

УДК 681.2

## **Анализ S-образной балки и разработка измерительного модуля тензорезистивного датчика на ее основе**

*Эйвазов А. Г., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

*Казаков А. К., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

*Научный руководитель: Павлов Ю.Н., д.т.н, профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[pavlov@bmstu.ru](mailto:pavlov@bmstu.ru)*

### **1. Введение**

Проблема взвешивания появилась давно, вместе с появлением торговли и обмена материальными ценностями.

По мере развития промышленного производства повышались требования к применению и хранению мер веса. Со временем, начало использоваться всё больше и больше мер веса.

На генеральной конференции по мерам и весам, прошедшей в Париже, была принята метрическая система меры весов. В результате которой утвердилась мера веса килограмм(кг) и тонна(т). Несмотря на это, в настоящее время в некоторых странах мира используют такие величины как: фунт, унция и т.д.

Существует большое количество устройств для взвешивания (весов), построенных на различных принципах: рычажные, пружинные, тензометрические, гидравлические, гидростатические для взвешивания предметов в широком диапазоне весов от 1 мг до нескольких тонн.

Например, авторы статьи предполагают конструкцию универсальных весов для измерения веса в пределах от 100 кг до 5 т, построенную с использованием тензометрии. Основным элементом весов является балка (S-образная) с наклеенным на ней тензометрическим датчиком (фольговый тензорезистор).

Важным преимуществом фольгового тензорезистора является лучшая восприимчивость деформации объекта вследствие большего отношения периметра

сечения плоской чувствительной тензометрической полосы к площади её сечения по сравнению с проволочными тензорезисторами. Это позволяет обеспечить большую точность измерения деформации. В настоящее время подавляющее большинство фольговых тензорезисторов изготавливаются из константановой фольги толщиной 5, 10, 12 мкм и выше методом фототравления.

Этим тензорезисторам, при изготовлении фотолитографским способом, могут быть приданы любые очертания, требуемые условиями эксперимента. Вследствие низкой поперечной чувствительности и плоского сечения элементов тензорешетки, они имеют при той же площади сечения более развитую поверхность приклейки, что улучшает условия их работы. Преимуществом S-образной балки является то, что вид ее преобразуемой силы как сжатие, так и растяжение. Такие тензодатчики способны выдерживать вес приблизительно в 5 тонн. Они всегда изготавливаются из нержавеющей стали, поэтому способны работать во влажной среде. Перед началом работы эти датчики проходят тщательную проверку на наличие повреждений, поэтому результаты их показаний всегда точны. Все тензодатчики имеют большой гарантийный срок. Исходя из вышесказанного, авторы статьи решили использовать именно такой преобразователь деформаций (фольговый тензорезистор) и именно такую балку (S-образную балку (см. рис. 1).



Рис. 1. S-образная балка с фольговым тензорезистором

## 2. Техническое задание

Измерительный модуль тензорезистивного датчика в составе:

преобразователь силы 1000Н с использованием S-образной балки.

преобразователь деформаций в электрический сигнал – фольговый тензорезистор.

Характеристики тензорезистивного датчика:

1. Диапазон температур -30С - +50 С;
2. Точность измерения 1%;
3. Допустимая степень защиты IP67;
4. Материал упругого элемента балки: сталь.

Разместить разработанный измерительный модуль в корпус из нержавеющей стали со степенью защиты IP67.

Разработать и встроить в корпус порт ввода-вывода питания и сигналов полученной информации.

### Технические характеристики

Наибольший предел измерений (НПИ)	100; 150; 200; 250; 300; 500; 700 кг; 1; 1,5; 2; 3; 5 т
Рабочий коэффициент передачи (РКП)	2,0 мВ/В
Класс точности (по ГОСТ 30129)	С3
Вид преобразуемой силы	Растяжение/сжатие
Число поверочных интервалов	3000
Начальный коэффициент передачи (НКП)	2,5 % от РКП
Входное сопротивление	400±50 Ом
Выходное сопротивление	352±5 Ом
Сопротивление изоляции	≥5000 МОм
Диапазон рабочих температур	от -30 до +50 °С
Допустимая перегрузка в течение не более 1 часа	125 % от НПИ
Разрушающая перегрузка	200 % от НПИ
Рекомендуемое напряжение питания	от 5 до 12 В
Максимальное напряжение питания	15 В

Степень защиты (по ГОСТ 14254)	IP 67
Материал корпуса датчика	Легированная сталь

### 3. Теоретические сведения

#### 3.1. Тензодатчик. Основные сведения

Тензометрический датчик или тензодатчик, предназначается для измерения деформации, тех или иных объектов исследования. Флуктуации геометрических характеристик образца, приводят к изменению, каких-либо физических свойств датчика, которые могут быть замерены. Используются тензодатчики, для измерения: силы, давления, ускорения, перемещения, крутящего момента. Наиболее простыми, являются механические тензодатчики.

