

УДК 681.586.326

doi: 10.18698/0536-1044-2021-3-29-38

Трехкомпонентный датчик силы на базе упругого силиконового элемента и магнитометра

П.А. Трунин¹, А.М. Мелешников², М.А. Соловьев³, А.А. Воротников³

¹ ООО «Фьючер Формс»

² ООО «Армопром»

³ ФГБОУ ВО «МГТУ» СТАНКИН»

Three-Component Force Measurement Sensor Based on an Elastic Silicone Element and a Magnetometer

P.A. Trunin¹, A.M. Meleshnikov², M.A. Solovyev³, A.A. Vorotnikov³

¹ ООО Future Forms

² ООО Armoprom

³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Moscow State Technological University “STANKIN”

Наличие силомоментного очувствления робототехнических систем позволяет повысить качество взаимодействия робота с объектами внешней среды. Существует много способов обеспечения силомоментного очувствления, одним из которых является применение многокомпонентных датчиков силы. Однако их стоимость довольно высока, поэтому актуально проводить разработку более выгодных технических решений. В связи с этим создан трехкомпонентный датчик силы, построенный на основе упругого силиконового элемента (со встроенным постоянным магнитом) и магнитометра на эффекте Холла. Такое техническое решение является бюджетным. Описан технологический процесс производства трехкомпонентного датчика силы, основанный на 3D-печати корпуса фотополимерным принтером (что делает его производство дешевым) и литье двухкомпонентного силикона. Рассмотрен процесс пайки SMD-компонентов на платы с помощью паяльного фена, трафаретов и паяльной пасты. Показан стенд для калибровки изготовленных датчиков, состоящий из микрометрических винтов и деталей, напечатанных на 3D-принтере FDM. Математический аппарат для калибровки основан на методе наименьших квадратов. Приведены результаты калибровки трехкомпонентного датчика силы. Созданный датчик имеет следующие характеристики: разрешающая способность — 1 мН, чувствительность — 0,005 Тл/Н.

Ключевые слова: магнитометр на эффекте Холла, упругий силиконовый элемент, трехкомпонентный датчик силы, силомоментное очувствление, калибровка датчика

The presence of force-moment sensing of robotic systems makes it possible to improve the quality of the interaction between the robot and the objects of the external environment. There are many ways to provide force-moment sensing, one of which is to use multicomponent force sensors. However, their cost is quite high, so it is important to search and develop more profitable technical solutions. In this regard, a three-component force measurement sensor was developed, built on the basis of an elastic silicone element, with a built-in permanent magnet, and a hall-effect magnetometer. This technical solution is low-cost. The paper describes the technological process for the production of a three-component force measurement sensor, based on 3D printing of the body with an FDM printer, which makes it cheap to manufacture, and molding of two-component silicone. The paper considers the process of soldering SMD components to boards using a soldering hair dryer, stencils and solder paste, and shows a stand for calibrating the manufactured sensors, consisting of mi-

crometric screws and parts printed on an FDM 3D printer. The mathematical method for calibration is based on the least squares method. The result of calibration of a three-component force measurement sensor is given. The research results in the development of a working sensor with the following characteristics: resolution — 1 mN, sensor sensitivity — 0.005 T/N.

Keywords: hall-effect magnetometer, elastic silicone element, three-component force measurement sensor, force-moment sensing, sensor calibration

В настоящее время проводится большое число исследований по применению силомоментного и тактильного оцувствления в робототехнике. Тактильные и силомоментные датчики позволяют роботам взаимодействовать с людьми и окружающей средой, повышая их способность к сложным манипуляциям.

Силомоментные датчики, получившие широкое распространение в медицине [1–5], обеспечивают повышение безопасности функционирования робототехнических систем и понимание сил, возникающих при взаимодействии медицинских инструментов с тканями пациента при проведении хирургических операций.

Наличие силомоментного оцувствления позволяет добиться наилучших результатов при калибровке роботов [6, 7], что особенно важно для механообработки [8–10]. Применение силомоментных датчиков в механообрабатывающих роботизированных системах делает более точной обработку деталей и улучшает качество производимых изделий.

Благодаря силомоментному оцувствлению повышается точность работы узлов исполнительных механизмов [11, 12]. Большая часть работ, связанных с силомоментным оцувствлением, приходится на специальное машиностроение [13].

В зависимости от типа чувствительных элементов (ЧЭ) и происходящих физических явлений датчики силы (ДС) бывают резистивными; емкостными; магнитными; пьезоэлектрическими и др.

Резистивные ДС являются наиболее распространенными. Более 95 % всех ДС — резистивные, что обусловлено их достоинствами: широким диапазоном воспринимаемых усилий и линейностью статической характеристики.

При деформации материала (проводника или полупроводника) изменяется его электрическое сопротивление. Это явление, открытое в 1856 г. английским физиком Уильямом Томсоном, лордом Кельвином, получило название тензоэффекта. На нем и основаны резистивные ДС [14–16].

