

Тензодатчики и тензорезисторы для вендинговых аппаратов и современной РЭА

Андрей Ласорла

В статье описан принцип работы тензорезисторов как перспективных радиоэлементов для разработки контрольно-измерительной техники. На основе имеющихся примеров предложен обзор разных типов тензодатчиков, обоснованы перспективы разработок РЭА в метрологической отрасли, что очень важно в условиях импортозамещения.

В современной электронике как элементы датчиков перемещений, и особенно деформаций, широко применяют тензорезисторы. В основе их работы лежит тензоэффект – способность некоторых материалов менять электрическое сопротивление при деформировании (сжатии, скручивании, растяжении), а также закономерности деформации упругого тела, открытые в XVII веке Робертом Гуком и описанные как закон Гука. Тензорезисторы (от лат. *tensus* – напряжённый и лат. *resisto* – сопротивляюсь), по сути, – это резистор с изменяемым в зависимости от механической деформации рабочей поверхности сопротивлением. Таково «официальное» определение. Полезный функционал тензорезисторов стал востребован после открытия эффекта изменения удельного сопротивления металлического проводника под действием всестороннего сжатия (гидростатического давления) в 1856 г. Кельвином и в 1881 г. О.Д. Хвольсоном. Пионерами в практических измерениях деформаций были Е.Е. Симмонс (Калифорнийский технологический институт) и Л.С. Руже (Массачусетский технологический институт). В 1938 г. они применили образцы тензорезистора с монтажом на клеевой основе. Это были прототипы распространённых в современном мире тензорезисторов различного назначения.

Однако технологии производства как отдельных элементов, так и датчиков из нескольких тензорезисторов претерпевали изменения. Первые тензорезисторы изготавливались из константана, никеля, нихрома,

а современные производятся с участием полупроводников – кремния, арсенида галлия и др. Тензочувствительность полупроводниковых датчиков в 50...100 раз больше, чем у «металлических» анахронизмов эпохи. Так, сопротивление проволочных датчиков составляет десятки и сотни Ом, полупроводниковых – тысячи Ом при погрешности измерений менее 1%. Этот параметр также принято называть «значение нуля».

С развитием НТ-прогресса принцип работы тензорезисторов остался прежним, он основан на изменении под воздействием давления и механической деформации геометрических размеров элемента и соответственно сопротивления элемента, включённого в электрическую цепь. По условной формуле: $R = PL/S$, где S – поперечное сечение проводника тензорезистора, L – длина проводника. При механическом воздействии S стремится к уменьшению значения, а L – к увеличению за счёт растяжения тензорезистора. Или так: $E = L_R/RK_f$, где L – относительное изменение длины проводящего элемента тензорезистора; L_R/R – относительное изменение сопротивления тензорезистора; K_f – коэффициент тензочувствительности.

Чувствительность тензорезистора характеризуется безразмерным параметром – коэффициентом чувствительности K_f . Тензорезисторы по конструкции и способу изготовления могут быть плёночными металлическими или фольговыми константановыми. Для первых параметр K_f слабо зависит от деформации и немного превышает 2. Типичные значения коэффициента

тензочувствительности для разных материалов приведены в табл. 1.

На рис. 1 представлен схематичный вид плёночного тензорезистора.

Тонкая решётка из фольги, уложенная змейкой и запрессованная на фенольную плёнку, под механическим воздействием испытывает деформацию вместе с упругим элементом, что влечёт изменение электрических свойств элемента. На рис. 2 схематично показаны особенности изменения

Таблица 1. Некоторые типичные значения коэффициента тензочувствительности для разных материалов

Материал	Коэффициент тензочувствительности
Металлическая фольга	2–5
Тонкая металлическая плёнка (к примеру, константановая)	2
Монокристаллический кремний	От –125 до +200
Поликристаллический кремний	30
Тонкоплёночные резистивные материалы	100

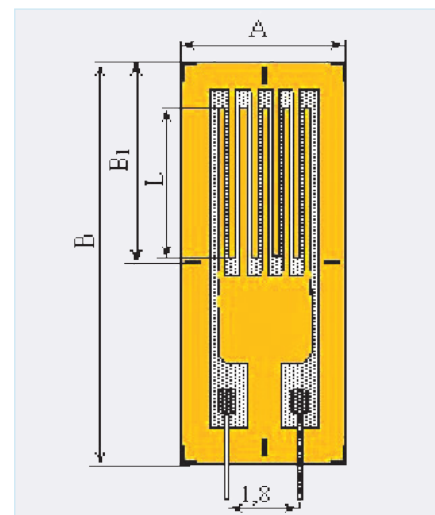


Рис. 1. Схематичный вид плёночного тензорезистора

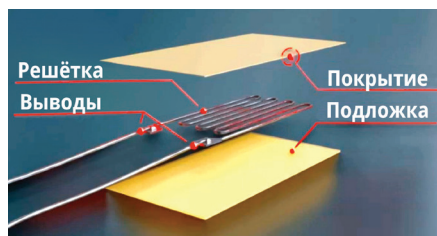


Рис. 2. Особенности строения (состава, конструкции) тензорезистора

формы элемента при внешнем механическом воздействии.

Электропроводящий элемент – тензорезистор закрепляют на измерительное тело – балку, консоль, мембрану, колонну, что составляет корпус будущего тензодатчика. Причём в современных высокоточных тензодатчиках установлен не один тензорезистор, а 4 и более, да и самих тензодатчиков в одной системе может быть несколько. Все они подключаются по одному протоколу для достижения минимальной погрешности измерения. Эта практика оправдана (кроме заботы о метрологической точности) тем, что в такой системе можно без ущерба работоспособности отказаться (в случае неисправности) от одного или нескольких тензодатчиков и провести ремонтные, регламентные работы без простаивания системы.

Наиболее типичную схему включения четырёх тензорезисторов называют мостом Уитстона. Такой тензодатчик имеет не 1, а 4 резистивных элемента, включённых в плечи резистивного моста. Тензорезисторы имеют одинаковый номинал, поэтому в состоянии покоя ток в мосте сбалансирован и не фиксируется измерительными приборами; да, токовая нагрузка может иметь место из-за несовершенства конструкции и температурных колебаний, но в определённых пределах. При деформации гибкой подложки происходит попарное сжатие и растяжение тензорезисторов, как следствие – изменение рабочих параметров в цепи моста, а сигнал разбалансировки от моста по экранированному кабелю передаётся на АЦП.

