,01078	0,01075
151,2	0,04263	0,04199

Окончание таблицы

Угол положения выходного звена редуктора, град.	Момент трогания, полученный с помощью существующего метода, Н·м	Момент трогания, полученный с помощью разработанного метода, Н·м
158,4	0,01078	0,01095
165,6	0,04361	0,04313
172,8	0,01225	0,01242
180	0,04361	0,04413
187,2	0,01176	0,01178
194,4	0,04312	0,04269
201,6	0,01078	0,01087
208,8	0,04410	0,04344
216	0,01225	0,01240
223,2	0,04214	0,04138
230,4	0,01127	0,01147
237,6	0,04263	0,04278
244,8	0,01078	0,01064
252	0,04165	0,04115
259,2	0,01127	0,01114
266,4	0,04263	0,04203
273,6	0,01127	0,01116
280,8	0,0441	0,04339
288	0,01176	0,01182
295,2	0,04165	0,04090
302,4	0,01225	0,01240
309,6	0,04410	0,04388
316,8	0,01176	0,01172
324	0,04263	0,04340
331,2	0,01176	0,01190
338,4	0,04312	0,04334
345,6	0,01225	0,01250
352,8	0,04361	0,04413

Согласно данным, представленным в таблице, расхождение результатов, полученных с помощью существующего и разработанного методов, лежит в пределах $\pm 1,8$ %. Это свидетельствует о достаточной сходимости данных для применения разработанного метода для оценки технического состояния электропривода электромеханического ортеза нижней конечности, а также для исследования влияния момента трогания на остаточный ресурс электропривода и его коэффициент полезного действия.

Выводы. Результаты представленного в настоящей работе исследования свидетельствуют о применимости разработанного метода для определения момента трогания электропривода для электромеханического ортеза нижней конечности. Проверка достоверности данных, получаемых с помощью разработанного метода, показала, что расхождение между значениями момента трогания, получаемыми традиционным способом и с помощью

разработанного метода, находится в пределах 1,8 %, что является доказательством работоспособности представленных разработок.

Предлагаемый в настоящем исследовании аппаратно-программный комплекс позволяет проводить контроль технического состояния электропривода в автоматическом режиме с низким уровнем влияния человеческого фактора и с меньшими временными и трудовыми затратами, по сравнению с существующими методами контроля. Применение энкодера с высокой точностью измерения угла положения входного вала редуктора, встроенного в систему электропривода, потенциально может позволить проводить экспресс-испытания исследуемого объекта без применения дополнительного оборудования.

Данный метод может найти широкое применение на заводах-изготовителях и предприятиях, эксплуатирующих экзоскелеты, поскольку он сокращает временные и финансовые затраты на испытания и контроль каче-

ства их сборки и технического состояния за счет универсальности метода и массогабаритных показателей разработанного АПК, а также отсутствия необходимости в калибровке измерительных органов.

На уровне отдела технического контроля предприятия-изготовителя, определив допуск на изменение момента трогания электропривода и редуктора определенной модели, а также оснастив исследуемый объект аппаратно-программным комплексом, имеется возможность оперативно реагировать на ухудшение их энергетических показателей, что позволяет улучшать качество их сборки, обеспечивать высокий КПД производимого

оборудования, а также проводить своевременное их техническое обслуживание и ремонт.

