

## МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

*А.П. Лапин, Н.М. Гайфулин, Л.Н. Сулейманова, Г.Р. Юнусова*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

В связи с ростом требований, направленных на совершенствование технологических процессов на предприятиях, возникли предпосылки новой промышленной революции (индустрия 4.0). Современная промышленная революция предполагает самое активное использование датчиков для измерения физических величин, причем предпочтительно основанных на новых физических эффектах. Анализ литературных источников в области приборостроения показывает, что отсутствуют работы, содержащие последовательное и четкое описание процедуры использования физических эффектов для построения датчиков физических величин. В связи с этим актуальной является задача выделения основных этапов реализации физических эффектов в современных датчиках. Предложена методика последовательного изучения физических эффектов, применяемых в датчиках измерения физических величин, которая включает в себя: описание математической модели физического эффекта; описание физической реализации данного эффекта; описание зависимости выходного сигнала датчика измерения физической величины от величины, подаваемой на вход; графическое представление данной зависимости; конструктивную реализацию физического эффекта в датчике для измерения физических величин.

В качестве физических эффектов для иллюстрации предложенной методики были использованы тензорезистивный и емкостной эффекты, применяемые в датчиках измерения давления. По результатам применения методики сформирована таблица, которая содержит характерные особенности рассмотренных физических эффектов и дает наглядное представление о применении их в современных датчиках для измерения физических величин. Вышеизложенная методика может быть рекомендована для внедрения в учебный процесс по направлению подготовки студентов 12.03.01 «Приборостроение».

*Ключевые слова:* физические эффекты, измерение давления, тензорезистивный эффект, емкостной эффект, конструкции датчиков, мост Уитстона, мост Саути.

### **Введение**

Четвертая промышленная революция [1] набирает ход, при этом особое внимание привлекают к себе датчики измерения физических величин (ФВ), в частности, датчики давления. Принцип работы таких датчиков основан на использовании различных физических эффектов (ФЭ), которые обладают определенной спецификой применения. Физический эффект – это закономерность проявления результатов взаимодействия объектов материального мира, осуществляемого посредством физических полей [2]. Исследования ФЭ являются одним из основных направлений в приборостроении при разработке, создании и изучении новых датчиков давления [3], а также в учебном процессе по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение».

Однако описания физических эффектов в литературных источниках [4–6] с точки зрения их изучения характеризуются отсутствием четкой структуры изложения свойств и характеристик эффектов. Таким образом, актуальной является задача создания методики изучения ФЭ на примере датчиков давления.

### **Методика изучения ФЭ**

Предложим следующую методику описания физических эффектов, используемых для создания датчиков измерения давления. Она имеет следующий вид:

- 1) описание математической модели физического эффекта;
- 2) описание физической реализации данного эффекта;
- 3) представление зависимости выходного сигнала датчика давления от входной величины;

- 4) графическое представление данной зависимости;
- 5) конструктивная реализация физического эффекта в датчике.

Данная методика имеет такие преимущества, как наглядность и простоту изложения. Проиллюстрируем данную методику на примере тензорезистивного и емкостного эффектов.

### Тензорезистивный эффект

Тензорезистивный эффект основан на изменении сопротивления проводника при его механической деформации (растяжении) [7].

Сопротивление проводника определяется по следующей формуле [7]:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$$

где  $R$  – сопротивление проводника, Ом;

$\rho$  – удельное сопротивление проводника, Ом·м;

$S$  – площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>;

$l$  – длина проводника, м.

Рассмотрим проводник, на который действуют внешние силы  $F$  (рис. 1).

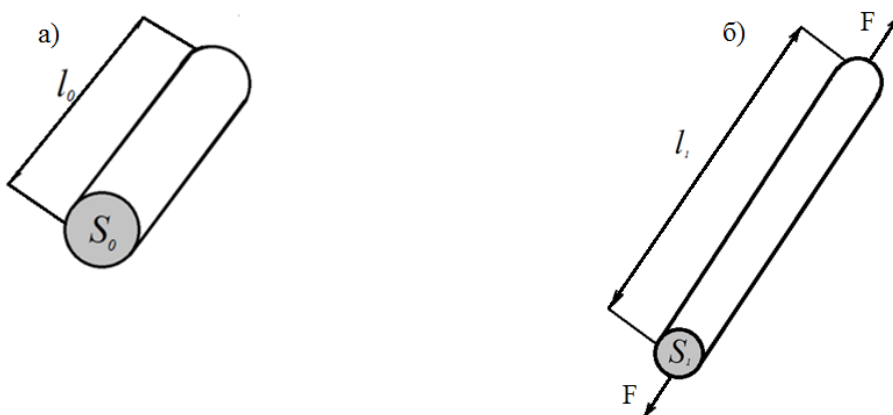


Рис. 1. Воздействие силы на проводник: а – проводник в исходном состоянии; б – проводник в деформированном состоянии

