

#09, сентябрь 2015

УДК 681.2.084

## Исследование тензорезистивного датчика пульсаций давления воды и оптимизация его параметров

*Короткова О.А., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Информационные Системы и Телекоммуникации»*

*Научный руководитель: Буцев А.А., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Элементы приборных устройств»  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

### Начальные условия

В качестве упругого элемента приведена стальная мембрана, заделанная по краям и нагруженная давлением.

Материалом упругого элемента служит нержавеющей сталь AISI 316.

Марка AISI 316 - улучшенная версия 304, с дополнением молибдена и немного более высоким никелевым содержанием. Данная композиция AISI 316 значительно повышает коррозионное сопротивление в большинстве агрессивных средах. Молибден делает сталь более защищенной от питтинговой и щелевой коррозии в хлористой среде, морской воде и в парах уксусной кислоты. Данный материал выбран в рамках Solidworks.

Свойства стали AISI 316 приведены на рисунке 1.

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	1.929999974e+011	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.3	Не применимо
Предел прочности при растяжении	550000001.7	Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	137895145.9	Н/м <sup>2</sup>
Начальный модуль		Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	1.6e-005	/К
Массовая плотность	8000	кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент отверждения	0.85	Не применимо

Рис. 1. Свойства стали AISI 316

## Тензорезистивные датчики

Тензорезистивные датчики давления используют конструкцию механической мембраны с установленным на ней чувствительным элементом – тензорезистором.

*Преимуществом* данного вида датчиков является более высокая точность измерений по сравнению с механическими и индуктивными датчиками, наличие унифицированного токового выхода, более высокая надежность.

*Недостатки* тензорезистивных датчиков давления связаны с механической усталостью тензорезисторов, надежность которых ниже надежности самих механических мембран, на которых они расположены. Кроме того, тензорезисторы требуют определенных температурных условий, что не всегда выполнимо в условиях эксплуатации.

## Конструкция

Датчик состоит из защитного корпуса, рабочего корпуса, вкручиваемого в защитный корпус со степенью защиты IP67, что означает защиту от пыли и от временного погружения в воду, и упругого элемента – мембраны с мостом тензорезисторов (см. рис. 2).

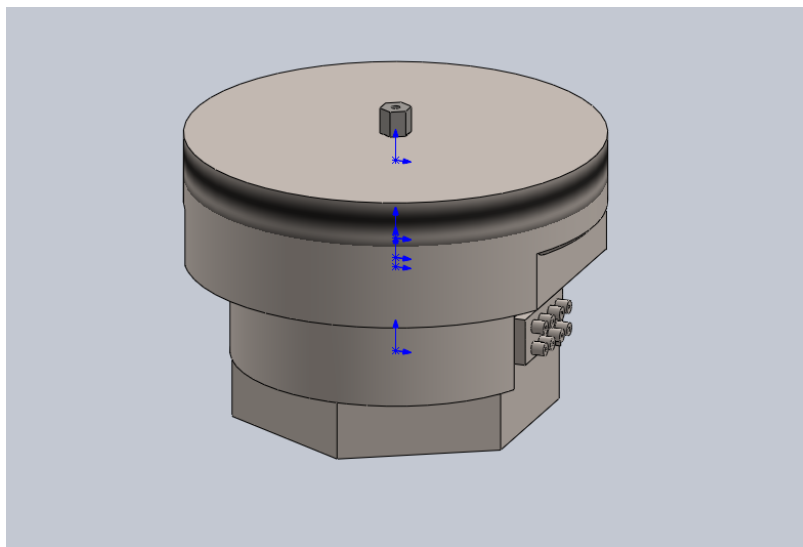


Рис. 2. Сборка измерительного модуля датчика и корпуса-крышки

## Процесс измерений

Упругая мембрана, на которой размещены фольговые тензорезисторы, приварена к датчику давления. Тензорезисторы соединены в мостовую схему. В полость, образованную рабочим корпусом и мембраной снизу подается через нижний герметичный

клапан начальное давление 3 бар. Определенное внешнее давление P0 (максимально до 3 бар), поступающее сверху на рабочую мембрану через герметичный клапан в защитном корпусе, вызывает деформацию мембраны, фиксируемую тензорезисторами, выдающими соответствующий сигнал в измерительную схему.

### Предварительный расчет

Величина допускаемого давления определяется из формулы:

$$P_{max} = 1,5[\sigma] \frac{h^2}{R^2}.$$

Отсюда

$$h = \sqrt{\frac{P_{max}}{1,5 \cdot [\sigma]}} \cdot R.$$

Следовательно, толщина мембраны зависит от её радиуса линейно. Логично, что при увеличении радиуса мембраны необходимо увеличить и её толщину для нормальной работы элемента при заданной нагрузке.

