

### Раздел III. Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура

УДК 007.52:62.523.2:62.526

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-198-215

А.В. Васильев, И.В. Шардыко, В.М. Копылов

#### МОДУЛЬНЫЙ ШАРНИР С ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ\*

Рассматриваются вопросы построения шарниров манипуляторов, обладающих привнесённой упругостью и снабжённых при этом механизмом изменения величины этой упругости (регулируемой жёсткости). На сегодняшний день работоспособные шарниры с переменной упругостью (ШПУ) в России отсутствуют. В то же время в мире ведутся интенсивные исследования по различным типам таких шарниров и манипуляторов на их основе. Хотя до настоящего времени все созданные изделия по большей части носили экспериментальный и исследовательский характер, в ближайшее время можно ожидать появления и внедрения за рубежом опытных образцов ШПУ для решения конкретных практических задач, позволяющих строить манипуляторы с новыми качествами и повышенными техническими характеристиками. Такие манипуляторы будут востребованы при решении задач, связанных с контактными операциями, требующими повышенной точности, корректности и безопасности выполнения, например, в ситуациях нахождения робота и человека в едином операционном пространстве. Целью предлагаемого исследования является создание научно-технического задела в области построения шарниров с регулируемой жёсткостью в виде разработки методических рекомендаций по проектированию ШПУ под требуемые конкретные задачи и по применению их в составе манипуляционных систем. Для этого на начальном этапе исследования решаются задачи анализа и систематизации существующих технических решений механизмов регулирования жёсткости и построения собственного ШПУ для проведения впоследствии физических экспериментов. На сегодняшний момент существует огромное количество различных вариантов реализации ШПУ, имеющих свои преимущества для конкретных областей применения. Оптимальных устройств для всех типов задач одновременно не существует. Исходя из этого предлагается вести исследование ШПУ по трём наиболее перспективным на взгляд авторов направлениям, предполагающим принципиально различные варианты реализации переменной упругости. Объединение совершенно разных вариантов в рамках единой конструкции предложено реализовывать на основе модульного подхода к построению исследовательского ШПУ, что позволяет достаточно легко и без применения специальных инструментов реконфигурировать шарнир с одного варианта на другой, используя в то же время ряд общих (типовых) модулей, что существенно экономит ресурсы на создание и исследование такого шарнира. В статье приводится краткое описание принципа построения и конструктивных особенностей предлагаемого модульного исследовательского ШПУ и модулей регулирования жёсткости. Полученные результаты позволяют перейти к этапу изготовления макета и постановки физических экспериментов по исследованию ШПУ различных типов.

Роботы; манипуляторы; упругие манипуляторы; шарниры с переменной упругостью; модульность; конструкции упругих шарниров.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания на 2023 г. № 075-01595-23-00 на тему «Исследование конструкций и разработка методов управления мехатронными узлами с переменной жёсткостью» (FNRG-2022-0009, регистрационный номер 1021060307688-8-2.2.2).

A.V. Vasiliev, I.V. Shardyko, V.M. Kopylov

**VARIABLE RIGIDITY MODULAR JOINT  
FOR MANIPULATORS OF ROBOTIC SYSTEM**

*The article considers the actuated joint designs with added elasticity and equipped with a mechanism for changing the value of this elasticity (adjustable stiffness) for robotic manipulators. To date, there are no workable joint actuators with variable stiffness (VSA) in Russia. At the same time, intensive research is being carried out around the world on various types of such joint actuators and manipulators based on them. Although until now all the products created have mostly been of an experimental and research nature, in the near future we can expect the appearance and implementation of prototypes of VSA to solve specific practical problems that make it possible to build manipulators with new qualities and improved technical characteristics. Such manipulators will be in demand when solving tasks related to contact operations that require increased accuracy, correctness and safety of execution, for example, in situations where a robot and a person are in a single operating space. The aim of the proposed study is to form a scientific and technical groundwork in the field of manipulator actuators design with adjustable stiffness in the form of developing methodological recommendations for designing VSAs for the required specific tasks and for using them as part of manipulation systems. To do this, at the initial stage of the study, the tasks of analyzing and systematizing the existing technical solutions for stiffness control mechanisms and constructing our own VSA for subsequent physical experiments are solved. To date, there are a huge number of different options for the implementation of VSAs, which have their own advantages for specific areas of application. There are no optimal devices for all types of tasks. Proceeding from this, it is proposed to conduct a study of VSAs in the three most perspective trends, in the opinion of the authors, using fundamentally different options for implementing the variable stiffness. The combination of completely different options within a single design is proposed to be implemented on the basis of a modular approach to constructing a research VSA, which makes it quite easy and without the use of any special tools to reconfigure the actuator joint from one option to another, using at the same time a number of common (typical) modules, which significantly saves resources for the development and study of such an actuator. The article provides a brief description of the design features of the proposed modular research VSA and stiffness control modules. The results obtained allow us to proceed to the stage of making a mockup VSA model and setting up physical experiments to study various types of VSAs.*

*Robots; manipulators; elastic joint manipulators; variable stiffness actuators; variable stiffness joints; modularity; compliant robotics.*

**Введение.** На рубеже 1990-х и 2000-х годов в области робототехники сформировалось два основных подхода к построению механических систем: жёсткие манипуляторы и податливые (упругие) манипуляторы. Жёсткие манипуляторы включают лишь жёсткие приводные шарниры (в зарубежной литературе используется термин актуаторы), в то время как податливые содержат один или более податливый (упругий) шарнир. Жёсткий шарнир – это устройство, способное перемещаться в заданное положение либо следовать по заданной траектории, таким образом, что по достижении целевого положения такой шарнир остаётся в нём, какие бы внешние силы на него не воздействовали. Упругий шарнир, напротив, допускает отклонение от заданного положения равновесия, зависящее от приложенного внешнего усилия. Положением равновесия упругого шарнира является положение, которое он занимает при отсутствии внешнего воздействия.

Жёсткие манипуляторы получили широкое распространение в промышленной робототехнике [1, 2], в то время как упругие манипуляторы – в большом числе менее массовых областей, таких как создание антропоморфных и гуманоидных роботов [3], экзоскелеты различных типов [4, 5], манипуляторы для экстремальных условий [6], коллаборативные манипуляторы [7] и т.д. Одной из востребованных областей потенциального применения упругих шарниров являются манипуляторы роботов-ассистентов для людей с ограниченными возможностями [8]. Критически важным

требованием к таким манипуляторам является обеспечение безусловной безопасности при его взаимодействии с человеком как при нормальной работе, так и при сбоях, при одновременных точности и скорости выполнения операций, и упругие манипуляторы гораздо в более полной степени отвечают этим критериям [9].

Свойства податливости «традиционному» манипулятору можно придать и посредством системы управления (т.е. программно), что получило название «активной податливости» [10, 11]. Это не относится напрямую к подходам конструирования и может применяться в любых типах робототехнических систем из перечисленных выше, при наличии необходимых датчиков. Однако, несмотря на гибкость в применении, данный подход сам по себе обладает существенным недостатком: невозможностью обеспечить безопасность (а в общем случае – желаемое взаимодействие) в случае высокочастотных (импульсных) столкновений или существенно быстрых изменений внешней нагрузки, так как система управления обладает ограниченной и сравнительно низкой полосой пропускания относительно таких воздействий.

Применение «пассивной податливости», то есть, реализация её механическим способом, позволяет обеспечить требуемые свойства естественным образом. Полоса пропускания системы по отношению к быстро меняющимся внешним воздействиям определяется, в этом случае, преимущественно её механическими характеристиками. Это явление выражено тем сильнее, чем ниже механическая жёсткость системы. Отправной точкой в этом подходе считается публикация MIT (Massachusetts Institute of Technology) [12], где исследовались вопросы оценки полосы пропускания, устойчивости и законов управления для шарнира, в цепи передачи движения которого был установлен упругий элемент. С точки зрения обмена энергией и импульсом с внешним объектом при ударе, упругий элемент обеспечивает «расцепление» инерций двигателя с редуктором и инерции выходного звена, закреплённого после упругого элемента, то есть, в этот момент в обмене энергией и импульсом участвует только выходное звено, чья инерция и воспринимается внешним объектом, а воздействие на двигатель и редуктор практически не передаётся.

