

И змерение
М ониторинг
У правление
К онтроль

Научно-производственный журнал

3 (5)
2013



Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

Научно-производственный журнал

Тематика журнала:

информатика; измерительная техника; управление; автоматика;
электроника; датчики; системы мониторинга, контроля и диагностики

Цель журнала:

представить результаты исследований и разработок научных и производственных коллективов
в области современных информационно-измерительных технологий

Территория распространения:

Российская Федерация и зарубежные страны

Периодичность выхода:

4 раза в год

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ:

В. И. Волчихин (главный редактор),
Е. А. Ломтев (заместитель главного редактора),
А. Г. Дмитриенко (заместитель главного редактора),
А. В. Блинов (научный редактор), П. П. Чураков (научный редактор),
М. Г. Мясникова (выпускающий редактор),
Е. Ю. Белякова (ответственный секретарь), А. В. Терехина (ответственный секретарь)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. И. Батищев, С. Ю. Байдаров, В. А. Васильев, Ю. В. Гуляев, Ю. Н. Косников,
П. П. Мальцев, В. С. Мелентьев, В. А. Мишин, В. Г. Недорезов, Д. И. Нефедьев,
Р. М. Печерская, С. А. Прохоров, А. В. Светлов, Л. Р. Фионова, В. А. Фунтиков,
Б. В. Цыпин, А. Л. Шестаков, В. Б. Шорин, М. А. Щербаков, Н. К. Юрков

Учредители:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Пензенский государственный университет»,
Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт физических измерений»

Подписной индекс ФС77-49714 в каталоге Роспечати

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-49714 от 04.05.2012 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором)

Адрес редакции:

Россия, 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40
Пензенский государственный университет
Тел./факс: (8412) 36-82-22; e-mail: iit@pnzgu.ru

ISSN 2307-5538

**Перепечатка допускается только по согласованию
с редакцией с ссылкой на журнал**

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

*Редактор О. Ю. Ещина
Компьютерная верстка Ф. Д. Фафурина
Дизайн обложки Ф. Д. Фафурина*

Подписано в печать 12.09.2013. Формат 60×84¹/₈.
Усл. печ. л. 9,3. Заказ № 833. Тираж 300.

Пенза, Красная, 40, Издательство ПГУ
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru

.....

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

.....

Научно-производственный журнал

.....

№ 3(5), 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Дмитриенко А. Г., Трофимов А. А., Нефедьев Д. И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ
ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСТРОВЫХ ДАТЧИКОВ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

3

Селезнев А. В., Чувыкин Б. В.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА
ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ПОГРЕШНОСТИ КВАНТОВАНИЯ СИГМА-ДЕЛЬТА АЦП

9

Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Мельников А. А., Цыпин Б. В.

ТЕСТЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ НА ПРОТЯЖЕНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

15

Кострикина И. А., Галкина Е. Н.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖПОВЕРОЧНЫХ
ИНТЕРВАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

19

Нефедьев Д. И., Шварев А. В.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПУЛЬСАТОРА ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДВУМЕРНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

25

Бодин О. Н., Сергеенков А. С., Царев П. С., Целикин М. А.
АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АНТРОПОМЕТРИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ
КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ТОРСА ПАЦИЕНТА

31

Чувькин Б. В., Долгова И. А., Сидорова И. А.
ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ
СИГМА-ДЕЛЬТА АЦП В СОСТАВЕ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

39

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИЗМЕРЕНИЯХ

Дмитриенко А. Г., Папко А. А., Торгашин С. И., Кирынина И. В.
ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ
ИНЕРЦИАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ОБЪЕМНОЙ МИКРОМЕХАНИКИ

45

Чебурахин И. Н., Нефедьев Д. И.
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
ТЕНЗОСТРУКТУР МДМ

54

Ефремов Е. В., Блинов А. В.
МЕМБРАНА СИЛОПРЕОБРАЗУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА.
АНАЛИЗ СИСТЕМЫ «МЕМБРАНА – ЭЛЕМЕНТ».
ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

