

ISSN 1991-3494

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Ш Ы С Ы

ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

THE BULLETIN

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

1944 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С 1944 ГОДА
PUBLISHED SINCE 1944

3

АЛМАТЫ
АЛМАТЫ
ALMATY

2015

МАМЫР
МАЙ
MAY

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі

М. Ж. Жұрынов

Р е д а к ц и я а л қ а с ы :

биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Айтхожина Н.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байпақов К.М.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байтулин И.О.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Берсімбаев Р.И.**; хим. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Газалиев А.М.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Дүйсенбеков З.Д.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Елешев Р.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; фил. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Нысанбаев А.Н.**; экон. ғ. докторы, проф., ҰҒА академигі **Сатубалдин С.С.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбжанов Х.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішева З.С.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Абсадықов Б.Н.** (бас редактордың орынбасары); а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Баймұқанов Д.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Байтанаев Б.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Давлетов А.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; геогр. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Медеу А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мырхалықов Ж.У.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Огарь Н.П.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Таткеева Г.Г.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Үмбетаев И.**

Р е д а к ц и я к е ñ е с і :

Ресей ҒА академигі **Велихов Е.П.** (Ресей); Әзірбайжан ҰҒА академигі **Гашимзаде Ф.** (Әзірбайжан); Украинаның ҰҒА академигі **Гончарук В.В.** (Украина); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Джрбашян Р.Т.** (Армения); Ресей ҒА академигі **Лаверов Н.П.** (Ресей); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Москаленко С.** (Молдова); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Рудик В.** (Молдова); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Сагян А.С.** (Армения); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Тодераш И.** (Молдова); Тәжікстан Республикасының ҰҒА академигі **Якубова М.М.** (Тәжікстан); Молдова Республикасының ҰҒА корр. мүшесі **Лупашку Ф.** (Молдова); техн. ғ. докторы, профессор **Абиев Р.Ш.** (Ресей); техн. ғ. докторы, профессор **Аврамов К.В.** (Украина); мед. ғ. докторы, профессор **Юрген Аппель** (Германия); мед. ғ. докторы, профессор **Иозеф Банас** (Польша); техн. ғ. докторы, профессор **Гарабаджиу** (Ресей); доктор PhD, профессор **Ивахненко О.П.** (Ұлыбритания); хим. ғ. докторы, профессор **Изабелла Новак** (Польша); хим. ғ. докторы, профессор **Полещук О.Х.** (Ресей); хим. ғ. докторы, профессор **Поняев А.И.** (Ресей); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); техн. ғ. докторы, профессор **Хрипунов Г.С.** (Украина)

Главный редактор

академик НАН РК

М. Ж. Журинов

Редакционная коллегия:

доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Н.А. Айтхожина**; доктор ист. наук, проф., академик НАН РК **К.М. Байпаков**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **И.О. Байтулин**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Р.И. Берсимбаев**; доктор хим. наук, проф., академик НАН РК **А.М. Газалиев**; доктор с.-х. наук, проф., академик НАН РК **З.Д. Дюсенбеков**; доктор сельскохоз. наук, проф., академик НАН РК **Р.Е. Елешев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор фил. наук, проф., академик НАН РК **А.Н. Нысанбаев**; доктор экон. наук, проф., академик НАН РК **С.С. Сатубалдин**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Х.М. Абжанов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **З.С. Абишева**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.Н. Абсадыков** (заместитель главного редактора); доктор с.-х. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Д.А. Баймуканов**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.А. Байтанаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А.Е. Давлетов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор геогр. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А. Медеу**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.У. Мырхалыков**; доктор биол. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.П. Огарь**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Г.Г. Таткеева**; доктор сельскохоз. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **И. Умбетаев**

Редакционный совет:

академик РАН **Е.П. Велихов** (Россия); академик НАН Азербайджанской Республики **Ф. Гашимзаде** (Азербайджан); академик НАН Украины **В.В. Гончарук** (Украина); академик НАН Республики Армения **Р.Т. Джрбашян** (Армения); академик РАН **Н.П. Лаверов** (Россия); академик НАН Республики Молдова **С. Москаленко** (Молдова); академик НАН Республики Молдова **В. Рудик** (Молдова); академик НАН Республики Армения **А.С. Сагиян** (Армения); академик НАН Республики Молдова **И. Тодераш** (Молдова); академик НАН Республики Таджикистан **М.М. Якубова** (Таджикистан); член-корреспондент НАН Республики Молдова **Ф. Лупашку** (Молдова); д.т.н., профессор **Р.Ш. Абиев** (Россия); д.т.н., профессор **К.В. Аврамов** (Украина); д.м.н., профессор **Юрген Аппель** (Германия); д.м.н., профессор **Иозеф Банас** (Польша); д.т.н., профессор **А.В. Гарабаджиу** (Россия); доктор PhD, профессор **О.П. Ивахненко** (Великобритания); д.х.н., профессор **Изабелла Новак** (Польша); д.х.н., профессор **О.Х. Полещук** (Россия); д.х.н., профессор **А.И. Поняев** (Россия); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); д.т.н., профессор **Г.С. Хрипунов** (Украина)

«Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан». ISSN 1991-3494

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5551-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год

Тираж: 2000 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел. 272-13-19, 272-13-18.

www: nauka-nanrk.kz, bulletin-science.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75

Editor in chief

M. Zh. Zhurinov,
academician of NAS RK

Editorial board:

