

УДК 620.178.6 : 621.565.9

**И. Н. Николенко, В. А. Мазур**✉

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

✉ e-mail: victor.mazur@gmail.com

## ЭЛЕКТРОННЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

*Проведен анализ отечественных и зарубежных электронных датчиков высокой точности, которые разработаны для измерения деформаций механических деталей в различных областях техники. Но они обеспечивают измерения деформаций с высокой точностью только в узком интервале температур (от +18°C до +22°C), как внешних возмущений. В связи с этим ставится научная задача по разработке электронного датчика, который позволяет с высокой точностью измерять деформации в широком интервале температур (от -10°C до +80°C). Такой датчик разработан на основе преобразователя деформации в частоту прямоугольных импульсов для применения в холодильной технике. Преобразователь обеспечивает непрерывный бесконтактный съём сигнала о деформации и представляет собой замкнутую систему автогенераторного типа, выполненную на базе интегральных микросхем.*

**Ключевые слова:** Датчик – Преобразователь – Система автогенераторного типа – Измерение деформации – Высокая точность.

**І. М. Ніколенко, В. О. Мазур**

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

## ЕЛЕКТРОНИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ДЕТАЛЕЙ У ШИРОКОМУ ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР

*Проведений аналіз вітчизняних і зарубіжних електронних датчиків високої точності, які розроблені для вимірювання деформацій механічних деталей в різних областях техніки. Але вони забезпечують вимірювання деформацій з високою точністю тільки у вузькому інтервалі температур (від +18°C до +22°C), як зовнішніх збурень. У зв'язку з цим ставиться наукова задача з розробки електронного датчика, який дозволяє з високою точністю вимірювати деформації у широкому інтервалі температур (від -10°C до +80°C). Такий датчик розроблено на базі перетворювача деформації у частоту прямокутних імпульсів для застосування у холодильній техніці. Перетворювач забезпечує безперервне безконтактне знімання сигналу про деформацію і є замкнутою системою автогенераторного типу, що виконана на основі інтегральних мікросхем.*

**Ключові слова:** Датчик – Перетворювач – Система автогенераторного типу – Вимірювання деформації – Висока точність.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

### І. ВВЕДЕНИЕ

При организации прочностных исследований продольной модификации перемещающихся, вращающихся, работающих на изгиб (сжатие) участков механических деталей разных форм, например, прямозубых, косозубых, шевронных колес, роторов турбин и т.п. возникает задача съёма сигнала об их деформации (напряженности).

Постоянные влияния внутренних и (или) внешних возмущающих воздействий, например, в виде изменения внутренних и (или) внешних температур, брызг масла, вибраций на исследуемую механическую деталь исключают использование механических и электрических методов съёма сигнала о вели-

чине деформации механической детали с высокой точностью.

В последнее время ведётся интенсивная разработка устройств (датчиков) для бесконтактного съёма сигнала (информации) о напряженности вращающихся механических деталей с высокой точностью. Основным элементом электронных датчиков, обеспечивающим первоначальный съём аналогового сигнала о деформации с участка механической детали, в виде изменяющегося электрического напряжения или магнитной проницаемости, выступают соответственно – проволочные тензорезисторы или индуктивности. Но амплитуды этих сигналов очень малы и требуют дальнейшего усиления, преобразования в код-импульсный, время-импульсный или частотный сиг-

нал [6] с дальнейшей предварительной обработкой и кодированием их при передаче по радиоканалу [2]. Последние операции с сигналами необходимы, так как радиоканал может быть подвержен различным помехам. Ограниченность энергетических ресурсов питания электронного датчика (устройство, система), расположенного на вращающийся механической детали и ряд конструктивных соображений (в частности ограниченность места расположения датчика на (в) механической детали) затрудняет размещение аналого-цифровых преобразователей на (в) вращающихся деталях.

Наиболее приемлемыми для этих целей выступают преобразователи аналоговой величины во время-импульсный или частотный выходной сигнал [5], что объясняется достаточно высокой точностью и линейностью выходной характеристики (форма выходного сигнала), помехоустойчивостью, большей, чем при других методах преобразования, сравнительно небольшим объёмом датчика. При этом можно конструктивно выполнить преобразователь в виде двух частей, одна из которых располагается на передающей стороне (на вращающийся детали), а вторая – на приёмной (вне детали). Этот метод обеспечивает наиболее простое преобразование аналоговых сигналов, поступающих с тензорезисторов в цифровой код [3]. Но известные датчики функционируют с высокой точностью измерения деформаций деталей при влиянии на них внутренних и внешних возмущений – в виде изменяющихся температур, но только в узком интервале от  $+15^{\circ}\text{C}$  до  $+24^{\circ}\text{C}$ .

