

делённом уровне СКО входного аддитивного белого гауссовского шума, алгоритм показывает удовлетворительные результаты.

Литература. 1. Кресин, В. Сверхпроводимость и сверхтекучесть / В. Кресин – М.: Наука, 1978. – 192 с. 2. Лихарев, К., Ульрих, Б. Т. Системы с джозефсоновскими контактами: основы теории / К. Лихарев, Б. Ульрих – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 448 с. 3. Васюков, В.Н. Теория электрической связи: учебник / В. Н. Васюков – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 392 с. («Учебники НГТУ»). 4. Critical_current_evaluation [Электронный ресурс] / rkm81 URL: https://github.com/rkm81/critical_current_evaluation.

Реквизиты для справок: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20, студент, Примаченко О. Г., тел. +79134534018, e-mail: primachenko_oleg@outlook.com

УДК 681.586.773, 621.314.4.61

СНИЖЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЬЕЗОДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СХЕМНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СПОСОБОВ

А.А. ПИРОГОВА, И.Н. ЧЕБУРАХИН, В.С. ВОЛКОВ, В.В. КИКОТ

При разработке перспективных конструкций высокотемпературных пьезодатчиков динамического давления (пьезодатчиков), которые эксплуатируются при мощных и быстроизменяющихся температурных воздействиях в диапазоне от минус 253 С до 700 С, все чаще используются пьезоэлементы из лангата [1]. Однако при создании объектов ракетно-космической техники для автономной эксплуатации требуются пьезодатчики с пьезоэлементами с подтвержденным сроком службы до 25 лет и более [2]. Положительные результаты длительных и дорогостоящих испытаний, а также эксплуатации в составе основного изделия имеются у пьезокерамических элементов, изготовленных из материалов, разработанных в 1970-2000 гг., и отсутствуют у пьезоэлементов из лангата [3]. Поэтому решение частных измерительных задач возможно путем варьирования материала пьезоэлементов и перенастройки вторичных преобразователей разработанных пьезодатчиков, а также изменением объема требуемых испытаний.

Цель исследования. Целью исследования является подтверждение возможности использования пьезодатчика с пьезокерамическими элементами из модифицированного материала ТНВ-1 вместо пьезоэлементов из монокристаллического галлотанталата лантана (лангата) и

разработка методики снижения температурной погрешности измерения пьезодатчика путем вычисления измеренного значения динамического давления со сниженной температурной погрешностью.

В составе пьезодатчика используются два пьезоэлемента, стянутых между собой токосъемниками из стальной ленты, которые приварены к токоведущим жилам кабеля. Работоспособность датчика при температурах до 800 С без принудительного охлаждения обеспечивается высокотемпературными материалами пьезоэлемента (лангатаг или модифицированный ТНВ-1).

В соответствии с [4] дополнительная температурная погрешность измерения у пьезодатчиков характеризуется коэффициентом влияния повышенной (пониженной) температуры рабочей среды на коэффициент преобразования измеряемого быстропеременного давления в изменение информативного параметра выходного сигнала K_{II} (коэффициент термочувствительности K_T). Отклонение значения K_T в заданном температурном диапазоне от значения при температуре $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ должно быть в диапазоне от 0,4 до 1,4.

Пьезоэлементы ПЭСД-22 из модифицированного материала ТНВ-1 [2] и аналогичные по геометрическим размерам элементы из лангатага при схожей пьезочувствительности d_{33} (от 8 до 12 пКл/Н) и электрической ёмкости C_0 (от 8 до 12 пФ) отличаются температурной чувствительностью. Электрическая ёмкость C_0 и пьезочувствительность d_{33} у ПЭСД-22 при температурах от минус 253 С до 700 С изменяются в диапазоне от минус 8 до 20% [2], а у пьезоэлементов из лангатага до 450°C не более чем на 5% [1].

Температурные зависимости $C_0(T)$ и $d_{33}(T)$ у ПЭСД-22 имеют близкий к линейному характер, что упрощает коррекцию температурной погрешности измерения, а также позволяет использовать $C_0(T)$ в качестве информативного относительно температуры пьезоэлемента параметра при разработке измерительных цепей вторичных преобразователей [5].

Анализ результатов натурального эксперимента, проведенного по изложенной в [4] методике по определению K_T пьезодатчиков с пьезокерамическими элементами из модифицированного материала ТНВ-1, показал, что при температурах от минус 196 С до 500°C K_T изменяется в диапазоне от 0,89 до 1, что соответствует требованиям [4].

Коррекция дополнительных температурных погрешностей измерения пьезодатчиков проводится с использованием двух основных групп методов: технологических и схемно-технических. К технологическим методам относятся, в частности, выбор материала для изготовления чувствительных элементов и технологических режимов его обработки.

