

УДК 62-1/-9

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ

С. В. ПЕТЮКЕВИЧ, Н. В. КАРЛА

(Представлено: канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ)

Представлены результаты теоретического анализа свойств тензорезистора. Оценена возможность применения тензорезисторов для измерения внутриглазного давления. Материалы статьи могут быть использованы для разработки устройства измерения внутриглазного давления на основе тензодатчика.

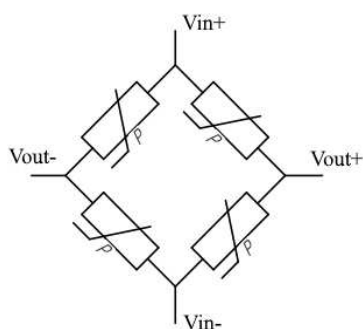
Введение. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в необходимости найти способ удешевить производство устройств для измерения внутриглазного давления, так как большинство приборов, выполняющих данную функцию, имеют достаточно высокую стоимость. Имеет смысл проанализировать возможность применения тензорезисторов для измерения внутриглазного давления, так как прибор, использующий танзорезисторы будет иметь более низкую стоимость, чем существующие аналоги. Тензорезистор (от лат. *tensus* — напряжённый и лат. *resisto* — сопротивляюсь) — резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации. С помощью тензорезисторов можно измерять деформации механически связанных с ними элементов [1]. Большинство современных устройств, предназначенных для измерения внутриглазного давления оказывают физическое воздействие на глазное яблоко, приводящее к его деформации, путем оценки характера деформаций производится расчет внутриглазного давления. Исходя из этого можно предположить, что способность тензорезистора изменять сопротивление при деформации может быть применена в устройстве для измерения внутриглазного давления.

Теоретический анализ. В данной работе проведен анализ свойств тензорезистора. Оценена возможность применения тензорезисторов для измерения внутриглазного давления. При деформации объекта измерения эта деформация передается резистивной проволоке или резистивной фольге тензорезистора через его основание (подложку). В результате сопротивление проволоки или фольги изменяется. Это изменение точно пропорционально деформации, что отражает следующее уравнение [2]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R / R}{K}, \quad (1)$$

где ε — измеряемая деформация; L — исходная длина материала; ΔL — изменение длины под действием силы; R — сопротивление тензорезистора; ΔR — изменение сопротивления под действием деформации; K — коэффициент тензочувствительности.

На практике, деформации тензорезистора не приводят к существенному изменению сопротивления, из-за чего для измерения тензорезисторы соединяют в мост Уитсона, данная конструкция называется тензодатчиком (см. рисунок 1).



**Vin- и Vin+ - входное напряжение питания тензодатчика;
Vout- и Vout+ - выходное напряжение**

Рисунок 1. – УГО тензодатчика

Измеряя напряжение на выводах Vout- и Vout+ можно судить о степени деформации тензодатчика. Главные преимущества моста Уитсона – возможность обеспечить очень точные измерения сопротивления [3].

Можно сделать вывод, что тензорезисторы соединенные в мост Уитсона могут применяться для решения задач, где необходимо измерение деформаций с высокой точностью. В случае измерения внутриглазного давления точность крайне важный фактор, так как:

А) высокая точность позволяет с большей вероятностью выявлять заболевания и реже ставить ложные диагнозы пациенту;

Б) во избежание травм глаза, следует избегать высоких физических воздействий на глазное яблоко, так как существенная механическая деформация может привести к патологиям. Поэтому нам необходимо минимизировать деформации, которым будет подвергаться глаз – возникает необходимость в высокой точности датчика.

Существует множество методов измерения внутриглазного давления, но наиболее предпочтительным из них является апланационная тонометрия. В настоящее время считается наиболее надежным методом для измерения ВГД. Метод основан на законе Имберта-Фика: $P = F/S$, в котором P — давление, S — поверхность уплощенной области, а F — сила, необходимая для уплощения фиксированной области роговицы [4].