Иллюстрация изменения состояния посредством механического воздействия представлена на рис. 3 и рис. 4.

После снятия нагрузки с весовой платформы гибкий элемент возвращается в исходное положение, мост Уитстона возвращается в состояние равновесия.

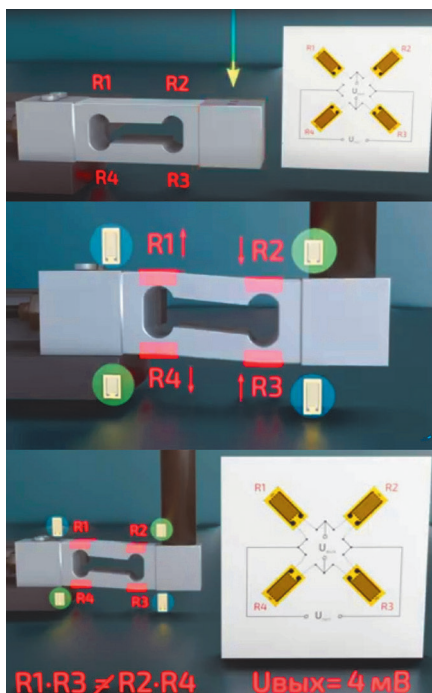


Рис. 3. Особенности работы тензодатчика

На рис. 5 представлен вид плёночного тензорезистора FSR402 для измерений в диапазоне 0...10 кг.

Плёночный аналоговый тензодатчик FSR402 с предельно допустимой нагрузкой 0,1...10 кг. Диаметр чувствительной части 12,7 мм. На рис. 6 представлен вид плёночного тензорезистора RFP602 для измерений в диапазоне 0...1 кг.

Именно такие тензорезисторы установлены в тензодатчиках Wavgat, о которых будем говорить далее, а также в настольных электронных весах бытового назначения для взвешивания мелких деталей, продуктов, драгметаллов. Плёночный аналоговый тензорезистивный датчик с предельно допустимой нагрузкой 1 кг изменяет сопротивление под действием прикладываемой силы. Диаметр чувствительной части – 10 мм.

В состоянии покоя решётка тензорезистора, сделанная из фольги, имеет определённое сечение и длину «нитки». В состоянии покоя сопротивление тензорезистора стабильно. Когда тензоэлемент деформируется, длина его проводящих ток ниток незначительно меняется. Когда в качестве основания используется балка, дорожки датчика растягиваются, их поперечное сечение уменьшается, и омическое сопротивление тензорезистора увеличивается. При сжатии (возврате в исходное положение) возникает обратный эффект – сопротивление уменьшается из-за сжа-

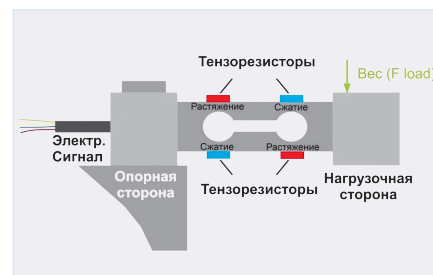


Рис. 4. Схематический вид особенности работы тензодатчика



Рис. 5. FSR402 для измерений в диапазоне 0...10 кг



Рис. 6. Тензорезистор RFP602 для измерений в диапазоне 0...1 кг

тия дорожек, увеличения их сечения. Эти изменяемые параметры в электронном устройстве с тензорезисторами обеспечивают преобразование механических данных в электрический ток.

Принцип работы тензорезистора мы рассмотрели выше, а далее обратим внимание на особенности включения тензорезисторов по схеме моста Уитстона в электрическую цепь.

Типичные схемы включения в электрическую цепь

Полномостовой тензодатчик из четырёх однотипных тензорезисторов подключается в электрическую цепь с соблюдением типичной цветовой маркировки проводов: «красный» и «чёрный» – соответственно «+» и «-» питания; «белый» и «зелёный» – выходной сигнал мостовой схемы. Соединительный кабель экранирован для защиты от помех. Помехоустойчивость системы с тензодатчиками, особенно при малых весовых значениях, – важ-

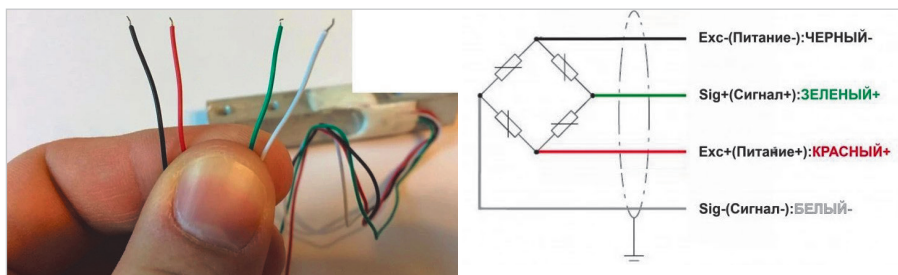


Рис. 7. Схема подключения моста Уитстона по четырём проводам

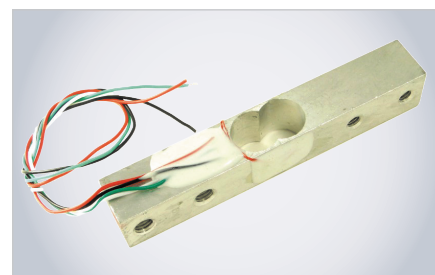


Рис. 9. Внешний вид тензометрического датчика Wavgat

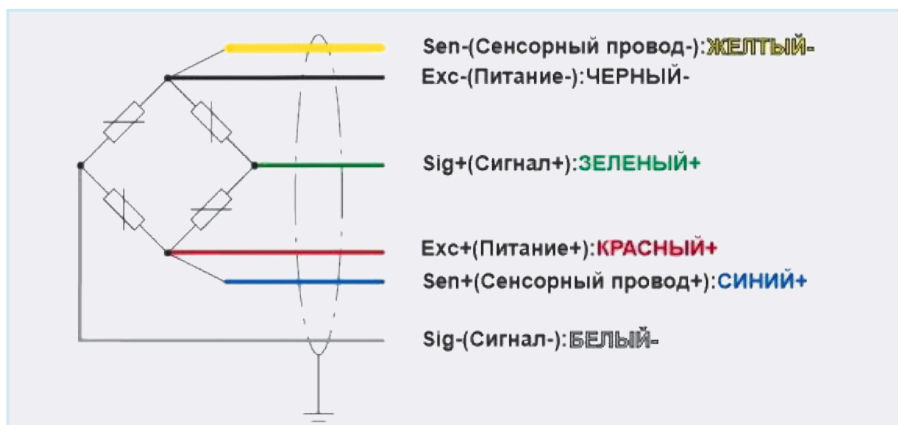


Рис. 8. Шестипроводная схема включения тензорезисторов моста Уитстона

ное условие стабильной работы всей системы.