N.A. Aitkhozhina, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **K.M. Baipakov**, dr. hist. sc., prof., academician of NAS RK; **I.O. Baitulin**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **R.I. Bersimbayev**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **A.M. Gazaliyev**, dr. chem. sc., prof., academician of NAS RK; **Z.D. Dyusenbekov**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **R.Ye. Yeleshev**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **T.Sh. Kalmenov**, dr. phys. math. sc., prof., academician of NAS RK; **A.N. Nysanbayev**, dr. phil. sc., prof., academician of NAS RK; **S.S. Satubaldin**, dr. econ. sc., prof., academician of NAS RK; **Kh.M. Abzhanov**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Z.S. Abisheva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.N. Absadykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **D.A. Baimukanov**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.A. Baytanayev**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A.Ye. Davletov**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A. Medeu**, dr. geogr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.U. Myrkhalykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **N.P. Ogar**, dr. biol. sc., prof., corr. member of NAS RK; **G.G. Tatkeeva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **I. Umbetayev**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

E.P. Velikhov, RAS academician (Russia); **F. Gashimzade**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **V.V. Goncharuk**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **R.T. Dzhrbashian**, NAS Armenia academician (Armenia); **N.P. Laverov**, RAS academician (Russia); **S.Moskalenko**, NAS Moldova academician (Moldova); **V. Rudic**, NAS Moldova academician (Moldova); **A.S. Sagiyan**, NAS Armenia academician (Armenia); **I. Toderas**, NAS Moldova academician (Moldova); **M. Yakubova**, NAS Tajikistan academician (Tajikistan); **F. Lupaşcu**, NAS Moldova corr. member (Moldova); **R.Sh. Abiyev**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **K.V. Avramov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine); **Jürgen Appel**, dr.med.sc., prof. (Germany); **Joseph Banas**, dr.med.sc., prof. (Poland); **A.V. Garabadzhiu**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **O.P. Ivakhnenko**, PhD, prof. (UK); **Isabella Nowak**, dr.chem.sc., prof. (Poland); **O.Kh. Poleshchuk**, chem.sc., prof. (Russia); **A.I. Ponyaev**, dr.chem.sc., prof. (Russia); **Mohd Hassan Selamat**, prof. (Malaysia); **G.S. Khripunov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine)

Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

ISSN 1991-3494

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of Information and Archives of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan N 5551-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 2000 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

<http://nauka-nanrk.kz/>, <http://bulletin-science.kz>

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

**BULLETIN OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 1991-3494

Volume 3, Number 355 (2015), 55 – 64

COMBINED SENSORS OF PHYSICAL PARAMETERS

**K. A. Ozhikenov¹, P. G. Mikhailov²,
A. O. Kassimov¹, N. Bayanbay¹, J. Kuatkanova¹**

¹Kazakh National Technical University after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan,

²Penzensky State Technological University, Penza, Russia

Keywords: sensor, measurement, microelectronic sensors, pressure, temperature, combined.

Abstract. The application of sensors of physical quantities has always been one of the major in measurement technology and instrumentation. Of particular relevance they have acquired in connection with the creation and development of complex autonomous measurement and control systems in the aerospace, energy, pipeline transport, protection of important objects, and ecology. This is due to factors such as the long period of operation of objects, the impossibility of their maintenance and repair, including the installation and dismantling of sensors, territorial remoteness, stealth, etc.

In the development and testing of rocket and space flight technology and controlled by the main parameters are: pressure, temperature and vibration. The use of combined sensors that measure multiple parameters can effectively control the levels of acoustic and vibration loads, the magnitude of pressure fluctuations and gradients of temperature fields arising from aerodynamic research models of rocket and space and flight technology. The use of combined sensors can not only increase the information content of the measurement, but also reduce the uncertainty arising from the influence of external factors as well as additional information about the temperature and vibration levels can be used for automatic correction of errors. Of the largest emerging sensor design and technological capabilities have semiconductor sensors that allow the integration on a semiconductor chip and a heat-sensitive elements of the tensor; Photosensitive, magnetically structure. The combined piezoelectric sensors can be used sensitive layers or individual piezoelectric elements that are affected by the additional parameter - the temperature or vibration.

The concept of multi-parameter measurement. The methods of the combined conversion of non-electrical values are shown block diagrams of multi-sensors. It is shown that the use of multi-parameter measurements to improve the accuracy of measurement and informative.

СОВМЕЩЕННЫЕ ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

К. А. Ожикенов¹, П. Г. Михайлов², А. О. Касимов¹, Н. Баянбай¹, Ж. Куатканова¹

¹Казахский Национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы

²Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

Ключевые слова: датчик, измерение, микроэлектронные датчики, давление, температура, совмещенный.

Аннотация. Вопросы применения датчиков физических величин всегда были одними из основных в измерительной технике и приборостроении. Особую актуальность они приобрели в связи с созданием и развитием сложных автономных измерительных и управляющих систем в космонавтике, энергетике, трубопроводном транспорте, охране важных объектов, экологии. Это связано с такими факторами, как длительный период функционирования объектов, невозможность их обслуживания и ремонта, в том числе монтажа-демонтажа датчиков, территориальная отдаленность, скрытность и т.д.

При разработке и испытаниях изделий ракетно-космической и летной техники основными контролируемыми параметрами являются: давление, температура и вибрация. Использование совмещенных датчиков, измеряющих одновременно несколько параметров, позволяет эффективно контролировать уровни акустических и вибрационных нагрузок, величину пульсаций давления и градиенты температурных полей, возникающих при аэродинамических исследованиях моделей ракетно-космической и летной техники. Применение совмещенных датчиков позволяет не только увеличить информативность измерений, но и уменьшить погрешности, возникающие от влияния внешних факторов, так как дополнительная информация о значениях температуры и уровне вибраций может быть использована для автоматической коррекции погрешностей. Из разрабатываемых датчиков наибольшими конструктивно-технологическими возможностями обладают полупроводниковые датчики, которые позволяют интегрировать на полупроводниковом кристалле тензо- и термочувствительные элементы; фоточувствительные, магниточувствительные структуры. В совмещенных пьезоэлектрических датчиках возможно использование чувствительных слоев или отдельных пьезоэлементов, на которые воздействует дополнительный параметр - температура или вибрации.