Емкостные ДС состоят из двух параллельных проводящих пластин (электродов), между которыми находится слой диэлектрика. Таким образом, образуется конденсатор, емкость которого приближенно можно рассчитать по формуле

$$\Delta C = C_0 - C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{A_0}{d_0} - \frac{A}{d} \right),$$

где C_0 и C — начальная и конечная электрические емкости; ε_0 — электрическая постоянная; ε_r — диэлектрическая проницаемость материала между проводящими пластинами; A_0 и A — начальная и конечная площади перекрытия электродов; d_0 и d — начальное и конечное расстояния между электродами [17].

Пьезоэлектрические ДС построены на использовании прямого пьезоэффекта. Под действием приложенной внешней силы к пьезоэлектрическому материалу возникает электрическое напряжение между поверхностями деформируемого тела.

Такой ДС состоит из трех групп, содержащих по два ЧЭ из пьезоэлектрической керамики. Пара ЧЭ в каждой группе имеет одинаковое направление поляризации. Группа ЧЭ находится в поджатом состоянии между верхней и нижней крышкой корпуса. Прижатие ЧЭ осуществляется с помощью четырех винтов. Медные прокладки с контактами предназначены для подключения ЧЭ к плате с усилителями сигналов [18].

Магнитные ДС основаны на обратном магнитострикционном эффекте, заключающемся в том, что под действием внешней силы ферромагнитный материал деформируется. При этом меняются не только его геометрические параметры, но и магнитные свойства, вследствие чего пропорционально изменяются магнитное сопротивление и индуктивность катушки.

Это явление получило название магнитоупругого эффекта. К ферромагнитному сердечнику с размещенной на нем катушкой индуктивности приложена сила, под действием кото-

рой изменяется индуктивность катушки. При падении индуктивного сопротивления катушки уменьшается амплитуда переменного тока, протекающего через нее. Данные о силе можно получить из падения напряжения на нагрузочном сопротивлении [19].

Каждый тип ДС имеет свои достоинства и недостатки. Как правило, резистивные, емкостные, пьезоэлектрические/пьезорезистивные датчики имеют высокое разрешение и рабочие характеристики. Однако для измерения сил по различным направлениям такие многокомпонентные ДС дороги и сложны в изготовлении.

Поэтому перспективно заниматься разработкой более дешевых, экономически эффективных многокомпонентных ДС для робототехнических и мехатронных систем. В данной работе рассмотрен процесс разработки контактного датчика, основанного на эффекте Холла.

Цель работы — разработка бюджетного тактильного трехкомпонентного ДС.

Описание трехкомпонентного ДС на основе магнитометра. Разрабатываемый ДС состоит из трехкомпонентного магнитометра 4 и упругого силиконового элемента 3, в котором зафиксирован магнит 2. Как показано на рис. 1, под действием внешней силы (нормальной F_z или боковой F_x, F_y), приложенной к поверхности упругого силиконового элемента, магнит перемещается на некоторое расстояние.

Измеряя вектор магнитного поля I с помощью трехкомпонентного магнитометра, можно определять перемещения магнита в пространстве. Сила, приложенная к датчику, вычисляется исходя из механических свойств упругого силиконового элемента [20]. Схема, поясняя

ющая принцип работы трехкомпонентного ДС, приведена на рис. 1.

Современные магнитометры позволяют измерять с помощью эффекта Холла магнитное поле в пространстве трех координат. При этом они представляют собой миниатюрный чип с габаритными размерами $3 \times 3 \times 0,8$ мм, низким потреблением мощности (от 100 мкВт до 10 мВт), цифровыми выходами (I2C или SPI) и встроенным датчиком температуры для компенсации температурного дрейфа.

К наиболее популярным датчикам Холла относятся MLX90393 (Melexis, Ieper, Бельгия), TLV493D-A1B6 (Infineon, Neubiberg, Германия) и AS54XX (ams, Premstaetten, Австрия). Для разработки ДС выбран магнитометр MLX90393 [21].

Чтобы обеспечить корректную работу, упругий элемент должен обладать высокой магнитной проницаемостью, которая позволит использовать относительно слабый магнит. Для проверки проведено моделирование, результаты которого показали, что различия магнитных проницаемостей силикона и воздуха крайне малы и не влияют на работу ДС. Благодаря расстоянию от элемента Холла до магнита даже слабый магнит позволяет точно считывать внешние физические воздействия на силикон, однако необходимо выбрать оптимальные параметры магнита.

При изменении положений магнитов во время увеличения расстояния от магнита до магнитометра сильно уменьшаются составляющая магнитной индукции B_z и плотность магнитного поля. Наиболее близкое положение от датчика до магнита ограничено максимально считываемой плотностью магнитного поля, чтобы избежать перенасыщения магнитометра.