Проволочный тензорезистор, используемый в датчике, состоит из отрезка провода, согнутого в форме серпантина и смонтированного на подходящем материале подложки [5] (рис. 2).

Обычно для реализации тензорезистивного эффекта при измерении давления используется мост Уитстона [7]. Схема моста Уитстона представлена на рис. 3.

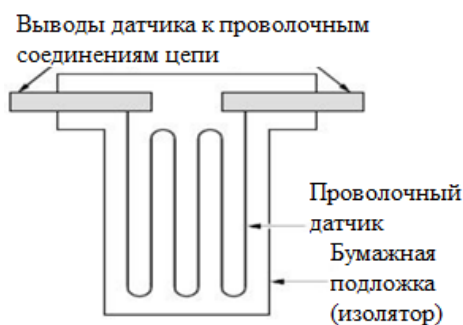


Рис. 2. Тензорезистор

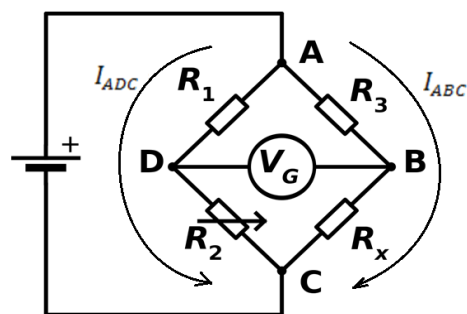


Рис. 3. Мостовая схема Уитстона, используемая в датчиках давления:  $R_1, R_2, R_3$  – резисторы, номиналы которых известны;  $V_G$  – гальванометр;  $R_x$  – тензорезистор

Тензорезистор  $R_x$  крепится на элемент, подверженный деформации при изменении давления, чаще всего путем наклеивания тензорезистора на мембрану датчика, которая прогибается под воздействием давления [7]. Полезным сигналом в данном случае является изменение напряжения на измерительной диагонали моста (между точками  $B$  и  $D$ ). Если выполняется равенство (1), то

## Краткие сообщения

мост находится в состоянии равновесия, следовательно, напряжение  $U_{DB}$  на измерительной диагонали будет равно нулю:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \quad (1)$$

Выразим напряжение измерительной диагонали  $U_{DB}$  моста через сопротивления плеч и напряжение питания  $U_{AC}$  моста [7]:

$$U_{DB} = \varphi_D - \varphi_B = (\varphi_C + U_{R_2}) - (\varphi_C + U_{R_x}) = U_{R_2} - U_{R_x}; \quad (2)$$

$$U_{DB} = I_{ADC} \cdot R_2 - I_{ABC} \cdot R_x; \quad (3)$$

$$U_{DB} = \frac{U_{AC}}{R_1+R_2} \cdot R_2 - \frac{U_{AC}}{R_3+R_x} \cdot R_x = U_{AC} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_x}{R_3+R_x} \right). \quad (4)$$

Для примера будем использовать тензорезистор ФКП-3-1000 (1000 Ом) [8]. Согласно паспортным данным  $\Delta R_{MAX}$  максимальное изменение сопротивления от номинального составляет 6 Ом [8, 9]. В соответствии с номиналом тензорезистора и условием равновесия подбираются остальные параметры моста:  $R_1 = 1000$  Ом,  $R_2 = 1000$  Ом,  $R_3 = 1000$  Ом, и зададим напряжение питания  $U_{AC} = 20$  В.

