



РУКА ОБ РУКУ С ЧЕЛОВЕКОМ: БИОНИЧЕСКИЙ МАНИПУЛЯТОР ОТ FESTO

ВЛАДИМИР РЕНТЮК

Rvk.modul@gmail.com

Бионические разработки компании Festo уже появлялись на страницах нашего журнала [1], и настоящая статья продолжает освещать эту тему, только в более узком ракурсе: в ней представлен инновационный бионический манипулятор BionicSoftHand.

Посмотрим на тенденции развития современной промышленной робототехники. Во-первых, это тяжелые узкоспециализированные роботы, работающие в составе технологических линий, задача которых «бери больше — кидай дальше». Во-вторых, роботы-транспортровщики, умеющие двигаться либо по меткам, либо по программе до места назначения с использованием искусственного интеллекта. И, наконец, третья тенденция — коллаборативные роботы-помощники, работающие в общей среде с человеком, для чего им нуж-

на подвижность манипуляторов, совмещенная с последними достижениями в области искусственного интеллекта.

Что касается манипуляторов, то в случае коллаборативного использования робота необходимо решить одну весьма сложную проблему. Дело в том, что манипуляторы, используемые на производстве, как правило, предназначены для перемещения тяжелых объектов, они выполнены из стали и работают на базе мощных пневматических систем, делающих их сильными и быстрыми, но совсем

не деликатными. Контакт манипулятора такого робота с человеком в момент работы чаще всего влечет плачевные последствия для последнего, а о какой-либо коллаборации вопрос не стоит в принципе. Если перефразировать известное выражение: «люди — отдельно, а роботы — отдельно», и желательно подальше друг от друга.

Для коллаборативной робототехники необходимо мягкое, чувствительное (имеется в виду обладание соответствующей тактильной чувствительностью) и, естественно,

высокоинтеллектуальное решение. Основное внимание здесь уделяется пневматическим легким роботам, которые по своей природе предназначены для совместной работы и могут в будущем представлять экономически эффективную альтернативу классическим концепциям роботов. Сильными сторонами пневматических приводов всегда были простое обращение и высокая надежность наряду с низкой стоимостью приобретения и достаточно высокой мощностью, которая позволяет им применять сравнительно большую силу по отношению к собственному низкому весу. Что касается экономии, то процессы удержания в таких системах без дальнейшего потребления сжатого воздуха и, следовательно, чрезвычайно энергоэффективны.

Компания Festo, известная приверженностью к бионике и достигшая в этом направлении немалых успехов [1], сделала очередной шаг в области коллаборативной робототехники. Ее команда во главе с инициатором проекта доктором Вильфридом Штоллем (Wilfried Stoll) и автором идеи и концепции профессором Дитером Манкау (Dieter Mankau) из университета Франкфурт-на-Майне представила мягкую бионическую руку — BionicSoftHand (рис. 1) [2]. Эта пневматическая роботизированная рука будет впервые показана на выставке Hannover Messe 2019. Объединенное с бионическим плечом BionicSoftArm [5] в легкий пневматический робот, данное решение оптимально подходит для совместной работы человека и робота. BionicSoftHand может безопасно использоваться и при непосредственном контакте с человеком, поскольку в своей основе является пневматическим [3].

Будь то захват, удержание, поворот, прикосновение, печатание или нажатие — в повседневной жизни мы используем наши руки для самых разнообразных задач как нечто само собой разумеющееся. В этом отношении человеческая рука, с ее уникальным сочетанием силы, ловкости (говоря техническим языком — степени свободы) и прекрасной моторной сенсорики, является настоящим чудодейственным «продуктом» природы. Что может быть более естественным, чем оснащение коллаборативных роботов захватом,

смоделированным по природному образцу, который решает различные задачи путем обучения через искусственный интеллект?