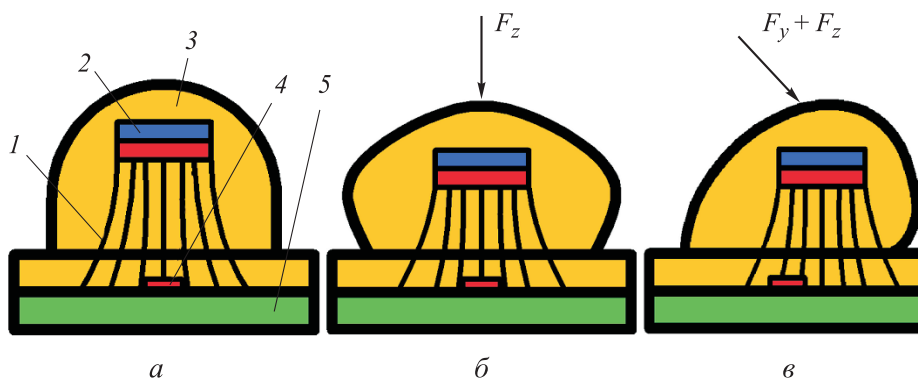


Рис. 1. Схема, поясняющая принцип работы трехкомпонентного ДС без нагрузки (а), под действием силы F_z (б) и сил $F_y + F_z$ (в):

1 — магнитное поле; 2 — магнит; 3 — упругий силиконовый элемент; 4 — трехкомпонентный магнитометр; 5 — плата

Следовательно, необходимо учитывать начальное и конечное положения магнита в силиконе.

Для имплементации данного решения в виде готового устройства разработан корпус, состоящий из пластиковых деталей (основания и крышки), электронной платы с магнитометром и силиконового наконечника с магнитом внутри. Вся конструкция скреплена винтовыми соединениями.

Технологический процесс изготовления многокомпонентного ДС. Такой датчик включает в себя пластиковый корпус, магнит, силиконовый упругий элемент, печатную плату с датчиком Холла и другие электронные компоненты.

Первый этап производства ДС — печать корпусных деталей. Пластиковый корпус и крышку печатают на фотополимерном принтере Anycubic Photon S. Выбор принтера и материалов обусловлен стоимостью, которая во много раз меньше, чем у FDM-принтеров, а также скоростью печати и качеством готовых деталей. Фотополимерный принтер печатает корпус датчика в среднем десять минут, а FDM-принтер — один час. При этом фотополимерный принтер печатает детали лучшего качества, не требующие постобработки.

Второй этап производства ДС — литье двухкомпонентного силикона. В процессе литья внутри упругого элемента необходимо разместить магнит, поэтому литье силикона осуществляют в два этапа. При литье используют двухкомпонентную форму с основанием, содержащим сферическую полость. Верхняя часть состоит из платформы с цилиндрическими элементами. Четыре угловых элемента служат для позиционирования центрального относительно сферической полости основания.

При литье силикон принимает форму сферы с глухим отверстием в центре. После отверждения магнит помещают в отверстие и заливают силиконом сверху без использования разделяющей жидкости. При конечном отверждении упругий элемент получается целостным.

Третий этап производства ДС — пайка элементов по предварительно заготовленной модели. Была разработана электрическая схема платы, на основе которой проводилась пайка. Процесс пайки осуществляется с помощью трафаретов и специализированных кондукторов. Панель с платами закрепляют на кондукторе, после чего посредством трафарета на нее наносится паяльная паста.



Рис. 2. Внешний вид трехкомпонентного ДС в сборе

Четвертый этап производства — установка SMD-компонентов и термическая обработка панели. Коннектор, не являющийся SMD-компонентом, запаивается вручную с помощью паяльной станции.

Пятый этап производства — сборка всех частей в готовый продукт (рис. 2). В основание вставляют плату с коннектором, на которую сверху устанавливают крышку с заранее приклеенным силиконовым наконечником, после чего всю конструкцию скрепляют винтовыми соединениями. При сборке используют винты M2, благодаря которым датчик можно установить на робототехническое устройство.

Калибровка трехкомпонентного ДС. По мере удаления постоянного магнита от датчика на эффекте Холла магнитное поле ослабевает по нелинейной зависимости, поэтому значение силы также меняется нелинейно. Это обуславливает необходимость использовать методы нелинейной аппроксимации, а также проводить калибровку датчика сканированием в широком диапазоне значений магнитного поля с целью получения стабильных силовых показателей. Для осуществления калибровки ДС разработан ручной стенд калибровки, 3D-модель которого приведена на рис. 3.

Стенд состоит из двух микрометрических винтов, закрепленных на общем корпусе. Расположенный в основании двухкомпонентный микрометрический винт 1 обеспечивает перемещение калибруемого ДС 2 по осям x и y , а вертикально расположенный однокомпонентный микрометрический винт 5 — смещение датчика по оси z , а следовательно, и усилия по оси z . Под воздействием варьируемого вертикального усилия калибруемый ДС сдвигается в плоскости xy на заданное расстояние, что создает трехкомпонентную силу.

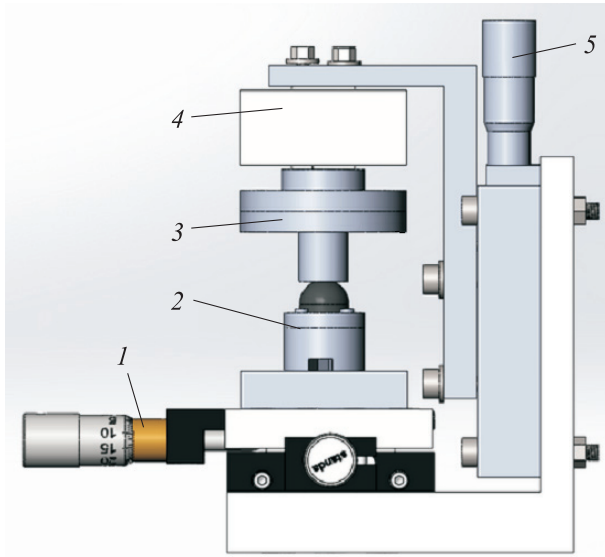


Рис. 3. 3D-модель станда калибровки:
 1 и 5 — двух- и однокомпонентные микрометрические винты;
 2 и 4 — калибруемый и эталонный ДС;
 3 — пластиковый переходник

Магнит под данными усилиями смещается вместе с магнитным полем. Перемещение магнитного поля считывается датчиком Холла и с помощью программного обеспечения преобразуется в силу. Полученное значение силы сравнивается с таковым для эталонного ДС 4.