Четырёхпроводные тензодатчики подключают к модулю нагрузки и АЦП (рис. 7).

В ситуации удалённого размещения тензодатчиков относительно контроллера-анализатора для обеспечения корректных замеров веса используют 6-проводную схему подключения, исключая влияние сопротивления питающих проводников на результаты измерений. С двух дополнительных проводов Sen+ и Sen- снимают данные о падении напряжения (рис. 8). Цветовая маркировка может различаться у разных производителей, но типичная именно такова.

Распиновка 4-жильных кабелей тензодатчика:

- красный – плюсовой вход (питание «+», Exс+);
- зелёный – плюсовой выход (сигнал «+», Sig+);
- чёрный – минусовой вход (питание «-», Exс-);
- белый – минусовой выход (сигнал «-», Sig-).

В тензодатчиках шестипроводного типа старых выпусков, когда неравномерность сечения провода приводила к скачкам напряжения, дополнительно присутствовали ещё 2 провода; как правило, синий соответствовал положительному (Sen+) и жёлтый – отрицательному (Sen-) контакту. При сое-

динении кабеля, состоящего из 4 и 6 жил, провод Sen+ (синий) соединяется перемычкой (либо WAG) с +Up, Exс+ (красный). Провод Sen- (жёлтый) соединяется перемычкой с -Up Exс- (чёрный), как показано на рис. 7.

При необходимости соединения 6- и 4-жильного кабелей тензодатчика провод Sen+ (синий) имитируют, включая его от +Up, Exс+ (красный), а провод Sig- (жёлтый) имитируют, включая его от -Up, Exс- (чёрный), как показано на рис. 8.

У разных производителей цветовая маркировка проводов может отличаться. Если нет описания, для определения распиновки используют мультиметр с режимом измерения сопротивлений от 0,5 Ом и выше. В случае с четырёхпроводным модулем уместен следующий алгоритм.

Последовательно выберите 6 парных комбинаций проводников, измерьте сопротивление для каждой пары. Определите, в каком случае получено наибольшее значение сопротивления – эта пара является линией питания. Отделите оставшиеся два провода – это линия сигнала. Подайте напряжение на провода питания и определите полярность подключения, измеряя напряжение на сигнальных проводниках. При этом мультиметр – наименее предпочтительный вариант для проверки тензодатчика, если он не имеет достаточной чувствитель-

ности и точности. Лучше применить милливольтметр с пределом измерения от 0,1 мВ, с высокой точностью и оценкой производительности аналоговых и цифровых показателей.

Применение в вендинговых аппаратах и не только

Основное предназначение тензодатчиков – измерительные приборы тензодатчики, к которым относится различного назначения контрольно-весовое оборудование, но и в этом аспекте есть несколько особенностей. С тензодатчика сигнал передаётся на контроллер – терминал, где переданная в цифровом виде через общий протокол передачи данных информация анализируется. В автоматических аппаратах выдачи за деньги или по кодовой комбинации вещей, игрушек, напитков (к примеру, вендинг) тензодатчик является важнейшим узлом контроля расхода материальных активов. Ибо вещи из лотка хранения «автомата» идентифицируются по номерам ячеек, но контроль в «выпускном» лотке определяется по их весу, заложенному как ординар в память устройства. На этапе выдачи продукта на основе информации, полученной в электронном виде от тензодатчика, сравниваются вес эталонный и вес отпускаемого продукта.

В системах с автоматизированной выдачей напитков на выходе устройства сравнивается вес наполненного стакана (тары) с эталонным весом, заложенным в память электронного контроллера; когда значения совпадают, с помощью управляемых электронных клапанов в магистрали подвода жидкости налив прекращается. Таков простой (хоть и не единственный) и часто используемый способ автоматизированной выдачи, упрощающей коммуникацию между покупателем и автоматом – продавцом товаров.

Для измерения массы стакана с жидкостью в типичном вендинговом аппа-

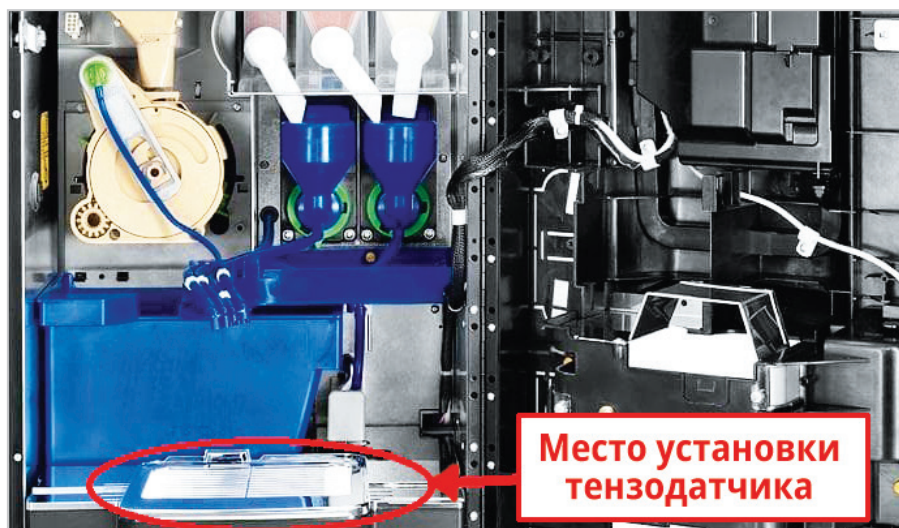


Рис. 10. Место установки тензодатчика в вендинговом аппарате по розливу кофе и чая

рате розлива кофе и чая применяется тензометрический датчик Wavgat A1, установленный под площадкой выдачи товара и подключённый к микроконтроллеру через модуль HX711.

На рис. 9 представлен тензодатчик Wavgat.

Подробно технические характеристики тензодатчика приведены в [9].