Что же представляет собой BionicSoftHand компании Festo? В отличие от человеческой руки, BionicSoftHand не имеет скелетной структуры. Его «пальцы» состоят из гибких сильфонных структур с воздушными камерами, вокруг которых располагается созданная с помощью 3D-печати трехмерная ткань из эластичных волокон, которая изгибается вместе с движениями руки, когда в сильфоны подается воздух. Проще говоря, все это больше похоже на работу наших мышц и сухожилий. Это делает BionicSoftHand легким, гибким, адаптируемым и чувствительным, но при этом способным оказывать достаточное силовое воздействие (рис. 2) [2]. Кроме того, такая гибкая пневматическая конструкция BionicSoftHand отличается от рук робота с электрическим или кабельным управлением возможностью более дешевого изготовления. При этом рабочее давление в пальцах составляет всего 3,5 бар, а в поворотных модулях — 6 бар. Максимальная грузоподъемность, в зависимости от ориентации, достигает 4 кг.

Как мы видим из рис. 2, мягкие пальцы роботизированной руки BionicSoftHand (размеры пальцев манипулятора: 4×98 мм (основные пальцы); 1×79 мм (маленький палец)) оснащены инерционными датчиками движения и силы, которые способны

контролировать момент движения и усилие. Сенсоры обеспечивают обратную связь с системами управления рукой, сообщая о совершаемых движениях самой руки и пальцев, а также о контакте с объектом. Кроме того, они передают информацию о том, правильно ли расположен объект в руке для дальнейшей манипуляции. Другими словами, комплекс датчиков наделяет руку контактным восприятием, имитирующим наше чувство осязания. В целом в кисти использованы:

- 1 инерционный датчик на тыльной стороне кисти;
- 10 инерционных датчиков в захватных пальцах;
- 15 датчиков тактильного усилия в пальцах;
- 14 датчиков давления воздушного потока.

Управление движениями манипулятора BionicSoftHand, как уже было сказано, осуществляется с помощью пневматической структуры, встроенной в его пальцы. Когда камеры наполнены воздухом, пальцы сгибаются. Если воздух из камеры удален (выпущен через обратный клапан), то пальцы выпрямляются. Большой и указательный пальцы дополнительно оснащены поворотным модулем, который позволяет им перемещаться в боковом направлении. Такое построение обеспечивает бионической руке двенадцать степеней свободы. Для сравнения, например, наш основной рабочий орган — кисть руки — по отношению к туловищу имеет семь степеней свободы: по две

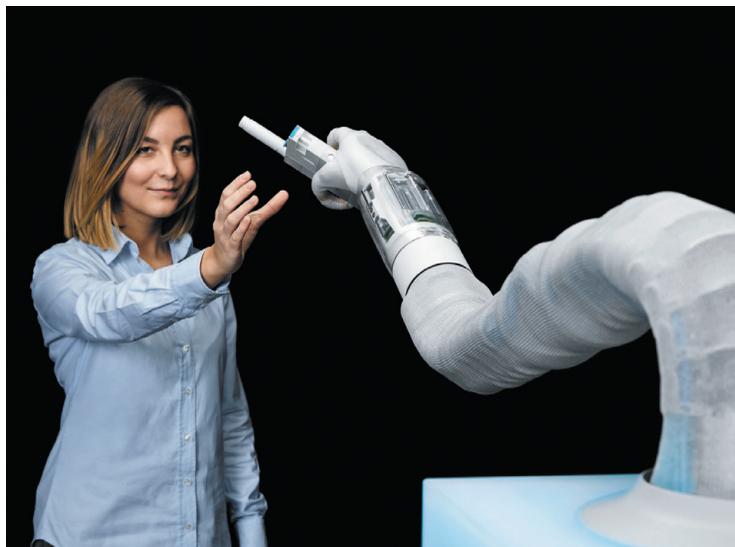


РИС. 1. ◀
Бионическая мягкая рука
BionicSoftHand компании
Festo



оси у лучезапястного и локтевого и три оси у плечевого сустава. Таким образом, BionicSoftHand можно считать абсолютно свободным телом, поскольку, согласно теории механики, для этого достаточно шести степеней свободы.

Одной из важных особенностей рассматриваемой системы является то, что для того чтобы удерживать давление в пневмоприводе BionicSoftHand на как можно более низком уровне, разработчики создали специальный небольшой пневмоостров с цифровым управлением, который монтируется непосредственно на бионической руке. Такое решение обеспечивает управление пальцами манипулятора без необходимости передачи воздуха через всю руку робота. BionicSoftHand можно быстро и легко подключить к общей пневмосистеме, и это также позволяет использовать только одну трубку для подачи и вытяжки воздуха.