Смоделированные компоненты станда напечатали на 3D-принтере из жесткого пластика. Эти компоненты заранее проверили на восприятие необходимых усилий, так как при возможных отклонениях от начальной формы под действием возникающей в контактах силы могут образовываться дополнительные нелинейные характеристики, что делает стенд калибровки неработоспособным.

Для станда разработано специализированное программное обеспечение, которое в процессе калибровки снимает значения с эталонного и калибруемого датчиков, сопоставляя их с привязкой по времени. Далее на базе алгоритмов параметрической нелинейной аппроксимации программа генерирует матрицу калибровки, которая впоследствии используется для преобразования значений датчика в значения прикладываемых к нему усилий.

Анализ результатов исследований показывает, что взаимосвязь между магнитным полем и прикладываемой силой является нелинейной. Эта взаимосвязь описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} F_z = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^k C_{zj} B_z^i B_r^{k-i}; \\ F_r = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^k C_{rj} B_z^i B_r^{k-i}, \end{cases}$$

где F_z — сила, приложенная по оси z ; F_r — радиальная составляющая силы; n — постоянная, используемая для определения степени многочлена и изменяемая в зависимости от требуемой точности; C_{zj} и C_{rj} — коэффициенты многочлена для сил F_z и F_r ; B_z и B_r — составляющие магнитной индукции.

При поиске наилучших коэффициентов применяли метод наименьших квадратов. При калибровке ДС использовали многочлен третьей степени. При этом уравнение принимало вид

$$[F_r \ F_z] = [C_{r1} \dots C_{r10} \ C_{z1} \dots C_{z10}] \times \\ \times [1 \ B_z \ B_r \ B_z^2 \ B_z \ B_r \ B_r^2 \ B_z^3 \ B_z^2 \ B_r \ B_z \ B_r^3 \ B_r^2]^T.$$

Для определения коэффициентов C_{zj} и C_{rj} необходимо экспериментально получить значения силы и магнитной индукции как минимум в десяти точках. При этом диапазон значений должен быть максимально широким, чтобы обеспечить проверку калибровки во всех областях работы ДС.

Найденная радиальная составляющая F_r приложенной силы преобразуется в силы, действующие по осям x F_x и y F_y следующим образом:

$$F_x = \frac{B_x}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} F_r; \quad F_y = \frac{B_y}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} F_r.$$

где B_x и B_y — составляющие магнитной индукции по осям x и y .

В результате описанных преобразований полученные данные можно представить как систему

$$\begin{cases} D = f_1(B); \\ F = f_2(D), \end{cases}$$

где D — перемещение магнита; B — магнитная индукция; F — приложенная к упругому элементу сила [22, 23].

Сбор и обработка экспериментальных данных. Для определения коэффициентов полиномиальной аппроксимации собраны данные по эталонной силе, возникающей от перемещения упругого датчика в стенде калибровки, а также данные изменения магнитного поля. Количество данных составило 24 точки.

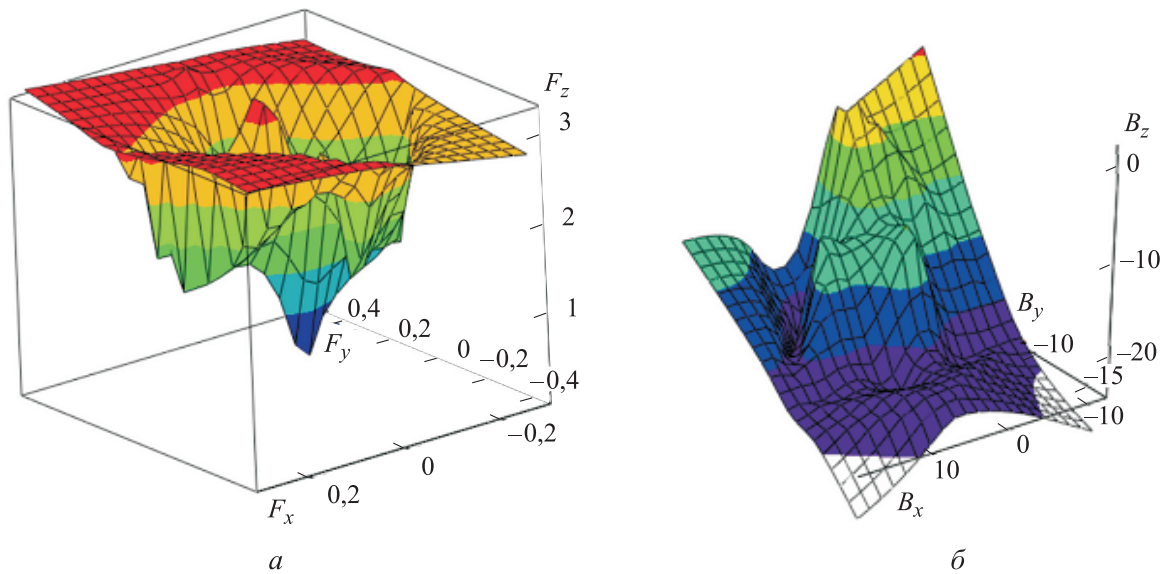


Рис. 4. Значения действующих на ДС эталонных сил (а) и соответствующие им значения магнитной индукции (б)