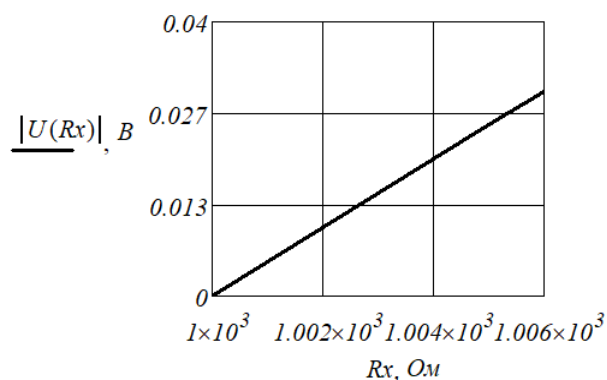


Рис. 4. График зависимости  $|U_{DB}| = f(R_x)$

Проверим правильность подбора элементов моста по выражению (4):

$$U_{DB} = 20 \cdot \left( \frac{1000}{1000+1000} - \frac{1000}{1000+1000} \right) = 0 \text{ В.}$$

Получим зависимость напряжения измерительной диагонали как функцию от сопротивления тензорезистора  $U_{DB} = f(R_x)$ :

$$U_{DB} = 20 \cdot \left( \frac{1000}{1000+1000} - \frac{R_x}{1000+R_x} \right).$$

Представим зависимость  $|U_{DB}| = f(R_x)$  графически (рис. 4).

Схема Уитстона реализуется в датчике [7], конструкция которого представлена на рис. 5.

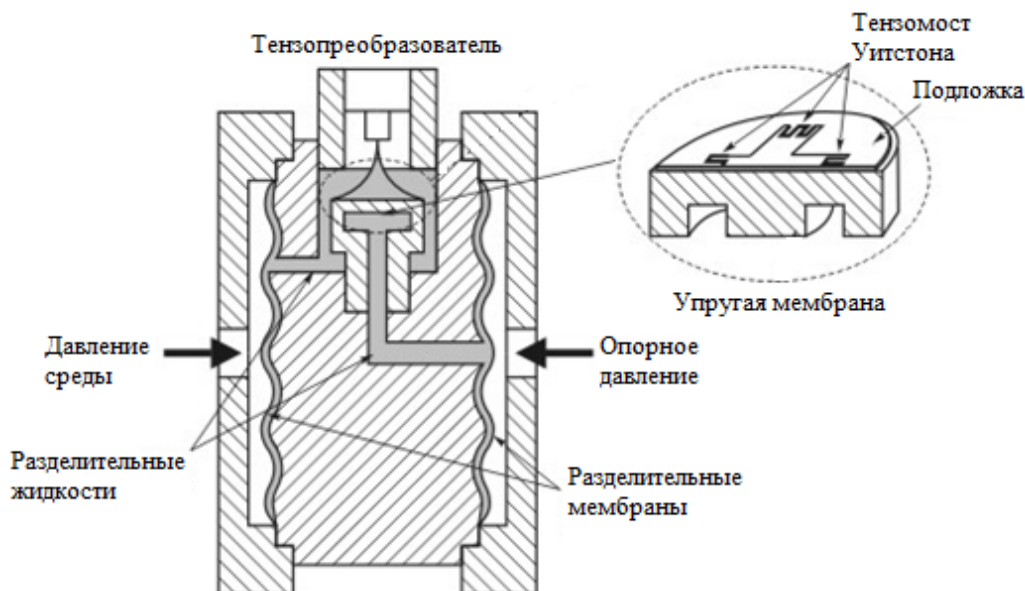


Рис. 5. Конструкция тензорезистивного датчика

### Емкостной эффект

Емкостной эффект возникает при изменении емкости конденсатора вследствие изменения расстояния между обкладками либо их площади [10, 11].

Выражение для емкости плоского конденсатора [8]:

$$C = \varepsilon \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (5)$$

где  $C$  – емкость плоского конденсатора, Ф;

$S$  – площадь пластин конденсатора, м<sup>2</sup>;

$d$  – расстояние между пластинами, м;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;

$\varepsilon_0 = 8,87 \cdot 10^{-12}$  – диэлектрическая постоянная вакуума, Ф/м.

На рис. 6 приведен чувствительный элемент датчика давления, использующий функциональную зависимость  $C(d)$  [10].