С учетом допустимых пульсаций давления (до 3 бар = 300000 Па) и допустимым напряжением

$$[\sigma] = 550000001,7 \text{ Н/м}^2.$$

приходим к:  $300000 = 1,5 \cdot 550000001,7 \cdot \frac{h^2}{R^2}$ . Откуда  $\frac{h^2}{R^2} = 0,000036$ , следовательно, справедливо отношение:  $\frac{h}{R} = 0,00603$ . Тогда получаем, что:

$$h = 0,00603R.$$

Учитывая, что радиус мембраны выбран равным  $R = 83$  мм, получаем, что толщина

$$h = 0,00603 \cdot 83 = 0,50049 \text{ мм}.$$

Зависимость, приведенная ниже, выражает перемещение жесткого центра мембраны.

$$\varepsilon = A_p \cdot \frac{P \cdot R_0^4}{E \cdot h^3},$$

где  $A_p = \frac{3 \cdot [1 - \mu^2] \cdot [c^4 - 1 - 4 \cdot c^2 \cdot \ln(c)]}{16 \cdot c^4}$  - коэффициент, зависящий от отношения радиуса

мембраны к радиусу ее жесткого центра  $c = \frac{R_0}{r} = 8$ ,  $\mu = 0,3$  - коэффициент Пуассона.

Отсюда получим зависимость деформации центра мембраны от ее радиуса:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot [1 - \mu^2] \cdot [c^4 - 1 - 4 \cdot c^2 \cdot \ln(c)]}{16 \cdot c^4} \cdot \frac{P \cdot R_0}{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{P_{max}}{1,5 \cdot \sigma_{пред}} \cdot E},$$

$$\varepsilon = \frac{0,016P}{\sqrt[3]{\frac{300000}{1,5 \cdot 550000001,7}} \cdot 19,3 \cdot 10^{10}},$$

$$\varepsilon = 13,8 \cdot 10^{-12} \cdot P \quad (1)$$

Как видно из последнего уравнения, зависимость деформации от радиуса мембраны носит линейный характер.

### Выходная характеристика

Измерение механических деформаций мембраны будет производиться при помощи водонепроницаемых фольговых тензорезисторов (мембранной розетки) серии KFW с номинальным сопротивлением  $R = 120$  Ом, чувствительностью  $K \approx 2,1$  и коэффициентом линейного расширения  $\gamma \approx 16 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (см. рис. 3). Применимы как вне помещения, так и под водой. Защитные компоненты наносятся на тензорезисторы и терминалы для защиты от адсорбирующейся влаги. Эти компоненты существуют в различных вариантах типа, включая каучук, воск, замазку.

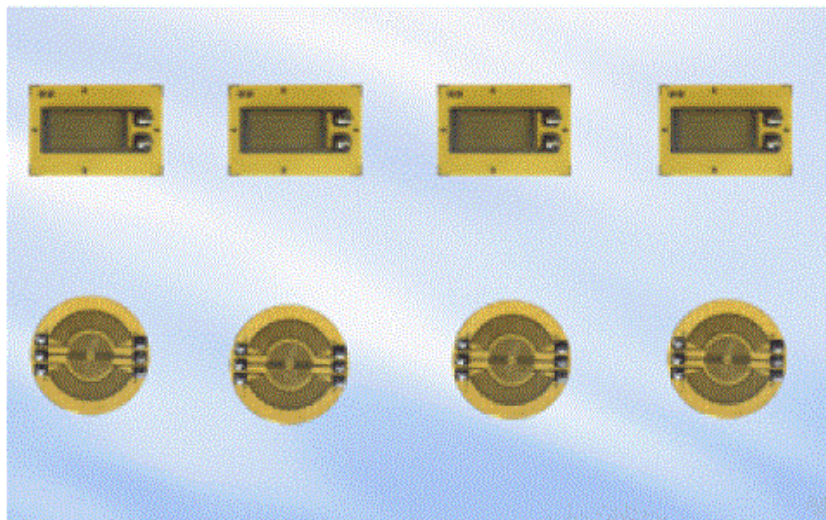


Рис. 3. Тензорезисторы серии KFW

Возьмем уравнение преобразования относительной деформации в относительное изменение сопротивления чувствительного элемента.

$$\frac{\Delta R}{R} = e^{K \cdot \varepsilon(P)} - 1,$$

где  $\Delta R$  – изменение сопротивления тензорезистора, а  $\varepsilon(P)$  – зависимость перемещения центра мембраны от действующего давления.