Запись координат точек приложения силы осуществлялась последовательно от малого значения F_z (0,5 Н) до большого (3,0 Н), при этом значения сил F_x и F_y составляли около 1 Н. Значения действующих на ДС эталонных сил показаны на рис. 4, а, а соответствующие им значения магнитной индукции — на рис. 4, б.

Найденные коэффициенты аппроксимации C_{zj} и C_{rj} позволили преобразовать считываемые значения магнитной индукции в значения измеряемой датчиком силой. Отклонения измеренных во время калибровки значений эталонной силы от значений силы, полученных с помощью разработанного ДС и математиче-

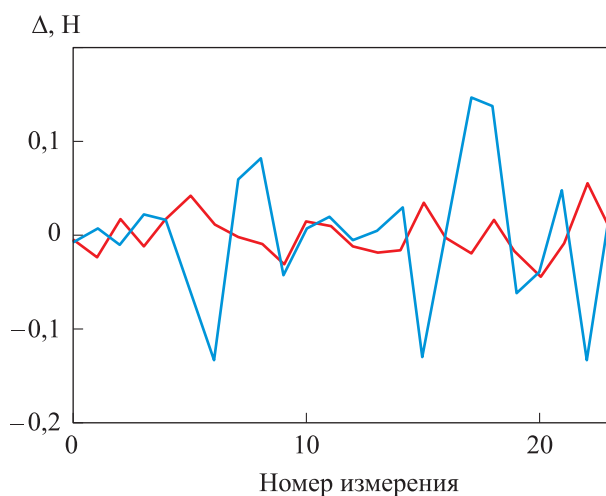


Рис. 5. Отклонения Δ измеренных эталонных сил от сил, полученных с помощью разработанного ДС

ской модели, показаны на рис. 5. Синим цветом показаны отклонения для составляющей силы F_x , красным — для составляющей силы F_z .

Как видно из рис. 5, у составляющей F_x максимальное отклонение равно 0,147 Н, а у составляющей F_z — 0,057 Н. Таким образом, максимальная относительная погрешность для силы F_x составляет 14,7 %, для F_z — 5,7 %. Средняя относительная погрешность во всем диапазоне измерений для составляющей F_x равна 5,1 %, для F_z — 0,8 %, что свидетельствует о качественной работе предлагаемого ДС.

Сравнение разработанного ДС с аналогами по цене и техническим характеристикам. Трехкомпонентный ДС занимает уникальную нишу на рынке, так как может конкурировать с аналогами как в сегменте любительской и образовательной электроники, так и в сегменте профессионального оборудования. Разрешающая способность ДС составляет 1 мН, чувствительность — 0,005 Тл/Н. К достоинствам разработанного ДС также относятся простота изготовления и применения.

Самые распространенные ДС, основанные на использовании резистивных методов, в любительской и образовательной электронике дают возможность ввода аналоговой информации только по одной оси. Датчики, предназначенные для применения в любительских и полупрофессиональных проектах, используются вместе с контроллерами Arduino или Raspberry.

Сравнение показателей датчиков

Показатель	Micro Load Cell	Capacitive Force Sensor 8 mm 10N	K3D40	Разработанный датчик
Количество осей	1	1	3	3
Диапазон измерения силы, Н:				
F_z	10,0	10,0	10,0	10,0
F_y	–	–	2,0	2,5
F_x	–	–	2,0	2,5
Класс точности, %	–	–	0,5	2,5
Интерфейс	SPI	I ² C	–	SPI/I ² C
Габаритные размеры, мм	35×12×4	58×8×0,35	40×40×20	20×20×35
Масса, г	3,2	1,83	85,0	35,0
Цена, руб.	580	1400...5500	80 000...100 000	Около 3000
Наименьший срок поставки, дни	28	28	63	3

Разработанный ДС имеет три компоненты измерения силы, что обеспечивает ему значительное преимущество перед аналогами.

Для сравнения в таблице приведены технические, ценовые и временные показатели разработанного ДС, а также одного профессионального ДС K3D40 (производства Phidgets) и двух любительских ДС Micro Load Cell (Single Tact) и Capacitive Force (Me-Systems).

В отличие от любительской и образовательной электроники, в профессиональной существует широкий выбор трехкомпонентных ДС, используемых в промышленности и науке.

Несмотря на то, что у разработанного трехкомпонентного ДС даже в более точном исполнении показатели точности немного ниже, чем у профессиональных датчиков, он может конкурировать с ними благодаря значительно более низкой стоимости.