Однако, несмотря на модернизацию устаревших и созданию новых электронных средств (датчиков) для измерения деформаций механических деталей, в связи с жесточайшими требованиями к повышению точности этих устройств при воздействии на них внутренних и внешних температур в интервале от "минус"  $40^{\circ}\text{C}$  до "плюс"  $100^{\circ}\text{C}$  требуют поиска новых методов и научных подходов для решения такой задачи.

## II. ОДИН ИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Измерение деформаций участков механических деталей машин осуществляется, с учётом механических, электрических и электронных способов, механическими, электрическими и электронными устройствами (датчиками). К данным устройствам постоянно предъявляются жесткие требования к повышению (улучшению) их метрологических характеристик. Первые два вида устройств не позволяют выполнять измерение деформаций на участках движущихся, например, вращающихся, изгибающихся и т.п. механических деталях с высокой точностью. Третий вид устройств позволяют выполнять эти измерения с высокой точностью при влиянии на детали и датчики внутренних и внешних возмущающих воздействий в виде меняющихся температур, но только в узком их интервале от  $+18^{\circ}\text{C}$  до  $+24^{\circ}\text{C}$ .

В связи с этим, в статье рассматривается один из электронных способов улучшения метрологических характеристик, (точности) электронных датчиков предназначенных для измерения деформаций с вращающихся механических деталей машин и (или) механизмов при влиянии на них сильных возмущений в виде изменения температур в широком интервале от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ .

На рисунке 1 приведена принципиальная схема разработанного электронного частотного датчика высокой точности для измерения деформаций участков вращающихся и работающих на изгиб механических деталей в широком интервале температур. Датчик выполнен на основе разработанного преобразователя, который обеспечивает съём сигнала о деформации в виде напряжения с помощью тензорезистора с дальнейшим его усилением и преобразованием в частоту симметричных прямоугольных импульсов на выходе датчика. Преобразователь представляет собой замкнутую систему автогенераторного типа. Датчик может крепиться на какой-либо поверхности вращающейся механической детали или в углублении большого зубчатого колеса. Датчик имеет высокие метрологические характеристики выходного сигнала и обеспечивает непрерывный бесконтактный съём сигнала о деформации с участка движущейся, вращающейся или работающей на изгиб механической детали машины.

В состав схемы датчика входят следующие электронные блоки: измерительный тензомост (состоит из прецизионных проволочных резисторов  $R_{10}$  и  $R_{11}$ , которые снижают до минимума величину "суперного шума" и тензорезисторов  $R_6$  и  $R_7$ , причём  $R_6$  значительно компенсирует величину внутренней (или) внешней температуры, а  $R_7$  обеспечивает измерение величины деформации); сложный (точный) дифференциальный усилитель, который содержит эмиттерные повторители выполненные на  $DA1$ ,  $DA2$  и диффузилитель на  $DA3$ ; блок усилителей постоянного тока выполнен на  $DA4$ ,  $DA6$ ; компаратор выполнен на  $DA7$ ; интегратор выполнен на  $DA8$  с двухтактным усилителем мощности на биполярных транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$ ; выходной каскад датчика, в виде эмиттерного повторителя, выполнен на  $DA9$ . Часть блоков тракта преобразования выполнены на микросхемах  $DA4$ ,  $DA6$ ,  $DA7$ ,  $DA8$ , транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$  охвачены внутренней гибкой обратной связью, включающей интегрирующий усилитель с  $DA5$ . Все блоки прямой цепи (канала) датчика: тензомост – интегратор с усилителем мощности охвачены жёсткой обратной связью. Элементы  $DA1 \dots DA9$  – интегральные микросхемы (ИМС): операционные усилители (усилители постоянного тока).

Принцип работы датчика. При отсутствии и при наличии сигнала о деформации, датчик функционирует постоянно в автогенераторном режиме (в первом случае режим генерации обеспечивается за счёт небольшого первоначального разбаланса тензомоста). На выходе датчика постоянно присутствует сигнал в виде разнополярных симметричных прямоугольных импульсов. Съём сигнала о деформации с участка механической детали осуществляется с помощью рабочего тензорезистора  $R_7$ .