С помощью пропорциональных пьезоклапанов движения пальцев можно точно контролировать. Что же касается оболочки, то для прикрытия сильфонных структур исполь-

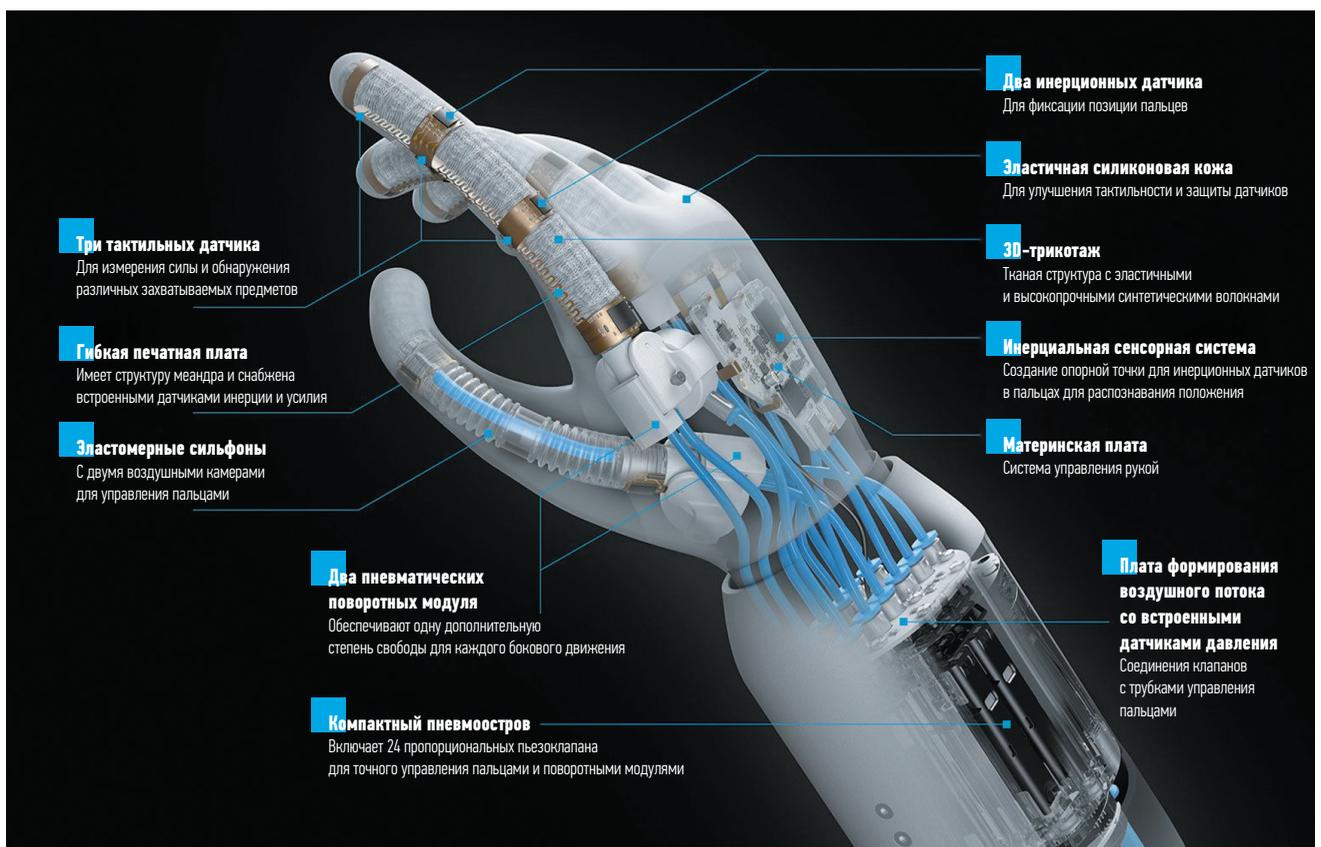
зуется материал EPDM (этиленпропилен-диен-каучук) с твердостью по Шору ~45, а для остальной части руки была разработана новая технология — специальная трехмерная трикотажная ткань сложного переплетения на основе волокна Дупеема производства компании Dutch State Mines (Нидерланды) из высокомолекулярного полиэтилена (HPPE). Это сверхпрочное полиэтиленовое волокно изготавливается с помощью уникального процесса, в результате которого молекулы приобретают новую параллельную ориентацию, что, собственно, и придает волокну уникальные механические свойства.