Подставим в данное уравнение параметры, а также уравнение (1):

$$\Delta R = 120 \cdot (e^{2,1 \cdot 13,8 \cdot 10^{-12} \cdot P} - 1) \quad (2)$$

Составим таблицу для построения графика в Excel. Таблица представлена ниже на таблице 1.

Таблица 1

Данные для построения графика

$\Delta R$ , Ом	P, Па
0,000348	100000
0,000452	130000
0,000556	160000
0,000696	200000
0,000800	230000
0,000939	270000
0,001043	300000

Получим график зависимости изменения сопротивления тензорезистора от действующего давления, представленный на рисунке 4:

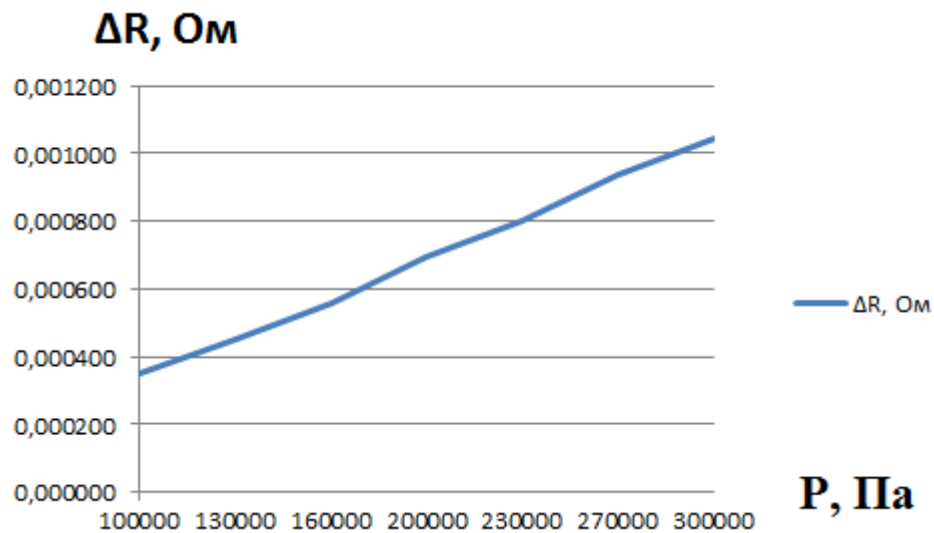


Рис. 4. График зависимости изменения сопротивления тензорезистора  $\Delta R$  от действующего давления P

### Изображения результатов исследования

Исследование проводилось без участия корпуса-крышки. На рисунке 5 показано распределение нагрузки (давления).

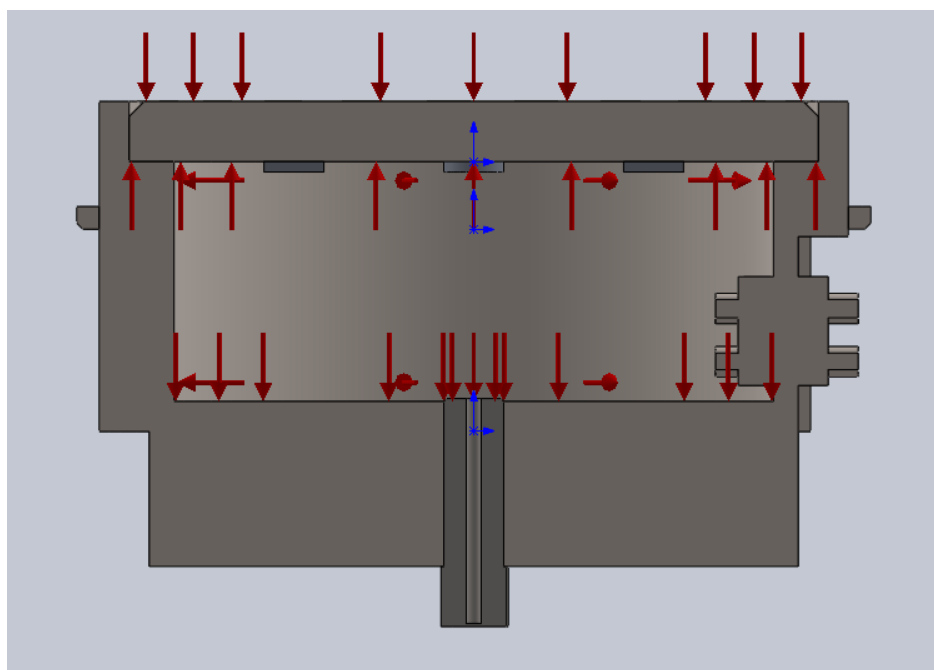


Рис. 5. Распределение давления для исследования измерительного модуля датчика

Далее на рисунках 6 и 7 соответственно приведены изображения распределения напряжения и перемещение мембраны при внутреннем давлении, равным 1 бар, и внешнем давлении, равным 3 бара.