Кроме того, упругий элемент переводит микродеформации, возникающие при приложении нагрузки к жёстким манипуляторам и измеримые только при помощи специальных средств (тензорезисторов), в макродеформации, которые можно измерить датчиками положения. Для этого требуется минимум два датчика положения на шарнир, расположенных до и после упругого элемента (при чём датчиком до упругого элемента чаще всего выступает собственный датчик положения ротора двигателя). Следовательно, упругие шарниры позволяют достаточно точно и с высокой надёжностью измерять момент нагрузки, что в свою очередь позволяет реализовывать управление по моменту, в частности, изменять характер активной (программной) податливости. Однако, в момент столкновения процессы по-прежнему определяются механическими свойствами шарнира, которые являются постоянными.

Другой положительной стороной упругости является возможность запасать энергию, что полезно при циклических движениях, таких, как ходьба или бег, позволяя расходовать энергию более экономно. Однако, высокую эффективность такой подход будет показывать лишь вблизи резонанса, который опять-таки определяется механическими характеристиками и будет находиться на конкретной частоте (периодичности движений).

Итак, механическая упругость в шарнирах даёт следующие преимущества:

- ♦ смягчение удара при столкновении благодаря повышенной полосе пропускания до собственных механических характеристик,
- ♦ снижение инерции, участвующей в столкновении, и ударных нагрузок, передаваемых на элементы приводной части шарнира,
- ♦ повышение энергоэффективности при циклических движениях.

В то же время, с математической точки зрения, разный характер взаимодействий при контакте с различными объектами требует различных значений собственной жёсткости шарнира. Поэтому для того, чтобы в полной мере реализовать и максимизировать преимущества упругих шарниров, постоянной жёсткости оказывается уже недостаточно. Причём изменять жёсткость лучше не программными методами, а иметь возможность управления именно механической жёсткостью системы. Так возникла и была реализована идея шарниров с переменной упругостью (ШПУ), известных в англоязычной литературе как *variable stiffness actuators (VSA)* [13].

Так как идея применения ШПУ во многом основывается на природных чертах и способностях человека, важно рассмотреть, как с контактными воздействиями справляется человек. В целом, соударения можно разделить на две группы: детерминированные (*known*) и недетерминированные (*unknown*) [14]. В случае детерминированных соударений, таких как в случае ловли мяча, человек предугадывает величину энергии столкновения и, исходя из этого значения, адаптирует жёсткость суставов, чтобы рассеять эту энергию и избежать как достижения крайних положений в суставах, так и повреждения мышц. При недетерминированных соударениях, таких как падения при катании на лыжах, человек использует стратегию максимальных совместных сокращений (*maximum cocontraction*), рассеивая как можно больше энергии посредством мышц и предотвращая достижение крайних положений суставов. Это связано с тем, что последствия повреждения мышц опасны, но достижение крайних положений суставов гораздо более опасно, так как восстановление после таких травм гораздо сложнее.

ШПУ, по аналогии с этим, активно рассеивает энергию столкновения, увеличивая длительность процесса в сравнении с жёсткими шарнирами, так как масса звена и упругость шарнира образуют механический низкочастотный фильтр [15]. ШПУ как техническая система может изменять свой импеданс непосредственно на физическом уровне, вследствие чего, накладывая поверх данной возможности активное управление, т.е. регулятор шарнира, можно достичь более широкого диапазона эффективного импеданса, чем упругим шарниром с постоянной жёсткостью. Принцип изменения механического импеданса приводных систем заимствуется напрямую из природных опорно-двигательных систем, которые зачастую обладают таковой особенностью. ШПУ могут независимо изменять точку равновесия движущегося звена и жёсткость упругого взаимодействия.

Применение ШПУ позволяет преодолеть ряд недостатков шарниров с постоянной упругостью. Управление жёсткостью в ШПУ даёт возможность управлять резонансной частотой, приближая её к частоте желаемого циклического движения, минимизируя тем самым затраты энергии и фактически воплощая желаемое поведение в механических свойствах системы. Регулирование жёсткости при постоянном усилии в контурных задачах позволяет обеспечить повышенное качество отработки заданного усилия контакта. Движениям взрывного характера свойственны высокие скорости звеньев, набираемые за короткие интервалы времени, что требует больших ускорений. Чтобы разогнать выходной вал шарнира до значительной скорости, можно применить способ, заключающийся в блокировке выхода и работе привода на создание преднатяга в пружине, после чего резкая разблокировка приведёт к резкому разжатию пружины.

Технически переменная упругость реализуется посредством установки ещё одного привода той или иной природы с целью реализации того или иного механизма (принципа) регулировки жёсткости – отдельным модулем или совместно в составе единой приводной системы. Сегодня создано множество лабораторных образцов шарниров и манипуляторов с переменной упругостью, но, несмотря на это, практически нет информации как о применении подобных систем в хозяйственной жизни, так и о коммерчески доступных образцах.

Первые разработки ШПУ можно встретить ещё в публикациях 1990-х [16, 17], но достаточно активно они начали разрабатываться в 2000-е гг. [18, 19]. В 2013-2015 гг. вышла серия обзорно-аналитических статей, обобщившая накопленный опыт [20–22]. За последующие годы количество созданных ШПУ выросло ещё более значительно, при этом фокус по их разработке сместился из США и Европы в Юго-Восточную Азию, в первую очередь, Китай. Также на протяжении последних десяти лет велись работы по анализу данного класса шарниров, в том числе, определение ключевых параметров для сравнения, разработка методик проектирования и оптимизации, абстрактное описание ШПУ для различных задач.

**Классификация шарниров с переменной упругостью.** Обзор научно-технической информации по разработкам и исследованиям в области создания и развития ШПУ позволяет сделать ряд обобщений, помогающих систематизировать существующее многообразие их конструктивных реализаций и выделить наиболее интересные направления для проведения собственных исследований.

Прежде всего, можно отметить, что ШПУ могут быть разделены по физическому принципу механизма регулирования жёсткости на несколько классов, из которых в данной работе для нас интерес представляют механические и магнитные системы, отмеченные на рис. 1. По способу регулирования жёсткости можно выделить три группы: 1) использующие преднатяг пружины, создаваемый тем или иным способом, 2) использующие изменение передаточного отношения между пружиной и точкой приложения нагрузки, 3) использующие изменение физических параметров пружины в соответствии с известной формулой Гука

$$F = \frac{E \cdot A}{L_0} \Delta L, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $A$  – площадь сечения упругого элемента,  $L$  – длина упругого элемента.

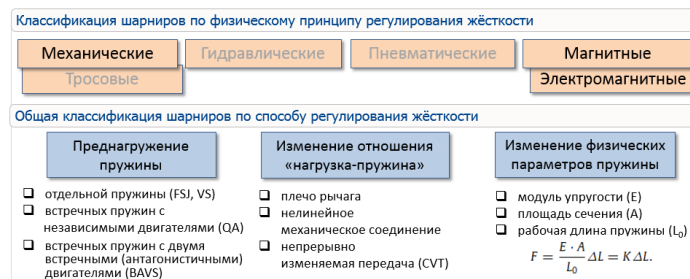


Рис. 1. Классификация ШПУ по физическому принципу механизма регулирования жёсткости и по способу регулирования

По принципу организации приводной системы можно выделить две большие группы ШПУ, наиболее часто реализуемые (рис. 2), – это шарниры со встречными (антагонистичными) приводами, где, чаще всего, используется система из двух одинаковых двигателей, работающих совместно, и шарниры последовательной (или независимой) схемы с функциональным разделением двигателей на основной приводной и регулировочный.