В дальнейшем предполагаются исследования, направленные на совершенствование разработанного метода и аппаратно-программного комплекса для возможности оценки технического состояния электропривода и редуктора без их демонтажа с электро-механического ортеза нижней конечности, что позволит проводить самодиагностику технического состояния, остаточного ресурса и эффективности электропривода средствами управляющих органов экзоскелета во время его входного контроля и эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A wearable exoskeleton suit for motion assistance to paralysed patients / B. Chen, C.-H. Zhong, X. Zhao, H. Ma, X. Guan et al. // *Journal of Orthopaedic Translation*. 2017. Vol. 11. P. 7-18. DOI: 10.1016/j.jot.2017.02.007.
2. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons / B. Chen, H. Ma, L.-Y. Qin, F. Gao, K.-M. Chan et al. // *Journal of Orthopaedic Translation*. 2016. Vol. 5. P. 26-37. DOI: 10.1016/j.jot.2015.09.007.
3. Singla A., Rupal B.S., Virk G.S. Optimization of stepped-cone CVT for lower-limb exoskeletons // *Perspectives in Science*. 2016. Vol. 8. P. 592-595. DOI: 10.1016/j.pisc.2016.06.030.
4. Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks / K. Huysamen, M. Looze, T. Bosch, J. Ortiz, S. Toxiri, L.W.O. O'Sullivan // *Applied Ergonomics*. 2018. Vol. 68. P. 125-131. DOI: 10.1016/j.apergo.2017.11.004.
5. Kawale S.S., Sreekumar M. Design of a Wearable Lower Body Exoskeleton Mechanism for Shipbuilding Industry // *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 133. P. 1021-1028. DOI: 10.1016/j.procs.2018.07.073.
6. Pons J.L. *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
7. Moreno J.C., Figueiredo J., Pons J.L. Exoskeletons for lower-limb rehabilitation / Colombo R., Sanguineti V. (Eds.) // *Rehabilitation Robotics*. Academic Press, Elsevier Inc., 2018. P. 89-99. DOI: 10.1016/B978-0-12-811995-2.00008-4.
8. Gasperini G., Cannaviello G., Eng E.G. Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review // *PM&R: Innovations Influencing Physical Medicine and Rehabilitation*. 2018. Vol. 10, issue 9. P. S174-S188. DOI: 10.1016/j.pmrj.2018.06.005.
9. Powered orthosis for lower limb movements assistance and rehabilitation / W. Hassani, S. Mohammed, H. Rifai, Y. Amirat // *Control Engineering Practice*. 2014. Vol. 26. P. 245-253. DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.02.002.
10. Control strategies for effective robot assisted gait rehabilitation: the state of art and future prospects / J. Cao, S.Q. Xie, H. Rifai, R. Das, G.L. Zhu // *Med Eng Phys*. 2014. Vol. 36. P. 1555-1566.
11. The Control of a Lower Limb Exoskeleton for Gait Rehabilitation: A Hybrid Active Force Control Approach / A.P.P.A. Majeed, Z. Taha, A.F.Z. Abidin, M.A. Zakaria, I.M. Khairuddina, M.A.M. Razman, Z. Mohamed // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 105. P. 183-190. DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.204.
12. Sit-to-stand and stand-to-sit transfer support for complete paraplegic patients with robot suit HAL / A. Tsukahara, R. Kawanishi, Y. Hasegawa, Y. Sankai // *Adv Robot*. 2010. Vol. 24. P. 1615-1638.
13. Anam K., Al-Jumaily A.A. Active Exoskeleton Control Systems: State of the Art // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 41. P. 988-994. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.273.
14. Biomechanical design of an agile, electricity-powered lower-limb exoskeleton for weight-bearing assistance / D.J. Hyun, H. Park, T. Ha, S. Park, K. Jung // *Robotics and Autonomous Systems*. 2017. Vol. 95. P. 181-195. DOI: 10.1016/j.robot.2017.06.010.