61

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Васильев В. А., Громков Н. В., Николаев Д. П., Сатыбалдыев О. С.
ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ С УМЕНЬШЕННОЙ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ
НА ОСНОВЕ НАНО-И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ И ЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ
РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

72

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.7.08

*В. А. Васильев, Н. В. Громков, Д. П. Николаев, О. С. Сатыбалдыев***ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ С УМЕНЬШЕННОЙ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ
НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ
РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ***V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov, D. P. Nikolaev, O. S. Satybaldyev***PRESSURE SENSORS WITH THE REDUCED TEMPERATURE
ERROR ON THE BASIS OF NANO- END
OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS
AND FREQUENCY INTEGRATING DEVELOPING CONVERTERS**

А н н о т а ц и я. Рассмотрены датчики давления на основе тонкопленочных тензорезисторных нано- и микроэлектромеханических систем с частотным выходным сигналом, устойчивые к воздействию температур. Представлены оригинальные схемы частотных преобразователей и топологии расположения тензоэлементов на мембране чувствительного элемента датчика.

A b s t r a c t. Pressure sensors on the basis of thin-film tenzorezistorny nano – and microelectromechanical systems with the frequency output signal, steady to influence of temperatures are considered. Original schemes of frequency converters and topology of an arrangement of tenzoelement on a membrane of a sensitive element of the sensor are submitted.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчики давления, тонкопленочные тензорезисторные НиМЭМС, температура, частотные преобразователи.

К е y w o r d s: pressure sensors, thin-film tenzorezistorny NIMEMS, temperature, frequency converters.

Датчики давления находят широкое применение в различных отраслях промышленности (в таких как автомобильная, нефтехимическая, авиастроение, производство ракетной и космической техники). К современным датчикам давления постоянно повышаются требования по точности измерения, надежности, массогабаритным размерам, простоте схемной реализации и качеству передачи информации на значительные расстояния. Из большого объема выпускаемых датчиков различного типа (емкостные, индуктивные, резистивные) по различным техноло-

гиям (полупроводниковая, тонкопленочная технология на керамике, NiCr-тонкопленочная технология на стали, Poli-Silicon-тонкопленочная технология на стали) значительное место занимают тонкопленочные тензорезисторные датчики давления ТТДД мембранного типа с измерительной цепью в виде мостовой схемы. В ракетной и авиационной технике используют датчики давления на основе тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем (НиМЭМС), созданные с применением NiCr-тонкопленочной технологии на стали [1]. Основными качественными и эксплуатационными показателями датчиков давления являются диапазон измерений, погрешность (точность), диапазон рабочих температур, выходной сигнал, тип давления, габариты и вес. Большинство датчиков давления имеют диапазон измерений от минус 0,1 до 100 МПа, точность не хуже 1 %, диапазон рабочих температур от $-50 \dots +125$ °С, выходной сигнал: милливольтный (0...50 мВ), нормализованный (0,5...4,5 В), токовый (4...20 мА), частотный (от 1 до 10 кГц) и цифровой.

Для работы в экстремальных условиях при воздействии различных дестабилизирующих факторов (температура, вибрации, ускорения, нестабильность источников питания и др.) пригодны лишь малое число датчиков. Особое место среди всех дестабилизирующих факторов занимает температура [2]. Для компенсации температурной погрешности датчиков давления используют различные методы: конструктивные, технологические, схемные и др. [3]. Анализ методов уменьшения влияния стационарных и нестационарных температур показывает, что в связи с большим количеством факторов, влияющих на температурные чувствительности тонкопленочных НиМЭМС, не может быть разработан какой-то один универсальный метод, обеспечивающий решение всех задач по уменьшению влияния температур на датчики давления. Для уменьшения влияния температур на тонкопленочные НиМЭМС и датчики давления на их основе необходимо комплексное использование конструктивных, схемных, конструктивно-схемных, технологических и методологических методов.