На рис. 10 представлено место установки тензодатчика в вендинговом аппарате по розливу кофе и чая.

На рис. 11 представлен модуль датчика нагрузки HX711 АЦП для тензодатчика.

Модуль HX711AD универсален для тензодатчиков с номинальным диапазоном измерения 1...20 кг – АЦП с разрядностью 24 бит. Имеет встроенное активное шумоподавление PGA и выбор коэффициента усиления: 32, 64 и 128, а также:

- встроенный стабилизатор напряжения;
- встроенный осциллятор;
- выбор скорости передачи данных: от 10 SPS до 80 SPS;
- одновременное подавление шумов питания 50 и 60 Гц;
- потребляемый ток: в рабочем режиме < 1,5 мА, в режиме ожидания < 1 мкА;
- диапазон рабочих напряжений: от 2,6 до 5,5 В;
- диапазон рабочих температур: –40...+85°С;
- размеры: 34×21 мм.

Вопросы корректности метрологии

Рассмотрим алгоритм работы электронного узла с тензодатчиком и АЦП

на примере вендингового автомата по розливу напитков. После команды контроллера о выдаче товара модуль HX711AD обнуляет значения текущего веса, приложенного к датчику, и далее считывает информацию с тензодатчика. По мере заполнения и увеличения веса тары напряжение, снимаемое с тензодатчика, увеличивается (порядок значений – милливольты), сигнал после АЦП анализируется контроллером и сравнивается в реальном времени с эталонным весом (в памяти МК) наполненной тары. Как только значения в цифровом формате сравнялись, микроконтроллер формирует команду на прекращение подачи жидкости (и ещё ранее – субстрата размолотых зёрен – порошка кофе или чая); эта команда служит сигналом на электронный клапан подачи жидкости в магистрали аппарата или на поворот шагового двигателя с редуктором, совмещённым с закрытием отверстия ёмкости подачи (в зависимости от конструкции аппарата).

В целом модули нагрузки и АЦП на рассмотренном примере универсальны для небольших весовых значений и надёжны. Однако надо учитывать, что точность преобразования выходного сигнала (ошибки и отклонения в дискретности) может влиять на общую ошибку измерения веса, и тензодатчик тут ни при чём. К примеру, 10-битный АЦП при разном входном напряжении 0...5 В (при условии, что 5 В – опорное напряжение питания модуля) преобразует его в цифровой вид с точностью 1/1024 В. На графике невозможно изобразить много сту-

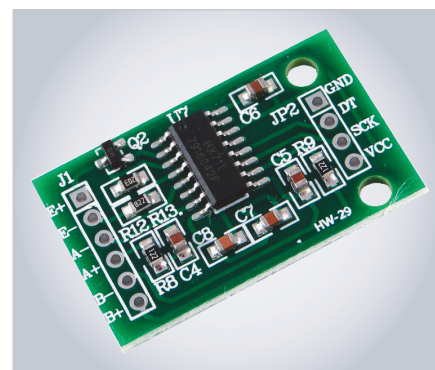


Рис. 11. Внешний вид модуля HX711

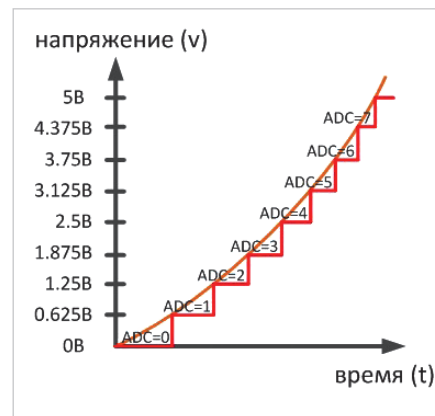


Рис. 12. Иллюстрация графика дискретного преобразования выходного сигнала АЦП в зависимости от входного

пенек, но для примера приведём его на рис. 12.

АЦП с разрядностью 10...24 бит чувствителен к изменению напряжения на входе величиной даже 5 мВ, что удачно стыкуется с применённым типом тензодатчика. Но точность преобразования входного сигнала зависит и от опорного напряжения, которое определяет границу диапазона работы АЦП. Таким образом, при опорном напряжении 5,2 В это одна точность, при 5,02 В – другая, при напряжении 4,8 В – третья... Притом что АЦП рассматриваемого модуля работоспособен в диапазоне 5 В ±15% [10].

В конструкторах Arduino Uno сия проблема решается задействованием для опорного напряжения специального вывода V_{ref} микроконтроллера. В условно простых вендинговых системах в таком случае реализуется или с помощью использования внешнего (дополнительного) суперстабильного источника опорного напряжения, или путём качественного источника питания устройства с высоким уровнем стабилизации напряжения. Иначе, точность измерения веса на этапе преобразования сигнала от тензорези-

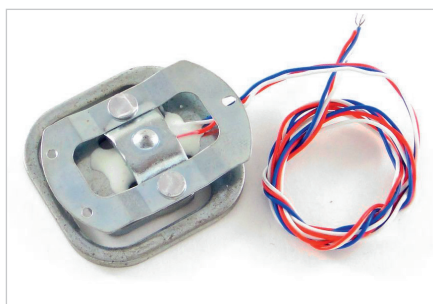


Рис. 13. Внешний вид тензодатчика Sensortronics 92001

Таблица 2. Некоторые технические характеристики тензодатчиков модельного ряда Sensortronics 92001–92006

Материал	Коэффициент тензо-чувствительности
Рабочий коэффициент передачи (РКП)	2 мВ/В ±10% от максимального измеряемого веса
Значение нуля	±1% от максимального измеряемого веса
Повторяемость	< ±0,01% от максимального измеряемого веса
Ползучесть	30 мин. < ±0,025% от максимального измеряемого веса
Комбинированная ошибка	< ±0,045% от максимального измеряемого веса
Предельная нагрузка	300% НН
Номинальное/макс. напряжение	10/15 В
Выходное сопротивление	349...355 Ом
Сопротивление изоляции	>1000 МОм
Степень защиты	IP66

стора в цифровой формат может колебаться, что приведёт условно к недоливу или переливу жидкости в тару; когда вы встречаете такое на практике, желая гастрономически насладиться и украсить свой обеденный рацион кофе-брейком, понимаете, в чём дело.