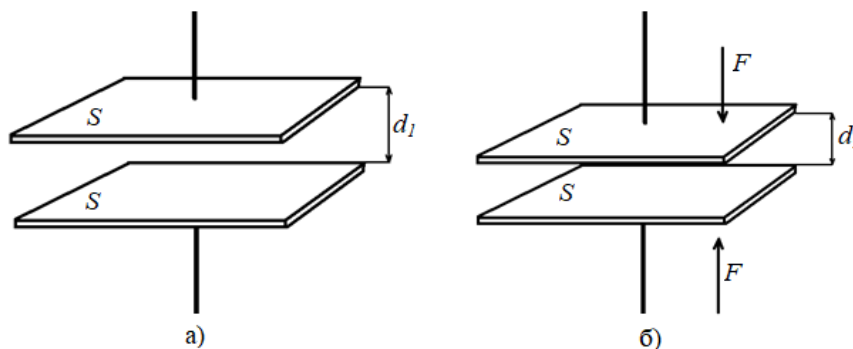


Рис. 6. Конденсатор: а – без воздействия сил на обкладки; б – под воздействием сил  $F$  на обкладки

Ключевым элементом в емкостном датчике давления является емкостная ячейка, которая имеет конструкцию, представленную на рис. 7.

Для измерения давления с использованием емкостного эффекта используем мост Саути [10], представленный на рис. 8.

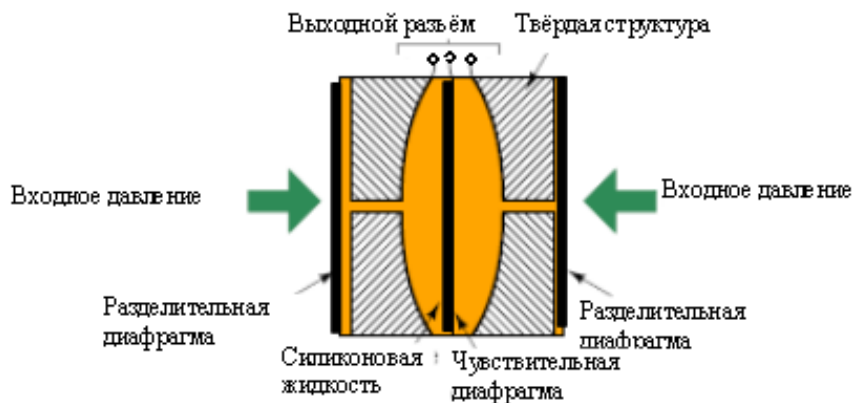


Рис. 7. Конструкция емкостной ячейки

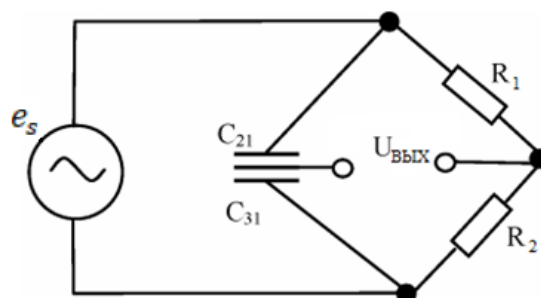


Рис. 8. Схема моста Саути:  $C_{21}$ ,  $C_{31}$  – конденсаторы с неизвестной емкостью;  $R_1$ ,  $R_2$  – резисторы известных номиналов;  $e_s$  – переменный источник питания

## Краткие сообщения

Для моста переменного тока условие баланса выполняется следующим соотношением импедансов:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{z_3}{z_4}, \quad (6)$$

где  $z_i$  – импеданс  $i$ -й ветви.

Напряжение на выходе измерительной схемы имеет вид [4]:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}}, \quad (7)$$

где  $C_{21}, C_{31}$  – емкости конденсаторов емкостной ячейки, Ф;

$e_s$  – напряжение источника питания, В.

Зададим конкретные номиналы элементов электрической схемы:  $R_1, R_2 = 1$  кОм,  $C_{21}, C_{31} = 1$  мкФ,  $e_s = 220$  В,  $w = 100$  рад/с.

Проверим условие равновесия моста по формулам (6) и (7) соответственно:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{i\omega C_{31}}{i\omega C_{21}},$$

$1 = 1$  – равенство выполняется,

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{220}{2} \cdot \frac{10^{-6} - 10^{-6}}{10^{-6} + 10^{-6}} = 0.$$

Получим зависимость  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Delta C)$  по формуле (7):

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{e_s}{2} \cdot \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}} = \frac{220}{2} \cdot \frac{(10^{-6} + \Delta C) - (10^{-6} - \Delta C)}{(10^{-6} + \Delta C) + (10^{-6} - \Delta C)} = 1,1 \cdot 10^8 \cdot \Delta C,$$

где  $\Delta C$  – изменение ёмкостей конденсаторов  $C_{21}$  и  $C_{31}$ , Ф.