Для решения ряда реальных задач показатели точности профессиональных дорогостоящих

датчиков являются избыточными, однако их используют из-за отсутствия альтернативы.

Выводы

1. Разработан и изготовлен в различных модификациях трехкомпонентный ДС. Датчик имеет высокую чувствительность, что позволяет ему измерять малейшие усилия. Разрешающая способность ДС составляет 1 мН, чувствительность — 0,005 Тл/Н.

2. Смоделированные в процессе работы взаимодействия силиконов с различными физическими свойствами дают возможность создать линейки датчиков с различными характеристиками.

3. Основными достоинствами трехкомпонентного ДС являются высокая чувствительность, простота изготовления и использования.

Литература

- [1] Янушевич О.О., Базикян Э.А., Чунихин А.А., Воротников А.А., Климов Д.Д., Подураев Ю.В. *Роботизированный мультифункциональный лазерный хирургический комплекс*. Патент 2693216 С1 РФ, бюл. № 19, 2019.
- [2] Мелешников А.М., Воротников А.А., Климов Д.Д., Подураев Ю.В. Концепция прототипа рабочего органа робототехнической системы разрезания для определения контакта с десной в хирургической стоматологии. *СТИН*, 2019, № 8, с. 31–33.
- [3] Климов Д.Д., Воротников А.А., Соловьев М.А., Подураев Ю.В., Гринь А.А., Крылов В.В. Медицинская робототехника для нейрохирургии. *Вестник МГТУ Станкин*, 2019, № 1(48), с. 32–37.
- [4] Базикян Э.А., Чунихин А.А., Янушевич О.О., Подураев Ю.В., Буйнов М.А., Климов Д.Д., Воротников А.А. *Лазерная роботизированная медицинская установка*. Патент 172817 U1 РФ, бюл. № 21, 2017.

- [5] Буйнов М.А., Воротников А.А., Климов Д.Д., Малышев И.Ю., Миронов В.А., Парфенов В.А., Перейра Ф.Д.Д.С., Подураев Ю.В., Хесуани Ю.Д. Роботические технологии в медицине и биопринтинге: состояние проблемы и современные тенденции. *Вестник МГТУ Станкин*, 2017, № 1(40), с. 127–131.
- [6] Vorotnikov A., Bashevskaya O., Plyukhin Y., Romash E., Isaev A.V., Poduraev Y. Geometrical Approach for Industrial Robot Axis Calibration Using Laser Tracker. *Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium*, Vienna, Austria, Published by DAAAM International, 2016, pp. 0897–0904, doi: 10.2507/26th.daaam.proceedings.125
- [7] Воротников А.А., Подураев Ю.В., Ромаш Е.В. Оценка погрешности определения центров вращения звеньев кинематической цепи для методики калибровки промышленных роботов. *Измерительная техника*, 2015, № 8, с. 23–28.
- [8] Гречишников В.А., Исаев А.В., Пивкин П.М., Илюхин Ю.В., Воротников А.А., Колесниченко Р.В., Бьянки Д.Д., Леонезио М. Инструментальные решения для роботизированного фрезерования. *Вестник МГТУ Станкин*, 2017, № 4(43), с. 73–78.
- [9] Гречишников В.А., Илюхин Ю.В., Исаев А.В., Колесниченко Р.В., Пивкин П.М., Воротников А.А., Бьянки Д.Д., Педрокки П. Повышение точности и производительности роботизированного фрезерования на основе траекторно-импедансного управления. *Вестник МГТУ Станкин*, 2016, № 4(39), с. 8–16.
- [10] Гречишников В.А., Исаев А.В., Илюхин Ю.В., Пивкин П.М., Воротников А.А., Харченко А.Н., Бьянки Д.Д., Леонезио М., Педрокки Н., Тосатти Л.М. Концепция построения робототехнических комплексов для металлообработки и системы их инструментального обеспечения. *Вестник МГТУ Станкин*, 2015, № 4(35), с. 46–51.
- [11] Plyukhin Y.V., Poduraev Y.V. Improving the precision of mechatronic robot drives. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 4, pp. 328–334, doi: 10.3103/S1068798X16040067
- [12] Илюхин Ю.В., Подураев Ю.В. Повышение точности мехатронных приводов технологических роботов. *СТИН*, 2015, № 9, с. 30–37.
- [13] Гойдин О.П., Кураев Е.В., Подураев Ю.В. Робототехнический комплекс с силомоментным оучувствлением для демонтажных работ. *Вестник МГТУ Станкин*, 2015, № 1(32), с. 78–82.
- [14] Baki P., Szekely G., Kosa G. Miniature tri-axial force sensor for feedback in minimally invasive surgery. *4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronic, IEEE*, 2012, pp. 805–810, doi: 10.1109/BioRob.2012.6290770
- [15] Yu L., Yan Y., Li C., Zhang X. Three-dimensional nonlinear force-sensing method based on double microgrippers with E-type vertical elastomer for minimally invasive robotic surgery. *Robotica*, 2018, vol. 36, iss. 6, pp. 865–881, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574718000085>
- [16] Мехеда В.А. *Тензометрический метод измерения деформаций*. Самара, Изд-во СГАУ, 2011. 57 с.
- [17] Kim U., Kim Y.B., Seok D.-Y., So J., Choi H.R. A Surgical Palpation Probe with 6-Axis Force/Torque Sensing Capability for Minimally Invasive Surgery. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, pp. 2755–2765, doi: 10.1109/TIE.2017.2739681
- [18] Yu Hui Feng. Development of a Force Sensor Prototype for Medical Devices. *Journal of Medical Devices*, 2016, vol. 10, pp. 1–2, doi: 10.1115/1.4033221
- [19] Илюхин Ю.В., Зеленский А.А. *Информационные устройства в мехатронике и робототехнике*. Москва, МГТУ Станкин, 2018. 264 с.
- [20] Wang H., De Boer G., Kow J., Alazmani A., Ghajari M., Hewson R., Culmer P. Design Methodology for Magnetic Field-Based Soft Tri-Axis Tactile Sensors. *Sensors*, 2016, no. 16, 1356, doi: 10.3390/s16091356
- [21] *MLX90393 DataSheet*. URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/5/7/7/MLX90393-Datasheet-Melexis.PDF (дата обращения 10 Мая 2020).
- [22] Camacho J., Sosa V. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. *Revista Mexicana de Fisica E*, 2013, vol. 59, pp. 8–17.
- [23] Loweth E., De Boer G., Toropov V. Practical recommendations on the use of moving least squares metamodel building. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, 6–9 September 2011, Crete, Greece, 2011, pp. 1–18, doi: 10.4203/ccp.96.150