Считывание показаний в них, осуществляется со специальной линейки. Также существуют, пьезорезистивные, оптико-поляризационные, волоконно-оптические датчики. Наибольшее распространение получили тензорезистивные датчики. Это связано, с относительной простотой и надёжностью их работы.

Принцип работы тензорезистивного датчика, основывается на законе, который в 1856 году, открыл лорд Кельвин. Он заключается в том, что под действием растягивающего усилия, которое меняет геометрические характеристики проводника, изменяется, его электрическое сопротивление. Это изменение, можно измерить и сопоставить со степенью деформации датчика, которая в свою очередь, может быть сопоставлена со степенью деформации, исследуемого образца.

В состав измерительного моста, как одно из сопротивлений, включён тензодатчик. Производится калибровка моста, при которой сопротивление между контрольными точками, равно нулю. Одна из проводящих ветвей, снабжена тензодатчиком, а другая уравновешена резистором. При изменении физических параметров тензодатчика, его сопротивление изменяется, а сопротивление резистора на свободной ветви, остаётся неизменным. Это приведёт к тому, что изменится напряжение, между контрольными точками. Закон изменения этого напряжения, будет точно сопоставляться, с изменениями физических параметров, воздействующих на объект исследования, на котором установлен тензодатчик. Вплоть до восьмидесятых годов прошлого века, показания обрабатывались, с помощью бумажных самописцев. В настоящее время, используются электронные методы. Сигнал передаётся на компьютер, где его исследуют специальные программы.

### 3.2. Виды тензодатчиков

Существуют различные виды тензодатчиков. Одноточечные датчики, преобразуют механическую деформацию изгиба, в сигнал, который пропорционален, этой деформации. Тензорезисторные, консольные датчики, преобразуют механическую деформацию сдвига, в электрический сигнал, пропорциональный степени этой деформации. Они, представляют, из себя, консольную балку. S-образные датчики, преобразуют в электрический сигнал, механическое усилие, сжатия или растяжения, направленное вдоль оси датчика. Параметры сигнала, соответствуют величине, приложенной к объекту исследования, силы. Цилиндрические тензорезисторные датчики, осуществляют, преобразование усилия сжатия, в электрический сигнал, пропорциональный энергии сжатия. Эти датчики, в различных источниках, также, называются – шайбами или бочками. Существует ряд направлений, для применения тензорезисторных датчиков. Они используются, для исследования напряжений в строительных конструкциях. Привариваемые датчики, служат, для контроля за металлическими составляющими, зданий и сооружений. Датчик крепится к объекту исследования, методом точечной сварки. Для защиты, от неблагоприятных факторов внешней среды, он защищается, слоем герметика. Для защиты от случайного механического разрушения, сверху его прикрывают, металлическим кожухом. В случае невозможности использования, сварки, могут использоваться привинчивающиеся датчики. Также, возможно крепление, с помощью специального клея, на каменные, бетонные, кирпичные и другие подобные поверхности. Тензометрические датчики, используются во всех типах электронных весов, например на бетонных заводах.

В зависимости от конструктивных особенностей и характера, решаемых оборудованием задач, могут применяться все типы датчиков. Используются тензодатчики, также, в системах пожарной и охранной сигнализации и контроля доступа. Датчики измерения моментов, используются в строительной технике, автомобилестроении, на железнодорожном транспорте и в авиации. Для осуществления контроля, за износом оборудования, тензорезисторные датчики служат в машиностроении, металлообработке, сталелитейной промышленности. Датчики S-образного типа, широко применяются в такелажном оборудовании. Они крепятся на металлические тросы, для определения, степени приближения к опасным перегрузкам. Для работ связанных с измерением механических нагрузок, в условиях повышенных или пониженных температур, используются специальные типы тензодатчиков.