При дальнейшем углублении в конструктивные особенности построения механизмов регулирования жёсткости мы сможем отметить различные варианты реализации этих двух групп механизмов, примеры которых схематично приведены на рис. 3.

Так, механизмы с переменным рычагом могут быть реализованы тремя способами (во всех случаях свойства пружины не меняются): 1) изменением положения пружины, но расстояние от точки приложения силы до точки опоры постоян-

ное; 2) изменением точки приложения силы, но расстояние от пружины до точки опоры рычага постоянное; 3) изменением положения точки опоры от точки приложения силы до пружины, так что жёсткость механизма теоретически может меняться от нуля до бесконечности.

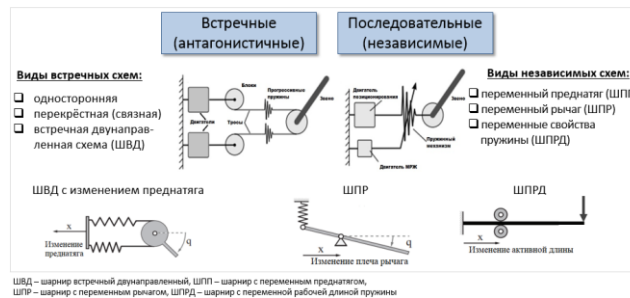


Рис. 2. Виды ШПУ по принципу организации приводной системы

Существуют также и различные варианты построения антагонистичных схем: 1) односторонняя, при которой каждый из двух приводных двигателей работает только на одно направление вращения шарнира; 2) двунаправленная, в которой оба двигателя работают совместно в каждом из направлений движения; 3) связанная, занимающая промежуточное положение между первыми двумя.

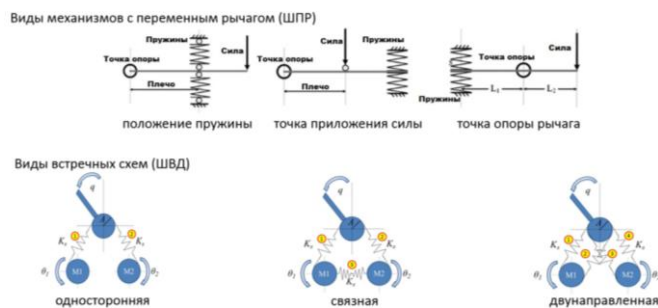


Рис. 3. Принципиальные схемы реализации механизмов с переменным рычагом (сверху) и механизмов с антагонистичными приводами (снизу)

**Постановка задачи и выбор направления исследования.** По результатам обзора литературных источников и анализа ШПУ как технической системы можно отметить следующее:

- ♦ интерес к разработке ШПУ в мире высок, что свидетельствует об актуальности данной тематики и востребованности для практической робототехники,
- ♦ наиболее перспективными областями применения ШПУ являются ноги шагающих роботов, манипуляторы для контактных и динамических задач, коллаборативные роботы, а также подвеска мобильных роботов для экстремальных сред, например, планетоходов,
- ♦ не существует единого технического решения построения ШПУ, оптимального для всех классов задач и областей применения, что требует отдельного изучения в плане оценки их преимуществ/недостатков и разработки, в конечном итоге, методики проектирования ШПУ под конкретные требования.

Научной проблемой, не позволяющей в настоящее время внедрять подобные шарниры в отечественные робототехнические системы, является отсутствие методики проектирования и отработанных методов и алгоритмов управления ШПУ, ис-

пользующих различные принципы регулирования жёсткости. Для решения данной проблемы методами компьютерного моделирования и физических экспериментальных исследований, необходима разработка соответствующих математических и компьютерных моделей ШПУ различных типов, разработка конструкции и создание экспериментальных образцов ШПУ, проведение компьютерных и физических исследований разработанных алгоритмов и способов управления ШПУ, реализующих различные принципы регулировки жёсткости, анализ достоинств и недостатков различных подходов к изменению жёсткости ШПУ. Выполнение данных шагов позволит получить компетенции, опыт и научно-технический задел по проектированию и применению отечественных ШПУ и манипуляционных систем на их основе.

Для определённости в качестве объекта для исследований рассматривается шарнир манипулятора, сравнимый по силовыми и мощностным параметрам с шарниром плеча известного и широко используемого робота типа Universal Robotics UR5e. В качестве исходных данных для исследуемого ШПУ принят выходной момент не менее 100 Нм и потребляемая мощность не более 450 Вт.

В виду огромного количества возможных вариантов построения ШПУ, представленных в научной литературе, невозможности разработки единой конструкции под все задачи и, по большей части, фундаментального характера выполняемого исследования были приняты три направления исследований по трём типам ШПУ, отличающимся принципом регулирования жёсткости.

В соответствии с представленными классификациями это:

1) шарнир встречного (зависимого) типа с антагонистичными приводами (работающими совместно как на внешнюю нагрузку, так и на изменение величины жёсткости) – ШПУ с механической регулировкой жёсткости, с преднагружением пружины, со встречными пружинами и двумя встречными (антагонистичными) двигателями (ШВД),

2) шарнир последовательного типа с независимыми приводами (один из которых играет роль основного привода, второй – привода регулировки величины жёсткости) и механизма регулировки жёсткости (МРЖ) на основе кулачкового механизма с плавающей пружиной – ШПУ с механической регулировкой жёсткости, с преднагружением пружины, с отдельной пружиной и двумя независимыми двигателями, т.е., шарнир с переменным преднатягом (ШПП),

3) шарнир последовательного типа с магнитной муфтой с регулируемой величиной жёсткости (упругости) передачи момента на выходной вал – ШПУ с применением магнитного МРЖ с электромеханическим приводом настройки жёсткости.

**Теоретические основы проектирования ШПУ.** Для того, чтобы анализировать и в дальнейшем управлять ШПУ, а также проектировать ШПУ с достижением желаемых характеристик, необходимо описать их характеристики посредством математической модели, учитывающей как статическое, так и динамическое поведение.

В первую очередь необходимо последовательно определить некоторые понятия, которые используются при математическом описании ШПУ. Так, наиболее простым случаем механического импеданса является линейная пружина, т.е., кусок материала, обеспечивающий пропорциональную зависимость между приложенной силой  $f$  и смещением от положения равновесия  $y = cf$ . Коэффициент пропорциональности  $c$  называется податливостью. Обратное отношение, то есть  $f = ky$  вводит понятие жёсткости пружины  $k = c^{-1}$ . Пружина запасает потенциальную энергию упругости  $U$ , первая производная которой по смещению представляет собой силу, а вторая производная – коэффициент жёсткости (константу).

Понятия податливости и жёсткости можно обобщить, перейдя от статического случая (положения равновесия) к динамическому, через понятия адмиттанса (admittance) и импеданса (impedance) соответственно. Для этого необходимо рассмотреть

демпфирующий элемент (амортизатор), имеющий вязкую природу, и противодействующий смещению пропорционально скорости, соответствующий созданию ускорения для деформируемой массы. В случае простой системы «масса-пружина-амортизатор» импеданс описывается линейным дифференциальным уравнением

$$f = m\ddot{y} + b\dot{y} + ky, \quad (2)$$

описывающим отношение двух функций времени:  $y(t)$  и  $f(t)$ . Такое уравнение описывает динамическую систему. Переходя к преобразованию Лапласа, импеданс определяется как оператор, связывающий функции усилия и скорости:

$$Z(s) = \frac{F(s)}{V(s)} = \frac{ms^2 + bs + k}{s}. \quad (3)$$

Взаимно обратный оператор представляет собой адмиттанс  $A(s)$ .

