

Исследование и разработка датчика измерения давления мембранного типа с использованием платформы Arduino и программного комплекса Labview

С.П. Ереско^a, В.А. Зябликов^b, Е.В. Кукушкин^c

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнёва,
пр. «Красноярский рабочий» 31, Красноярск, Россия

^aeresko07@mail.ru, ^bvalerij-zyablikov@mail.ru, ^cironjeck@mail.ru

^a<https://orcid.org/0000-0001-9580-480X>, ^c<https://orcid.org/0000-0002-9921-575>

Статья поступила 9.01.2019, принята 3.02.2019

В статье описан мембранный датчик измерения давления. Проведены его теоретические и экспериментальные исследования с использованием положений системного и регрессионного анализа, известных соотношений теории прочности и сопротивления материалов, а также с применением сертифицированной программы Eregre, специализированных пакетов программ АРМ FEM, «Компас-3D», авторского стендового оборудования и автоматизированных калибровочных средств с записью данных на компьютер. На основе анализа известных конструкций разработан мембранный датчик измерения давления с повышением точности за счет уменьшения нелинейности измерительной цепи датчика и повышения чувствительности путем расположения радиальных тензоэлементов, воспринимающих отрицательные радиальные деформации на окружности радиусом, при котором абсолютные значения отрицательных радиальных деформаций равны максимальным положительным радиальным деформациям мембраны. Исследована конструкция мембранного датчика измерения давления с помощью конечно-элементного анализа элементов конструкции. Исходя из данных вычислительного эксперимента, получены регрессионные зависимости значения деформации мембраны для следующих материалов: АД0, АД1, сталь 3сп, сталь 12Х18Н10Т и сталь 36НХТЮ при давлениях от 1 до 10 атмосфер. Найдена оптимальная толщина мембраны для датчика измерения давления, которая составляет $b = 0,5$ мм. Проведен расчет для выбранного материала мембраны (сталь 36НХТЮ), который показал, что ее деформация будет упругой. Предложена усовершенствованная конструкция мембранного датчика измерения давления с использованием упругой мембраны из стали 36НХТЮ, которая позволяет измерять давления в заданном диапазоне, а также разработана система измерения давления с использованием платформы Arduino. На базе натурных экспериментальных исследований произведено тарирование мембранного датчика давления с использованием образцового манометра, по которому были получены значения давления. Выполнена корректировка кода программы в среде разработки Arduino. Разработана методика тарирования датчика измерения давления.

Ключевые слова: датчик; мембрана; давление; тензорезистор; нагружение; деформация; тарирование; методика.

Research and development of a pressure measurement sensor of the membrane type using the Arduino platform and the Labview software package

S.P. Eresko^a, V.A. Zyablikov^b, E.V. Kukushkin^c

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

^aeresko07@mail.ru, ^bvalerij-zyablikov@mail.ru, ^cironjeck@mail.ru

^a<https://orcid.org/0000-0001-9580-480X>, ^c<https://orcid.org/0000-0002-9921-575>

Received 9.01.2019, accepted 3.02.2019

This article describes the membrane pressure sensor and its study. Research tasks have been solved by carrying out theoretical and experimental researches with use of the system analysis, regression analysis, the known equations of the theory of strength and resistance of materials and the certified programs "EREGRE", specialized software packages APM FEM, Kompas-3D, field bench equipment and automated calibration tool data logging on computer. Based on the analysis of known structures, a membrane pressure measurement sensor was developed with an increase in accuracy by reducing the non-linearity of the sensor measuring circuit and sensitivity by arranging radial strain elements that perceive negative radial deformations on a circle with a radius at which the absolute values of negative radial deformations equal the maximum radial deformations of the membrane. The design of a membrane pressure measurement sensor is investigated using a finite element analysis of structural elements. Based on the data of the computational experiment, regression dependencies of the membrane strain value for the following materials were obtained: AD0, AD1, steel 3sp, steel 12X18N10T and steel 36NHTYU at pressures from 1 to 10 ATM. An optimum membrane thickness for a pressure measurement sensor was found, which is $b = 0.5$ mm. The calculation for the selected membrane material (steel 36NHTYU) showed that its deformation is

elastic. An improved design of a membrane pressure measurement sensor using an elastic membrane made of 36NHTY steel, which allows measuring pressure in a given range, is proposed. The pressure measurement system using an Arduino platform is developed. On the basis of field experimental studies, a membrane pressure sensor was calibrated using an exemplary manometer, from which pressure values were obtained. The correction of the program code in the Arduino development environment has been carried out. The for calibrating the pressure measurement sensor method has been developed.