15. Aliman N., Ramli R., Haris S.M. Design and development of lower limb exoskeletons: A survey // *Robotics and Autonomous Systems*. 2017. Vol. 95. P. 102-116. DOI: 10.1016/j.robot.2017.05.013.
16. O'Sullivan L., Nugent R., der Vorm J. Standards for the Safety of Exoskeletons Used by Industrial Workers Performing Manual Handling Activities: A Contribution from the Robo-Mate Project to their Future Development // *Procedia Manufacturing*. 2015. Vol. 3. P. 1418-1425. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.306.
17. Manna S.K., Dubey V.N. Comparative study of actuation systems for portable upper limb exoskeletons // *Medical Engineering & Physics*. 2018. Vol. 60. P. 1-13. DOI: 10.1016/j.medengphy.2018.07.017
18. Veale A.J., Xie S.Q. Towards compliant and wearable robotic orthoses: A review of current and emerging actuator technologies. *Medical Engineering & Physics*. 2016. Vol. 38, issue 4. P. 317-325. DOI: 10.1016/j.medengphy.2016.01.010.
19. Development and Analysis of an Electrically Actuated Lower Extremity Assistive Exoskeleton / Y. Long, Z. Du, C. Chen, W. Wang, L. He et al. // *Journal of Bionic Engineering*. 2017. Vol. 14, issue 2. P. 272-283. DOI: 10.1016/S1672-6529(16)60397-9.
20. Egorov A., Kozlov K., Belogusev V. The method and instruments for induction motor mechanical parameters identification // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10, No. 17. P. 37685-37691.
21. Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. Москва: Академия, 2003.
22. Measurement and evaluation of DC motor starting torque / R. Cipin, M. Mach, M. Toman, J. Knobloch // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977475.
23. A Design of Rotor Bar for Improving Starting Torque by Analyzing Rotor Resistance and Reactance in Squirrel Cage Induction Motor / H.J. Lee, S.H. Im, D.Y. Um, G.S. Park // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018. Vol. 54, issue 3. P. 1-4. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2764525.
24. Санников К. Calculation of forces and moments in calculating mechanisms. Москва: ГИОР, 1948.
25. Янгулов В.С. Ускоренные испытания прецизионного редуктора на его ресурс // *Известия Томского политехнического университета*. 2008. Т. 313, № 2. С. 28-31.
26. Кондратов Р.Ю. Некоторые уточнения по расчету статического момента редуктора при отрицательных температурах окружающей среды // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2017. Т. 15, № 2. С. 31-38.

Информация об авторах

ЕГОРОВ Алексей Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – методы контроля и диагностика в машиностроении. E-mail: aleg1976@me.com

БЕЛОГУСЕВ Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических машин, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – методы контроля и диагностика в машиностроении. E-mail: sernyg86@mail.ru

КАПУСТИН Александр Валерьевич – доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, кандидат технических наук, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – теория механизмов и машин, прикладная механика, биомеханика, САПР. E-mail: kapustinav@volgatech.net

КУДРЯВЦЕВ Игорь Аркадьевич – руководитель Лаборатории новой техники, старший научный сотрудник, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – прикладная механика, детали машин, приводная техника, биомеханика, экзоскелеты. E-mail: KudryavtsevIA@volgatech.net.

ЛИВАНОВА Татьяна Сергеевна – студентка Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий; мехатроника. E-mail:

UDC 681.2.083
DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.44

**METHOD AND TOOLS FOR ASSESSING
THE ASSEMBLY QUALITY AND TECHNICAL CONDITION
OF AN ELECTRIC GEAR ACTUATOR IN AN ELECTROMECHANICAL
ORTHOSIS OF EXOSKELETON LOWER LIMB**

**A. V. Egorov¹, V. N. Belogusev¹, A. V. Kapustin¹,
I. A. Kudriavtsev¹, T. S. Livanova²**

¹Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola)

²Mari State University (Yoshkar-Ola)

The paper proposes the method and tools for assessing the assembly quality and the technical condition of an electric gear actuator for an exoskeleton based on determining its starting torque as one of the main indicators of the level of degradation of its components. The existing methods are mainly based on identifying the starting torque with the help of additional devices that require involvement of an operator in the measurement process, which increases time and labor costs and makes it difficult to automate. As opposed to the existing methods and instruments, the method and hardware-software complex developed in this study allows automating the measurement process, does not require expensive equipment, and has potential for controlling its technical condition without dismounting the actuator from an exoskeleton.

The hardware-software complex proposed in the present study allows to monitor the technical condition of the electric drive in an automatic mode with a low level of human factor influence and with less time and labor costs, as compared with the existing control methods. The use of an encoder with a high accuracy of measuring the angle of the input shaft position of the gearbox built into the system of the electric drive can potentially enable the express test of the object under study without the use of additional equipment.

This method can be widely used by manufacturers and enterprises operating with exoskeletons, since it reduces time and financial costs of testing and quality control of their assembly and technical condition due to universal character of the method, weight and size parameters of the developed hardware and software complex and the calibration of measuring bodies.