Схема последовательного ШПУ представлена на рис.4 [15].

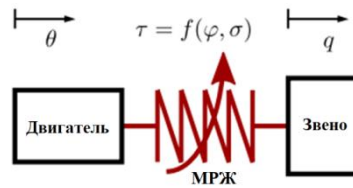


Рис. 4. Структурная схема последовательного ШПУ

Вывод модели традиционно выполняется через Лагранжиан:

$$L(x, \dot{x}) = T(x, \dot{x}) + U(x), \quad (4)$$

$$x = \begin{pmatrix} q \\ \theta \\ \sigma \end{pmatrix} \in R^3, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx} \frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial x} = Q, \quad (6)$$

где  $T$  и  $U$  – кинетическая и потенциальная энергии системы,  $q$  – положение выходного звена,  $\theta$  – положение двигателя,  $\sigma$  – положение настроечного двигателя,  $Q$  – обобщённая равнодействующая внешних сил.

В развёрнутом виде модель последовательного ШПУ записывается следующим образом [23]:

$$\begin{cases} M\ddot{q} + b_j\dot{q} + \tau_E(\sigma, \varphi) = \tau_{ext} + g(q) \\ B_\theta\ddot{\theta} + b_\theta\dot{\theta} - \tau_E(\sigma, \varphi) = u_\theta \\ B_\sigma\ddot{\sigma} + b_\sigma\dot{\sigma} + \tau_r(\sigma, \varphi) = u_\sigma \end{cases}, \quad (7)$$

где  $M$  – момент инерции нагрузки,  $b_j$ ,  $b_\theta$ ,  $b_\sigma$  – коэффициенты вязкого трения,  $g$  – момент от действия силы тяжести на нагрузку,  $B_\theta$ ,  $B_\sigma$  – момент инерции роторов двигателей,  $\tau_E$  – момент на выходе шарнира,  $\tau_{ext}$  – момент, приложенный внешним объектом,  $\tau_r$  – момент реакции на приводе регулирования жёсткости,  $u_\theta$ ,  $u_\sigma$  – задающие моменты на двигателях.

Первое уравнение отражает твердотельную механику (выход шарнира), второе – уравнение основного двигателя, отвечающего за поворот шарнира, а третье – уравнение двигателя, отвечающего за изменение жёсткости. При этом распространено допущение, что можно пренебречь динамикой привода регулирования жёсткости [15].

Аналогично можно представить модель ШПУ со встречными антагонистичными приводами. Если обозначить  $\varphi_1 = \theta_{m1} - q$ ,  $\varphi_2 = \theta_{m2} - q$ , где  $\theta_{m1}$ ,  $\theta_{m2}$  – углы поворота двигателей 1 и 2, то при общепринятых допущениях, модель будет иметь вид



$$\begin{cases} M\ddot{q} = \tau_{e1}(\varphi_1) + \tau_{e2}(\varphi_2) \\ B_1\ddot{\theta}_{m1} + D_{m1}\dot{\theta}_{m1} + \tau_{e1}(\varphi_1) = \tau_1, \\ B_2\ddot{\theta}_{m2} + D_{m2}\dot{\theta}_{m2} + \tau_{e2}(\varphi_2) = \tau_2 \end{cases} \quad (8)$$

где  $\tau_{e1}$  и  $\tau_{e2}$  – моменты на пружинах каждого привода, являющиеся нелинейными функциями от упругой деформации пружин. Общий упругий момент на выходе шарнира и моменты на отдельных упругих элементах определяются соответственно как

$$\tau_e = \tau_{e1}(\varphi_1) + \tau_e(\varphi_2) \quad (9)$$

$$\tau_{ek} = \left( \frac{\partial U_e}{\partial \varphi_k} \right)^T. \quad (10)$$

**Модульный принцип построения шарнира.** В настоящей работе стоит задача создания исследовательского ШПУ в трёх вариантах исполнения механизма реализации переменной упругости. В связи с этим, с точки зрения удобства реконфигурации шарнира с одного на другой вариант, установки его на исследовательский стенд, обслуживания, возможной последующей модификации/модернизации, целесообразным представляется построение ШПУ в виде модульной конструкции. Такой подход с другой стороны, очевидно, приведёт к избыточности конструкции с ухудшением её массогабаритных характеристик, что представляется менее существенным обстоятельством в сравнении с отмеченными достоинствами, с учётом чисто исследовательских целей проекта.

ШПУ для исследований предполагается создавать на базе нескольких модулей, часть которых являются общими для всех конструкций:

модуль основного двигателя (общий) – 2 шт.,

модуль редуктора (общий) – 2 шт.,

модуль тормоза (общий) – 2 шт.,

модуль датчика положения (общий) – 3 шт.,

модули реализации переменной упругости: оппозитного привода, пружинного механизма регулируемой жёсткости или магнитной упругой муфты.

Таким образом, используя перечисленные модули предполагается построение ШПУ в трёх вариантах:

ШПУ встречного типа с антагонистичными приводами,

ШПУ последовательного типа с независимыми приводами,

ШПУ с магнитной регулируемой упругой муфтой.

Все модули выполняются с полым валом, что позволяет стыковать их вдоль оси, комбинируя несколько однотипных модулей (например, электродвигателей или редукторов) в одном шарнире. Стыковка модулей друг с другом осуществляется с помощью накидных стяжных хомутов, устанавливаемых на конусные фланцы, что позволяет быстро заменить один модуль на другой без применения специального инструмента.

На рис. 5–7 представлены блок-схемы возможных компоновок модулей при построении ШПУ трёх типов. На этих рисунках приняты следующие обозначения: Д1, Д2 – модули основного двигателя, ДВВ – датчик выходного вала, ДР – двигатель привода регулировки упругости, ЛП – модуль механизма линейного перемещения привода регулировки магнитной муфты, ММ – модуль магнитной муфты, ОУ – объект управления, Р – модуль редуктора, Т – модуль тормоза, У1 – модуль упругости ШПУ встречного (зависимого) типа, У2 – модуль упругости ШПУ последовательного (независимого) типа.

Исследовательские цели проекта требуют оснащения ШПУ несколькими датчиками положения. Руководствуясь модульным принципом, изначально рассматривались варианты выполнения датчика для измерения абсолютного углового положения вала (ДВВ на схемах) в виде модуля с типовыми интерфейсами соединения аналогично остальным модулям шарнира. Такие схемы соответствуют вариантам А1 на рис. 5–7.

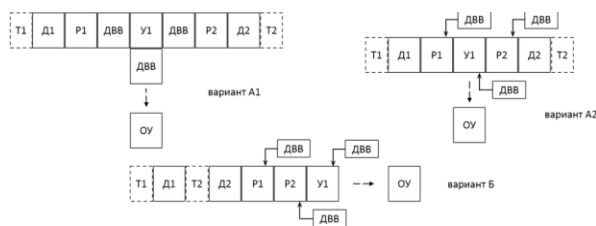


Рис. 5. Схемы построения ШПУ встречного (зависимого) типа



Рис. 6. Схемы построения ШПУ последовательного (независимого) типа

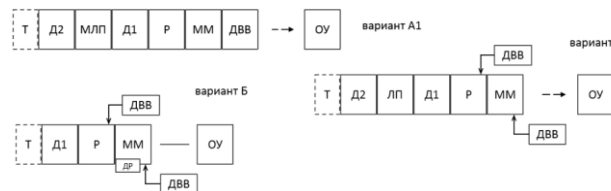


Рис. 7. Схемы построения ШПУ с магнитной регулируемой муфтой

Однако, даже на уровне схем видно, что подобное решение вызывает чрезмерную избыточность и громоздкость конструкции, неоправданную даже с учётом исследовательской специфики разрабатываемых шарниров. Учитывая, что используемый датчик положения может быть достаточно компактным, более целесообразным представляется отход в этом случае от концепции однотипных модулей и выполнение модуля датчика положения ДВВ в виде отдельного небольшого модуля, пристыковываемого в требуемом месте. Поэтому варианты А1 заменены на более компактные варианты А2 и далее не рассматриваются. При этом для ШПУ встречного типа (рис. 5) и ШПУ с магнитной муфтой (рис. 7) помимо варианта А2 приведены альтернативные варианты Б.