Keywords: sensor; membrane; pressure; strain gage; loading; deformation; calibration; technique.

Известен датчик давления [1], который содержит корпус с закрепленной в нем полупроводниковой мембраной с расположенными на ней тензорезисторами, соединенными в измерительную схему, и компенсатор нелинейности. Датчик отличается тем, что с целью повышения точности и упрощения конструкции компенсатор в нем выполнен в виде поворотной втулки, установленной одним торцом на поверхности мембраны, у зоны заделки, а другим — на корпусе, причем внутренний диаметр втулки эксцентричен наружному.

Датчик давления [2], содержащий мембрану из полупроводникового материала с тензопреобразователем, опорное кольцо с диэлектрическим слоем и нанесенным на него слоем полупроводника, соединенным с корпусом, отличается тем, что с целью повышения точности, стабильности и расширения диапазона рабочих температур в него введен слой стекла, равный по толщине слою полупроводника и размещенный между слоем полупроводника и корпусом, выполненным из того же материала, что и мембрана.

Датчик давления [3] состоит из корпуса и размещенной в нем мембраны с закрепленными на ней кремниевыми тензорезисторами, легированными бором, с концентрацией дырок $(0,5-1,8) \cdot 10^{-6}$ см⁻³. Датчик отличается тем, что с целью повышения точности за счет уменьшения температурной погрешности мембрана выполнена из эливарного сплава с температурным коэффициентом линейного расширения, равным $(0,4-6,4) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Существует тензометрический датчик давления [4], конструкция которого включает в себя тензометрический датчик давления с установленной в корпусе мембраной, связанной посредством штока с жестко заземленной с двух концов балкой, на которой размещены тензорезисторы, соединенные в мостовую измерительную схему. Отличие данного датчика в том, что в нем тензорезисторы, входящие в смежные плечи мостовой схемы, расположены вдоль балки, в ее центральной части, на противоположных сторонах, параллельно друг другу, а длина балки в 1,4–1,7 раза больше базы тензорезисторов.

Тензорезисторный датчик давления [5] состоит из корпуса, в котором размещен упругий элемент, выполненный в виде полого цилиндра с герметично закрытым концом, свободный торец которого снабжен подводным штуцером, а также тензорезисторов, размещенных на поверхности полого цилиндра, и стакана, установленного с внешней стороны упругого элемента соосно с ним, при этом основание стакана жестко закреплено на свободном торце цилиндра. Конструкция отличается тем, что на поверхности стакана размещены нормирующие и компенсационные резисторы, соединенные в электрическую мостовую схему. При этом упругий элемент и стакан выполнены из материалов с одинаковой теплопроводностью, а их площади поперечного сечения равны.

Основным недостатком известных датчиков является невозможность их подключения к программному обеспечению компьютера через стандартные проводные и беспроводные интерфейсы.

На основе анализа конструкций мембранных датчиков спроектирован датчик измерения давления, считывающий показания давления в системе стенда в реальном времени. Датчик состоит из корпуса, изготовленного из металла с жестко закрепленной в нем мембраной, на которой размещен тензорезистор (2ФКМГ-20-100Б ГОСТ 21616-76), резисторы которого соединены между собой по мостовой схеме. Сам тензорезистор наклеен на мембрану.