Предложена концепция многопараметрического измерения. Описаны методы совмещенного преобразования неэлектрических величин, приведены структурные схемы многофункциональных датчиков. Показано, что применение многопараметрического измерения позволяет повысить точность и информативность измерения.

Общие принципы построения совмещенных датчиков. При разработке и испытаниях изделий ракетно-космической и летной техники (РК и ЛТ) основными контролируемыми параметрами (до 60–80%) являются: давление, температура и вибрация. Использование совмещенных датчиков (СД) измеряющих одновременно несколько параметров, позволяет эффективно контролировать уровни акустических и вибрационных нагрузок, величину пульсаций давления и градиенты температурных полей, возникающих при аэродинамических исследованиях моделей РК и ЛТ.

Применение СД позволяет не только увеличить информативность измерений, но и уменьшить погрешности, возникающие от влияния внешних факторов, так как дополнительная информация о значениях температуры и уровне вибраций может быть использована для автоматической коррекции погрешностей.

Из разрабатываемых датчиков наибольшими конструктивно-технологическими возможностями обладают полупроводниковые датчики, которые позволяют интегрировать на полупроводниковом кристалле тензо- и термочувствительные элементы; фоточувствительные, магниточувствительные структуры [1, 2, 11]. В совмещенных пьезоэлектрических датчиках возможно использование чувствительных слоев или отдельных пьезоэлементов, на которые воздействует дополнительный параметр (температура или вибрации). Возможные структуры СД приведены на рисунок 1, а-е.

Для пьезоэлектрических датчиков термочувствительный элемент (ТЧЭ) может быть объединен с рабочим пьезоэлементом в монолитный пьезомодуль. Виброочувствительный пьезоэлемент (ВЧПЭ) выполняется в виде отдельного пьезоэлемента, соединенного с инерционным грузом.

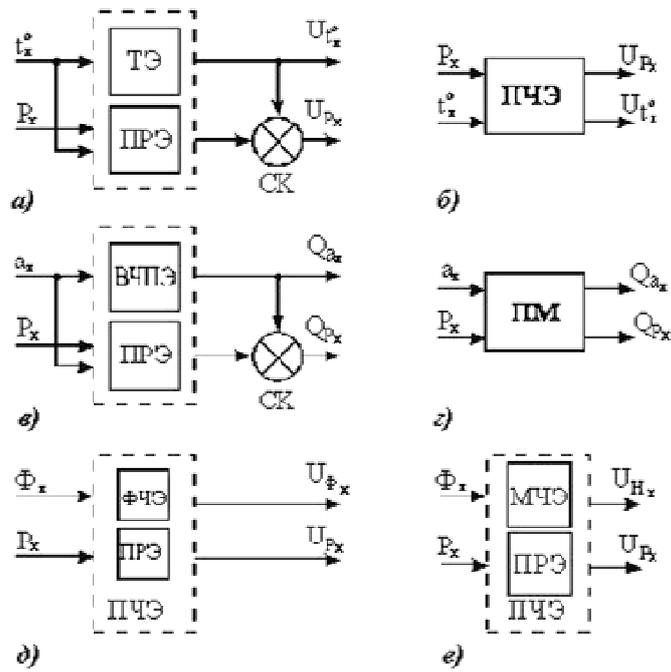


Рисунок 1 – Структурные схемы совмещенных датчиков:
 ТЭ - термоэлемент; СК - схема термокомпенсации; ПРЭ - пьезорезистивный элемент;
 ПЧЭ - полупроводниковый чувствительный элемент; ФЧЭ - фоточувствительный элемент;
 МЧЭ - магниточувствительный элемент; ПМ - пьезомодуль, ВЧПЭ - виброочувствительный пьезоэлемент

На рисунке 2 приведены принципиальные схемы полупроводниковых и пьезоэлектрических СД с элементами, реагирующими на температуру и вибрацию. На рисунке 2,а в качестве термочувствительного параметра использован ток питания тензомоста; на рисунке 2,б - сопротивление перехода эмиттер-база («Э-Б») транзистора, включенного в обратном направлении; на рисунке 2,в - сопротивление терморезистора.

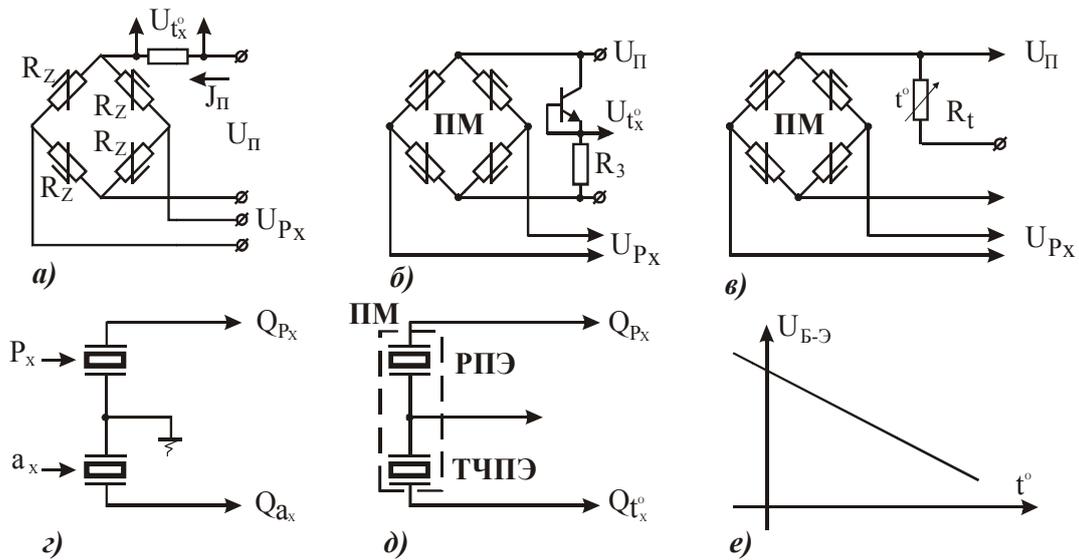


Рисунок 2 – Принципиальные схемы СД:
 РПЭ - рабочий пьезоэлемент; ТЧПЭ - термочувствительный пьезоэлемент

Примеры реализации многофункциональных пьезоэлектрических датчиков приведены на рисунке 3 и 4. В частности, на рисунке 3 изображена схема пьезоэлектрического датчика акустических давлений и вибраций с отдельными пьезоэлементами. Такой принцип построения

использован в датчиках акустических давлений, которые были разработаны для ракетно-космической системы «Буран-Энергия» [3-6].