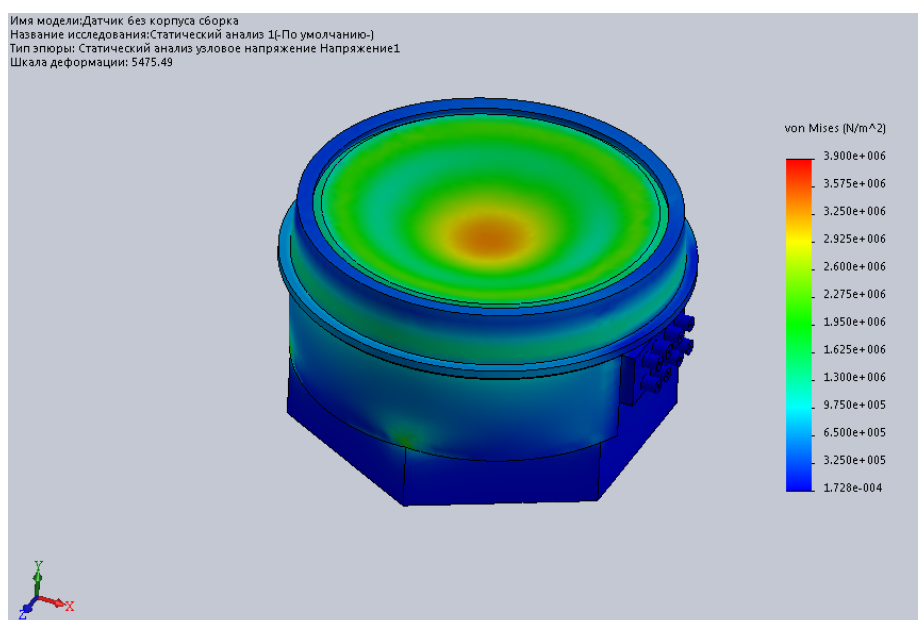


Рис. 6. Результаты исследования SolidWorks: напряжение упругого элемента

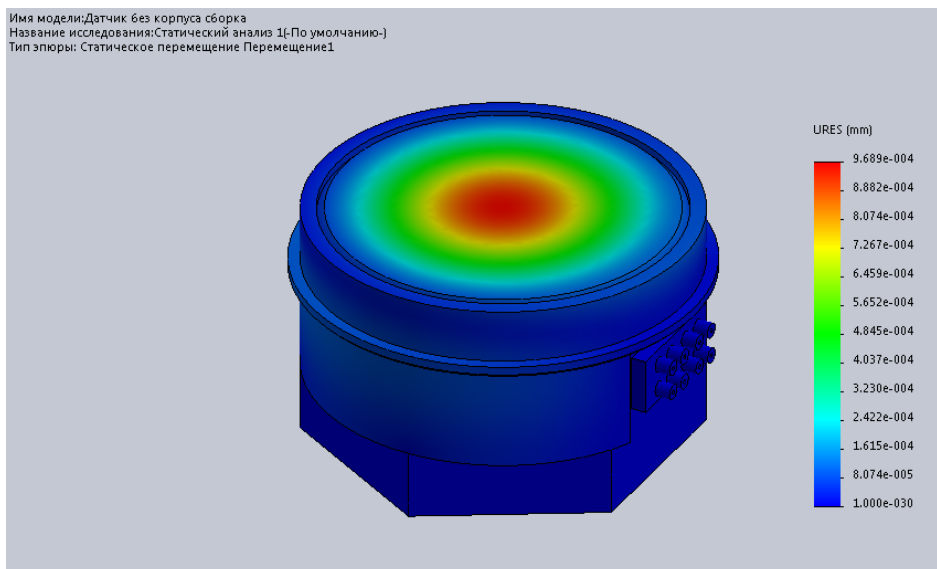


Рис. 7. Результаты исследования SolidWorks: перемещение упругого элемента

### Список литературы

1. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
2. Потапцев И.С., Нарыкова Н.И., Перминова Е.А., Буцев А.А. Разработка конструкторской документации при курсовом проектировании: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 78 с.
3. Потапцев И.С., Буцев А.А., Еремеев А.И., Кокорев Ю.А. Разработка конструкторской документации при курсовом проектировании: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 82 с.