Вариант А2 ШПУ встречного типа (рис.5) построен по Т-образной схеме. В этом случае модуль упругости У1, выполняющий роль суммирующего дифференциального механизма, должен иметь два входа и один выход, расположенный под углом  $90^\circ$  относительно входов. В то же время исполнение модулей с полым валом даёт возможность более простой линейной компоновки ШПУ встречного типа по варианту Б, который и принят в качестве рабочего.

Вариант А2 ШПУ с магнитной муфтой (рис. 7) также имеет линейную компоновку. Недостатком этого варианта является то, что модуль магнитной муфты ММ конструктивно отделён от модуля механизма линейного перемещения ЛП, приводом которого служит модуль основного двигателя Д2, мощность которого избыточна для данной функции. Преимуществом этого варианта является использование однотипных модулей. В то же время, вариант Б предлагает более компактную компоновку, предполагая модификацию модуля магнитной муфты ММ путём интеграции в единый модуль самой магнитной муфты и механизма линейного перемещения вместе с отдельным маломощным приводом регулировки. В этом случае данный вариант по компактности становится сравним с наиболее компактным из представленных схем – вариантом А2 ШПУ последовательного типа (см. рис. 6). На первом этапе в качестве рабочего принят более простой вариант А2 ШПУ с магнитной муфтой с возможной реализацией впоследствии более компактного варианта Б этого шарнира.

**Краткое описание конструкции исследовательского шарнира с переменной упругостью.** ШПУ в каждом из трёх исполнений включает типовые модули электродвигателя, редуктора, тормоза и датчика положения вала, которые объединяются с тем или иным модулем реализации переменной упругости.

На рис. 8–10 показаны конструктивно-компоновочные схемы шарнира в трёх вариантах исполнения. Цифрами на рисунках обозначены: 1 – модуль приводного двигателя, 2 – модуль редуктора, 3 – модуль тормоза, 4 – модуль датчика положения, 5 – модуль регулировки упругости с суммирующим дифференциалом, 6 – модуль регулировки упругости на основе пружинно-кулачкового механизма, 7 – модуль магнитной муфты с регулируемой упругостью, 8 – хомут накидной.

Соединение модулей между собой, за исключением модуля датчика положения вала 4, осуществляется с помощью накидных хомутов 8 двух типоразмеров. Модуль датчика положения вала выполнен на основе оптического абсолютного углового энкодера типа ЛИР-ДА119А производства АО «СКБ ИС» [24], имеющего компактные размеры, и устанавливается на винтах на корпусе в соответствии со схемами на рис. 5–7.

Приводные модули выполнены на основе бесколлекторного встраиваемого вентильного электродвигателя типа FL70BL19 со встроенным датчиком Холла для измерения углового положения вала [25] и волнового редуктора «Сервосила» с передаточным отношением 160 [26]. Модуль тормоза реализован таким образом, что электроэнергия требуется только для его переключения, в результате чего не происходит перегрева обмоток актуатора тормоза. Такая схема недостаточно надёжна, когда важна немедленная фиксация шарнира при внезапном отключении питания, однако в лабораторных условиях обеспечивает экономную и надёжную эксплуатацию. Для привода тормоза выбран двигатель с осевым направлением магнитного потока [27–30], фиксация ротора тормоза производится с помощью механизма типа «винт-гайка». Корпусные детали модулей выполняются из пластика методом 3D-печати. В качестве материала используется полиэтилентерефталатгликоль (PETG), что обосновывается сочетанием прочности и технологичности, а также эстетическими свойствами поверхности.

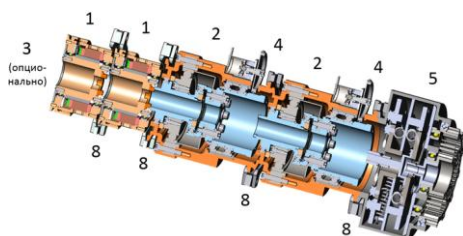


Рис. 8. Компоновка ШПУ встречного (зависимого) типа с антагонистичными приводами

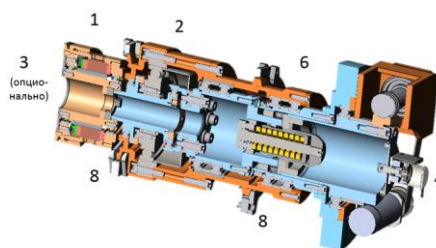


Рис. 9. Компоновка ШПУ последовательного типа с независимыми приводами

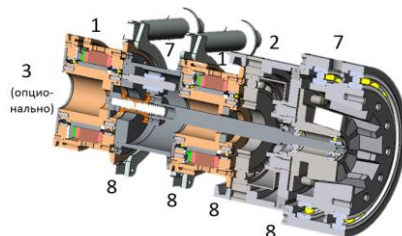
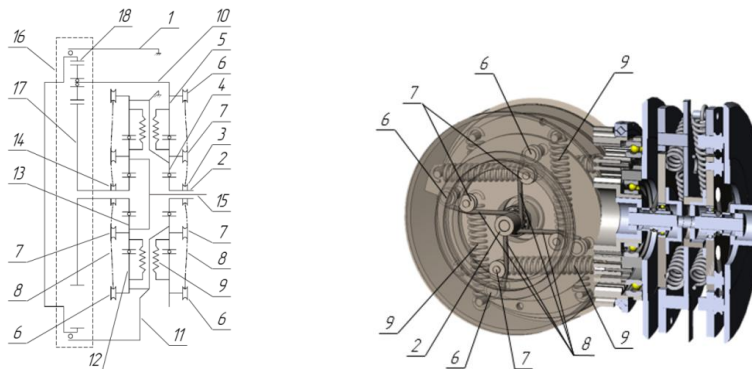


Рис. 10. Компоновка ШПУ с магнитной регулируемой упругой муфтой

Наиболее интересными частями ШПУ являются модули реализации переменной упругости, на которых остановимся подробнее.

Кинематическая и конструктивная схемы модуля упругости с суммирующим дифференциалом для построения ШПУ встречного типа с антагонистичными приводами показаны на рис. 11. Модуль включает две основные части: дифференциальный суммирующий механизм (позиция 16) на основе планетарной передачи и модуль нелинейной упругости на основе системы тросово-блочных механизмов.