Перспективным направлением в создании микроэлектронных датчиков давления с частотным выходом, устойчивых к воздействию стационарных и нестационарных температур, является интеграция тонкопленочных НиМЭМС [1] с частотными интегрирующими развертывающими преобразователями (ЧИРП) [4], выполненными в виде интегральных микросхем.

Тонкопленочные НиМЭМС, предназначенные для ТТДД, обычно состоят из упругого элемента (мембрана, стержень, балка и т.п.) простой или сложной формы, образованной на нем методами нано- и микроэлектронной технологии гетерогенной структуры, герметизирующей контактной колодки, соединительных проводников [5, 6]. Для исключения дополнительных передаточных звеньев в качестве упругого элемента используют наиболее широко мембрану. Мостовую измерительную цепь располагают непосредственно на упругом элементе, тензорезисторы, включенные в измерительную цепь, воспринимают деформации упругого элемента, а терморезисторы используются в качестве термокомпенсационных элементов [7–9].

Используя конструктивно-технологические методы, различные варианты топологии измерительной схемы на упругом элементе (мембране) датчика, можно уменьшить погрешности от нелинейности и температурной погрешности первичных измерительных преобразователей (датчиков) в условиях воздействия стационарных и нестационарных температур.

Уменьшение влияния дестабилизирующих факторов на погрешность преобразования тензорезисторных тонкопленочных датчиков давления возможно с помощью схемотехнических решений вторичных измерительных преобразователей, преобразующих выходные сигналы с первичных измерительных преобразователей в частотные сигналы. Применение ЧИРП позволяет также уменьшить составляющие погрешности от нестабильности и несимметрии источников питания, от изменения параметров соединительной кабельной линии, от влияния окружающей температуры на параметры операционных усилителей ЧИРП.

Проведенные исследования показывают, что разработанные ЧИРП хорошо совместимы с измерительными цепями ТТДД, могут быть выполнены в интегральном исполнении и размещены в корпусе датчика. При этом возможно улучшение технических характеристик измерительных преобразователей.

На основе системного подхода, совместного использования первичных и вторичных измерительных преобразователей с учетом их характеристик, путем введения дополнительных элементов в схемы ЧИРП и совмещением функций отдельных элементов схем вторичных и первичных измерительных преобразователей представляется возможным уменьшение по-

грешностей преобразования измерительных преобразователей, состоящих из датчиков давления резистивного типа (ТТДД) и ЧИРП от воздействия различных дестабилизирующих факторов (температуры, нестабильности питания, сопротивления кабельной линии и т.д.). В качестве дополнительных элементов схем могут быть резисторы, включенные в цепь отрицательной обратной связи между выходом измерительного преобразователя и диагональю питания тензомоста, ограничивающие ток потребления тензорезисторов, который приводит к их разогреву. Кроме того, с помощью дополнительных резисторов можно задавать диапазон выходных частот, начальную частоту при нулевом разбалансе тензомоста и осуществлять симметрию напряжения питания измерительной цепи резистивного датчика.

Недостатком некоторых известных конструкций датчиков является то, что с изменением температуры изменяется сопротивление плеч тензомоста (тензорезисторов), которое приводит к изменению чувствительности, повышению нелинейности, соответственно, увеличению погрешности и уменьшению точности измерения. Введение добавочного резистора в цепь питания тензомоста для температурной компенсации [10] при постоянном напряжении питания уменьшает напряжение выходного сигнала с измерительной диагонали тензомоста, которое и без того составляет единицы милливольт. При этом уменьшается помехозащищенность полезного сигнала при передаче его по линии связи к устройствам обработки информации.

В реальных условиях эксплуатации датчиков давления рабочая температура тензомоста может изменяться в широком диапазоне (от минус 200 до 150 °С и даже шире) и тогда с изменением температуры сопротивление тензорезисторов, включенных по мостовой схеме, будет изменяться пропорционально в соответствии со значением температурного коэффициента сопротивления, который, к примеру, для металлопленочных тензорезисторов имеет значение порядка $3 \cdot 10^{-3} \% / 10^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1 представлена функциональная электрическая схема частотного преобразователя сигнала тензомоста с уменьшенной температурной погрешностью с дополнительным резистором R_d , включенным последовательно с диагональю питания тензомоста ТМ. Схема содержит интегратор Инт., выполненный на базе операционного усилителя ОУ1, и компаратор на базе ОУ2 [11].