В задачу исследования входило усовершенствование измерительной системы, расширение функциональных возможностей лабораторного учебного стенда ГПС-01 [6], работающего в диапазоне давлений от 1 до 10 атм., путем проектирования и изготовления опытного образца мембранного датчика измерения давления. Одним из элементов такого датчика является мембрана, которая будет нагружена различными уровнями давления. Исходя из этого, возникает необходимость анализа напряженно-деформированного состояния мембраны на этапах проектирования, экспериментальных исследований [7]. Задача состоит в том, чтобы выполнить расчет мембраны, которая должна работать в зоне упругих деформаций. Разработанная конструкция мембраны требует обоснованной конструкторской проработки и проведения прочностных расчетов, которые наиболее актуально выполнять с использованием САПР и пакетов конечно-элементного анализа. Подобная методика описана авторами в работе [8], где исследовались конструкции составной унифицированной вилки карданной передачи. В работе [9] выполнен конечно-элементный анализ крестовин карданных шарниров неравных угловых скоростей. Таким образом, исследования в области напряженно-деформированного состояния узлов пневматических систем являются актуальными.

Исследование напряженно-деформированного состояния мембраны включает в себя следующие этапы:

1. Оценка прочностных характеристик мембраны при нагружении давлением от 1 до 10 атм. (от 69,24 до 692,4 Н);

2. Исследования параметров проводились на основе методов регрессионного анализа, цель которого заключается в нахождении такого сочетания параметров размеров толщины мембраны b и давления p , при котором обеспечиваются минимальные значения деформации мембраны при ее достаточной информативной способности.