Поскольку к пьезодатчикам предъявляется комплекс требований, включающих в себя высокую точность и стабильность метрологических характеристик в широком температурном диапазоне, современные пьезокерамические материалы не могут удовлетворить этим требованиям в полном объеме. Вторая группа методов позволяет корректировать погрешности измерения от действия влияющих величин путем введения в измерительную цепь активных и пассивных корректирующих электрорадиоэлементов [6]. Развитие современной электроники позволяет минимизировать массу и габариты корректирующих элементов и размещать их в непосредственной близости от пьезоэлемента пьезодатчика, что при необходимости компенсации температурной погрешности измерения обеспечивает выполнение условия равенства температурного воздействия на пьезоэлемент и элементы компенсирующей схемы. Кроме того, развитие цифровой микропроцессорной техники позволяет производить коррекцию выходного сигнала датчика непосредственно в цифровой форме с выполнением сложных и громоздких математических операций в режиме реального времени.

Развитие современной электроники и схемотехники позволяет также реализовывать измерение нескольких параметров пьезодатчика одновременно, используя результаты измерения дополнительных параметров, в частности для коррекции температурной погрешности измерения.

Для снижения изменения K_T до значения соответствующего пьезодатчику с пьезоэлементами из лангата (не более 5 %) использован схемно-технический способ измерения температуры: на пьезоэлемент с генератора постоянного синусоидального тока подаётся токовый сигнал стабильной амплитуды и частоты, значение которой превышает максимальное значение диапазона измеряемого быстропеременного давления. Зависимость падения амплитуды напряжения токового сигнала на комплексном сопротивлении пьезосборки от температуры используется для измерения её температуры [5], при этом применяется следующая методика вычисления измеренного значения динамического давления:

1) при максимальном значении измеряемого быстропеременного давления для восьми значений температуры рабочей среды (минус 196; минус 100; 25 ± 10 ; 100; 200; 300; 400; 500 °C), для каждого из семи полученных температурных поддиапазонов рассчитываются значения коэффициентов термочувствительности K_{Ti} :

$$K_{Ti} = 1 + \frac{U_{Ti \max} - U_{Ti \min}}{U_{Ti \max}}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер температурного поддиапазона;

$U_{Ti \max}, U_{Ti \min}$ – значения выходного сигнала об измеряемом быстро-переменном давлении при максимальном и минимальном значениях температуры рабочей среды;

2) значения K_{Ti} и K_{Π} , определённые при изготовлении пьезодатчика, нормируются, преобразуются в цифровой код и заносятся в энергонезависимую память микроконтроллера вторичного преобразователя.

При эксплуатации скорректированное значение выходного сигнала пьезодатчика об измеряемом быстропеременном давлении, например, значение выходного напряжения $U_{\Delta P}^{CK}$ вычисляется по формуле (2), причем значения K_{Ti} выбираются в соответствии с измеренной с использованием температурной зависимости электрической ёмкости температурой пьезоэлементов:

$$U_{\Delta P}^{CK} = K_{\Pi} \cdot K_{Ti} \cdot \Delta P. \quad (2)$$

Выводы. Подтверждена возможность замены материала пьезоэлементов пьезодатчика с лангасита на модифицированный ТНВ-1. Разработана методика снижения температурной погрешности измерения пьезодатчика на основе схемно-технического способа путем вычисления с использованием измеренных значений температуры пьезоэлементов измеренного значения динамического давления.

Литература. 1. Пьезоэлементы для датчиков // ОАО «Фомос-Материалс». Пьезоэлектрические материалы и приборы [Официальный сайт]. РФ, 2019. URL: <http://www.newpiezo.com/ru/sensors.html> (дата обращения: 25.04.2019). 2. Богущ, М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 3 / Богущ М.В. // Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ, 2006. 346 с. 3. Датчики. Преобразователи. Системы. Каталог АО «НИИФИ» // Пенза: «Пензенская правда», 2011. – С. 70-98. 4. ОСТ 92-4890-83. Преобразователи измерительные первичные быстропеременных давлений. Отраслевой стандарт. Общие технические условия // Введён с 01.01.1985. 68 с. 5. Патент RU 2 568 948 C1. МПК G01L 9/00 (2006.01). G01L 11/00 (2006.01). Приоритет: 05.08.2014. Опубл. 20.11.2015. Бюл. 32. Устройство измерения динамического давления / Дмитриенко А.Г., Блинов А.В., Маланин В.П., Кикот В.В. 6. Датчики давления. Проектирование полупроводниковых чувствительных элементов : учеб. пособие / И. Н. Баринов, С. И. Торгашин, Б. В. Цыпин, В. С. Волков. – Пенза : Издательство ПГУ, 2016. – 105 с.

Реквизиты для справок. Россия, 440026, Пенза, ул. Володарского, 8/10, АО «НИИФИ», тел. (8412)59-19-42, e-mail: piezo@nii.fi.ru.