References

- [1] Yanushevich O.O., Bazikyan E.A., Chunikhin A.A., Vorotnikov A.A., Klimov D.D., Podurayev Yu.V. *Robotizirovannyi mul'tifunktional'nyy lazernyy khirurgicheskiy kompleks* [Robotic multifunctional laser surgical complex]. Patent no. RU2693216 C1, 2019.
- [2] Meleshnikov A.M., Vorotnikov A.A., Klimov D.D., Podurayev Yu.V. Concept of a prototype of the working organ of a robotic cutting system for determining contact with the gum in surgical dentistry. *STIN*, 2019, no. 8, pp. 31–33 (in Russ.).
- [3] Klimov D.D., Vorotnikov A.A., Solov'yev M.A., Podurayev Yu.V., Grin' A.A., Krylov V.V. Medical robotics for neurosurgery. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2019, no. 1(48), pp. 32–37 (in Russ.).
- [4] Bazikyan E.A., Chunikhin A.A., Yanushevich O.O., Podurayev Yu.V., Buynov M.A., Klimov D.D., Vorotnikov A.A. *Lazernaya robotizirovannaya meditsinskaya ustanovka* [Laser robotic medical device]. Patent no. RU 172817 U1, 2017.
- [5] Buynov M.A., Vorotnikov A.A., Klimov D.D., Malyshev I.Yu., Mironov V.A., Parfenov V.A., Pereyra F.D.D.S., Podurayev Yu.V., Khesuani Yu.D. Robotic technologies in medicine and bioprinting: the state of the problem and modern trends. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2017, no. 1(40), pp. 127–131 (in Russ.).
- [6] Vorotnikov A., Bashevskaya O., Ilyukhin Y., Romash E., Isaev A.V., Poduraev Y. Geometrical Approach for Industrial Robot Axis Calibration Using Laser Tracker. *Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium*, Vienna, Austria, Published by DAAAM International, 2016, pp. 0897–0904, doi: 10.2507/26th.daaam.proceedings.125
- [7] Vorotnikov A.A., Poduraev Y.V., Romash E.V. Estimation of error in determining the centers of rotation of links in a kinematic chain for industrial robot calibration techniques. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 8, pp. 864–871, doi: 10.1007/s11018-015-0809-9
- [8] Grechishnikov V.A., Isayev A.V., Pivkin P.M., Ilyukhin Yu.V., Vorotnikov A.A., Kolesnichenko R.V., B'yanki D.D., Leonezio M. Cutting tool solutions for robotic milling. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2017, no. 4(43), pp. 73–78 (in Russ.).
- [9] Grechishnikov V.A., Ilyukhin Yu.V., Isayev A.V., Kolesnichenko R.V., Pivkin P.M., Vorotnikov A.A., B'yanki D.D., Pedrokki P. Increase of accuracy and performance of robotic milling based on trajectory-impedance control. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2016, no. 4(39), pp. 8–16 (in Russ.).
- [10] Grechishnikov V.A., Isayev A.V., Ilyukhin Yu.V., Pivkin P.M., Vorotnikov A.A., Kharchenko A.N., B'yanki D.D., Leonezio M., Pedrokki N., Tosatti L.M. Building principles of robotic machining systems and their cutting tool system. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2015, no. 4(35), pp. 46–51 (in Russ.).
- [11] Ilyukhin Y.V., Poduraev Y.V. Improving the precision of mechatronic robot drives. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 4, pp. 328–334, doi: 10.3103/S1068798X16040067
- [12] Ilyukhin Yu.V., Podurayev Yu.V. Improving the accuracy of mechatronic drives of technological robots. *STIN*, 2015, no. 9, pp. 30–37 (in Russ.).
- [13] Goydin O.P., Kurayev E.V., Podurayev Yu.V. Robotic complex with force-torque sensing for demounting operations. *Vestnik MGTU STANKIN*, 2015, no. 1(32), pp. 78–82 (in Russ.).
- [14] Baki P., Szekely G., Kosa G. Miniature tri-axial force sensor for feedback in minimally invasive surgery. *4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, IEEE*, 2012, pp. 805–810, doi: 10.1109/BioRob.2012.6290770
- [15] Yu L., Yan Y., Li C., Zhang X. Three-dimensional nonlinear force-sensing method based on double microgrippers with E-type vertical elastomer for minimally invasive robotic surgery. *Robotica*, 2018, vol. 36, iss. 6, pp. 865–881, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574718000085>
- [16] Mekheda V.A. *Tenzometricheskiy metod izmereniya deformatsiy* [Strain gauge method for measuring deformations]. Samara, SGAU publ., 2011. 57 p.
- [17] Kim U., Kim Y.B., Seok D.-Y., So J., Choi H.R. A Surgical Palpation Probe with 6-Axis Force/Torque Sensing Capability for Minimally Invasive Surgery. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, pp. 2755–2765, doi: 10.1109/TIE.2017.2739681
- [18] Yu Hui Feng. Development of a Force Sensor Prototype for Medical Devices. *Journal of Medical Devices*, 2016, vol. 10, pp. 1–2, doi: 10.1115/1.4033221