Они проходят специальную калибровку, позволяющую учитывать, изменение сопротивления датчика, связанного с изменением температуры и отфильтровывать эти

помехи, от истинного сигнала. При работе датчиков при особо высоких температурах или в агрессивных средах, датчики оборудуются защитой. Используются датчики, также, при проведении, неразрушающего контроля за различными изделиями. Высокая точность измерений и низкая себестоимость тензодатчиков, позволяет широко использовать их в космической технике, для оснащения разгонных блоков, ракет-носителей. Небольшая масса тензодатчиков и возможность их установки в труднодоступных местах, позволяет использовать их, также, для оборудования пилотируемых и беспилотных космических кораблей.

### **3.3. Ingress Protection Rating**

Система классификации степеней защиты оболочки электрооборудования от проникновения твёрдых предметов и воды в соответствии с международным стандартом IEC 60529 (DIN 40050, ГОСТ 14254-96).

Под степенью защиты понимается способ защиты, проверяемый стандартными методами испытаний, который обеспечивается оболочкой от доступа к опасным частям (опасным токоведущим и опасным механическим частям), попадания внешних твёрдых предметов и (или) воды внутрь оболочки.

Маркировка степени защиты оболочки электрооборудования осуществляется при помощи международного знака защиты (IP) и двух цифр, первая из которых означает защиту от попадания твёрдых предметов, вторая — от проникновения воды.

Код имеет вид IPXX, где на позициях X находятся цифры, либо символ X, если степень не определена. За цифрами могут идти одна или две буквы, дающие вспомогательную информацию. Например, бытовая электрическая розетка может иметь степень защиты IP22 — она защищена от проникновения пальцев и не может быть повреждена вертикально или почти вертикально капающей водой. Максимальная защита по этой классификации — IP68: пыленепроницаемый прибор, выдерживающий длительное погружение в воду.

## **4. Выполнение**

### **4.1 Выбор упругого элемента**

По заданию, в качестве упругого элемента, используется S-образная балка. Данный вид упругих элементов, достаточно популярен, так как обладает множеством преимуществ. В частности, использование S-образной балки в тензорезисторе позволяет

измерять достаточно небольшие изменения нагрузки, так как обладает высокой чувствительностью, вследствие своих геометрических особенностей.

#### 4.2 Разработка и расчет упругого элемента, расчет зависимости выходного напряжения от внешней нагрузки

Определение геометрических размеров упругого элемента:

$$\sigma_0 = \frac{F_\tau}{S} + \frac{m_x * y}{I_x} + \frac{m_y * x}{I_y} \quad (1)$$

Расчет деформации в месте крепления тензорезисторов:

$$\sigma = \varepsilon * E, \text{ откуда } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

$$F_\tau = F * \sin\alpha$$

$$S = b * h$$

$$y = \frac{h}{2}$$

$$m_x = \frac{F * l}{2}$$

$$m_y = 0$$

$$I_x = \frac{b * h^3}{12}$$

Подставим вышеперечисленные величины в формулу (1):

$$\sigma_B = \frac{F * \sin\alpha}{b * h} + \frac{\frac{F * l}{2} * \frac{h}{2}}{\frac{b * h^3}{12}} = \frac{F * \sin\alpha}{b * h} + \frac{3 * F * l}{b * h^2} = F \left( \frac{\sin\alpha}{bh} + \frac{3l}{bh^2} \right)$$

Требуется выбрать:  $b$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $\alpha$ .

Пусть  $l = 200$ ,  $b = 33$ ,  $h = 66$  (размеры указаны в мм),  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ .

Тогда  $\sigma_B = 449,9$  МПа (при  $F = 1000$  Н).

По формуле (2)  $\varepsilon = 0,21$  %. Полученное значение - одного порядка с границей диапазона измеряемых деформаций, что означает: измерение будет достаточно точным.

Теперь проверим, не превышает ли максимальное напряжение предел текучести материала.

$$m_x = F * l$$

остальные величины имеют прежние значения.

$$\sigma_A = \frac{F * \sin \alpha}{b * h} + \frac{F * l * \frac{h}{2}}{\frac{b * h^3}{12}} = \frac{F * \sin \alpha}{b * h} + \frac{6 * F * l}{b * h^2} = 867.2 \text{ МПа} < [\sigma]$$

$$= 1375 \text{ МПа}$$

Таким образом, выбранные габаритные размеры балки удовлетворяют основным требованиям.

$$U_{\text{вых.}} = 5 \frac{e^{2.0529 \frac{F(\frac{\sin \alpha}{bh} + \frac{3l}{bh^2})}{E}} + 1}{e^{2.0529 \frac{F(\frac{\sin \alpha}{bh} + \frac{3l}{bh^2})}{E}} - 1}$$

Анализ разработки приведен ниже.