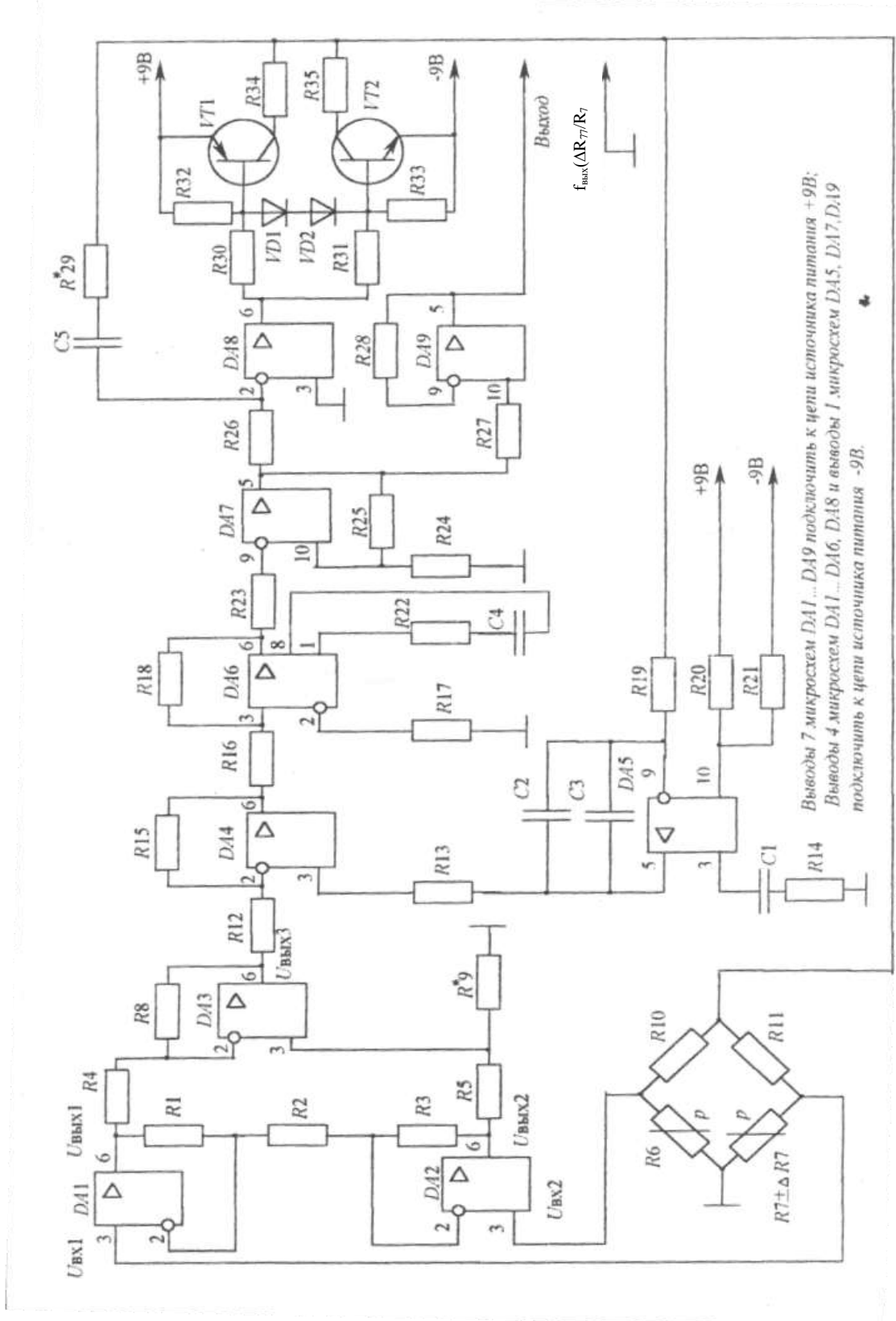


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная частотного датчика высокой точности для измерения деталей машин в широком интервале температур

Тензорезистор  $R_7$  входит в состав тензомоста, последний должен обладать высокой чувствительностью и широким частотным спектром. Математический аппарат, описывающий зависимость величины чувствительности тензомоста от вида его элементной базы, частоты и форм питающих тензомост напряжений при наличии окружающей температуры, описан в литературе [2].

Тензомост запитан электрическим напряжением в виде разнополярного симметричного прямоугольного меандра, которое поступает с выхода жёсткой обратной связи.

Сигнал разбаланса о деформации с выхода тензомоста поступает через сложный дифференциальный усилитель, усилители постоянного тока на инверсный вход компаратора DA7. Сложный дифференциальный усилитель позволяет получить на выходе интегральной микросхемы DA3 разностный (дифференциальный) сигнал и снизить до минимума синфазную помеху (практически наблюдается её отсутствие), которая может присутствовать в составе выходного сигнала тензомоста. Полная ликвидация возмущений (влияние внутренних и внешних температур) обеспечивается за счёт использования операционных усилителей DA4 и DA6 и введения гибкой обратной связи с интегратором DA5. При этом постоянные напряжения "дрейфа нуля" в микросхемах DA4 и DA6 должны быть противоположны по знаку. Гибкая обратная связь дополнительно обеспечивает устойчивую работу датчика при резких колебаниях возмущений.