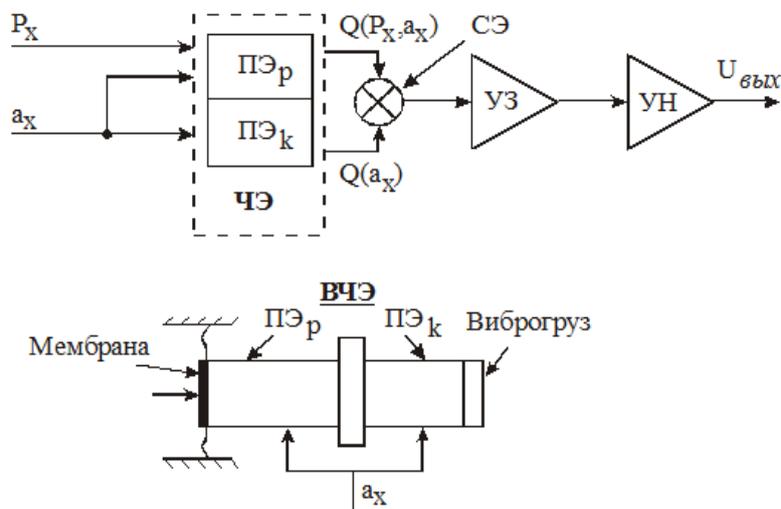


Рисунок 3 – Схема пьезоэлектрического датчика акустических давлений и вибраций с отдельными пьезоэлементами: ПЭ_р – рабочий пьезоэлемент; ПЭ_к – компенсационный пьезоэлемент; СЭ – суммирующий элемент (конденсатор); УЗ – усилитель заряда; УН – усилитель напряжения

Реализация совмещенных датчиков. Возможность миниатюрного выполнения сенсорных элементов (СЭ) в объеме или на поверхности полупроводникового чувствительного элемента (ПЧЭ) микроэлектронных датчиков (МЭД), а также поличувствительность полупроводниковых функциональных материалов к различным факторам (температуре, деформациям, магнитным и электрическим полям, ионизирующим излучениям, световым и тепловым полям) позволяет совмещать преобразования различных параметров в одном датчике. В тоже время, при реализации идей совмещенного преобразования на практике, сталкиваются с целым рядом трудностей конструктивного, метрологического и технологического плана:

- выбор информативных принципов преобразования;
- взаимовлияние деформационных и тепловых полей;
- разница в технологиях формирования термо- и силочувствительных СЭ на одном ЧЭ.

При выборе принципов преобразования давления и температуры в одном ПЧЭ МЭД, необходимо руководствоваться основными принципами совместимости преобразований силовых и термометрических параметров [12, 13]:

1. минимальное взаимовлияние каналов давления и температуры;
2. конструктивная (совместимость СЭ);
3. технологическая совместимость процессов формирования силочувствительных и термо-чувствительных СЭ;
4. информационно-энергетическая совместимость каналов.

Первый принцип определяет возможность появления перекрестных помех. Минимизация перекрестных помех возможна с помощью применения следующих конструктивно-технологических методов [14-16]:

1. Выбором принципов преобразования силовых и тепловых параметров, в которых информативные параметры не имеют взаимной корреляции вообще, или имеют очень слабую корреляцию;
2. Размещением силочувствительных элементов (СЧЭ) и ТЧЭ на ПЧЭ таким образом, чтобы локализовать тепловые и деформационные поля в зонах расположения, соответственно, ТЧЭ и СЧЭ [17-19];
3. Применением фильтров в каждом канале не пропускающих на вход или на выход канала перекрестной помехи;
4. Использованием отрицательных обратных связей (ООС) подавляющих помехи;

5. Достижением условий самокомпенсации влияния дестабилизирующих факторов.

Поясним перечисленные методы.

При выборе слабо коррелированных информативных параметров для полупроводников можно использовать ранее рассмотренные зонные, и деформационные модели. В частности, при анализе деформационных моделей установлено, что деформация в полупроводнике влияет на ширину запрещенной зоны и на подвижность носителей заряда (НЗ) в примесных и собственных полупроводниках [7].

$$\Delta E_{g_{\text{эф}}} = \Delta E_g + kT \ln(N_c \cdot N_v / N'_c \cdot N'_v), \quad (1)$$

где $\Delta E_g = \frac{dE_g}{dP}$ - коэффициент изменения ширины запрещенной зоны от давления (справочная величина), для Si $\Delta E_g = -1,5 \cdot 10^{-11}$ В/Па, $(N_c \cdot N_v)$ и $(N'_c \cdot N'_v)$ - эффективная плотность состояний в зонах проводимости и валентной соответственно, для недеформированного и деформированного полупроводника.

В том случае, когда $N_c = N'_c$, $N_v = N'_v$ вторая составляющая выражения (1) превращается в ноль, при этом получаем $\Delta E_{g_{\text{эф}}} = \Delta E_g$.

Это происходит тогда, когда при деформации или не изменяется симметрия полупроводника (всестороннее сжатие) или деформации не слишком велики (малые механические напряжения в ПЧЭ). Деформационные математические модели (ММ) на уровне кристалла содержат ориентационные члены, учитывающие количество и расположение энергетических зон (зоны проводимости и валентной зоны).