Тем не менее использование тензодатчиков для контроля веса отпускаемого продукта удешевляет конструкцию вендинговых и других устройств для бытовых нужд. Простое сравнение: цена одноточечного тензодатчика для мощных электронных весов с нагрузкой в 1,5 т составляет в 2022 году 35 тыс. руб., цена датчика с четырьмя встроенными тензорезисторами для



Рис. 14. Внешний вид балочного тензодатчика фирмы Keli серии SQB

малых нагрузок, используемых в вендинговом автомате, составляет 400 руб.; неудивительно, что вендинговые аппараты относительно быстро окупаются – примерно через 1300 покупок.

Критерии и характерные различия тензодатчиков

Тензодатчики различаются по нескольким критериям. По назначению: для платформенных весов, бункерных весов, дозаторов – это относительно мощные приборы для весовых значений от 50 кг до 1,5 т (мы говорим о типичном применении, а есть и специальные с нагрузками выше). Таков одноточечный тензодатчик Sensortronics 92001 с корпусом из легированной стали, предназначенный для установки в большие платформенные весы, к которым предъявляются требования высокой точности измерений. Sensortronics 92001 – один из модельного ряда 92001–92006, различие в которых определяется весовым (нагрузочным) назначением и, соответственно, размерами платформ. Модель 001 для метрологии нагрузок до 100 кг; это основной элемент в настольных, проверочных и напольных электронных измерителях веса. Внешний вид тензодатчика Sensortronics 92001 представлен на рис. 13.

Тензодатчики различаются по номинальной (расчётной) нагрузке (НН), что также определяется их практическим назначением, рабочему коэффициенту передачи (РКП). Как правило, у мощных тензодатчиков – за счёт их полупроводникового исполнения – условно бóльшая температурная стабильность. У тензодатчика Sensortronics 92001-050K-NC-00X (НН до 50 кг) влияние температуры на выход соответствует ±0,001% /°C при широком температурном диапазоне –20...+70°C, что делает устройства на их основе почти универсальными в применении как на улице, так и в



Рис. 15. Внешний вид тензодатчика CAS BCL, рассчитанного на измерение нагрузки 1...3 кг

отапливаемых помещениях в круглогодичном режиме.

Класс точности измерения, величина погрешности, количество проверочных делений регулируются стандартами. Приборы класса G (G1–G3 и др.) имеют наименьшую точность, с маркировкой С (C1, C2, C3) – наибольшую. Данные параметры тензодатчика регламентируются государственными стандартами. Количество диапазонов предполагает, что датчик может быть одно- и мультиинтервальным. Для повышения точности измерений на малых нагрузках применяют устройства с несколькими диапазонами, так обеспечивается минимальная погрешность измерений.

Важный параметр – компенсированный температурный диапазон. Точность измерений зависит от условий среды, и даже с учётом термостабильных полупроводниковых материалов тензорезистора в нижней и верхней части рабочего диапазона колебания сопротивления при механическом воздействии нуждаются в компенсации.

В табл. 2 представлены некоторые технические характеристики тензодатчиков модельного ряда Sensortronics 92001–92006.

По типу датчики различают по форм-фактору, к примеру, представленный на рис. 3, 9, 14, 15 прибор характеризуется типом датчика «балка на изгиб». Опционально корпус датчиков тензодатчиков может быть изготовлен из разных материалов – от пластика до лёгких сплавов с участием анодированного алюминия и даже из нержавеющей стали. Размеры корпуса влияют на специфику монтажа. В сложных или стеснённых (по месту) условиях, к примеру, с криволинейной поверхностью, размер и форм-фактор корпуса датчика имеет значение.

Корпуса тензодатчиков различают по типу воспринимаемой нагрузки и строению:

- консольные (балочные) – по принципу балки, работающей на сдвиг или изгиб. Используются в конструкции бункерных, платформенных весов (см. пример на рис. 3, 9, 14, 15);
- S-образные – работают на растяжение и сжатие. Тензодатчики на их основе подходят для измерения поднимаемых грузов;
- мембранные (шайбы) – наименее чувствительны к скручиванию. Датчики широко применяются в весах разных типов;
- колонные (стержневые) – работают на сжатие. Устанавливаются в оборудовании с высокой грузоподъемностью;
- торсионные – воспринимают усилие скручивания.

На рис. 14 представлен балочный консольный тензодатчик фирмы Keli серии SQB для среды с температурным диапазоном $-30...+70^{\circ}\text{C}$.

Прибор выдерживает перегруз до 150% от номинальной нагрузки. Класс пылевлагозащиты IP68 означает, что тензодатчик выдерживает погружение в воду на глубину до 1 м. В табл. 3 представлены технические характеристики тензодатчика Keli серии SQB.

На рис. 15 представлен внешний вид тензодатчика CAS BCL, рассчитанного на измерение нагрузки 1...3 кг.

В соответствии с особенностями конструкции тензодатчик с низкопрофильным дизайном применяется в настольных весах и др. контрольно-весовых устройствах, допускающих нецентральное нагружение по стандарту OIML R76. Класс защиты IP65. Соединительный кабель длиной 0,4 м, 4-жильный с экранирующей оплёткой и изоляционной оболочкой из ПВХ. Максимальный размер платформы: 200×200 мм. Имеются аналогичные тензодатчики CAS BCL, рассчитанные на вес 6...30 кг и на 60...200 кг для платформ максимального размера 400×400 мм. Заслуживает внимания «маломощный» тензодатчик CAS BCL-01L в корпусе из анодированного алюминия, уверенно работающий в диапазоне температур $-20...+70^{\circ}\text{C}$, с классом защиты IP65 и зазорами веса нагружения до 1 кг. Он применяется в точных настольных весах для мелких деталей и драгметаллов. Эксплуатационные и технические характеристики тензодатчиков линейки CAS BCL сведены в табл. 4.