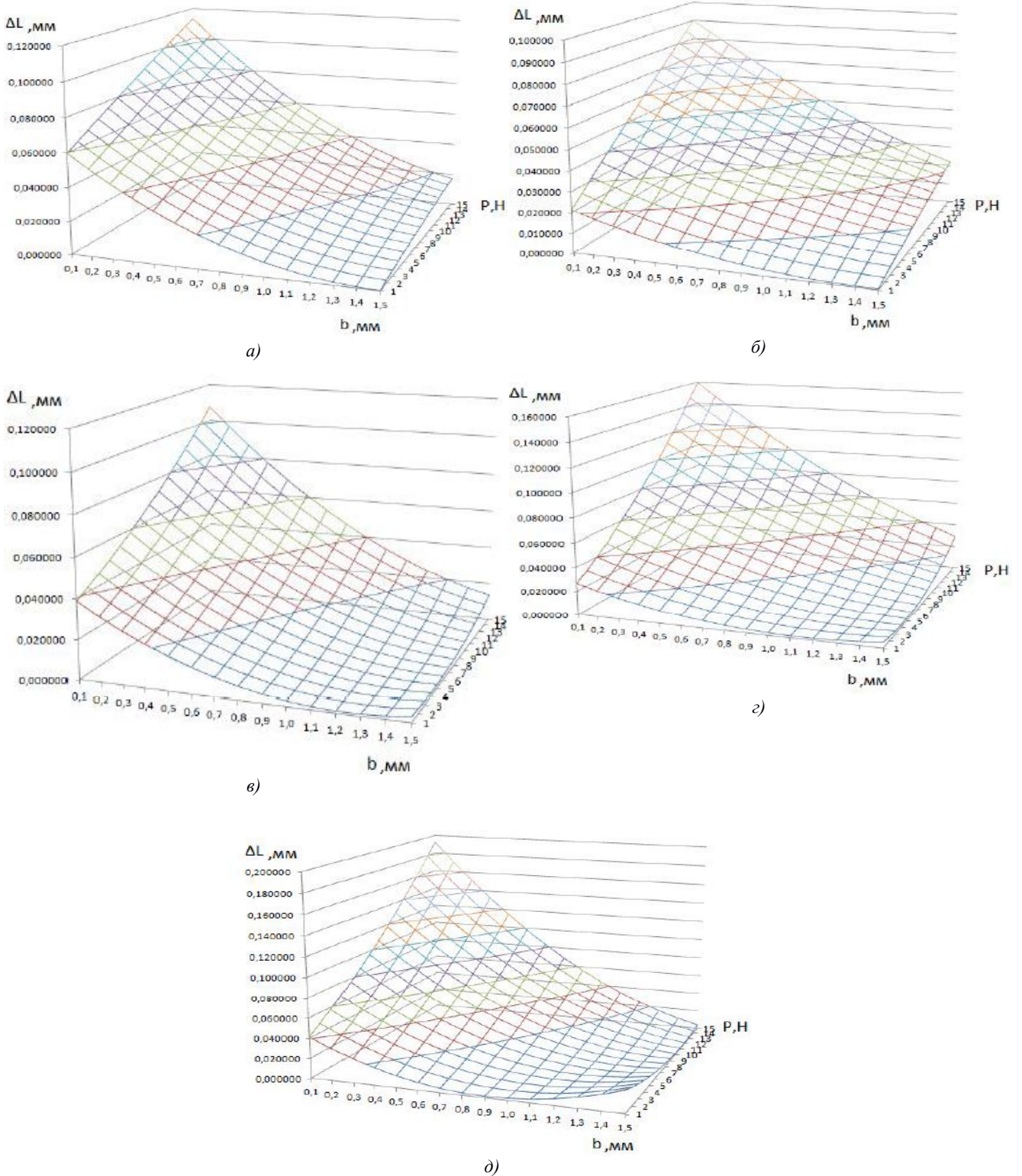


Рис. 1. График поверхности отклика значений деформации мембраны из материала: а — АД0; б — АД1; в — сталь 3сп; г — 12Х18Н10Т; д — 36НХТЮ

В результате проведенного регрессионного анализа получены регрессионные модели значения деформации мембраны для следующих материалов: АД0 (1), АД1 (2), сталь 3сп (3), сталь 12Х18Н10Т (4), 36НХТЮ (5):

$$\Delta l = 0,064 - 0,087 \times b + 0,062 \times p - 0,027 \times b \times p + 0,029 \times b^2 - 0,003657 \times p^2 \quad (1)$$

$$\Delta l = 0,019 - 0,03 \times b + 0,078 \times p - 0,035 \times b \times p +$$

$$+ 0,011 \times b^2 - 0,003111 \times p^2 \quad (2)$$

$$\Delta l = 0,042 - 0,069 \times b + 0,051 \times p - 0,043 \times b \times p + 0,029 \times b^2 + 0,022 \times p^2 \quad (3)$$

$$\Delta l = 0,037 - 0,086 \times b + 0,107 \times p - 0,119 \times b \times p + 0,051 \times b^2 + 0,067 \times p^2 \quad (4)$$

$$\Delta l = 0,043 - 0,101 \times b + 0,121 \times p - 0,125 \times b \times p + 0,06 \times b^2 + 0,043 \times p^2 \quad (5)$$

В результате получены значения конструктивно-режимных параметров, обеспечивающих минимальный уровень деформации мембраны.

Достоверность результатов обеспечивается статистической обработкой экспериментальных данных и их регрессионным анализом, подтверждающим адекватность полученных регрессионных моделей и относительную погрешность аппроксимации для материала АД0 — 5,15; для АД1 — 11,74; для 12Х18Н10Т — 14,75; для 36НХТЮ — 12,7; для стали 3сп — 8,9 %. Средняя погрешность аппроксимации составила 10,6 % [10].

Анализ графиков поверхностей отклика значений деформации мембраны позволил установить оптимальное значение ее толщины, которая составляет $b = 0,5$ мм. График зависимости деформации от давления для мембраны толщиной $b = 0,5$ мм представлен на рис. 2