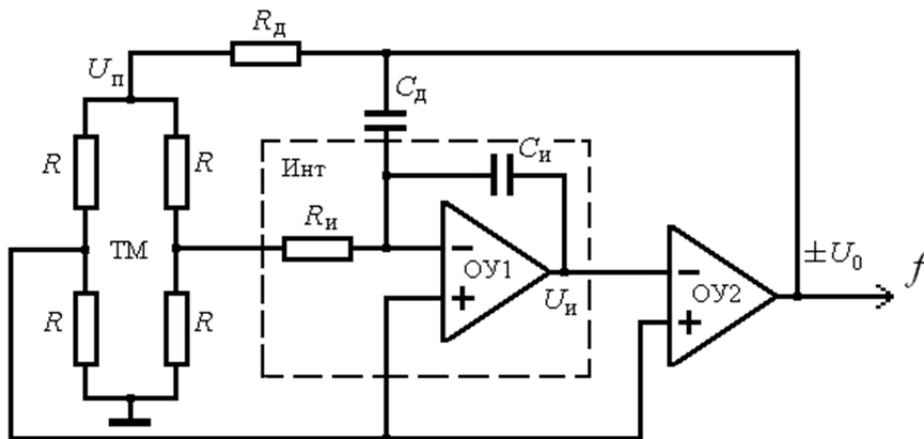


Рис. 1. Функциональная электрическая схема частотного преобразователя сигнала тензомоста с уменьшенной температурной погрешностью

Выражение для выходной частоты данного преобразователя

$$f = \frac{1}{T_k} = \frac{\varepsilon_R}{\left(1 + m \frac{1 + \varepsilon_{dT}}{1 + \varepsilon_T}\right) (1 + \varepsilon_T) 4R_i C_d}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_R = \Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления тензометрического моста под действием давления; $\varepsilon_T = \frac{\Delta R(T)}{R}$ – относительное изменение сопротивления тензомоста при из-

менении температуры; R_d – сопротивление дополнительного резистора; $\varepsilon_{dT} = \frac{\Delta R_d}{R_d}$ – относительное изменение сопротивления дополнительного резистора при изменении температуры; R – сопротивление тензомоста; $m = \frac{R_d}{R}$ – отношение сопротивлений дополнительного резистора и тензомоста; $R_{\text{и}}$ и C_d – сопротивление интегратора и емкость дозирующего конденсатора соответственно.

Для случая, когда дополнительный резистор R_d расположен в схеме преобразователя, на плате с интегратором и компаратором, при стационарной температуре и не подвержен ее влиянию, можно считать $\varepsilon_{dT} = 0$, и тогда выражение (1) примет вид

$$f = \frac{\varepsilon_R}{(1 + m + \varepsilon_T)4R_{\text{и}}C_d}. \quad (2)$$

Как видно из формулы (2), влияние температуры на выходные параметры частотного преобразователя сигнала разбаланса тензомоста уменьшается примерно в $(m + 1)$ раз, где $m = \frac{R_d}{R}$. Уменьшение выходной частоты преобразователя за счет введения дополнительного резистора можно компенсировать уменьшением величины емкости конденсатора C_d во столько же раз. Уменьшение напряжения питания тензомоста за счет введения дополнительного резистора, соединенного с выходом компаратора, снижает мощность, выделяемую тензорезисторами, не сказывается на чувствительности устройства, поскольку функция преобразования не зависит от напряжения питания. Снижение мощности, выделяемой тензорезисторами, позволяет снизить температуру разогрева тензорезисторов от протекающего через них тока.

Результаты проведенных экспериментальных исследований, представленных на рис. 2 в виде графика зависимости выходной частоты от температуры тензомоста, подтвердили уменьшение температурной погрешности представленного преобразователя сигнала разбаланса тензомоста за счет введения дополнительного резистора.