Графическая зависимость  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Delta C)$  представлена на рис. 9.

Электрическая схема реализуется в сенсоре, представленном на рис. 10.

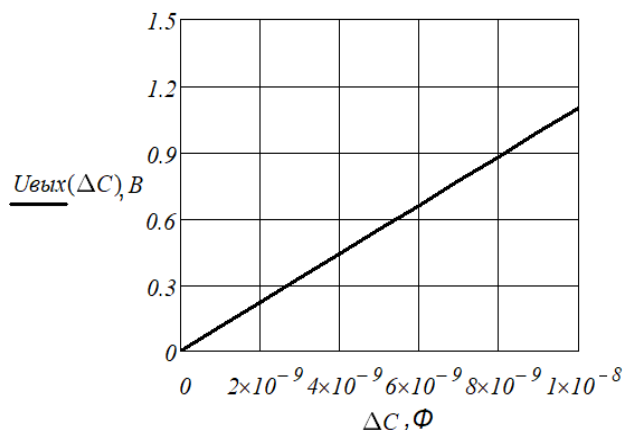


Рис. 9. Графическая зависимость  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\Delta C)$

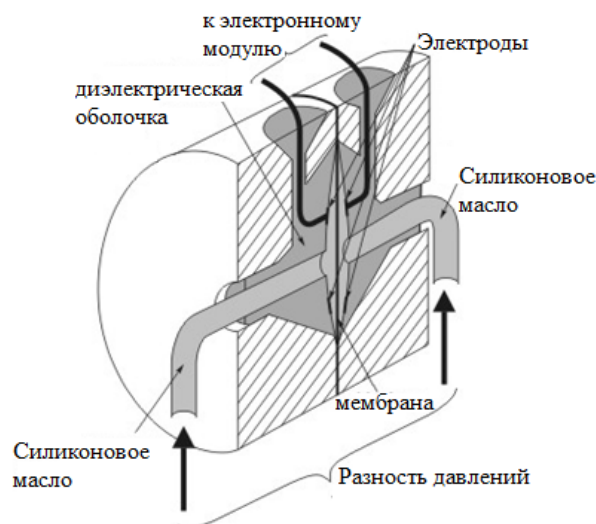
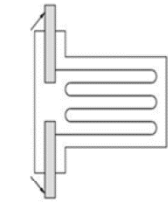
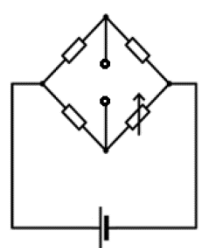
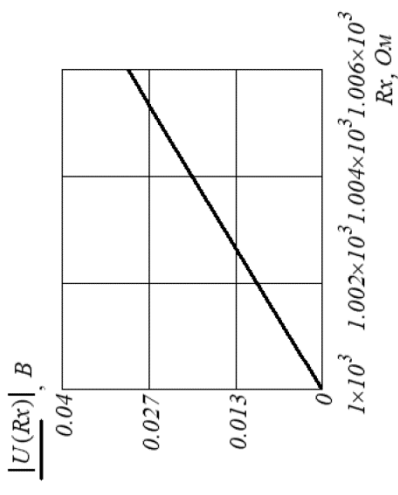
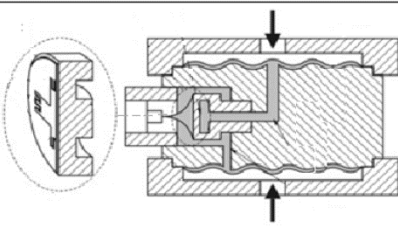
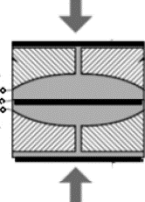
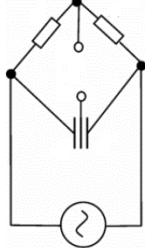
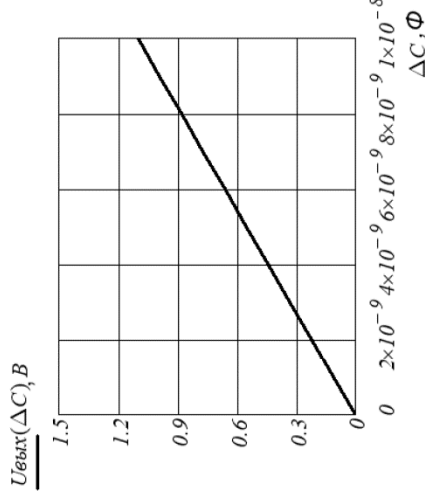
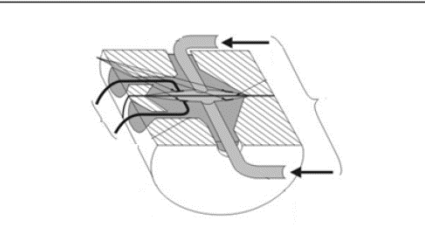