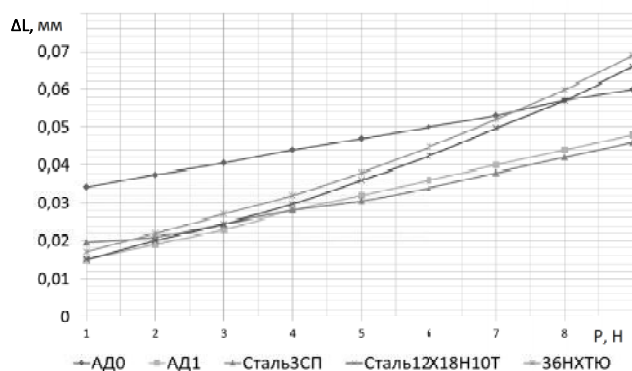


Рис. 2. График зависимости деформации мембраны от давления

На основе данных вычислительного эксперимента получены регрессионные зависимости значения деформации мембраны при давлениях от 1 до 10 атм. для следующих материалов: АД0, АД1, сталь 3сп, сталь 12Х18Н10Т и сталь 36НХТЮ. Найдена оптимальная толщина мембраны для датчика измерения давления, которая составляет $b = 0,5$ мм. Для изготовления мембраны выбрана сталь 36НХТЮ.

Достаточную пластичность в закаленном состоянии и высокие механические свойства после термомеханической обработки, включающей закалку, деформирование и старение, имеют дисперсионно-твердеющие сплавы на железо-никель-хромовой основе, типичным представителем которых является сплав 36 НХТЮ. Эти сплавы превосходят ряд материалов в отношении коррозионной и термической стойкости. Сплав 36НХТЮ имеет высокий предел упругости и находит применение для изготовления многих упругих элементов сложной формы, работающих при высоких напряжениях, в довольно агрессивных средах и при повышенных температурах [11]. Толщина мембраны датчика является одним из его важнейших физико-механических параметров, определяет чувствительность тензорезистора и диапазон линейного преобразования. Появление новой технологической возможности получения более тонкого упругого элемента открывает возможность увеличе-

ния чувствительности тензорезистора при сохранении его остальных геометрических размеров неизменными. Или наоборот чувствительность преобразования может остаться на прежнем уровне, но за счет этого могут быть уменьшены его геометрические размеры и, как следствие, стоимость. Предложенная конструкция датчика требует анализа изгиба этой системы.

Изготовлен опытный образец мембранного датчика измерения давления, считывающий показания давления в системе стенда в реальном времени. Датчик состоит из корпуса с жестко закрепленной в нем мембраной, на которой размещен тензорезистор, соединенный в мостовую измерительную схему. Общий вид датчика измерения давления представлен на рис. 3.

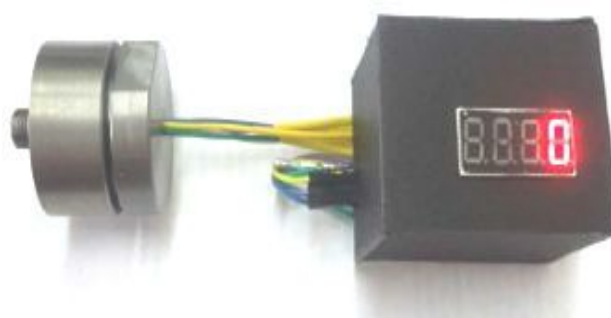


Рис. 3. Мембранный датчик измерения давления

Структурная схема элементов датчика измерения давления представлена на рис. 4, 5

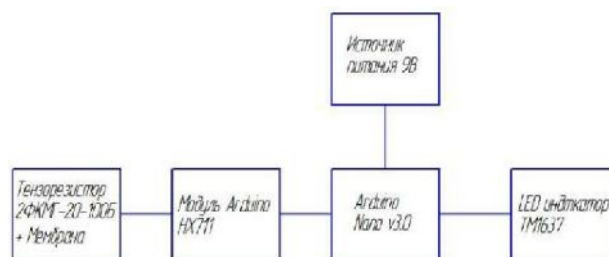


Рис. 4. Структурная схема элементов датчика измерения давления

Подобное устройство [12] было разработано на платформе Arduino с применением программного комплекса Labview. Разработанный мембранный датчик измерения давления с использованием Arduino может использоваться в системах измерений на испытательных стендах, в том числе стендах авторской разработки [13–15].