- [19] Plyukhin Yu.V., Zelenskiy A.A. *Informatsionnyye ustroystva v mekhatronike i robototekhnike* [Information devices in mechatronics and robotics]. Moscow, MSTU STANKIN, 2018. 264 p.
- [20] Wang H., De Boer G., Kow J., Alazmani A., Ghajari M., Hewson R., Culmer P. Design Methodology for Magnetic Field-Based Soft Tri-Axis Tactile Sensors. *Sensors*, 2016, no. 16, 1356, doi: 10.3390/s16091356
- [21] *MLX90393 DataSheet*. Available at: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/5/7/7/MLX90393-Datasheet-Melexis.PDF (accessed 10 May 2020).
- [22] Camacho J., Sosa V. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. *Revista Mexicana de Fisica E*, 2013, vol. 59, pp. 8–17.
- [23] Loweth E., De Boer G., Toropov V. Practical recommendations on the use of moving least squares metamodel building. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, 6–9 September 2011, Crete, Greece, 2011, pp. 1–18, doi: 10.4203/ccp.96.150

Статья поступила в редакцию 05.10.2020

Информация об авторах

ТРУНИН Петр Алексеевич — инженер. ООО «Фьючер Формс» (127018, Москва, Российская Федерация, ул. Суцневский Вал, д. 9, стр. 6, офис 2, e-mail: patrunin@miem.hse.ru).

МЕЛЕШНИКОВ Андрей Михайлович — инженер КИПиА. ООО «Армопром» (354003, Краснодарский край, Сочи, Российская Федерация, ул. 60 лет ВЛКСМ, д. 11, офис 32, e-mail: andreymeleshnikov@gmail.com).

СОЛОВЬЕВ Михаил Александрович — аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника». ФГБОУ ВО «МГТУ» СТАНКИН» (127055, Москва, Российская Федерация, Вадковский переулок, д. 3А, e-mail: mikke2@yandex.ru).

ВОРОТНИКОВ Андрей Александрович — преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника». ФГБОУ ВО «МГТУ» СТАНКИН» (127055, Москва, Российская Федерация, Вадковский переулок, д. 3А, e-mail: aavorotnikov90@gmail.com).

Information about the authors

TRUNIN Petr Alekseevich — Engineer. ООО Future Forms (127018, Moscow, Russian Federation, Sushchovskiy Val St., Bldg. 9, Block 6, Office 22, e-mail: patrunin@miem.hse.ru).

MELESHNIKOV Andrey Mikhaylovich — Control & Instrumentation Engineer. ООО Armoprom (354003, Krasnodar region, Sochi, Russian Federation, 60 Let VLKSM St., Bldg. 11, Office 32, e-mail: andreymeleshnikov@gmail.com).

SOLOVYEV Mikhail Aleksandrovich — Postgraduate, Department of Robotics and Mechatronics. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Moscow State Technological University “STANKIN” (127055, Moscow, Russian Federation, Vadkovskiy Pereulok, Bldg. 3A, e-mail: mikke2@yandex.ru).

VOROTNIKOV Andrey Aleksandrovich — Lecturer, Department of Robotics and Mechatronics. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Moscow State Technological University “STANKIN” (127055, Moscow, Russian Federation, Vadkovskiy Pereulok, Bldg. 3A, e-mail: aavorotnikov90@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Трунин П.А., Мелешников А.М., Соловьев М.А., Воротников А.А. Трехкомпонентный датчик силы на базе упругого силиконового элемента и магнитометра. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 3, с. 29–38, doi: 10.18698/0536-1044-2021-3-29-38

Please cite this article in English as:

Trunin P.A., Meleshnikov A.M., Solovyev M.A., Vorotnikov A.A. Three-Component Force Measurement Sensor Based on an Elastic Silicone Element and a Magnetometer. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 3, pp. 29–38, doi: 10.18698/0536-1044-2021-3-29-38