Рис. 10. Измерительный преобразователь емкостного датчика давления

### Заключение

Таким образом, мы продемонстрировали методику изучения физических эффектов на примере ёмкостного и тензорезистивного (см. таблицу), содержащую этапы: описание математической его модели, описание физической реализации, описание зависимости выходного сигнала датчика от входной величины, графическое представление данной зависимости, конструктивную реализацию физического эффекта в датчике.

Физические эффекты

Краткое содержание	Математическая модель	Физическая модель	Схема реализации	Графическая зависимость	Конструкция датчика
Возникновение изменения сопротивления при механической деформации	$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$ <p>где <math>\rho</math> – удельное сопротивление резистора, Ом·м;  <math>S</math> – площадь проводника, м<sup>2</sup>;  <math>l</math> – длина проводника, м</p>				
Зависимость изменения электрической ёмкости между обкладками конденсатора	$C = \epsilon \frac{\epsilon_0 S}{d},$ <p>где <math>C</math> – ёмкость плоского конденсатора, Ф;  <math>S</math> – площадь пластин конденсатора, м<sup>2</sup>;  <math>d</math> – расстояние между обкладками, м;  <math>\epsilon_0 = 8,87 \cdot 10^{-12}</math> – диэлектрическая постоянная вакуума</p>				

### Литература

1. Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб; пер. АНО ДПО «Корпоративный университет Сбербанка». – М.: Эксмо, 2016. – 138 с.
2. Лукьянец, В.А. Физические эффекты в машиностроении: справ. / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова и др.; под ред. В.А. Лукьянца. – М. 1993 – 224 с.
3. Выявление и систематизация физических эффектов и явлений для создания перспективных преобразователей физических величин / А.П. Лапин, А.С. Волосников, Ю.А. Усачев, О.Ю. Бушуев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 17. – С. 145–147.
4. Датчики: справ. пособие / Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Савлуков; под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
5. Фрайден, Дж. Современные датчики: справ. / Дж. Фрайден; пер. с англ. А. Заболотной. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
6. Головин, П.Д. Физические явления (эффекты), используемые для построения первичных преобразователей (датчиков) / П.Д. Головин, А.В. Блинов // Датчики и системы. – 2003. – № 11. – С. 3–9.
7. Болтон, У. Карманный справочник инженера-метролога. / У. Болтон. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 383 с.
8. Клименко, Е.С. Формулы по физике: справ. / Е.С. Клименко – М.: Эксмо, 2012. – 129 с.
9. Сибтензонприбор. Продукция. – <http://www.sibtenzo.com/products/tenzorezistory-folgovye-konstantanovye>.
10. Коныхов, В.Н. Исследование емкостного датчика давления: метод. указания / В.Н. Коныхов, К.Е. Воронов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 25 с.
11. Сысоева, С. Автомобильные датчики положения. Современные и новые перспективы. Емкостные датчики – новые устройства на автомобильном рынке / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – СПб.: Изд-во Файнстрит, 2006. – Вып. 4 – С. 14–24.

**Лапин Андрей Павлович**, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [lapinar@susu.ru](mailto:lapinar@susu.ru).

**Гайфулин Никита Маратович**, студент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [nik141196@gmail.com](mailto:nik141196@gmail.com).

**Сулейманова Лейсан Нуритдиновна**, студент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [sulejmanova.17@mail.ru](mailto:sulejmanova.17@mail.ru).

**Юнусова Гузель Руслановна**, студент кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [yunusowa.guzel2012@yandex.ru](mailto:yunusowa.guzel2012@yandex.ru).