In the experimental part of this paper, the proposed method and tools have been evaluated on the basis of electric actuators with reduction gears for an electromechanical orthosis of an exoskeleton lower limb. According to the experimental results, the discrepancy between the values of starting torque obtained separately by an existing method and by the proposed one is within 1.8%, which confirms the efficacy and applicability of the developed method for monitoring the technical condition of electric actuators for exoskeletons both at the stage of their production and during their operation.

Keywords: starting torque; reduction gear-motor; exoskeleton efficiency control; electric drive efficiency; exoskeleton actuator.

REFERENCES

1. Chen B., Zhong C.-H., Zhao X., Ma H., Guan X. et al. A wearable exoskeleton suit for motion assistance to paralysed patients, *Journal of Orthopaedic Translation*, 2017, Vol. 11, pp. 7-18, DOI: 10.1016/j.jot.2017.02.007.
2. Chen B., Ma H., Qin L.-Y., Gao F., Chan K.-M. et al. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons, *Journal of Orthopaedic Translation*, 2016, Vol. 5, pp. 26-37, DOI: 10.1016/j.jot.2015.09.007.
3. Singla A., Rupal B.S., Virk G.S. Optimization of stepped-cone CVT for lower-limb exoskeletons, *Perspectives in Science*, 2016, Vol. 8, pp. 592-595, DOI: 10.1016/j.pisc.2016.06.030.

4. Huysamen K., Looze M., Bosch T., Ortiz J., Toxiri S., O'Sullivan L.W.O. Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks, *Applied Ergonomics*, 2018, Vol. 68, pp. 125-131, DOI: 10.1016/j.apergo.2017.11.004.
5. Kawale S.S., Sreekumar M. Design of a Wearable Lower Body Exoskeleton Mechanism for Shipbuilding Industry, *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 133, pp. 1021-1028, DOI: 10.1016/j.procs.2018.07.073.
6. Pons J.L. Wearable robots: biomechatronic exoskeletons, 2008, Vol. 70. Wiley Online Library.
7. Moreno J.C., Figueiredo J., Pons J.L. Exoskeletons for lower-limb rehabilitation, Colombo R., Sanguineti V. (Eds.), *Rehabilitation Robotics. Academic Press*, Elsevier Inc., 2018, pp. 89-99. DOI: 10.1016/B978-0-12-811995-2.00008-4.
8. Gasperini G., Cannaviello G., Eng E.G. Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review, *PM&R: Innovations Influencing Physical Medicine and Rehabilitation*, 2018, Vol. 10, issue 9, pp. S174-S188, DOI: 10.1016/j.pmrj.2018.06.005.
9. Hassani W., Mohammed S., Rifai H., Amirat Y. Powered orthosis for lower limb movements assistance and rehabilitation, *Control Engineering Practice*, 2014, Vol. 26, pp. 245-253, DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.02.002.
10. Cao J., Xie S.Q., Rifai H., Das R., Zhu G.L. Control strategies for effective robot assisted gait rehabilitation: the state of art and future prospects, *Med Eng Phys*, 2014, Vol. 36, pp. 1555-1566.
11. Majeed A.P.P.A., Taha Z., Abidin A.F.Z., Zakaria M.A., Khairuddin I.M., Razman M.A.M., Mohamed Z. The Control of a Lower Limb Exoskeleton for Gait Rehabilitation: A Hybrid Active Force Control Approach, *Procedia Computer Science*, 2017, Vol. 105, pp. 183-190, DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.204.
12. Tsukahara A., Kawanishi R., Hasegawa Y., Sankai Y. Sit-to-stand and stand-to-sit transfer support for complete paraplegic patients with robot suit HAL, *Adv Robot*, 2010, Vol. 24, pp. 1615-1638.
13. Anam K., Al-Jumaily A.A. Active Exoskeleton Control Systems: State of the Art, *Procedia Engineering*, 2012, Vol. 41, pp. 988-994, DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.273.
14. Hyun D.J., Park H., Ha T., Park S., Jung K. Biomechanical design of an agile, electricity-powered lower-limb exoskeleton for weight-bearing assistance, *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, Vol. 95, pp. 181-195, DOI: 10.1016/j.robot.2017.06.010.
15. Aliman N., Ramli R., Haris S.M. Design and development of lower limb exoskeletons: A survey, *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, Vol. 95, pp. 102-116, DOI: 10.1016/j.robot.2017.05.013.
16. O'Sullivan L., Nugent R., der Vorm J. Standards for the Safety of Exoskeletons Used by Industrial Workers Performing Manual Handling Activities: A Contribution from the Robo-Mate Project to their Future Development, *Procedia Manufacturing*, 2015, Vol. 3, pp. 1418-1425, DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.306.
17. Manna S.K., Dubey V.N. Comparative study of actuation systems for portable upper limb exoskeletons, *Medical Engineering & Physics*, 2018, Vol. 60, pp. 1-13, DOI: 10.1016/j.medengphy.2018.07.017
18. Veale A.J., Xie S.Q. Towards compliant and wearable robotic orthoses: A review of current and emerging actuator technologies, *Medical Engineering & Physics*, 2016, Vol. 38, issue 4, pp. 317-325, DOI: 10.1016/j.medengphy.2016.01.010.
19. Long Y., Du Z., Chen C., Wang W., He L. et al. Development and Analysis of an Electrically Actuated Lower Extremity Assistive Exoskeleton, *Journal of Bionic Engineering*, 2017, Vol. 14, issue 2, pp. 272-283, DOI: 10.1016/S1672-6529(16)60397-9.
20. Egorov A., Kozlov K., Belogusev V. The method and instruments for induction motor mechanical parameters identification, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, Vol. 10, No. 17, pp. 37685-37691.
21. Kotelnets N., Akimova N., Antonov M. Ispytaniya, jekspluatatsiya i remont jelektricheskikh mashin [Tests, operation and maintenance of electric motors], Moscow: Akademiya, 2003. [In Russian]
22. Cipin R., Mach M., Toman M., Knobloch J. (2017). Measurement and evaluation of DC motor starting torque, *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977475. [In Russian]
23. Lee H.J., Im S.H., Um D.Y., Park G.S. A Design of Rotor Bar for Improving Starting Torque by Analyzing Rotor Resistance and Reactance in Squirrel Cage Induction Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, Vol. 54, issue 3, 1-4. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2764525.
24. Sannikov K. Raschet usilij i momentov v schetno-reshayushchih mekhanizmah [Calculation of forces and moments in calculating mechanisms], Moscow: GIOP, 1948.
25. Yangulov V. Uskorennyye ispytaniya precizionnogo reduktora na ego resurs [Accelerated tests of precision reducers for determining their service life], *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2008, Vol. 313, No. 2, pp. 28-31.