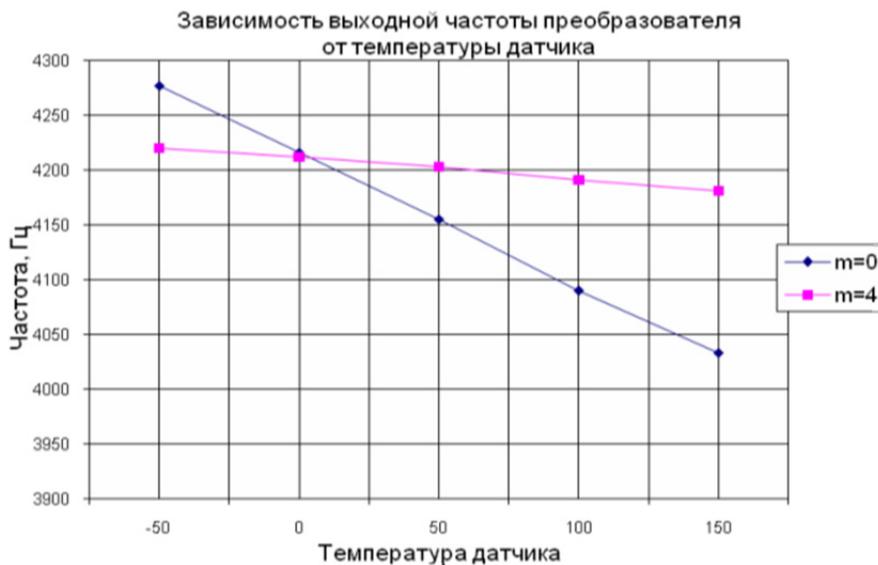


Рис. 2. Зависимость выходной частоты преобразователя от температуры тензомоста

Как видно из рис. 2, в указанном диапазоне температур (от минус 50 до 150 °C) для металлопленочных тензорезисторов с температурным коэффициентом $3 \cdot 10^{-3} \% / 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ при разбалансе тензомоста $\varepsilon_R = 0,01$, у предлагаемого преобразователя (при $m = 4$) относительное изменение частоты выходного сигнала с изменением температуры уменьшено по сравнению со схемой без дополнительного резистора ($m = 0$) более чем в 6 раз (с 5,7 до 0,9 %). Таким образом, повышается точность преобразования сигнала разбаланса тензомоста датчика давления за счет уменьшения влияния температуры тензомоста на выходной сигнал.

Данный частотный преобразователь рекомендуется применять в случае короткой кабельной линии, т.е. в непосредственной близости от датчика (например, в случае интегрального исполнения преобразователя и размещения его в корпусе датчика).

В схеме рассмотренного частотного преобразователя (см. рис. 1) выходная частота определяется по формуле (1), из которой видно, что изменение сопротивления интегратора $R_{\text{и}}$, включающее в себя выходное сопротивление тензометрического моста и сопротивление кабельной линии, увеличивает погрешность измерения преобразователя. Кроме того, следует отметить, что данная схема работает только при одностороннем разбалансе тензомоста, а при нулевом разбалансе и при разбалансе в другую сторону происходит «засыпание» схемы.

Избавиться от последнего недостатка позволяет устройство [12], состоящее из нано- и микроэлектромеханической системы НиМЭМС датчика давления с топологией измерительной схемы, представленной на рис. 3, и частотного преобразователя рис. 4.

В топологии измерительной схемы датчика давления на основе НиМЭМС рис. 3 дополнительные резисторы $R_{\text{д1}}$ и $R_{\text{д2}}$ выполнены из того же материала, что и тензорезисторы (тензоэлементы) тензомоста датчика, их сопротивления равны между собой (по номиналу), могут быть кратными сопротивлению тензомоста, сформированы на основании за границей мембраны в зоне, нечувствительной к механическим деформациям от давления.