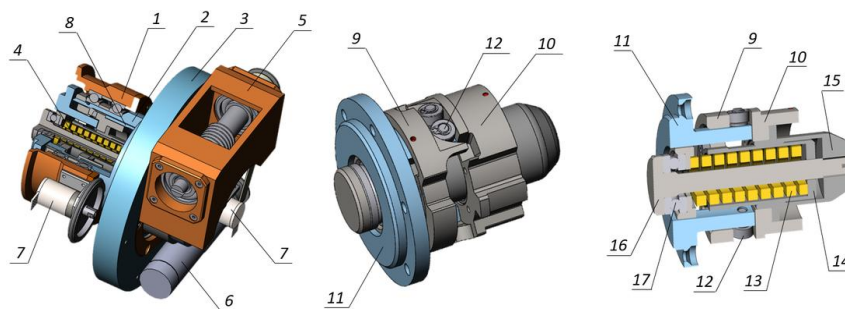
1 – корпус, 2 – приводной вал 1, 3 – барабан 1 намотки тросов, 4 – диск внутренний 1 с направляющими роликами, 5 – диск внешний 1 с опорными роликами, 6 – ролик опорный, 7 – ролик направляющий, 8 – трос, 9 – пружина, 10 – звено выходное ряда 1 (водило суммирующего дифференциала), 11 – диск промежуточный (корпус), 12 – диск внешний 2 с опорными роликами, 13 – диск внутренний 2 с направляющими роликами, 14 – барабан 2 намотки тросов, 15 – приводной вал 2, 16 – суммирующий дифференциал, 17 – солнечная шестерня, 18 – эпицикл (выходное звено модуля)

Рис. 11. Кинематическая схема (слева) и конструкция (справа) тросово-блочного механизма модуля нелинейной упругости с суммирующим дифференциалом

Реализация нелинейной упругости осуществляется в блочном механизме, включающем две системы (два идущих друг за другом ряда) из четырёх тросов 8, наматываемых на центральный барабан 2 или 14 с одного конца, закреплённых с другого конца на опорных роликах 6 и перекинутых через направляющие ролики 7. Скручиванию внешних дисков 5 и 12 относительно внутренних дисков 4 и 13 препятствуют пружины растяжения 9. При этом внешний диск 5 первого ряда механизма соединён с водилом 10 планетарного механизма суммирующего дифференциала, внутренний диск 4 первого ряда соединён с внешним диском 12 второго ряда и корпусом 1 (т.е. неподвижны), барабан 14 намотки тросов второго ряда соединён с солнечной шестерней планетарного механизма. Механизм имеет два входных приводных вала (позиции 2 и 15), первый из которых приводит во вращение барабан 3 намотки тросов первого ряда, второй – внутренний диск 13 второго ряда. Вращение приводных валов 2 и 15 в одном направлении приводит к работе планетарного механизма в режиме блокировки с вращением всех звеньев с одинаковой скоростью (как одно целое). Вращение приводных валов в противоположных направлениях приводит к взведению упругих механизмов и повышению жёсткости модуля.

Общая конструкция модуля пружинного механизма регулируемой жёсткости представлена на рис. 12. Модуль включает пластиковый корпус 1 с фланцем крепления под накидной хомут, в котором на подшипниковых опорах установлен подвижный корпус 2, связанный с выходным фланцем 3. На выходном фланце установлен привод регулировки жёсткости 5, включающий коллекторный электродви-

гатель 6 в сборе с планетарным редуктором, соединённый через ременную зубчатую передачу с червячным редуктором. Внутри подвижного корпуса установлен кулачковый механизм регулировки жёсткости 4. Угловое положение подвижного корпуса 2 относительно неподвижного корпуса 1 измеряется модулем датчика положения вала 7. Ещё один модуль датчика положения измеряет поворот вала привода регулировки жёсткости 8 относительно корпуса привода (т.е., выходного фланца модуля).



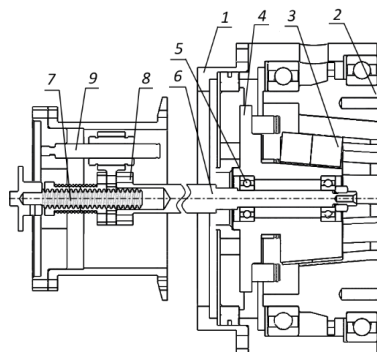
1 – корпус неподвижный, 2 – корпус подвижный, 3 – выходной фланец, 4 – механизм регулировки жёсткости, 5 – привод механизма регулировки жёсткости, 6 – двигатель привода механизма регулировки, 7 – модуль датчика положения вала, 8 – вал привода регулировки, 9 – кулачковый диск первый (ведущий), 10 – кулачковый диск второй (регулируемый), 11 – водило с присоединительным фланцем, 12 – ролик, 13 – пружина, 14 – стакан первого кулачкового диска, 15 – стакан второго кулачкового диска, 16 – винт, 17 – подшипник упорный

Рис. 12. Устройство модуля регулировки жёсткости на основе пружинно-кулачкового механизма

Механизм регулировки жёсткости состоит из двух кулачковых дисков 9 и 10, стягиваемых между собой пружиной 11 посредством стаканов 14 и 15 и регулировочного винта 16. По профилированным рабочим поверхностям кулачковых дисков перемещаются ролики 12, установленные на водиле 11, закреплённом на выходном элементе модуля редуктора шарнира. Профиль рабочих поверхностей кулачковых дисков имеет вид экспоненциальной зависимости. Включение привода регулировки на неподвижном шарнире, находящемся в состоянии равновесия, приводит к относительному закручиванию кулачковых дисков 9 и 10 с одновременным осевым смещением кулачкового диска 9 в сторону фланца водила 11 благодаря распиранью дисков роликами, находящимися на неподвижном в этот момент водиле. Такая ситуация приводит к сжатию пружины 5 и соответствует увеличению жёсткости механизма.

Общее устройство модуля магнитной регулируемой упругой муфты показано на рис. 13. Статор и ротор муфты (позиции 2 и 3) снабжены постоянными NdFe-магнитами. Регулировочный винт 7 приводится во вращение от двигателя регулировки жёсткости, а гайка с упорной резьбой 8, входящая в зацепление с резьбой винта регулировки жёсткости, способна перемещаться линейно по своим направляющим, и присоединена к регулировочному штоку 6. Перемещаясь, регулировочный шток через подшипниковые опоры толкает втулку ротора, в которой установлены магниты ротора муфты 3. Втулка ротора соединяется с предыдущим модулем шарнира (модулем редуктора) штифтами по скользящей посадке, что обеспечивает передачу вращательного момента на ротор, позволяя ему перемещаться вдоль оси. При смещении ротора вдоль оси изменяется воздушный зазор между магнитами ротора и статора, в результате чего изменяется абсолютная величина

магнитной силы между ними. При повороте ротора внутри статора возникает возвращающая сила, пропорциональная силе притяжения между полюсами ротора и статора, и при малых отклонениях (менее половины ширины полюса) примерно пропорциональная углу поворота ротора. Таким образом, изменение воздушного зазора меняет коэффициент пропорциональности возвращающей силы углу поворота, что эквивалентно изменению жёсткости шарнира. Для регулировки жёсткости шарнира используется базовый модуль основного двигателя, что не является оптимальным с точки зрения массогабаритных характеристик, но позволяет сократить затраты на разработку и изготовление макета для отработки шарнира, что приоритетно на текущем этапе исследований.



1 – корпус, 2 – статор муфты, 3 – ротор муфты,  
4 – втулка ротора, 5 – опоры втулки, 6 – регулировочный  
шток, 7 – регулировочный винт, 8 – гайка с упорной резьбой,  
9 – направляющие гайки

Рис. 13. Модуль магнитной регулируемой упругой муфты

**Заключение. Направления дальнейших исследований.** Главные целью проводимого исследования является создание научно-технического задела в области создания шарниров с регулируемой жёсткостью, разработка методических рекомендаций по проектированию ШПУ под требуемые конкретные задачи и по применению их для выполнения этих задач в составе манипуляционных систем, обладающих новыми качествами и повышенными техническими характеристиками. На сегодняшний день работоспособные ШПУ в России отсутствуют. В мире ведутся интенсивные исследования по разработке различных типов ШПУ и манипуляторов на их основе. В то же время до настоящего времени все созданные изделия по большей части носят экспериментальный и исследовательский характер, хотя, благодаря существенной и продолжительной активности зарубежных исследователей в этом направлении, в ближайшее время уже можно ожидать появления и внедрения опытных образцов для решения конкретных практических задач.