26. Kondratov R. Nekotorye utochneniya po raschetu staticheskogo momenta reduktora pri otricatel'nyh temperaturah okruzhajushhej sredy [Some updates on calculation of the static torque of a reducer at negative environment temperatures], *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], 2017, Vol. 15, No. 2, pp. 31-38.

Information about the authors

EGOROV Aleksey Vasilevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Machines, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – methods of control and diagnostics in mechanical engineering. E-mail: aleg1976@me.com

BELOGUSEV Vladimir Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – applied mechanics, machine details, and biomechanics. E-mail: belogusevvn@volgatech.net

KAPUSTIN Aleksandr Valerievich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Resistance of Materials and Applied Mechanics, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – mechanisms and machines theory, applied mechanics, biomechanics, CAD systems. E-mail: kapustinav@volgatech.net

KUDRIAVTSEV Igor Arkadevich – Head of the Laboratory for New Technology, Senior Researcher, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – applied mechanics, machine parts, drive technology, biomechanics, and exoskeleton. E-mail: kudryavtsevIA@volgatech.net

LIVANOVA Tatiana Sergeevna – student, Mari State University, Yoshkar-Ola. Research interests – devices and methods of control of the natural environment, substances, materials and products; mechatronics.

Библиографическая ссылка

Метод и средство оценки качества сборки, технического состояния и остаточного ресурса электропривода для электромеханического ортеза нижней конечности экзоскелета / А. В. Егоров, В. Н. Белогусев, А. В. Капустин, И. А. Кудрявцев, Т. С. Ливанова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 4(12). – С. 44-58. – DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.44