На рис. 16 представлены размеры тензодатчика CAS BCL, предна-

Таблица 3. Технические и эксплуатационные характеристики тензодатчика Keli серии SQB

Модель	SQB 100kg, SQB 150kg, SQB 200kg, SQB 250kg, SQB 300kg	SQB 500kg, SQB 750kg, SQB 1000kg, SQB 1500kg, SQB 2000kg, SQB 2500kg	SQB 3t, SQB 3.5t, SQB 5t, SQB 7.5t, SQB 10t
НПИ, кг	100–300 соответственно	500–2500 соответственно	3000–10 000 соответственно
Класс точности, OIML	C3; C4; C5		
Чувствительность, мВ/В	2,0 ±0,002	3,0 ±0,003	
Ползучесть (30 мин), % F.S.	±0,01		
Температурное отклонение нуля, % F.S./10°C	±0,02		
Температурное отклонение чувствительности, % F.S./10°C	±0,02		
Входное сопротивление, Ом	400 ±20		
Выходное сопротивление, Ом	352 ±3		
Сопротивление изоляции, МОм	≥ 5000		
Рабочий диапазон температур, °C	–40...+40		
Предельно допустимая нагрузка, % F.S.	150		
Рекомендуемое напряжение питания, В, пост. ток	10...12		
Максимальное напряжение питания, В, пост. ток	15		
Класс защиты	IP68		
Повторяемость (% F.S.)	0,02		

Таблица 4. Эксплуатационные и технические характеристики тензодатчиков CAS BCL

Характеристики	CAS BCL (1–3 кг)	CAS BCL (6–30 кг)	CAS BCL (60–200 кг)
Наибольший предел взвешивания, кг	1 / 2 / 3	6 / 10 / 15 / 20 / 30	60 / 100 / 150 / 200
Рабочий коэффициент передачи (РКП), мВ/В	1,0 ±0,1	2,0 ±0,2	
Диапазон значения нуля, мВ/В	0 ±0,05	0 ±0,1	
Класс точности	C3		
Суммарная ошибка, %	0,03	0,02	0,03
Повторяемость, %	0,01		
Ползучесть (30 мин.), %	0,03	0,017	0,03
Температурный дрейф, %/10°C			
«нуля»	0,028	0,014	0,028
сигнала	0,014	0,011	0,014
Напряжение возбуждения, В			
рекомендуемое	10		
максимальное	15		
Сопротивление, Ом			
входное	400 ±20		
выходное	350 ±3,5		
Изоляции	> 2000		
Безопасная перегрузка, % НПВ	150		
Компенсированный диапазон температур, °C	–10...+40		
Рабочий диапазон температур, °C	–20...+70		

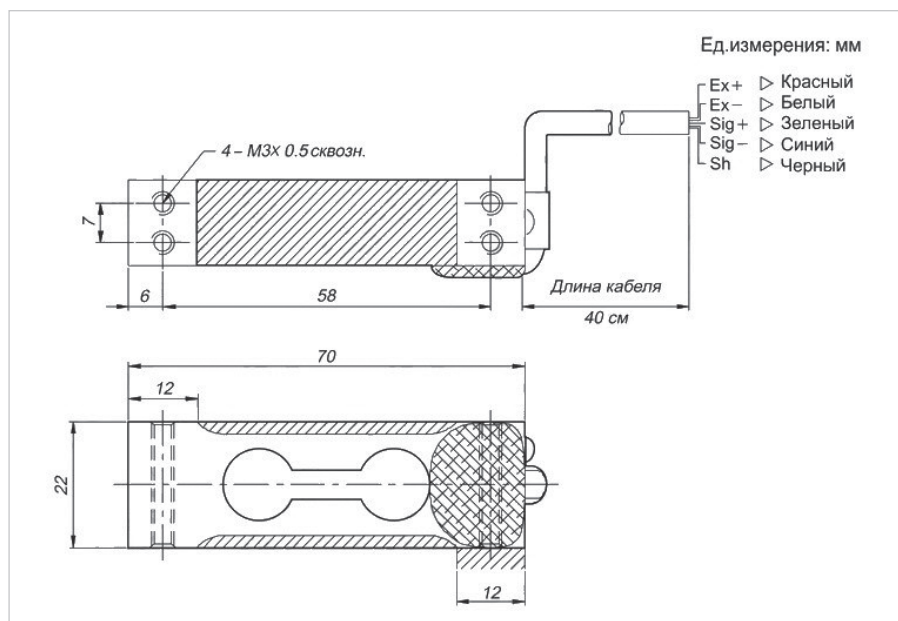


Рис. 16. Размеры тензодатчика CAS BCL, предназначенного для нагружения весом 1...3 кг



Рис. 17. Внешний вид весового модуля с допустимой нагрузкой 5 кг

значенного для нагружения весом 1...3 кг.

Весовой модуль с предельно допустимой нагрузкой 5 кг представлен на рис. 17.

Спецификация:

- класс точности C2;
- температурная погрешность (temp. effect on span): $\pm 0,02\% \text{F.S.}/10^\circ\text{C}$;
- диапазон ошибки (comprehensive error): $\pm 0,05\% \text{F.S.}$;
- смещение нуля (temp. effect on zero): $\pm 0,03\% \text{F.S.}/10^\circ\text{C}$;
- рабочее отношение (rated output): $1 \pm 0,15 \text{ мВ/В}$;
- компенсированный диапазон температур: $-10...+40^\circ\text{C}$;
- ползучесть: $\pm 0,02\% \text{F.S.}/30 \text{ мин.}$;
- диапазон рабочих температур: $-20...+60^\circ\text{C}$;



Рис. 18. Внешний вид модуль-контроллера весовых ячеек с индикатором

- баланс «нуля» (zero balance): $\pm 1\% \text{F.S.}$;
- напряжение возбуждения: от 9 до 12 В;
- сопротивление входа: $405 \pm 10 \text{ Ом}$;
- сопротивление выхода: $350 \pm 3 \text{ Ом}$;
- НН (ultimate overload): $150\% \text{F.S.}$;
- сопротивление изоляции (insulation resistance): $100\,000 \text{ МОм}$ (при 100 В);
- габаритные размеры: $80 \times 12,7 \times 12,7 \text{ мм}$.

К вопросу об импортозамещении: тензорезистор 2ФКП-5х200 имеет вид прямоугольника с размерами $10 \times 5 \text{ мм}$. Его сопротивление – число в наименовании после символа «х», в данном случае $200 \pm 0,35\% \text{ Ом}$. Подложка также является и основным корпусом элемента.

Для рассмотренных типов тензодатчиков предназначен модуль-контроллер весовых ячеек с индикатором, представленный на рис. 18.

Это готовый контроллер весовых ячеек и действующих электронных весов со светодиодным индикатором

из четырёх цифр и следующими техническими характеристиками:

- диапазон измерения: $\pm 19 \text{ мВ}$;
- температурный коэффициент: $\leq 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$;
- коэффициент конверсии А/D: от 6,25 до 100 Гц;
- функции защиты: обратное соединение, перенапряжение, мгновенное подавление;
- диапазон рабочих температур: $-40...+70^\circ\text{C}$.