Решение на основе манипулятора BionicSoftHand оснащено самообучающимся модулем искусственного интеллекта, способным самостоятельно просчитывать оптимальный способ взаимодействия руки с разными предметами и совершения разных действий, причем в кратчайшие сроки. Манипулятор получает данные не только от встроенных тактильных сенсоров и датчиков давления, но и от 3D-камер с восприятием перспективы, что необходимо

для анализа предметов и движений в зоне действия такого робота. Методы машинного обучения сравнимы с человеческими: они требуют обратной связи, будь она позитивная или негативная, следуя этим действиям, чтобы их классифицировать и запоминать. BionicSoftHand использует метод обучения на основе подкрепления приобретенных навыков. Это означает, что вместо слепого подражания определенному действию бионической руке BionicSoftHand просто ставят цель, а она для ее достижения использует метод проб и ошибок.

Все это весьма похоже на наше обучение: неврологи говорят, что люди могут решать очень много сложных задач. Младенцы начинают использовать их очень рано — например, «узнавать» мамины пальцы и игрушки. Как только они научатся правильно захватывать объект, они могут вращать его и смотреть на него со всех сторон. Это единственный способ восстановить трехмерное изображение объекта в голове. Таким образом, рука также помогает людям учиться. Автор статьи как-то наблю-

РИС. 2. ▼
Компоненты высокоинтегрированного мягкого манипулятора BionicSoftHand



дал за тем, как его двухмесячный сын осваивал соску — он брал ее рукой, оценивал и пытался использовать по назначению, через час проб и ошибок цель была достигнута. Аналогично действует и BionicSoftHand. Перед началом манипуляции объектом система искусственного интеллекта самостоятельно перебирает все возможные комбинации того, как правильно взять объект, как его повернуть и положить на заданное место. Для этого используется комплексная виртуальная симуляция, в которой методом проб и ошибок подбирается правильный вариант дальнейшего действия. Все это реализуется не хаотично, а на основе полученных откликов от встроенных датчиков и системы машинного зрения, BionicSoftHand постепенно оптимизирует свои действия до тех пор, пока задача не будет успешно решена. Неизвестно, сколько вариантов использования соски было смоделировано и как проводил вычисления мозг ребенка, но BionicSoftHand выполняет то же самое в виртуальной среде, перебирая (что важно, параллельно) миллиарды ошибочных вариантов и в итоге определяя наиболее правильный и оптимальный, не за часы, а за доли секунды.

В частности, в примере из [4] BionicSoftHand должен вращать 12-сторонний многогранник (рис. 3) так, чтобы в конце всех манипуляций он был повернут заданной стороной вверх, причем как именно это сделать, машине не объяснили и на примерах не обучили. Сначала робот, с помощью 3D-камеры с восприятием перспективы, создает цифровую копию объекта, а затем производит параллельное моделирование с множеством виртуальных рук, которые манипулируют объектом до тех пор, пока не будет подобрана правильная комбинация действий. И только после этого алгоритм передается BionicSoftHand. При таком методе машина способна обучаться гораздо быстрее, чем посредством перебора манипуляций физическим объектом. В будущем, при выполнении новых близких по смыслу задач, робот может задействовать уже выученные ранее алгоритмы манипуляций.

Развитие данной технологии не ограничилось возможностями кисти и пальцев. Бионическая рука BionicSoftHand, как уже было сказано в самом начале статьи, совмещается

с BionicSoftArm — гибким плечом (рис. 4) [5, 7].