Картину изменения взаимного расположения энергетических зон усложняет также тот факт, что зона проводимости и валентная зона под действием деформации изменяются по разным закономерностям. Они растягиваются, сжимаются, перемещаются и деформируются [8].

В конечном итоге, в деформированном полупроводнике перераспределение НЗ между энергетическими уровнями приводит к изменению концентрации НЗ:

- для собственных полупроводников

$$n_i = n_{i0} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right) \quad (2)$$

- для полупроводников «n» - типа проводимости

$$n = N_D + \frac{n_{i0}^2}{N} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (3)$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (4)$$

- для полупроводников «р» - типа

$$p_p = N_A + \frac{n_i^2}{N_A} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (5)$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right), \quad (6)$$

где N_D , и N_A - концентрации, соответственно, донорной и акцепторной примесей; n_i - концентрация НЗ в собственном полупроводнике; p_n - концентрация акцепторов в электронном полупроводнике; n_p - концентрация электронов в дырочном полупроводнике.

Введенные в полупроводник примеси вносят в запрещенную зону свои энергетические уровни, которые также изменяются под действием деформации. Но для мелких уровней чувствительность к деформации на два порядка меньше, чем у основных энергетических зон.

При деформационных явлениях в полупроводниках изменяется также подвижность и время жизни НЗ ввиду смещения и расщепления уровней внутри зон. При этом основной вклад вносит изменение подвижности НЗ:

$$\mu = \tau e / m, \tag{8}$$

где τ - время релаксации, которое не зависит от давления; m - масса НЗ.

Таким образом, зависимость подвижности, согласно (8), обусловлена снижением массы НЗ под действием давления. Кроме того, масса НЗ зависит от направления движения носителей заряда относительно кристаллографической ориентации, поэтому различают массы m_{\parallel} и m_{\perp} , соответственно с ними и подвижности μ_{\parallel} и μ_{\perp} [9]. В свою очередь, в выражения для μ_{\parallel} и μ_{\perp} входит член $\exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right)$ и коэффициенты анизотропии НЗ (дырок и электронов), поэтому общее влияние деформации на электрофизические характеристики (ЭФХ) СЭ совмещенных датчиков давления и температуры имеет сложный вид ввиду наличия перекрестных связей.

В то же время легко доказать, что на собственный полупроводник температура оказывает большее влияние, нежели деформация. Для этого определим изменение ширины запрещенной зоны при действии всестороннего сжатия и температуры, используя экспериментальные чувствительности к указанным параметрам [8,10]:

$$\frac{dE_g}{dT} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К} \text{ и } \frac{dE_g}{dP} = -1,5 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па}.$$

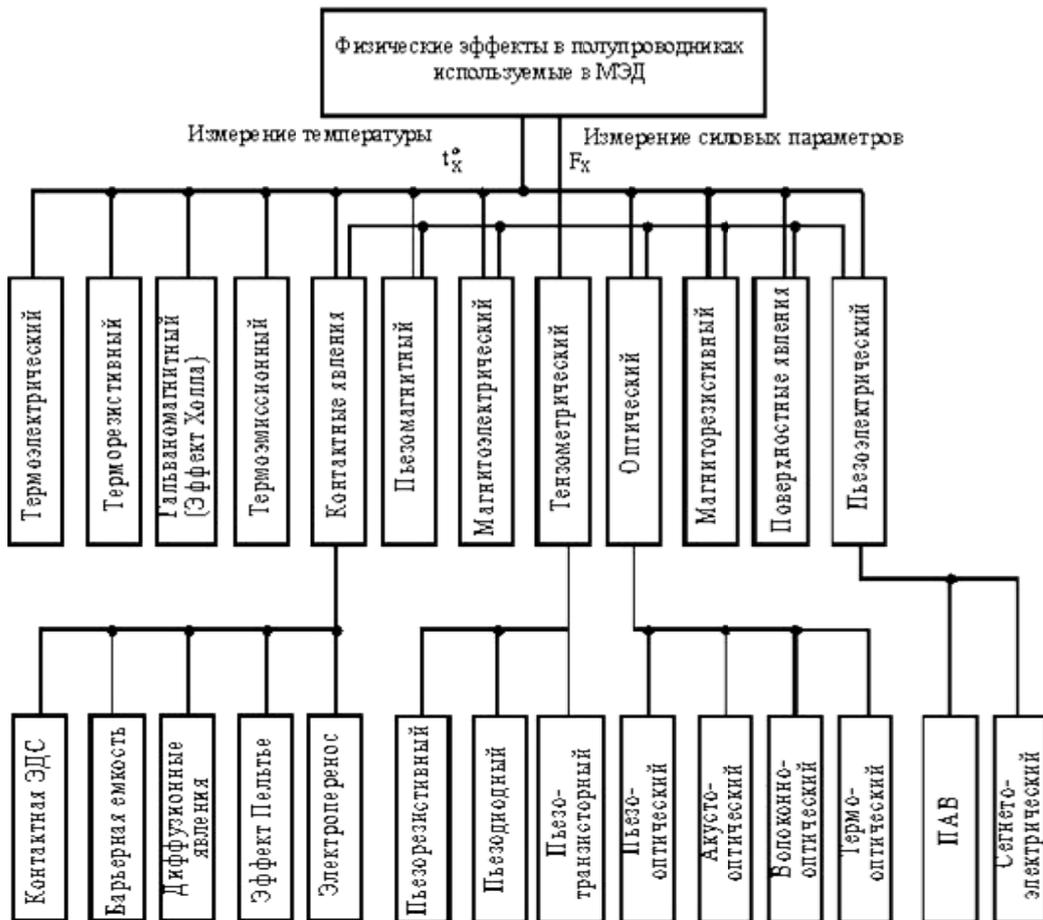


Рисунок 4 – Классификация принципов преобразования в совмещенных датчиках силовых параметров и температуры

Рассчитаем ΔE_g при $\Delta T = 100^\circ\text{K}$: $\Delta E_g = 2 \cdot 10^{-3} \text{эВ}$, что соответствует давлению $\Delta P = \frac{2,8 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-11}} \approx 2 \cdot 10^8 \text{Па} = 280 \text{МПа}$. С другой стороны, оценим возможную величину изменения температуры при изменении давления на 10 МПа:

$$\Delta E_g = 1,5 \cdot 10^{-11} \cdot 10 = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{эВ}, \quad \Delta T = \frac{1,5 \cdot 10^{-10}}{2,8 \cdot 10^{-4}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{К}.$$

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что температура гораздо эффективнее действует на собственный полупроводник, чем давление. Тем самым, подтверждается возможность использования совместимого измерения температуры и давления для ПЧЭ изготовленных на основе собственных полупроводников из-за слабой корреляции чувствительностей к давлению и к температуре.