Выполненные авторами первоначальные исследования выявили большой интерес в мире к данной тематике, что позволяет говорить об её актуальности. Анализ большого массива источников, посвящённых проблеме создания ШПУ, позволил сделать обобщения по их типам, сделать выводы о сильных и слабых сторонах некоторых технических решений и выделить ряд перспективных, по мнению авторов, направлений исследований, которые решено было сфокусировать на ШПУ с тремя различными типами механизмов регулирования жёсткости. Такой подход связан с тем, что ни одно из применяемых при построении ШПУ технических решений не является идеальным, имея свои особенности, из которых следуют достоинства и недостатки в конкретных условиях, определяющие целесообразную область (нишу) их потенциального применения. Научная значимость полученных на

данном этапе результатов также заключается в предложенной модульной архитектуре шарнира, позволяющей исследовать разные типы ШПУ в рамках одной конструкции. В настоящее время разработаны предварительные имитационные модели ШПУ в трёх вариантах исполнения, описание которых вышло за рамки настоящей статьи, проведено компьютерное моделирование динамики и прочности шарнира в трёх исследуемых вариантах ШПУ. Схожесть результатов моделирования с ожиданиями на основе физических законов и логики показывает принципиальную достоверность разработанных компьютерных моделей.

Дальнейшие направления исследований направлены на создание действующего макетного образца модульного исследовательского шарнира с регулируемой упругостью, разработку алгоритмов управления таким шарниром и манипулятором, реализующих различные подходы к регулированию жёсткости, уточнение моделей динамики подобных шарниров, проведение физических исследований ШПУ различных типов и формирование рекомендаций по проектированию и применению ШПУ и манипуляторов на их основе.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hu J. [et al.]. Robotic deburring and chamfering of complex geometries in high-mix/low-volume production applications // 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). – IEEE, 2020. – P. 1155-1160.
2. Sága M. [et al.]. Case study: Performance analysis and development of robotized screwing application with integrated vision sensing system for automotive industry // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2020. – Vol. 17, No. 3. – P. 1729881420923997.
3. Ott C. [et al.]. A humanoid two-arm system for dexterous manipulation // 2006 6th IEEE-RAS international conference on humanoid robots. – IEEE, 2006. – P. 276-283.
4. Zhou L. [et al.]. A Novel Portable Lower Limb Exoskeleton for Gravity Compensation during Walking // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2020. – P. 768-773.
5. Zimmermann Y. [et al.]. ANYexo: A versatile and dynamic upper-limb rehabilitation robot // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 3649-3656.
6. Jaekel S. [et al.]. Design and operational elements of the robotic subsystem for the e. deorbit debris removal mission // Frontiers in Robotics and AI. – 2018. – Vol. 5. – P. 100.
7. AlAttar A., Rouillard L., Kormushev P. Autonomous air-hockey playing cobot using optimal control and vision-based bayesian tracking // Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems. – Springer, Cham, 2019. – P. 358-369.
8. Groothuis S.S., Stramigioli S., Carloni R. Lending a helping hand: Toward novel assistive robotic arms // IEEE robotics & automation magazine. – 2013. – Vol. 20, No. 1. – P. 20-29.
9. Bicchi A. et al. Variable stiffness actuators for fast and safe motion control // Robotics research. The eleventh international symposium. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. – P. 527-536.
10. Albu-Schäffer A. [et al.]. The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments // Industrial Robot: an international journal. – 2007.
11. Al-Shuka H.F.N. [et al.]. Active impedance control of bioinspired motion robotic manipulators: An overview // Applied bionics and biomechanics. – 2018. – Vol. 2018.
12. Pratt G.A., Williamson M.M. Series elastic actuators // Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots. – IEEE, 1995. – Vol. 1. – P. 399-406.
13. Höppner H. Analysis of human intrinsic stiffness modulation and its use in variable-stiffness robots: diss. – Technische Universität München, 2016.
14. Grebenstein M. The awiwi hand: An artificial hand for the dlr hand arm system // Approaching Human Performance. – Springer, Cham, 2014. – P. 65-130.
15. Petit F. Analysis and control of variable stiffness robots: дис. – ETH-Zürich, 2014.
16. Morita T., Sugano S. Design and development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 1995. – Vol. 3. – P. 2469-2475.
17. Morita VOL., Sugano S. Development of an anthropomorphic force-controlled manipulator WAM-10 // 1997 8th International Conference on Advanced Robotics. Proceedings. ICAR'97. – IEEE, 1997. – P. 701-706.



18. Tonietti G., Schiavi R., Bicchi A. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction // *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. – IEEE, 2005. – P. 526-531.
19. Wolf S., Hirzinger G. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation // *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – IEEE, 2008. – P. 1741-1746.
20. Vanderborght B. [et al.]. Variable impedance actuators: A review // *Robotics and autonomous systems*. – 2013. – Vol. 61, No. 12. – P. 1601-1614.
21. Grioli G. [et al.]. Variable stiffness actuators: The user's point of view // *The International Journal of Robotics Research*. – 2015. – Vol. 34, No. 6. – P. 727-743.
22. Wolf S. [et al.]. Variable stiffness actuators: Review on design and components // *IEEE/ASME transactions on mechatronics*. – 2015. – Vol. 21, No. 5. – P. 2418-2430.
23. Sardellitti I. [et al.]. Gain scheduling control for a class of variable stiffness actuators based on lever mechanisms // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2013. – Vol. 29, No. 3. – P. 791-798.
24. Абсолютные преобразователи угловых перемещений (угловые абсолютные энкодеры). ОАО «СКБ ИС» – URL: <https://skbis.ru/catalog/rotary/absolute-rotary-encoders> (дата обращения: 08.02.2023).
25. FL70BL19 / Fulling Motor. – URL: <https://fullingmotor.com/EN/product/proServoDetail.aspx?mtt=551> (дата обращения: 08.02.2023).
26. Волновые редукторы Сервосила. – URL: <https://www.servosila.com/ru/harmonic/index.shtml> (дата обращения: 08.02.2023).
27. Патент RU189796U1: МПК F16B7/02. Торцевой моментный электродвигатель. СПБГМУ. – Заявл. 2003122143/09, зарег.: 15.07.2003; Опубл.: 10.07.2005, Бюл. №19. / Сеньков А.П., Сеньков А.А. – 12 с. – URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6d/6e/dd/4ee1b882ffb214/RU2256276C2.pdf> (дата обращения: 06.02.2023).
28. YASA P400 R Series. – URL: <https://www.yasa.com/products/yasa-p400/> (дата обращения: 06.02.2023).
29. P400R Electric Motors Product Sheet. – URL: <https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2021/05/YASA-P400RDatasheet-Rev-14.pdf> (дата обращения: 06.02.2023).
30. Phi-Range: A new generation of Axial Flux Motor. – URL: <https://www.phi-power.com/en/phi-power-motor-series/> (дата обращения: 06.02.2023).

#### REFERENCES

1. Hu J. [et al.]. Robotic deburring and chamfering of complex geometries in high-mix/low-volume production applications, *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, 2020, pp. 1155-1160.
2. Sága M. [et al.]. Case study: Performance analysis and development of robotized screwing application with integrated vision sensing system for automotive industry, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 1729881420923997.
3. Ott C. [et al.]. A humanoid two-arm system for dexterous manipulation, *2006 6th IEEE-RAS international conference on humanoid robots*. IEEE, 2006, pp. 276-283.
4. Zhou L. [et al.]. A Novel Portable Lower Limb Exoskeleton for Gravity Compensation during Walking, *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2020, pp. 768-773.
5. Zimmermann Y. [et al.]. ANYexo: A versatile and dynamic upper-limb rehabilitation robot, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, Vol. 4, No. 4, pp. 3649-3656.
6. Jaekel S. [et al.]. Design and operational elements of the robotic subsystem for the e. deorbit debris removal mission, *Frontiers in Robotics and AI*, 2018, Vol. 5, pp. 100.
7. AlAttar A., Rouillard L., Kormushev P. Autonomous air-hockey playing cobot using optimal control and vision-based bayesian tracking, *Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems*. Springer, Cham, 2019, pp. 358-369.
8. Groothuis S.S., Stramigioli S., Carloni R. Lending a helping hand: Toward novel assistive robotic arms, *IEEE robotics & automation magazine*, 2013, Vol. 20, No. 1, pp. 20-29.
9. Bicchi A. et al. Variable stiffness actuators for fast and safe motion control, *Robotics research. The eleventh international symposium*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, pp. 527-536.
10. Albu-Schäffer A. [et al.]. The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments, *Industrial Robot: an international journal*, 2007.