Для проверки расчетов была использована программа SolidWorks.

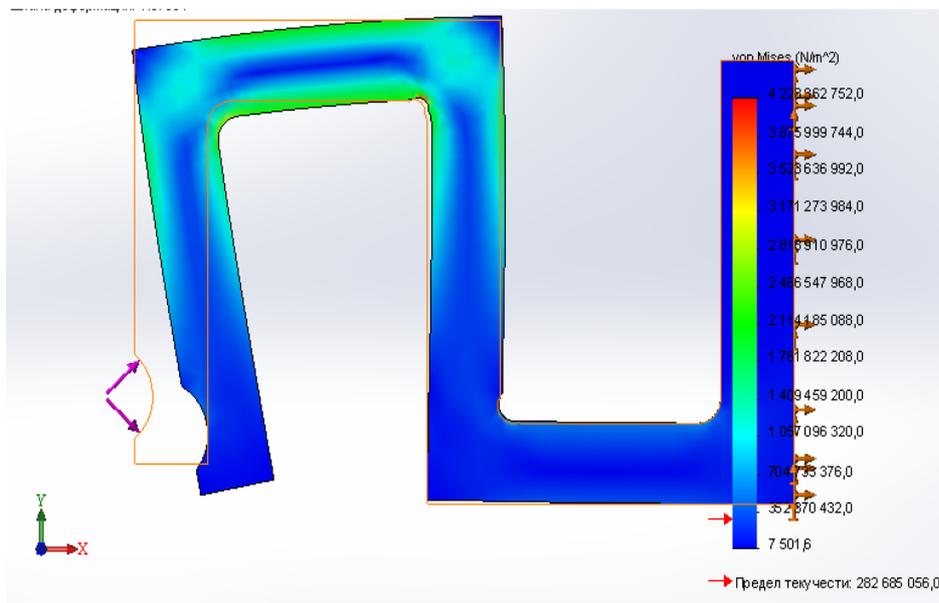


Рис. 2. Экспериментальные исследования в диапазоне рабочих нагрузок в режиме Solid Works Simulation

### 4.3 Анализ внутренних напряжений

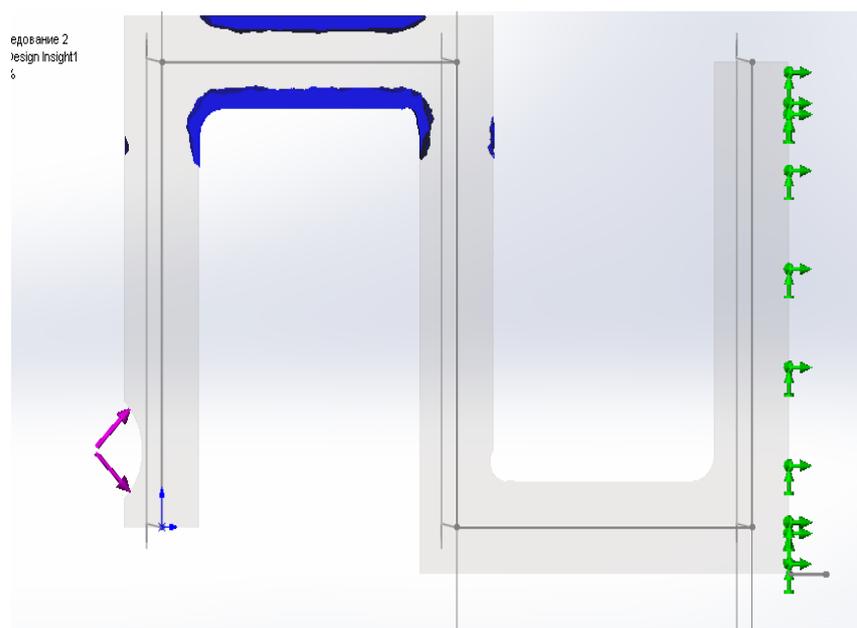


Рис. 3. Анализ внутренних напряжений в режиме Solid Works Simulation

Исходя из этого анализа, было принято решение об установке тензорестива в месте наибольших деформаций с целью обеспечения наилучшего результата.