Назначение кнопок: точка/сохранить (SAVE), цифра/обнуление (DIGIT), плюс/верхнее значение (PH), минус/нижнее значение (PL).

Калибровка осуществляется следующим образом.

1. При отсутствии веса нажимать более 2 с кнопку «PL». На индикаторе отобразятся две буквы PL и затем 0000 (4 нуля).
2. Удерживать более 2 с «SAVE», чтобы сохранить это значение.
3. Нагрузить весовую ячейку грузом с известной массой М.
4. Удерживать более 2 с кнопку «PH». На индикаторе отобразятся две буквы PH.
5. С помощью кнопок «PH», «PL» и «DIGIT» довести величину на индикаторе до массы М.
6. Удерживать кнопку «SAVE».

Для коррекции взвешивания тары (неучёта веса тары) после её размещения на рабочей поверхности площадки с тензодатчиком удерживать более 2 с кнопку «ZERO». После этого на индикаторе отобразится «0».

Контроль исправности тензодатчика по мостовой схеме

Для определения исправности моста Уитстона измеряют входное и выходное сопротивление каждой пары выводов. Для испытания используют омметр, полученные данные сравнивают с паспортными значениями. Баланс моста тензометрического датчика проверяется в двух вариантах: между минусовыми выходом и входом; и между минусовым выходом и плюсовым входом. Разница между полученными значениями и паспортными у исправного тензодатчика не превышает 10 Ом. Если показатель выше, а целостность моста не подтверждена измерениями, тензодатчик подлежит замене. Среди причин неисправности могут быть скачки напряжения, физическое разрушение из-за повышенных

вибраций или технический брак (несоблюдение технологии).

Спектр применения тензодатчиков и конструкций на их основе

Для описания принципа действия тензодатчика в статье приведён пример тензорезистора (резистивного тензодатчика). Однако кроме этого типа в метрологических задачах могут участвовать другие типы тензодатчиков.

Тактильные. В основе – два проводника, разделённые диэлектрическим слоем. Под воздействием деформации проводники сближаются и продавливают мягкую прослойку. В электрической цепи возникает ток, который зависит от материалов и расстояния между проводниками в рабочей зоне датчика.

Пьезоэлектрические, пьезорезонансные, по технологии полупроводников. Эффект основан на свойстве полупроводниковых кристаллов изменять состояние, величину статического заряда.

Магнитные. В качестве чувствительного элемента – магнитный сердечник, окружённый катушкой. При деформации сердечник изменяет положение, что влияет на ЭМ-индукцию в катушке.

Ёмкостные. Работают по принципу изменения ёмкости переменного конденсатора. При воздействии (давлении) нагрузки токопроводящие пластины сближаются, ёмкость образованного ими конденсатора возрастает. Изменение ёмкости преобразуется в электрический ток.

К условным минусам тензодатчиков относят:

- зависимость чувствительности от температуры и влажности окружающей среды (компенсируется);
- снижение точности показаний в условиях вибрации;
- необходимость усилителей – преобразователей сигнала в конструкции тензодатчика при значительном удалении датчика от контроллера состояний;
- уязвимость в условиях агрессивной среды (защита метрологической системы от коррозии, воды, химически активных веществ, несанкционированных механических воздействий).

Кабели слаботочных тензодатчиков нуждаются в экранирующей оплётке, поскольку оборудование на базе тензодатчиков работает в сложных элек-

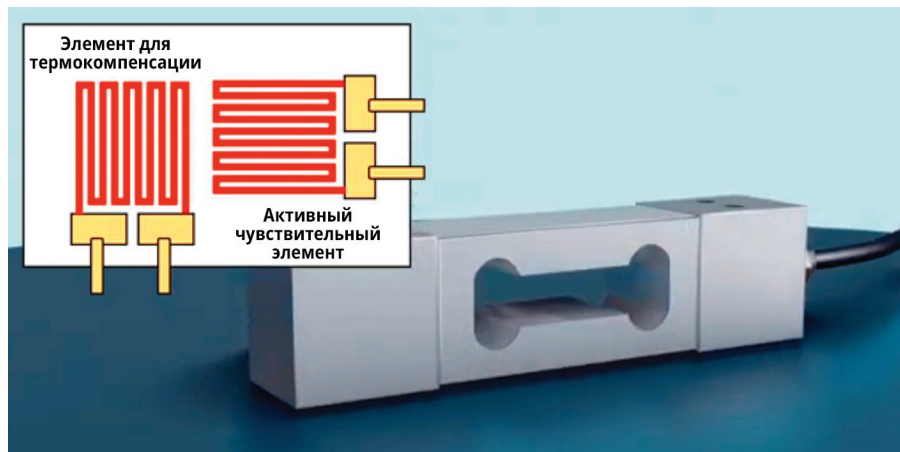


Рис. 19. Иллюстрация размещения в корпусе тензодатчика элемента термокомпенсации

тротехнических условиях. Тензодатчики не требуют обслуживания после включения и настройки. Но для корректной работы необходимы следующие условия:

- отсутствие сильных вибраций, которые могут повлиять на точность и ресурс оборудования;
- защита датчика от воды и пыли в соответствии со стандартом (устройства класса IP 24 работают в чистой сухой среде);
- отсутствие разрушающего механического воздействия – ударов, трения и т.д.;
- защита от химически агрессивных веществ, которые могут вызвать коррозию металлических элементов, разрушение оплётки и изоляции;
- соблюдение рабочего и компенсируемого температурного диапазона.

Если датчик установлен вне герметичного корпуса, его регулярно очищают от пыли струёй воздуха с напором. Для удаления загрязнений не используют агрессивные чистящие средства, которые могут повредить силиконовое покрытие или элементы модуля.

Условные проблемы решаемы. Тензорезистивные датчики обеспечивают широкий диапазон и высокую точность измерений (до 0,01%, в зависимости от модели), в том числе при высокой частоте динамических деформаций основания – до десятков млн раз. С условием компенсации тензодатчики работают в широком диапазоне температур. На рис. 19 представлен вид размещения в одном корпусе тензорезистора и элемента термокомпенсации.

За счёт плоской компактной конструкции они монтируются как на ровные, так и на криволинейные поверхности. Соединительный кабель с ПВХ-изоляционной оболочкой не тер-

ет эластичности при низких температурах, устойчив к истиранию и механическому воздействию.