Разработана методика тарирования датчика измерения давления, которая включает в себя следующие этапы:

1. Подача давления в рабочую полость датчика величиной от 1 до 8 атм. с шагом 0,4 атм. (предварительно);
2. Введение в программу поправочных коэффициентов и тарировочных зависимостей;
3. Подача давления в рабочую полость датчика величиной от 1 до 8 атм. с шагом 0,4 атм. (окончательно).

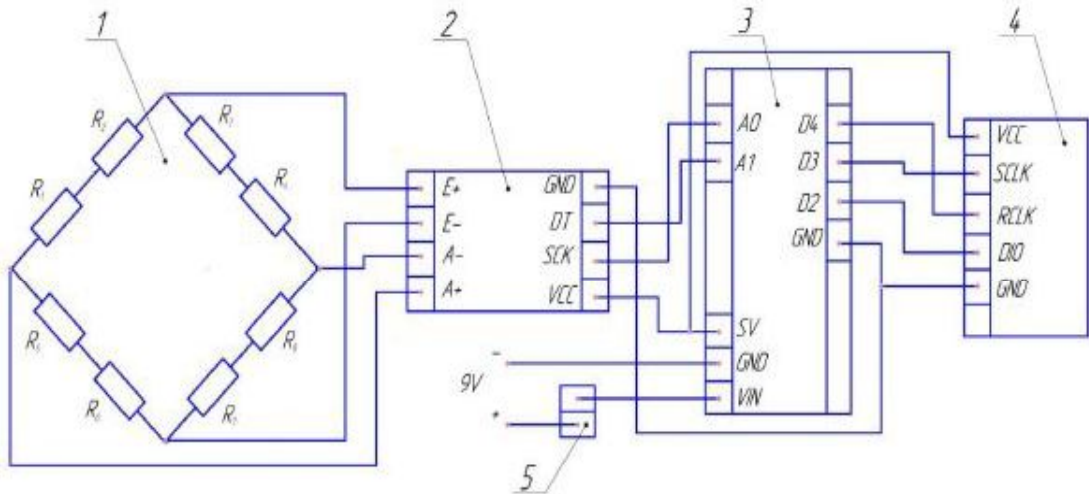


Рис. 5. Схема подключения элементов датчика

По первому этапу получен график зависимости значений нагружения от полученных значений мембранного датчика (рис. 6), на каждом из которых были получены линейные уравнения зависимости.

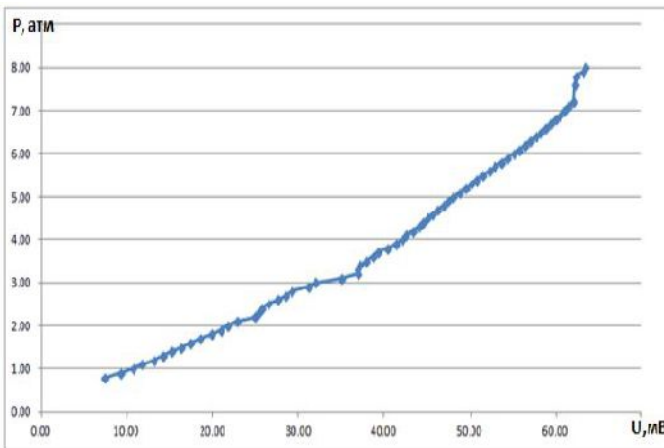


Рис. 6. График зависимости значений нагружения от полученных значений

Была получена система уравнений зависимости показаний напряжения от рабочего давления:

$$\begin{cases} 0 < P < 3,2 & P = 0.0894 \cdot U + 0.0645 \\ 3,2 \leq P < 4,9 & P = 0.1453 \cdot U - 2.0414 \quad (6) \\ 4,9 \leq P < 8,0 & P = 0.1792 \cdot U - 3.764 \end{cases}$$

В результате был получен тарифовочный график зависимости значений нагружения от полученных значений мембранного датчика (рис. 7).

Исследованию датчиков и методов измерения посвящено много работ [16–24], но методики, применяемые авторами в данной работе, использованы для лабораторного стенда СГУ-СТ-08-6ЛР-0 впервые и могут быть востребованы для любого другого оборудования.