BionicSoftArm — это компактная доработка уже известного читателям BionicMotionRobot [1], спектр приложений которой в настоящее время значительно расширен. Это стало возможным благодаря модульной конструкции BionicSoftArm, объединяющей несколько сегментов пневматического сильфона (в данном случае они выполнены из натурального каучука) и поворотных приводов. Такое решение позволяет роботу освоить

как свободные и гибкие движения, так и их определенные последовательности [6], а также полностью соответствовать всем требованиям для безопасной работы с людьми. В зависимости от данных требований длина бионического плеча BionicSoftArm может варьироваться до семи пневматических приводов, что обеспечивает максимальную гибкость в рабочем диапазоне и необходимую мобильность. Такой подход упрощает разработку и внедрение приложений, которые трудно осу-

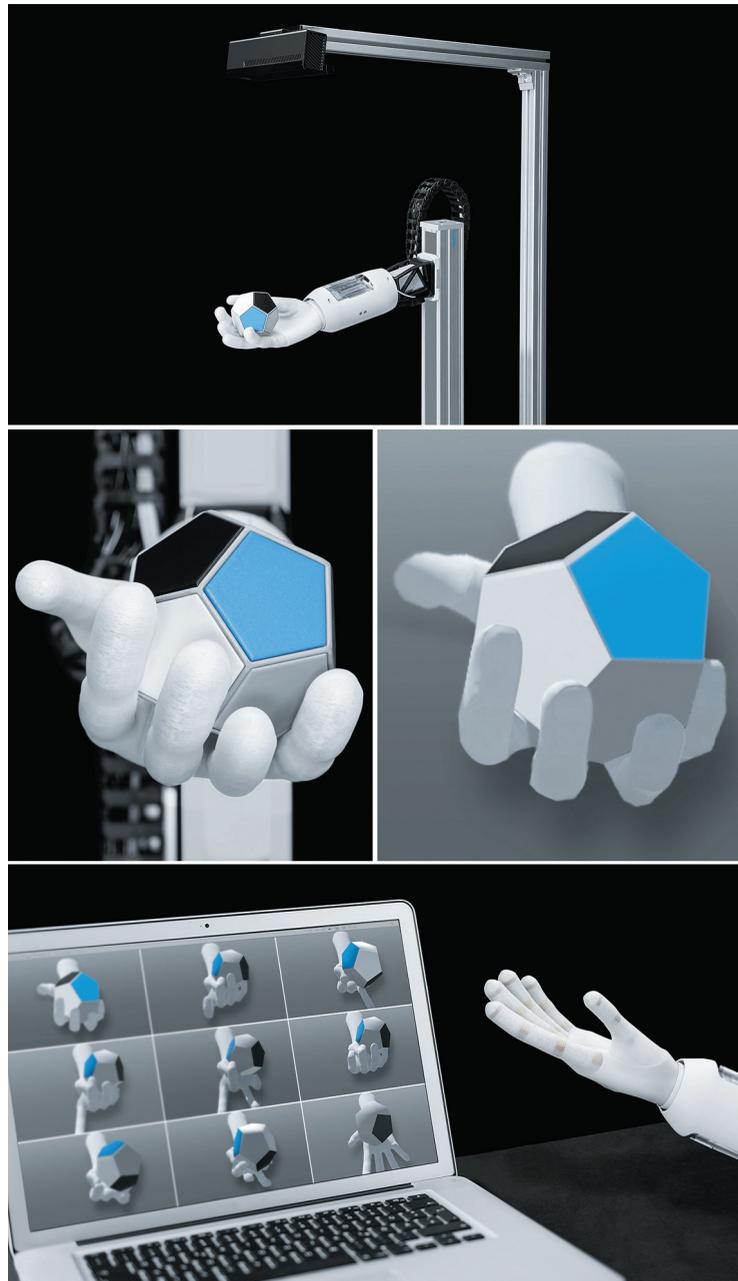


РИС. 3. ◀
Иллюстрации алгоритма принятия решения системой с использованием манипулятора BionicSoftHand