11. Al-Shuka H.F.N. [et al.]. Active impedance control of bioinspired motion robotic manipulators: An overview, *Applied bionics and biomechanics*, 2018, Vol. 2018.
12. Pratt G.A., Williamson M.M. Series elastic actuators, *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. IEEE, 1995, Vol. 1, pp. 399-406.
13. Höppner H. Analysis of human intrinsic stiffness modulation and its use in variable-stiffness robots: diss. Technische Universität München, 2016.
14. Grebenstein M. The awiwi hand: An artificial hand for the dlr hand arm system, *Approaching Human Performance*. Springer, Cham, 2014, pp. 65-130.
15. Petit F. Analysis and control of variable stiffness robots: diss. ETH-Zürich, 2014.
16. Morita T., Sugano S. Design and development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster, *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1995, Vol. 3, pp. 2469-2475.
17. Morita VOL., Sugano S. Development of an anthropomorphic force-controlled manipulator WAM-10, 1997 8th International Conference on Advanced Robotics. *Proceedings. ICAR'97*. IEEE, 1997, pp. 701-706.
18. Tonietti G., Schiavi R., Bicchi A. Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction, *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, 2005, pp. 526-531.
19. Wolf S., Hirzinger G. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008, pp. 1741-1746.
20. Vanderborght B. [et al.]. Variable impedance actuators: A review, *Robotics and autonomous systems*, 2013, Vol. 61, No. 12, pp. 1601-1614.
21. Grioli G. [et al.]. Variable stiffness actuators: The user's point of view, *The International Journal of Robotics Research*, 2015, Vol. 34, No. 6, pp. 727-743.
22. Wolf S. [et al.]. Variable stiffness actuators: Review on design and components, *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2015, Vol. 21, No. 5, pp. 2418-2430.
23. Sardellitti I. [et al.]. Gain scheduling control for a class of variable stiffness actuators based on lever mechanisms, *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, Vol. 29, No. 3, pp. 791-798.
24. Absolyutnye preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy (uglovyie absolyutnye enkodery) [Absolute angular displacement converters (angular absolute encoders)]. OAO «SKB IS». Available at: <https://skbis.ru/catalog/rotary/absolute-rotary-encoders> (accessed 08 February 2023).
25. FL70BL19, Fulling Motor. Available at: <https://fullingmotor.com/EN/product/proServoDetail.aspx?mtt=551> (accessed 08 February 2023).
26. Volnovye reduktory Servosila [Servosil wave reducers]. Available at: <https://www.servosila.com/ru/harmonic/index.shtml> (accessed 08 February 2023).
27. Sen'kov A.P., Sen'kov A.A. Patent RU189796U1: MPK F16B7/02. Tortsevoy momentnyy elektrodvigatel' [Patent RU189796U1: IPC F16B7/02. End torque electric motor]. SPbGMTU. Prov. app. 2003122143/09, Filed: 15.07.2003; Pub.: 10.07.2005, Bull. No. 19, 12 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6d/6e/dd/4ee1b882ffb214/RU2256276C2.pdf> (accessed 06 February 2023).
28. YASA P400 R Series. Available at: <https://www.yasa.com/products/yasa-p400/> (accessed 06 February 2023).
29. P400R Electric Motors Product Sheet. Available at: <https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2021/05/YASA-P400RDataSheet-Rev-14.pdf> (accessed 06 February 2023).
30. Phi-Range: A new generation of Axial Flux Motor. Available at: <https://www.phipower.com/en/phi-power-motor-series/> (accessed 06 February 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.Ю. Даляев.

**Васильев Андрей Викторович** – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК); e-mail: andrey@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125526093; к.т.н.; ведущий конструктор.

**Шардыко Игорь Вячеславович** – e-mail: i.shardyko@rtc.ru; тел.: +78125526093; научный сотрудник.

**Копылов Владислав Маркович** – e-mail: v.kopylov@rtc.ru; тел.: +78125526093; ведущий инженер.

**Vasiliev Andrey Viktorovich** – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC); e-mail: andrey@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; cand. of eng. sc.; leading designer.

**Shardyko Igor Vyacheslavovich** – e-mail: i.shardyko@rtc.ru; phone: +78125526093; researcher.

**Kopylov Vladislav Markovich** – e-mail: v.kopylov@rtc.ru; phone: +78125526093; leading engineer.

УДК 621.317.39.084.2

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-215-226

**Р.А. Жигалов, С.А. Матюнин, А.А. Иголкин**

### **БЕСКОНТАКТНЫЙ ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КЛАПАНА**

*Целью исследования является разработка бесконтактного феррозондового датчика положения для контроля открытого/закрытого состояния клапана. Существует множество примеров использования в современной техники элементов или устройств, взаимодействующих с магнитным полем. Одной из актуальнейших задач является использование влияния магнитного поля в качестве средства контроля или составляющей управляющей среды. Применение магнитооптических датчиков для контроля функционирования технических объектов обусловлено их бесконтактным способом измерения, возможностью измерения не только магнитных, но и других различных физических величин, относительной простотой, надежностью и дешевизной конструкции чувствительного элемента, гибкостью в применении, эксплуатацией в низкотемпературных и высокотемпературных средах. Одним из датчиков подобного типа является феррозондовый преобразователь магнитного поля. Примером объекта внедрения феррозондового датчика являются клапаны различных пневмогидравлических систем. Сущность поставленной задачи заключается в создании бесконтактного концевого переключателя золотника клапана, сигнализирующего о закрытом или открытом состоянии клапана и передающего эту информацию в систему контроля. Предлагается разбиение данной задачи на этапы и последовательное их выполнение. Сначала производится поиск и анализ уже существующих решений, литературы, посвященной теме исследования магнитных преобразователей. Далее, разрабатывается модельная конструкция датчика, согласно которой создаются геометрические 3D-модель и 2D-модель чувствительного элемента, выбирается предполагаемый материал составляющих элементов датчика. С помощью численных методов компьютерного моделирования и математических моделей моделируется работа датчика и определяются его выходные характеристики при различных режимах работы. По расчетным характеристикам выбирается и рассчитывается оптимальная конструкция и конфигурация чувствительного элемента датчика. По итогам моделирования разрабатываются сборочные и рабочие чертежи датчика. Предложенный способ решения задачи характеризуется сложностью изучения нелинейных магнитных систем и их моделирования. Результаты данного исследования могут быть рекомендованы для разработки магнитооптических датчиков подобного или иного типа и изучения материалов с нелинейными магнитными свойствами.*

*Феррозондовый датчик; магнитный датчик; численное моделирование; индукция; напряженность; клапан.*

**R.A. Zhigalov, S.A. Matyunin, A.A. Igolkin**

### **NON-CONTACT FLUXGATE POSITION SENSOR FOR MONITORING THE STATE OF THE VALVE**

*The aim of the study is to develop a non-contact fluxgate position sensor to control the open / closed state of the valve. There are many examples of the use in modern technology of elements or devices that interact with a magnetic field. One of the most urgent tasks is to use the influence of the magnetic field as a means of control or as a component of the control environment. The use of magneto-optical sensors for monitoring the functioning of technical objects is due to their non-contact measure-*