### 4.4 Цепи нормирования сигналов с измерительного моста (мост Уитстона)

На рисунке 4 представлена полномостовая цепь для измерения деформации при испытании материала на усталость. Мост является интегральным устройством и может быть закреплен на поверхности, деформацию или изгиб которой необходимо измерить. В схеме используется генератор тока возбуждения, для выполнения дистанционных измерений. OP177 питает мост током 10 мА, используя источник опорного напряжения 1.235 В. Сигнал усиливается инструментальным усилителем AD620 с коэффициентом усиления 100. Величину напряжения верхнего предела (полной шкалы) можно устанавливать, подстраивая потенциометр 100Ω так, чтобы деформации 3500 με выход составлял -3.5 В, а для деформации 3500 με выход +5.0 В.

Далее сигнал можно преобразовать с помощью АЦП с верхним пределом по входу 10В. Конденсатор 0.1 мкФ на входе инструментального усилителя совместно с сопротивлением моста 1КΩ составляют низкочастотный фильтр для радиочастотных помех. Частота среза составляет около 1.6 КГц.

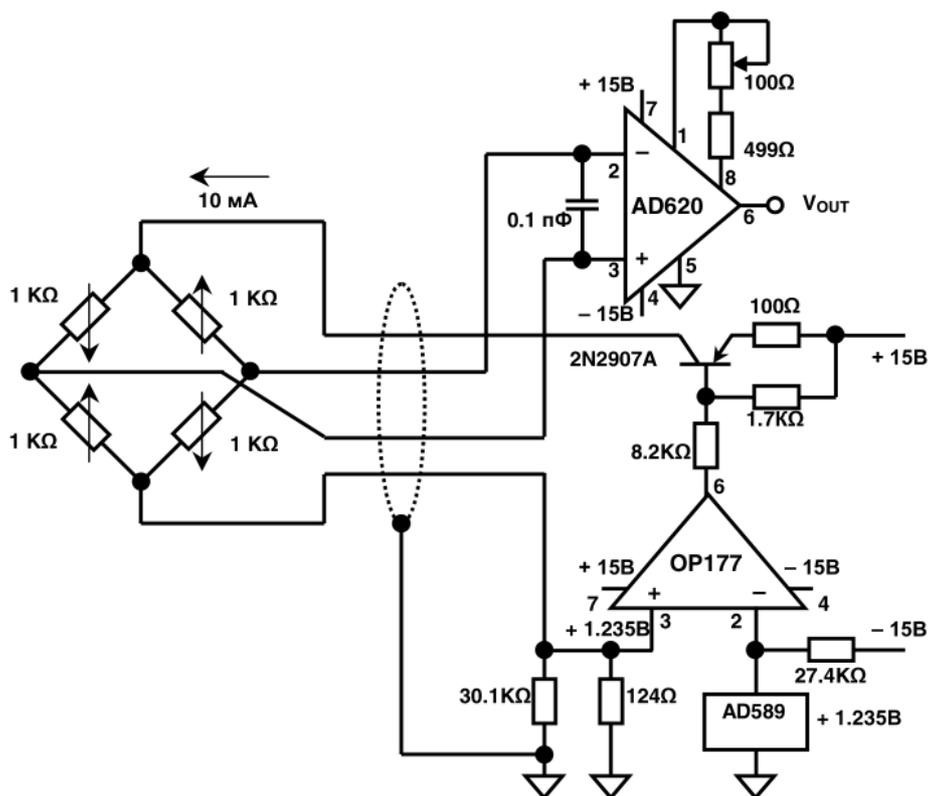


Рис. 4. Полномостовая цепь для измерения деформации

## 5. Разработка корпуса

Исходя из условия, что необходимо обеспечить защиту уровня IP67 было принято решение разместить упругий элемент в герметичный корпус. Все швы и разъемы загерметизировать клеем, а так же путем уменьшения шероховатостей.

## 6. Вывод

Разработанные тензометрические весы не имеют громоздких механических деталей, также в конструкции датчика весов отсутствуют подвижные элементы, благодаря чему он почти не изнашивается. Эти весы надежны и просты в работе, и при соблюдении правил эксплуатации служат намного дольше механических аналогов.

Данные весы, благодаря своей надежности и эффективности, широко используются на производстве, в грузоперевозках и торговле.

## Список литературы

1. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.

2. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.
3. Клокова Н.П. Тензорезисторы: теория, методика расчета, разработки. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.