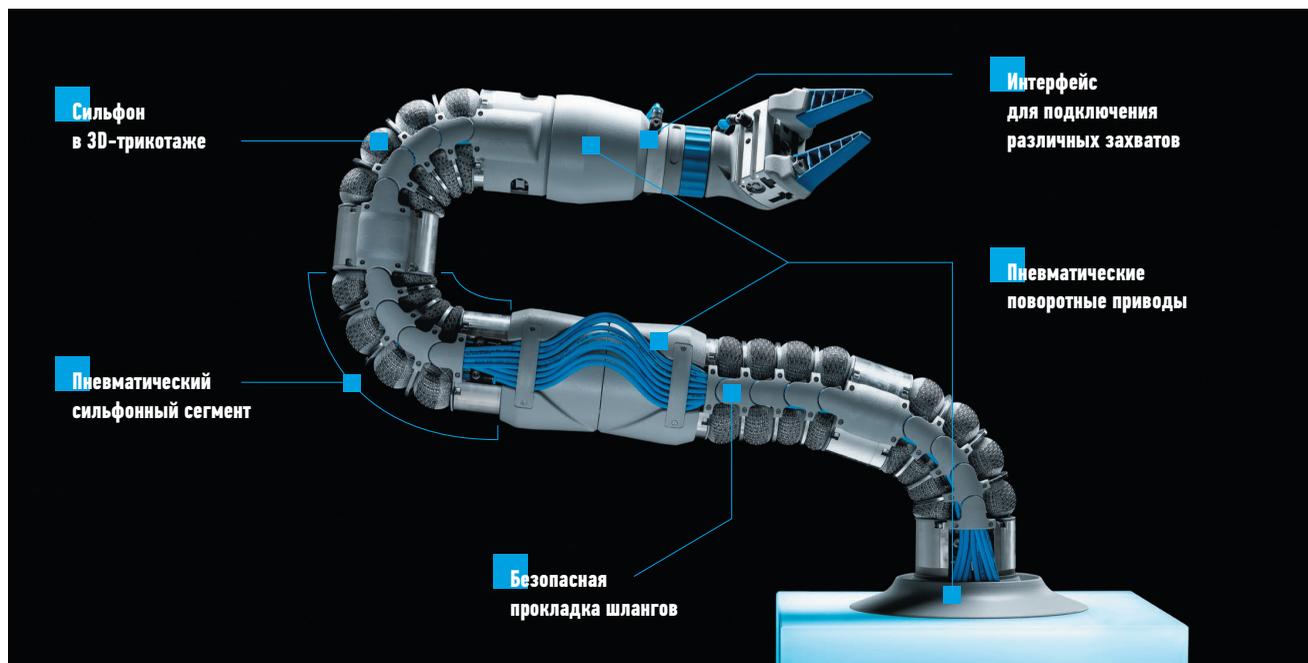
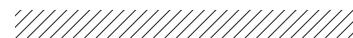


РИС. 4. ▲
Бионическое гибкое плечо
BionicSoftArm

ществить с помощью стандартного робота, и позволяет BionicSoftArm обходить препятствия даже в самых узких местах. Прямое взаимодействие человека с роботом также возможно, как и использование в классических приложениях SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm — кинематика, основанная на рычажной системе, которая обеспечивает перемещение конечного звена в плоскости за счет вращательного привода рычагов механизма) — например, в задачах выбора и размещения.

Применять BionicSoftArm помогает интерфейс для подключения различных захватов (рис. 5).

Одним из таких захватов является подробно рассмотренная выше бионическая рука BionicSoftHand (рис. 5б). Благодаря модульной конструкции есть также варианты захвата с тремя или четырьмя пальцами (рис. 5а). В настоящее время эти захваты еще являются бионическими концепциями, которые могут быть использованы в производстве в будущем. В качестве захватов могут

быть также применены адаптивный по форме захват DHEF (рис. 5в) и параллельный захват с адаптивными губками DHAS (рис. 5г). Оба этих захвата были сначала разработаны как прототипы в рамках учебной программы Bionic Learning Network, которой компания Festo уделяет большое внимание, а уже затем развились в серию продуктов.