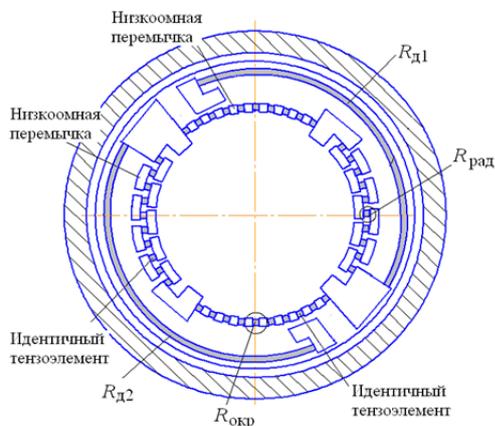


Рис. 3. Топология измерительной схемы НиМЭМС

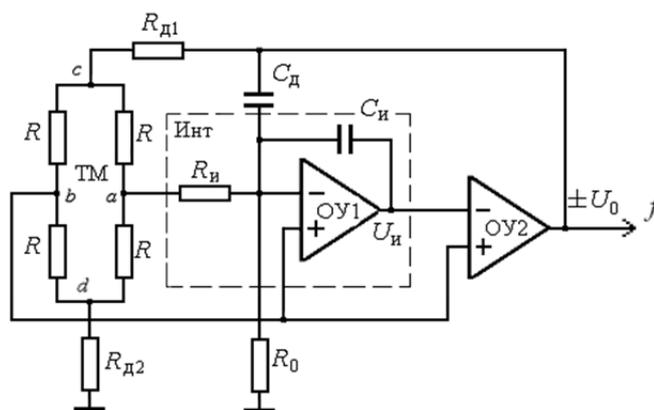


Рис. 4. Функциональная электрическая схема устройства для измерения давления с частотным выходом на основе НиМЭМС

Выражение для выходной частоты преобразователя

$$f = \frac{1}{T_k} = \frac{1}{2(1 - \varepsilon_R + 2m)C_d} \left(\frac{\varepsilon_R}{R_{\text{и}}} + \frac{(1 + \varepsilon_R + 2n)}{2R_0} \right), \quad (3)$$

где $\varepsilon_R = \Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления R тензомоста под действием давления; $m = \frac{R_{\text{д1}}}{R}$ и $n = \frac{R_{\text{д2}}}{R}$ – коэффициенты, равные отношению сопротивлений $R_{\text{д1}}$ и $R_{\text{д2}}$ к сопротивлению R тензомоста; C_d – емкость дозирующего конденсатора; $R_{\text{и}}$ – сопротивление резистора интегратора; R_0 – сопротивление второго резистора интегратора.

Из выражения (3) видно, что при нулевом разбалансе тензомоста ($\varepsilon_R = 0$) и равенстве сопротивлений дополнительных резисторов $R_{\text{д1}}$ и $R_{\text{д2}}$ ($n = m$) начальная частота f_0 выходного сигнала преобразователя может задаваться с помощью величин емкости конденсатора C_d и сопротивления R_0 второго резистора интегратора и равна

$$f_0 = \frac{(1 + 2n)}{4(1 + 2m)C_d R_0} = \frac{1}{4R_0 C_d}. \quad (4)$$

При разбалансе тензомоста в ту или другую сторону, как это происходит в датчиках дифференциального давления, величина относительного изменения сопротивления плеч тензомоста будет изменяться в зависимости от измеряемого давления в диапазоне от минус 0,01

до 0,01 ($\varepsilon_R = 0 \div \pm 0,01$). Учитывая то, что эта величина значительно меньше единицы, из выражения (3) можно определить девиацию частоты Δf выходного сигнала преобразователя:

$$\Delta f \approx \frac{\pm \varepsilon_R}{2(1+2m)C_d R_{и}}, \quad (5)$$

которая может задаваться и устанавливаться более точно с помощью величин емкости конденсатора C_d и сопротивления резистора $R_{и}$ интегратора.