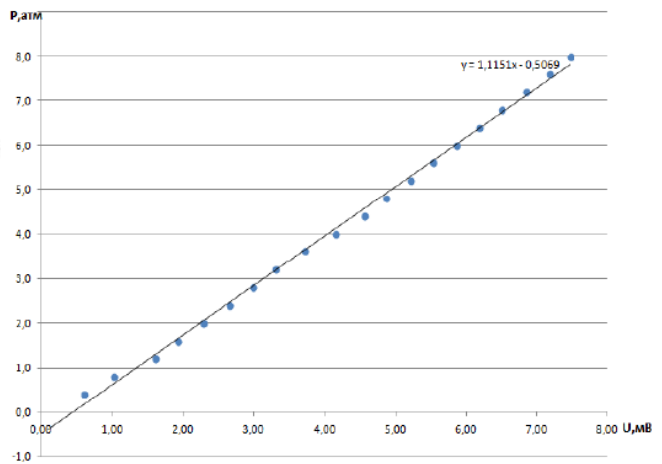


Рис. 7. График зависимости значений нагружения от полученных значений мембранного датчика

Заключение

На основе анализа известных конструкций разработан мембранный датчик измерения давления. Исследована конструкция мембранного датчика измерения давления с помощью конечно-элементного анализа элементов конструкции. Исходя из данных вычислительного эксперимента, получены регрессионные зависимости значения деформации мембраны для следующих материалов: АД0, АД1, сталь 3сп, сталь 12Х18Н10Т и сталь 36НХТЮ при давлениях от 1 до 10 атм. Найдена оптимальная толщина мембраны для датчика измерения давления, которая составляет $b = 0,5$ мм. Проведен расчет для выбранного материала мембраны (сталь 36НХТЮ), который показал, что деформация мембраны будет упругой. Предложена усовершенствованная конструкция мембранного датчика измерения давления с использованием упругой мембраны из стали 36НХТЮ, которая позволяет измерять давления в заданном диапазоне. Разработана система измерения давления для мембранного датчика с использованием платформы Arduino. На базе проведенных натуральных экспериментальных исследований было произ-

ведено тарирование мембранного датчика давления с использованием образцового манометра Samozzi M008-R00, по которому были получены значения давления. Выполнена корректировка кода программы в среде разработки Arduino. Разработана методика тарирования датчика измерения давления.