Адаптивный захват DHEF, предлагаемый компанией Festo, действует как язык хамелеона: он способен без необходимости в ручном управлении

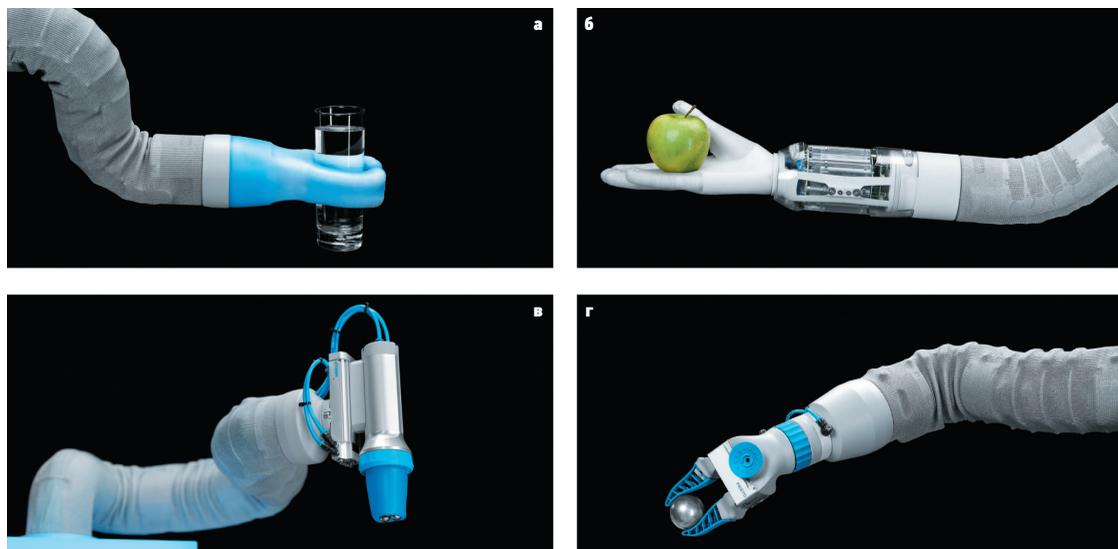


РИС. 5. ►
Возможные варианты
оснащения BionicSoftArm,
реализуемые благодаря
интерфейсу для
подключения различных
захватов: а) три или
четыре пальца захвата;
б) бионическая рука Bionic
SoftHand; в) адаптивный
захват формы DHEF;
г) адаптивный захват
DHAS

собирают, комплектовать, складывать в соответствующие емкости предметы самых разнообразных форм. Силиконовая насадка адаптивного захвата DHEF способна изгибаться и фиксировать предметы фактически любой формы [6], что позволяет точно адаптировать захват в соответствии с теми или иными потребностями. В отличие от механических захватов, способных работать лишь с ограниченным числом предметов, адаптивный захват DHEF весьма гибок. Он управляется даже с деталями свободной геометрической формы, а отсутствие острых краев делает DHEF оптимальным для захвата объектов, требующих особо бережного обращения.

DHAS поставляются как стандартные губки для захватов с удлиненным ходом или с индивидуальным креплением для захватных систем по условиям конкретного заказчика. Захват DHAS выполнен из мягкого материала — полиуретана, что отлично подходит для бережного захвата хрупких заготовок, при этом пальцы могут захватывать детали разной формы. В поперечном сечении ребра и кромки захвата образуют решетчатую структуру по принципу Fin Ray. Такие соединения, когда к ним приложено усилие, создают волнообразную форму, которая оптимально подходит для геометрического замыкания.

Для реализации прямого контакта между человеком и машиной пневматические роботы предлагают еще одно решающее преимущество — присущую им гибкость. Если привод заполнен сжатым воздухом, то создаваемое движение может быть точно задано с точки зрения скорости, силы и жесткости. В случае столкновения система автоматически отключается и, таким образом, не представляет опасности для людей.