Тензодатчики можно соединить напрямую с контрольным блоком или установить на удалении от АЦП. Их используют и для проведения измерений на движущихся деталях, одновременно в нескольких точках конструкции и т.д. Но тензодатчики нужны не только в рассмотренных в статье случаях.

Тензорезисторы прямоугольного и розеточного типа на основе константовой фольги предназначены для измерения деформации деталей машин, металлоконструкций при статических нагрузках, а также в качестве чувствительных элементов силоизмерительных датчиков в условиях макроклиматических районов с умеренным и холодным климатом. Их технические характеристики допускают циклы давлений/деформаций/воздействий десятки млн на один прибор.

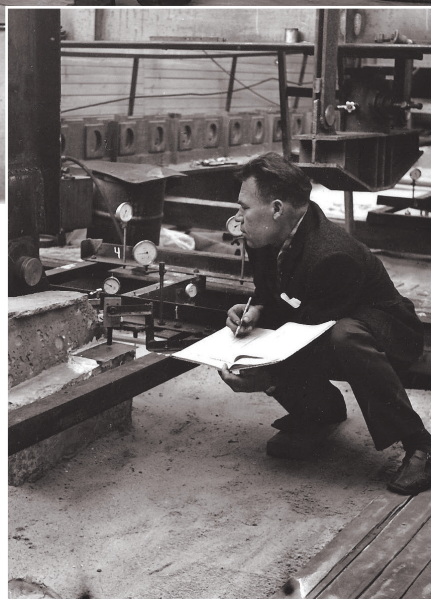
Былое и перспективы тензодатчиков

Технологичность, универсальность, удобство использования и выгодная стоимость – ключевые факторы, влияющие на востребованность тензодатчиков разных типов. Перспектива их применения связана и с методами обработки сигналов датчиков линейных и угловых перемещений, фаз квадратурного сигнала в код положений. К примеру, получение цифрового кодового сигнала непосредственно с АЦП (микросхема RDS-M), сопряжённого с тензорезистором, позволяет не только юстировать подключённый датчик, но и использовать альтернативные алгоритмы вычисления скорости перемещений конструкции (деформации вос-



Рис. 20. Исторические фото: инженер ВНИИГ, рационализатор и изобретатель СССР П.Н. Кашкаров при контроле параметров оснований грунтов Братской ГЭС

становливаемого тензодатчика) и угла перемещения конструкции. В составе промышленных агрегатов применяются для измерения деформирующих усилий штамповочных прессов, прокатных станков, других металлообрабатывающих машин. В строительных конструкциях – при возведении, эксплуатации, экспертизе для замера и контроля напряжённо-деформационных нагрузок. Для измерения и контроля давления в нефтегазопроводах и других коммуникациях и даже как элементы контроля силы затяжки в электрических приборах, монтажном оборудовании. Устройства на основе тензодатчиков незаменимы в гидротехнике и смежных сферах, когда требуется контролировать микронное смещение несущих конструкций, грунтов, бетонных оснований. Без применения электронных метрологических приборов с тензорезисторами не обошёлся ни один научно-исследовательский проект. Из истории развития промышленности в СССР следует, что тензорезисторы начали применять в конце 1940-х годов, с тех пор они практически заменили механические тензомеры и открыли новые возможности в исследовании прочности различных машиностроительных конструкций. Инженер ВНИИГ (Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Веденеева – сегодня в составе РосГидро) Кашкаров Петр



Николаевич, отец автора статьи, участвовавший в испытаниях грунтов и фундаментов Братской, Барабинской, Нижнекамской и др. ГЭС, работал с тензодатчиками в 60-х гг. XX века. На рис. 20 Кашкаров П.Н. при контроле параметров оснований грунтов Братской ГЭС.

Актуальные для разработчиков задачи включают повышение надёжности работы и упрощение установки тензодатчиков. Развитие точных электронных динамометров и датчиков давления тензорезисторного типа обеспечило метрологам погрешность измерения до сотых долей процента. Ведутся экспериментальные исследования материалов конструктивных (чувствительных, связующих, подложек) элементов, работы по созданию конструкций с малыми разбросами характеристик, влияний посторонних факторов на метрологические характеристики в сложных условиях.

Заключение

Распространение тензодатчиков в современных электронных разработках объясняется тем, что они не инер-

ционны, позволяют провести замер контролируемого параметра одновременно во многих точках, способ крепления на контролируемую поверхность может быть простым, в том числе приклеивание за подложку, а малые размеры позволяют размещать датчики в недоступных местах и устанавливать уже в период сборки конструкции. Большое значение имеет схемотехника и элементная база модулей сопряжения, микросхем-преобразователей АЦП, преобразователей «угол-код» и др. В этой области есть перспективы для разработок в области микроэлектроники, адаптированных к тензодатчикам. Современные тензодатчики ждёт большое будущее в разработках РЭА.

Литература:

1. Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений // Современная электроника. 2014. № 4.
2. Как проверить тензодатчик. URL: <https://sierra.market/company/articles/186/>.
3. Кашкаров А.П. 500 схем для радиолюбителей. Электронные датчики. СПб.: Наука и Техника, 2010. 208 с., ил. (2-е изд., доп.).
4. Кашкаров А.П. Справочник радиолюбителя: взаимозаменяемость элементов, цветовая и кодовая маркировки. СПб.: Наука и Техника., 2008. 288 с. (Серия: «Радиолюбитель»).
5. Кашкаров А.П. Датчики в электронных схемах: от простого к сложному. М.: ДМК Пресс, 2013. 212 с.
6. Микросборки преобразователя угол-код Ф020, Ф020.1. Краткое описание. URL: www.analog.com/static/imported-aires/datasheets/AD2S1210.pdf.
7. Модули для тензорезисторов. URL: http://www.lcard.ru/sites/default/files/products/LTR212_conn.jpg.
8. Прокофьев Г., Стахин В., Обедин А. К1382HX045 – микросхема преобразователя фазы квадратурного сигнала в код положения // Современная электроника. 2014. № 6.
9. Datasheet Тензометрический датчик PC7 ULN2004A [Электронный ресурс]. URL: https://www.flintec.com/wp-content/uploads/2016/09/A221-Rev0- RU_PC7_Data_Sheet.pdf.
10. Datasheet HX711 [Электронный ресурс]. URL: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf.
11. URL: https://shop.robotclass.ru/index.php?route=product/product&product_id=2398.