Литература

1. Саблин А.В Датчик давления: пат. 851139, СССР. заяв. 08.01.80; опубл. 30.07.81.
2. Саблин А. В., Редькин А. А. Датчик давления: пат. 1464055, СССР. заяв. 13.07.87; опубл. 07.03.89.
3. Шакиров А.А., Цыганов Г.В., Китманов Р.В., Шабалина Т.В., Винтайкин Е.З., Мохов Б. Н., Матюшенко Л.А. Датчик давления: пат. 1739222, СССР. заяв. 09.01.90; опубл. 07.06.92.
4. Панков Ю.М., Марьямова И.И. Датчик давления: пат. 2029264, Рос. Федерация. заяв. 07.08.91; опубл. 20.02.95.
5. Репняков В.Н., Потапов М.Г., Шалюта В.Н. Тензорезисторный датчик давления: пат. 2174220, Рос. Федерация. заяв. 09.09.97; опубл. 27.09.01.
6. Ереско С.П., Зябликов В.А. Моделирование пневматических систем с использованием стенда ГПС-01// Решетневские чтения: материалы III междунар. практ. конф. молодежи. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2017. С 335-338.
7. Демидов С.П. Теория упругости: Высшая школа, 1989. 432 с.
8. Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Кравченко И.Н. Исследование напряжённо-деформированного состояния деталей модернизируемых узлов трансмиссий различных машин // Строительные и дорожные машины. 2015. № 8. С. 20-26.
9. Иванов М.Е., Кукушкин Е.В., Кукушкин С.В., Швалева Н.А. Конечно-элементный анализ крестовин карданных шарниров неравных угловых скоростей // автоматизированное проектирование в машиностроении: междунар.одная науч.-практическая конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. С. 70-80.
10. Ереско С.П. Регрессионный анализ многофакторных экспериментальных исследований (Eregre): пат. 610534, Рос. Федерация. заявл. 08.09.03; опубл. 10.08.04, Бюл. № 28.
11. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов. М.: Машостроение-1, 2003. 741 с.
12. Ереско А.С., Ереско С.П., Ереско Т.Т., Кукушкин Е.В., Орлов А.А. Разработка модуля измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino // Механики XXI века: материалы XX Междунар. науч. конф. Братск, 2017. С. 82-85.
13. Ереско А.С., Ереско С.П., Ереско Т.Т., Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А., Орлов А.А. Расчет гидравлической системы тормозного устройства стенда для испытания трансмиссий транспортно-технологических машин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 4. С. 60-79. DOI: 10.15593/24111678/2016.04.06.
14. Ереско А.С., Ереско С.П., Ереско Т.Т., Иваненко Е.В., Кукушкин Е.В. Совершенствование методики расчета коэффициента полезного действия карданной передачи с целью оптимизации ее конструктивных и эксплуатационных параметров // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 3 С. 25-45. DOI: 10.15593/24111678/2017.03.02.
15. Ереско А.С., Иваненко Е.В., Кукушкин Е.В. Орлов А.А. Расчет привода стенда для испытания карданных передач на игольчатых подшипниках // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы XIII Всерос. науч.-практической конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2017. С. 332-334.
16. Lazik D., Geistlinger H.A. New method for membrane-based gas measurements // Sensors and actuators a: physical. 2004. Vol. 117. № 2. P. 241-251. doi: 10.1016/j.sna.2004.06.015.
17. Berney H., Hill M., Kelleher A.M., Lane W.A., Hynes E., O'Neill M. investigation of the effect of processing steps on stress in a polysilicon structural membrane // Journal of micromechanics and microengineering. 2010. Vol. 10, № 2. P. 223-234. DOI: 10.1088/0960-1317/10/2/321.
18. Pekarek J., Vrba R., Prasek J., Majzlikova P., Pekarkova J., Jasek O., Zajickova L. Mems carbon nanotubes field emission pressure sensor with simplified design: performance and field emission properties study // Ieee sensors journal. 20014. Vol. 15, № 3. P. 1430-1436. DOI: 10.1109/Jsen.2014.23632132015.
19. Bestugin A.R., Kirshina I.A., Okin P.A., Filonov O.M. Methodic errors of microelectromechanical pressure sensors in isotropic modeling of the elastic properties of single-crystal silicon // Automation and remote control. 2014. Vol. 76, 12. P. 2249-2254. DOI: 10.1134/S0005117915120140.
20. Dutoit B.M., Besse P.-A., Friedrich A.P., Popovic R.S. Demonstration of a new principle for an active electromagnetic pressure sensor // Sensors and actuators a: physical. 2016. Vol. 81, № 1. P. 328-331. DOI: 10.1016/S0924-4247(99)00103-X.
21. Dutoit B.M., Besse P.-A., Friedrich A.P., Popovic R.S. Demonstration of a new principle for an active electromagnetic pressure sensor // Sensors and actuators a: physical. Vol. 81. No. 1-3. P. 328-331.
22. Bogaert H., Kaminski M.L., Brosset L. Interaction between wave impacts and corrugations of markiii containment system for lng carriers: findings from the sloshel project // Proceedings of the international offshore and polar engineering conference. 2011. P. 109-118.
23. Jenkins D.M., Delwiche M.J. An immersible manometric sensor for measurement of humidity and enzyme mediated changes in dissolved gas // Biosensors and bioelectronics. 2013. Vol. 18, № 9. P. 1085-1093. DOI: 10.1016/S0956-5663(02)00141-0.
24. Puers R. Capacitive sensors: when and how to use them // Sensors and actuators a: physical. 2013. Vol. 37-38, № 2. P. 93-105. DOI: 10.1016/0924-4247(93)80019-D.