Легируя полупроводник примесями с заданными концентрациями, а также используя концентрационную и ориентационную зависимости НЗ от одноосной деформации, можно на несколько порядков увеличить чувствительность ЭФХ полупроводников к деформации. Поэтому в случае использования примесных полупроводников, эффекты изменения параметров полупроводников от давления и температуры могут сравняться.

Возможные принципы преобразования, которые могут быть использованы в совмещенных датчиках силовых параметров и температуры, приведены на рисунке 4.

Конструктивная реализация микроэлектронных совмещенных датчиков может быть представлена датчиком давления и температуры, датчиком статико-динамических давлений, показанных на рисунках 5 и 6.

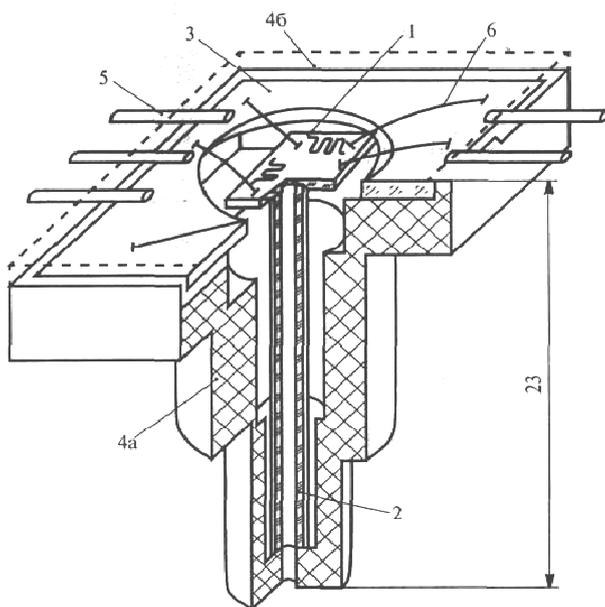


Рисунок 5 – Совмещенный датчик давления и температуры: 1 – ПЧЭ, 2 – стеклокапилляр, 3 – компенсационная плата, 4а – корпус, 4б – крышка, 5 – электрические выводы, 6 – проволочные выводы

Разработанный датчик давления и температуры ДБЭ 093 (рисунок 5) конструктивно выполнен в виде единого блока, объединяющего чувствительный элемент, компенсационную плату, внешние электрические выводы и несущий пластмассовый корпус. Общий вес датчика около 5 г. Полупроводниковый чувствительный элемент (ПЧЭ) содержит кремниевый кристалл, соединенный электростатическим способом со стеклянным кольцом. В теле кристалла методами интегральной технологии сформированы пьезорезисторы и терморезисторы. Пьезо- и терморезисторы золотыми проводниками соединяются с нормализующей тонкопленочной компенсационной платой. Электрический сигнал, соответствующий измеряемому параметру, подается на внешние электрические выводы.

ПЧЭ, компенсационная плата и внешние выводы закрепляются с помощью компаунда в корпусе 4а и сверху закрываются крышкой 4б (показана штриховой линией). Корпус и крышка датчика изготовлены из поликарбоната. Элементом, воспринимающим давление и температуру, является миниатюрный кремниевый профилированный кристалл с пьезорезисторами (ПР), соединенными в мост Уинстона и терморезисторами, один из которых служит для термокомпенсации, а второй является термодатчиком. Для уменьшения влияния переходных сопротивлений на точность датчика все межэлементные соединения в кристалле выполнены в виде высоколегированных диффузионных областей.

Давление внешней среды, воздействуя на ПЧЭ, вызывает его деформацию, а разница температур между контактирующей со средой поверхностью и планарной стороной кристалла приводит к возникновению в его объеме теплового потока.

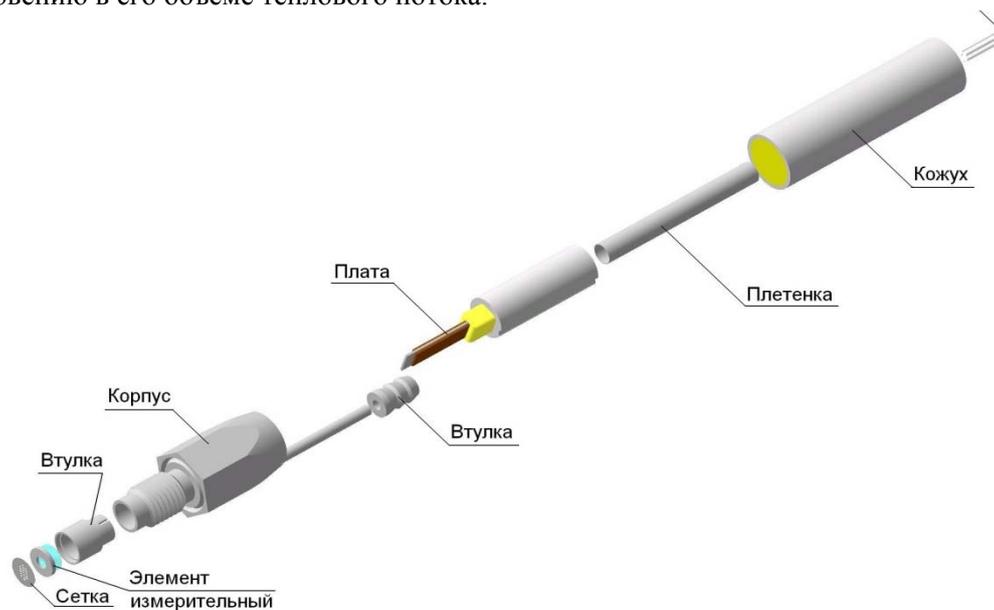


Рисунок 6 – Конструкция миниатюрного микроэлектронного датчика статико-динамических давлений