*Поступила в редакцию 6 декабря 2018 г.*

## METHOD OF STUDYING PHYSICAL EFFECTS AND PHENOMENA IN THE MEASUREMENT OF PRESSURE

A.P. Lapin, lapinap@susu.ru,  
N.M. Gaifulin, nik141196@gmail.com,  
L.N. Suleimanova, sulejmanova.17@mail.ru,  
G.R. Yunusova, yunusowa.guzel2012@yandex.ru  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In connection with the growth of requirements aimed at improving of the technological processes in enterprises, the prerequisites for a new industrial revolution (industry 4.0) have arisen. The modern industrial revolution assumes the most active using of sensors for measuring physical quantities, moreover, preferably based on new physical effects. An analysis of literature sources in the field of Instrument Engineering shows that there are no works containing strict and clear descriptions of the procedure for using physical effects to build sensors of physical quantities. In this connection, the problem of identifying the main stages of the implementation of physical effects in modern sensors is relevant. A technique is proposed for the sequential study of physical effects used in sensors for measuring physical quantities, which includes: a description of a mathematical model of a physical effect; description of the physical implementation of this effect; description of the dependence of the output signal of the sensor measuring the physical quantity from the value supplied to the input; graphical representation of this dependency; constructive implementation of the physical effect in the sensor for measuring physical quantities.

As physical effects to illustrate the proposed method were used strain gauge and capacitive effects used in pressure measurement sensors. According to the results of the application of the methodology, a table has been formed, which contains the characteristic features of the considered physical effects and gives a visual representation of their use in modern sensors for measuring physical quantities. The above methodology can be recommended for implementation in the educational process in the direction of preparing students 12.03.01 "Instrument Engineering".

*Keywords: physical effects, pressure measurement, strain gauge, capacitive effect, sensor designs, Wheatstone bridge, Sauty's bridge.*

### References

1. Shvab K. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya* [Fourth Industrial Revolution]. Moscow, Eksmo Publ., 2016. 138 p.
2. Lukyanec V.A., Almazova Z.I., Burmistrova N.P., Gaziz'yanov R.R., Kitkaeva S.A., Slyhanova N.V., Sobolev A.N., Sofronov S.A. *Fizicheskie efekty v mashinostroenii* [Physical Effects in Mechanical Engineering]. Moscow, Engineering Publ., 1993. 224 p.
3. Lapin A.P., Volosnikov A.S., Usachev Y.A., Bushuev O.Y. [Identification and Systematization of Physical Effects and Phenomena for the Construction of Promising Transducers of Physical Quantities]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2012, no. 17, pp. 145–147. (in Russ.)
4. Koshevoy N.D., Ishanin G.G., Minaev I.G., Savlukov A.S. *Datchiki* [Sensors]. Moscow, Technosphere Publ., 2012. 624 p.
5. Frayden, D. *Sovremennye datchiki* [Modern Sensors]. Moscow, Technosphere Publ., 2005. 592 p.
6. Golovin P.D., Blinov A.V. [Physical Phenomena (Effects) Used to Build Primary Transducers (Sensors)]. *Sensors and Systems*, 2003, no. 11, pp 3–9. (in Russ.)
7. Bolton, U. *Karmannyy spravochnik inzhenera-metrologa* [Pocket Guide of Metrology Engineer]. Moscow, Publishing House "Dodehka -XXI", 2002. 383 p.



## Краткие сообщения

---

8. Klimenko E.S. *Formuly po fizike: spravochnik* [Formulas on Physics: Reference Book]. Moscow, Eksmo Publ., 2012. 129 p.

9. *Produktsiya Sibtenzopribor*. [Products of Sibtenzopribor]. Available at: <http://www.sibtenzo.com/products/tenzorezistory-folgovye-konstantanovy> (accessed 1 September 2000).

10. Konyukhov V.N., Voronov K.E. *Issledovanie emkostnogo datchika davle-niya: metod ukazaniya* [Research of the Capacitive Sensor of Pressure: Method. Instructions]. Samara, Samara State Space Univ. Publ., 2006. 25 p.

11. Sysoyeva S. [Automobile Position Sensors. Modern and New Prospects. Capacitive Sensors – New Devices in the Automobile Market]. *Components and technologies*, 2006, iss. 4, pp. 14–24. (in Russ.)

*Received 6 December 2018*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Методика изучения физических эффектов, используемых для измерения давления / А.П. Лапин, Н.М. Гайфулин, Л.Н. Сулейманова, Г.Р. Юнусова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 160–168. DOI: 10.14529/ctcr190116

### FOR CITATION

Lapin A.P., Gaifulin N.M., Suleimanova L.N., Yunusova G.R. Method of Studying Physical Effects and Phenomena in the Measurement of Pressure. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 160–168. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190116