Выражения (3)–(5) были получены без учета влияния температуры разогрева тензомоста и не учитывают погрешности преобразования, связанной с изменением сопротивлений тензорезисторов и дополнительных резисторов $R_{д1}$ и $R_{д2}$.

С учетом влияния температуры, при которой будут изменяться сопротивления плеч тензомоста (независимо от измеряемого давления) и сопротивления дополнительных резисторов $R_{д1}$ и $R_{д2}$, установленных на основании мембраны датчика давления в непосредственной близости от тензорезисторов, но в зоне нечувствительности к механическим деформациям от измеряемого давления, для выходной частоты преобразователя выражение (3) принимает вид

$$f(T) = \frac{1}{2(1 - \varepsilon_{RT} + 2m_T)C_d} \left(\frac{\varepsilon_{RT}}{R_{и}} + \frac{(1 + \varepsilon_{RT} + 2n_T)}{2R_0} \right), \quad (6)$$

где значения $n_T = \frac{n}{1 + \varepsilon_T}$, $m_T = \frac{m}{1 + \varepsilon_T}$, $\varepsilon_{RT} = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon_T}$ зависят от относительного изменения со-

противлений тензорезисторов, связанных с изменением температуры тензомоста и величиной температурного коэффициента сопротивления материала тензорезисторов. Поскольку дополнительные резисторы $R_{д1}$ и $R_{д2}$ выполнены из того же материала, что и тензорезисторы, и расположены в непосредственной близости от тензорезисторов за периферией мембраны на ее основании, они будут претерпевать примерно одинаковые температурные изменения, т.е. с увеличением температуры сопротивление их будет увеличиваться согласно величине температурного коэффициента сопротивления материала (ε_T), которая меняется от минус 0,09 до 0,09 при изменении температуры от минус 150 °C до 150 °C соответственно.

При этом следует отметить, что при отсутствии в схеме преобразователя дополнительных резисторов $R_{д1}$ и $R_{д2}$ в положительной области температур (+150 °C) частота выходного сигнала уменьшается в зависимости от увеличения разбаланса тензомоста, а в области отрицательных температур (-150 °C) – увеличивается. Приведенная относительная погрешность преобразования на краях диапазонов температур и измеряемых давлений составляет от -9,39 % до +3,33 % для температуры минус 150 °C и от 7,86 до -2,78 % для температуры плюс 150 °C.

При включении в схему устройства дополнительных резисторов $R_{д1}$ и $R_{д2}$ с увеличением соотношения $m = R_{д1}/R$ и $n = R_{д2}/R$ ($m = n = 1; 4$ и т.д.) и размещении их на основании мембраны датчика давления происходит уменьшение температурной погрешности преобразования частоты выходного сигнала, как показано на рис. 5 и 6.

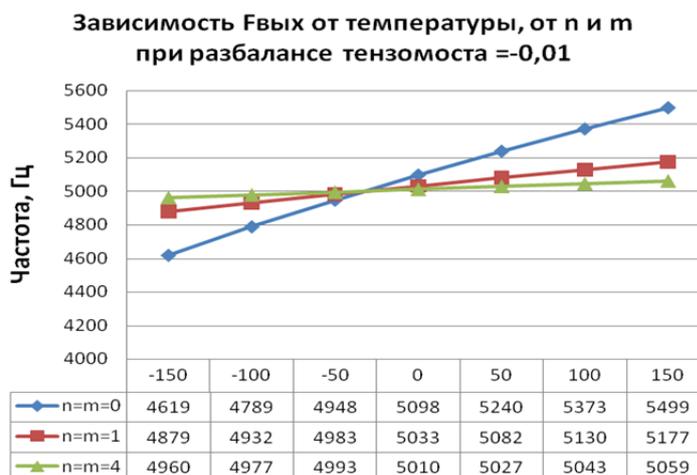


Рис. 5. Зависимость частоты выходного сигнала от n и m при разбалансе тензомоста $\varepsilon_R = -0,01$