Под действием давления и температуры пьезорезисторы и терморезисторы изменяют свое сопротивление пропорционально соответственно деформации ε_x и разнице температур Δt_x . Изменения сопротивления ΔR_x и ΔR_{tx} преобразуются в мостовой схеме в потенциальные U_x и U_{tx} или токовые сигналы, которые, после корректировки по температуре и нормализации по уровню, через внешние выводы подаются на выход датчика.

Номиналы терморезисторов равны 30 кОм. Терморезисторы сформированы ионной имплантацией. Резисторы компенсационной платы - тонкопленочные из сплава Х20Н75Ю, осажденные термовакуумным методом. Контактная металлизация - хром-медь-никель. Все резисторы компенсационной платы подгоняются после монтажа ее в корпус датчика. Подгонка осуществляется лазером. Корпусные детали изготавливались на литьевом пресс-автомате с применением многоместной пресс-формы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Михайлов П.Г., Белоусов Е.Ф. Микроэлектронные датчики. Проектирование, изготовление, диагностика, Учебное пособие, Пенза ПГУ, 2001, 87с.
- [2] Михайлов П.Г., Белозубов Е.М., Бекетов В.В. Миниатюрный полупроводниковый измерительный преобразователь с повышенной информативностью, Научные труды МЛТИ, вып. №195, М., 1987.
- [3] Михайлов П.Г., Бутов В.И., Винокуров И.П. и др. Датчики акустических давлений, Приборы и системы управления, №10, 1990.
- [4] Михайлов П.Г., Бутов В.И., Забродина С.Д. и др. Датчики быстропеременных и акустических давлений, Измерительная техника, №6, 1994.
- [5] Михайлов П.Г., Бутов В.И., Гориш А.В. и др. Пьезодатчики быстропеременных, импульсных и акустических давлений, Радиотехника №10, 1995, с.36.

- [6] Датчики теплофизических и механических параметров, Справочник в 2-х томах под ред. Багдатьяева Е.Е., Гориша А.В., Малкова Я.В., М.: ИПРЖР, 1998.
- [7] Викулин Н.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов, М.: Радио и связь, 1990, 264с.
- [8] Полякова А.А. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов, М.: Энергия, 1979.
- [9] Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Справочник, Наукова думка Киев, 1975, 704 с.
- [10] Pfan W.G and Thurston R.N. Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Trensvers and Shear Piezoresistive Effects, "Journal of Applied Physics", vol. 32, № 10, 1961, pp. 2008-2019.
- [11] Михайлов П.Г., Сергеев Д.А., Соколов А.В. Исследование методов расширения функциональных возможностей полупроводниковых и пьезоэлектрических датчиков давлений, Труды МНТК Датчики и системы: технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы 2012), Пенза, Издательство ПГУ, 2012, С. 143-149.
- [12] Михайлов П.Г., Зубков А.Ф. Чернецов М.А. Маринина Л.А. Принципы построения датчиков с расширенными функциональными возможностями, Сб. статей VII Межрегиональная НТК "Инновационные технологии в экономике, информатике и медицине", Пенза, ПГТА, 2010, С. 234-237.
- [13] Михайлов П.Г., Лапшин В.И., Сергеев Д.А. Моделирование и конструирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давлений, Известия Южного федерального университета, Технические науки, 2013, № 5, С. 128-133.
- [14] Михайлов П.Г., Соколов А.В., Маланин В.П., Сергеев Д.А. Разработка датчиков физических величин с применением унифицированных чувствительных элементов и измерительных модулей, Сб. статей Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах, Пенза, Издательство ПГУ, 2013, С. 231-235.
- [15] Михайлов П.Г., Соколов А.В., Сергеев Д.А. Вопросы применения чувствительных элементов и измерительных модулей в датчиках физических величин, Информационно-измерительная техника: Межвузовский сборник научных трудов, выпуск 37, Пенза: ИИЦ ПГУ, 2012.
- [16] Михайлов П.Г., Маринина Л.А., Смирнов И.Ю., Сергеев Д.А. Чувствительные элементы и измерительные модули датчиков. Конструкции и технологии, Современные информационные технологии: Труды МНТК, Выпуск 13, Пенза: ПГТА, 2011, С. 22-25.
- [17] Михайлов П.Г., Петрунин Г.В., Сергеев Д.А. Информационные параметры высокотемпературных чувствительных элементов на основе поликремниевых пленок, Университетское образование: Сборник материалов XIV Международной научно-методической конференции, Пенза: ПДЗ, 2010, с. 498-500.
- [18] Ожигенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О., Скотников В.В. Использование обратных преобразователей в микроэлектронных датчиках, Вестник НАН РК, №6, 2014, С. 41-46.
- [19] Ожигенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О. Петрин В.А., Маринина Л.А. Общие вопросы моделирования компонентов и структур микроэлектронных датчиков, Вестник НАН РК, №6, 2014, С. 62-71.