Обычно измерения данным методом осуществляются следующим образом: к глазу прикладывается заведомо известная фиксированная сила (например, на поверхность роговицы помещается груз весом 10 г) и расчеты ведутся на основании площади уплощенной области. Но данный способ нам не подходит так как мы не можем определить площадь уплощенной области применяя тензодатчик, но мы можем определить приложенную нагрузку, а площадь контакта ограничить (например, использовать квадратную подкладку с известной площадью), и вести расчёты зная фиксированное значение площади [5].

Так как глазное яблоко обладает определённой упругостью, которая зависит от глазного давления при физическом воздействии на глазное яблоко будет возникать сила упругости ($F_{упр}$), которая будет частично противодействовать силе тяжести груза (F_T) (рисунок 2).

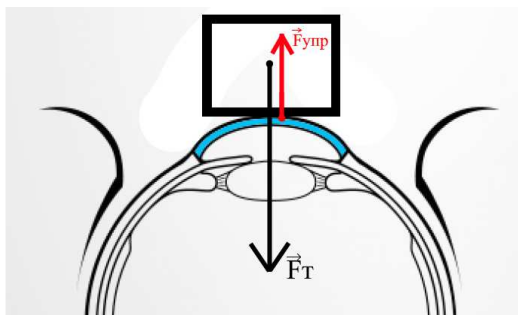


Рисунок 2. – Глазное яблоко при воздействии груза [6]

Данные вектора имеют противоположные направление и по мере деформации (уплощения) роговицы сила упругости будет возрастать пока не будет достигнуто состояние равновесия. Если между грузом и глазным яблоком поместить тензодатчик, можно по показаниям тензодатчика судить о степени деформации глазного яблока и определять внутриглазное давление. Чем больше степень деформации глазного яблока – тем меньше внутриглазное давление.

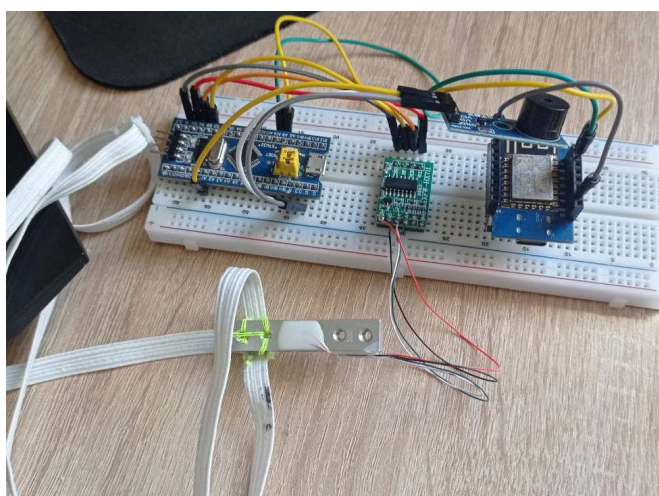
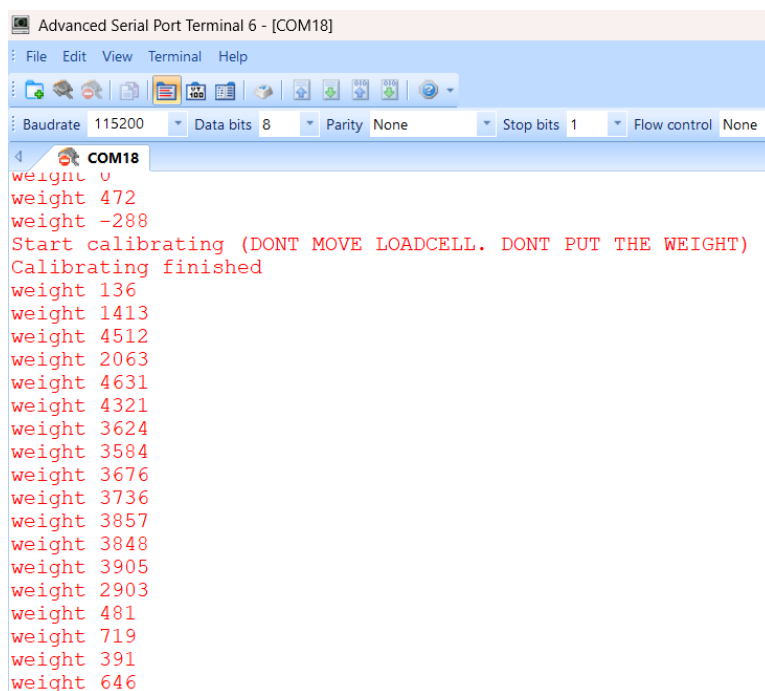