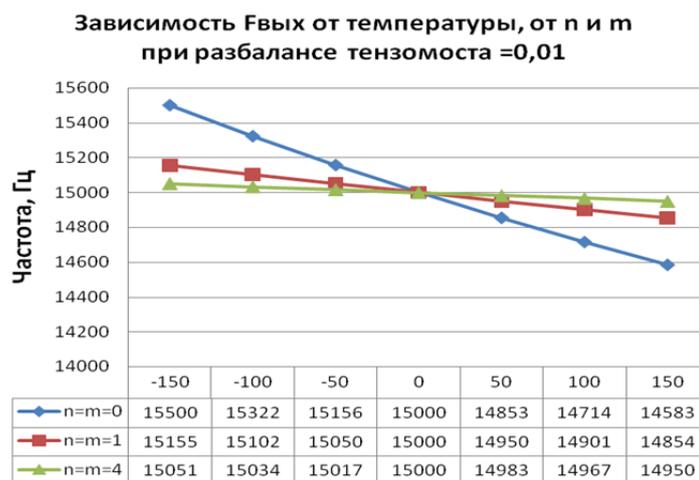


Рис. 6. Зависимость частоты выходного сигнала от n и m при разбалансе тензомоста $\varepsilon_R = 0,01$

С увеличением величины дополнительных резисторов R_{d1} и R_{d2} в 4 раза ($R_{d1} = R_{d2} = 2800$ Ом) температурная погрешность не превышает 1 % при разбалансе тензомоста, равном $-0,01$, и менее 0,34 % – при разбалансе $+0,01$.

Таким образом, для заданных значений диапазона измеряемых давлений, температуры разогрева тензомоста, частотного диапазона выходного сигнала устройства путем расчета и правильного подбора параметров элементов схемы частотного преобразователя сигнала с выхода тензомоста можно значительно уменьшить (или полностью компенсировать) погрешность измерения устройства, связанную с изменением температуры измеряемой среды и с разогревом тензомоста датчика давления.

Список литературы

1. Belozubov, E. M. Thin-Film Nano- And Micro-Electromechanical Systems – The Basis Of Contemporary And Future Pressure Sensors For Rocket And Aviation Engineering / E. M. Belozubov, V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov // Measurement Techniques. – 2009. – V. 52, № 7. – P. 739–744.
2. Belozubov, E. M. Effect Of Thermal Shock On A Membrane-Type Transducer / E. M. Belozubov, V. A. Vasil'ev, D. A. Izmailov // Measurement Techniques. – 2009. – V. 52, № 2. – P. 155–160.
3. Belozubov, E. M. Minimization Of The Effect Of Temperature On Thin-Film Nano- And Microelectromechanical Systems And Pressure Sensors Based On Them / E. M. Belozubov, V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov // Measurement Techniques. – 2009. – V. 52, № 8. – P. 853–858.
4. Громков, Н. В. Интегрирующие развертывающие преобразователи параметров датчиков систем измерения, контроля и управления : моногр. / Н. В. Громков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – 244 с.
5. Пат. 1615578. Российская Федерация, 5G01L 9/04. Датчик давления / Белозубов Е. М. // Б.И. № 47 от 23.12.90.
6. А. с. 1515081 СССР, МКИ G 01 L 9/04. Датчик давления / В. А. Васильев, Е. П. Осадчий, А. И. Тихонов // Б. И. № 38 от 15.10.1989.
7. Белозубов, Е. М. Тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы – основа современных и перспективных датчиков давления для ракетной и авиационной техники / Е. М. Белозубов, В. А. Васильев, Н. В. Громков // Измерительная техника. – 2009. – № 7. – С. 35–38.
8. Белозубов, Е. М. Тонкопленочные микроэлектромеханические системы и датчики на их основе / Е. М. Белозубов, Н. Е. Белозубова, В. А. Васильев // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 2. – С. 33–39.
9. Белозубов, Е. М. Перспективные тонкопленочные тензорезисторные датчики давления для ракетной и авиационной техники / Е. М. Белозубов // Измерительная техника. – 2004. – № 5. – С. 37.
10. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.