Модульный манипулятор робота может применяться для самых разных применений, в зависимости от конструкции и установленного захвата. В структуре BionicSoftArm используются датчики AA700 FREERITCSH компании Sensitec, выполненные на основе анизотропного магнитосопротивления (AMP), энкодер EBI 1135 производства компании Heidenhain и датчики давления XFGM компании Fujikura. Благодаря своей гибкой кинематике и встроенным сенсорам BionicSoftArm может непосредственно и безопасно взаимодействовать с людьми. В то же время кинематика

облегчает адаптацию к различным задачам в разных местах в производственных условиях: устранение дорогостоящих защитных устройств, таких как защитные и световые барьеры, сокращает время преобразования производства и, таким образом, обеспечивает гибкое использование роботов, в полном соответствии с современными требованиями адаптивного и экономичного производства.

Бионическое плечо BionicSoftArm управляется интуитивно, с помощью роботизированного программного обеспечения. Графический интерфейс пользователя был разработан специально для бионических легких роботов Festo и впервые использовался в BionicCobot [1]. С помощью планшета пользователь может довольно легко обучить робота каким-либо действиям и установить их параметры. Определенные этапы работы могут быть организованы в срок в любом порядке по системе «перенести и положить». При этом полная последовательность движений виртуально изображается и моделируется одновременно.

Точное позиционирование достигается благодаря цифровой пневматике, что стало возможным благодаря Festo Motion Terminal VTEM. Благодаря внутренним алгоритмам управления приложениями движения и установленными пьезоклапанами можно точно дозировать скорости потока и давления, а также изменять их при любой настройке одновременно в нескольких каналах. Движения BionicSoftArm контролируются положением, что достигается с помощью модельного подхода. Каждая часть робота является моделью, а требуемые параметры либо рассчитываются, либо определяются с использованием идентификации параметров. Необходимые алгоритмы управления выполняются в режиме реального времени на Festo Motion Terminal. Состояние BionicSoftArm постоянно контролируется с помощью датчиков давления и абсолютного положения по всему роботу с помощью Festo Motion Terminal.

Интерфейсом между планшетом и Festo Motion Terminal является платформа с открытым исходным кодом ROS (Robot Operating System), на которой рассчитывается планирование пути кинематики. Кроме того, ROS интерпретирует входящий код

с планшета и передает полученные координаты оси в терминал движения. На основе этих координат и данных, поступающих с датчика, Festo Motion Terminal может контролировать соответствующее давление в пневматических приводах и, таким образом, определять положения отдельных сегментов и осей.

Также возможны дистанционные манипуляции с системой BionicSoftHand и BionicSoftArm. С помощью изображений с камеры, чувствительной к перспективе, рука робота может имитировать жесты и движения руки оператора и реагировать на них. Таким образом, роботом можно управлять и контролировать его движения с безопасного расстояния, например при работе с вредными веществами или при выполнении операций, которые могут привести к травмам. Кроме того, это открывает возможности для управления несколькими системами одновременно.

В будущем на производстве возникнет необходимость в более гибких установках и компонентах, которые независимо подстраиваются под соответствующий производимый продукт. Адаптируемые захваты, такие как BionicSoftHand, могут сыграть при этом немаловажную роль. Кроме того, возможность разрабатывать независимые стратегии решений сделает взаимодействие между человеком и машиной еще более интуитивным, простым и эффективным. Преимущества таких интеллектуальных систем заключаются еще и в том, что как только они получают блоки знаний и новые навыки, их можно легко распространять и предоставлять в глобальном масштабе. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Рентюк В. Человек + робот + искусственный интеллект: BionicWorkplace от компании Festo // Control Engineering Россия. 110Т. 2018.
2. BionicSoftHand Pneumatic robot hand with artificial intelligence. www.festo.com/net/SupportPortal/Files/597078/Festo_BionicSoftHand_en.pdf.
3. Faix V., Lückfeldt S., Ostertag A. Pneumatic robotics meets artificial intelligence. Bionic projects 2019.
4. Festo — BionicSoftHand. www.youtube.com/watch?v=5e0F14RxVc.
5. BionicSoftArm Modular pneumatic lightweight robot. www.festo.com/group/en/cms/13527.htm.
6. Festo — BionicSoftArm. www.youtube.com/watch?v=JbGhtpSfPmU.
7. www.festo.com/group/en/repo/assets/media/BionicSoftArm_de-en_720x405.mp4.