Рисунок 3. – Прототип прибора для измерения внутриглазного давления

Был собран прототип устройства для измерения внутриглазного давления (см. рисунок 3). Прототип был откалиброван для измерения массы груза на поверхности датчика в мг. Сам тензодатчик закрепляется на поверхности глазного яблока с помощью повязки из бельевых резинок, благодаря чему повязка подходит для людей с разным размером головы.

Было проведено опытное измерение. На поверхность тензодатчика поместили груз массой 5,74 г. После чего были получены показания тензодатчика (см. рисунок 4). Видно, что показания находятся в пределах от 3500 до 3900 мг, что меньше массы груза, так как часть деформации, вызванной весом груза, компенсируется силой упругости глаза, которая зависит от внутриглазного давления. Из этого можно сделать вывод, что тензодатчик возможно применять с целью измерения внутриглазного давления.



```

Advanced Serial Port Terminal 6 - [COM18]
File Edit View Terminal Help
Baudrate 115200 Data bits 8 Parity None Stop bits 1 Flow control None
COM18
weight 472
weight -288
Start calibrating (DONT MOVE LOADCELL. DONT PUT THE WEIGHT)
Calibrating finished
weight 136
weight 1413
weight 4512
weight 2063
weight 4631
weight 4321
weight 3624
weight 3584
weight 3676
weight 3736
weight 3857
weight 3848
weight 3905
weight 2903
weight 481
weight 719
weight 391
weight 646

```

Рисунок 4. – Результаты экспериментального измерения

Заключение. Проведенный анализ свойств тензорезисторов и методов измерения внутриглазного давления показал, что тензорезисторы соединенные в мост Уитсона теоретически могут применяться для измерения внутриглазного давления. Был собран прототип устройства для измерения внутриглазного давления. Результаты экспериментального измерения с помощью прототипа показали, что тензодатчик действительно может применяться для измерения внутриглазного давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Википедия. Тензорезистор [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BD%D0%B7%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80>, свободный. – Дата доступа: 07.08.2025.
2. Японские Измерительные Технологии. Официальный дилер компании TML. Тензорезисторы общее описание и принципы работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://www.tmljp.ru/information/tenzorezistory_obshchee_opisanie/, свободный. – Дата доступа: 07.08.2025.
3. Vedantu. Why is Wheatstone's bridge more accurate? [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.vedantu.com/question-answer/wheatstones-bridge-more-accurate-class-12-physics-cbse-610cc848b6d618714e4f9264>, свободный. – Дата доступа: 07.08.2025.
4. National library of Medicine. How to Measure Intraocular Pressure: An Updated Review of Various Tonometers [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8456330/>, свободный. – Дата доступа: 07.08.2025.
5. Рожко, Ю.И. глазное давление: тонометрические и тонографические методы исследования/ Ю.И. Рожко. – Гомель: ГомГМУ, 2013. – 7 с.
6. LensGo. Роговица [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://lensgo.ru/blog/articles/rogovitsa>, свободный. – Дата доступа: 07.08.2025.