REFERENCES

- [1] Mikhailov P.G., Belousov E.F. Microelectronic sensors. Design, fabrication, diagnostics, Textbook, Penza PSU, 2001, p.87. (in Russ.).
- [2] Mikhailov P.G., Belozubov E.M., Beketov V.V. Miniature semiconductor transducer with an increased informative, MLTI Proceedings, vol. №195, M.:, 1987. (in Russ.).
- [3] Mikhailov P.G., Butov V.I., Vinokurov I.V., etc. Acoustic pressure sensors, instruments and control systems, №10, 1990. (in Russ.).
- [4] Mikhailov P.G., Butov V.I., Zabrodina S.D., etc. The sensors of rapidly and acoustic pressure measurement technology, №6, 1994. (in Russ.).
- [5] Mikhailov P.G., Butov V.I., Gohrisch A.V., etc. Piezosensor of rapidly, and acoustic pulse pressure, radio №10, 1995, p.36. (in Russ.).
- [6] The sensors of thermal and mechanical properties, in Handbook 2, Volumes ed. Bagdatyev E.E., Gorishi A.V., Malkov Y., M.: IPRZHR, 1998. (in Russ.).
- [7] Vikulin N.M., Stafeev V.I. Physics of Semiconductor Devices, M.: Radio and Communications, 1990, p.264. (in Russ.).
- [8] Polyakova A.A. Deformation of semiconductors and semiconductor devices, M.: Energy, 1979. (in Russ.).
- [9] Baranskii P.I., Klotchkov V.P. Potykevich I.V. Semiconductor electronics. Directory, Naukova Dumka, Kiev, 1975, 704 p. (in Russ.).
- [10] Pfan W.G and Thurston R.N. Semiconducting Stress Transducers Utilizing the Trensvers and Shear Piezoresistive Effects, "Journal of Applied Physics", vol. 32, № 10, 1961, pp. 2008-2019. (in Eng.).
- [11] Mikhailov P.G., Sergeev D.A., Sokolov A.V. Research methods to expand the functionality of semiconductor and piezoelectric pressure sensors, Proceedings IRTC sensors and systems: technology acquisition and processing of measuring data (Sensors and Systems in 2012), Penza, Publisher PSU, 2012, pp. 143-149. (in Russ.).
- [12] Mikhailov P.G., Zubkov A.F., Tchernetsov M.A., Marинина L.A. Principles of construction of sensors with advanced features, Coll. Articles VII Inter-regional conference on "Innovative technologies in the economy, science and medicine", Penza, PSTA, 2010, pp. 234-237. (in Russ.).
- [13] Mikhailov P.G., Lapshin V.I., Sergeev D.A. Modeling and design of silicon sensitive elements of the capacitive pressure sensor, Southern Federal University, Engineering, 2013, № 5, pp. 128-133. (in Russ.).
- [14] Mikhailov P.G., Sokolov A.V., Malanin V.P., Sergeev D.A. The development of sensors of physical quantities using standardized sensors and measurement modules, Coll. Articles of the International scientific conference "Problems of automation and control engineering systems, Penza, Publisher PSU, 2013, pp. 231-235. (in Russ.).

[15] Mikhailov P.G., Sokolov A.V., Sergeev D.A. The application of sensors and measurement modules in the sensors of physical quantities, Information and measuring equipment: Interuniversity collection of scientific papers, Issue 37, Penza: IPC PSU 2012. (in Russ.).

[16] Mikhailov P.G., Marinina L.A., Smirnov I.Y., Sergeev D.A. Sensing elements and measuring sensor modules. Design and technology, modern information technology: Proceedings of the IRTC, Issue 13, Penza: PSTA, 2011, pp. 22-25. (in Russ.).

[17] Mikhailov P.G., Petrunin G.V. Sergeev D.A. Information parameters of high-temperature sensing elements based on polysilicon films, University education: Proceedings of the XIV International Scientific Conference, Penza: ETC, 2010, pp. 498-500.

[18] Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Kasimov A.O., Skotnikov V.V. The use of inverters in microelectronic sensors, Bulletin of National Academy of Sciences of Kazakhstan, 2014, №6, pp. 41-46. (in Russ.).

[19] Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Kasimov A.O., Petrin V.A., Marinina L.A. Common questions of modeling components and structures microelectronic sensors, Bulletin of National Academy of Sciences of Kazakhstan, 2014, №6, pp. 62-71. (in Russ.).

БІРІКТІРІЛГЕН ФИЗИКАЛЫҚ ШАМАЛАР ДАТЧИКТЕРІ

К. А. Ожикенов¹, П. Г. Михайлов², А. О. Қасымов¹, Н. Баянбай¹, Ж. Қуатқанова¹

¹Қ.И. Сәтбаев ат. Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы

²Пенза мемлекеттік технологиялық университеті, Пенза, Ресей

Тірек сөздер: датчик, өлшеу, микроэлектрондық датчиктер, қысым, температура, біріктіру.

Аннотация. Физикалық шамалар датчиктерін қолдану өлшеу техникасы мен аспап жасаудың өзекті мәселелерінің бірі. Әсіресе ол космонавтика, энергетика, құбыр тарту транспорты, маңызды нысандарды күзету, экология салаларындағы автономды өлшеу және басқарушы жүйелердің жасалуы мен дамуына байланысты өзектілігі арта түсті.

Ракеталық-ғарыштық және ұшу техникаларының бұйымдарын жасау және сынау кездерінде олардың негізгі бақылау параметрлері ретінде қысым, температура және діріл алынады.

Көппараметрлік өлшеу концепциясы ұсынылады. Электрлік емес шамалардың біріктіріліп түрленуінің әдіс-тәсілдері сипатталады, көпфункционалық датчиктердің құрылымдық сұлбалары келтіріледі. Көппараметрлік өлшеу тәсілін өлшеудегі ақпараттың дәлдігін алуға көмектесетіні көрсетілген.

Поступила 22.05.2015 г.

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

www.nauka-nanrk.kz

bulletin-science.kz

Редакторы *М. С. Ахметова, Д. С. Аленов, Т. А. Апендиев*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 28.05.2015.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.

17,7 п.л. Тираж 2000. Заказ 3.