Величина напряжения порога срабатывания  $U_{п} = +2\text{В}$  на прямом входе компаратора DA7 сравнивается с линейно-изменяющимся напряжением (с учётом его угла  $\alpha$ ) поступающим на его инверсный выход с выхода DA6. При равенстве (момент сравнения) амплитуд этих напряжений происходит переключение полярности напряжения на выходе компаратора DA7 (рисунок 2). Таким образом изменение величины напряжения и его угла  $\alpha$  о деформации с выхода тензомоста определяет частоту (скорость) переключения компаратора DA7, то есть частоту следования выходных импульсов (выходной сигнал:  $f_{\text{вых}} (\Delta R_7 / R_7)$ ) датчика. С выхода DA7 сигнал поступает на инверсный вход интегратора (выполнен на DA8 и VT1 и VT2), а с его выхода по цепи жёсткой обратной связи в цепь питания тензомоста. Подключение к выходу DA8 двухтактного усилителя мощности позволяет повысить и линейность сигнала на выходе интегратора и надёжность работы датчика.

На рисунке 2 приведены осциллограммы сигналов с выходов отдельных блоков датчика.

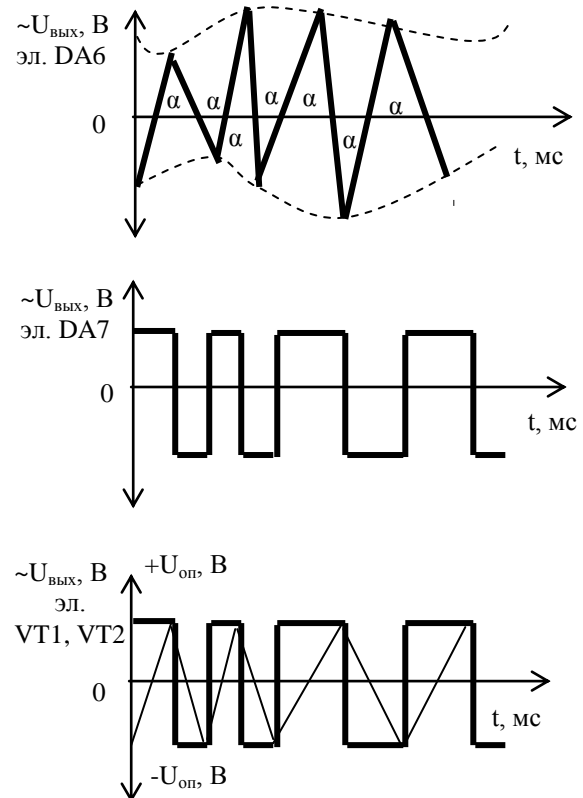
Основные отличительные особенности предложенной схемы разработанного датчика от известной [7]:

- добавлен операционный усилитель DA6 с отрицательным по знаку температурным коэффициентом дрейфа нуля в виде медленно меняющегося постоянного напряжения, вызванного изменением температуры, по отношению к положительным по знаку дрейфам нуля остальных операционных усилителем датчика. Это позволяет частично компенсировать внутренние и внешние влияние температур и под-

держивать среднетемпературный дрейф постоянных напряжений операционных усилителей (микросхем) датчика на заданном уровне;

- в состав интегратора на выход DA8 подключен двухтактный усилитель мощности на биполярных транзисторах VT1 и VT2, который повышает надёжность работы датчика при измерениях деформаций в течении длительного промежутка времени и улучшает линейность формы сигнала на выходе интегратора (датчика);

- для окончательной компенсации суммарного эффекта внутренних небалансов "дрейфа нуля" ИМС DA1...DA4, DA6...DA8, которые возникают при изменении внешних (внутренних) температур в прямом канале датчика введена гибкая отрицательная обратная связь по постоянному току с интегратором DA5. Постоянная времени интегратора DA5 значительно больше, чем интегратора выполненного на DA8 и транзисторах VT1 и VT2, что исключает влияние работы гибкой обратной связи на быстро протекающие рабочие процессы измерения деформаций и позволяет окончательно скомпенсировать "дрейфы нуля" ИМС, а также обеспечивает надёжную работу датчика при наличии длительных по времени внешних возмущений.



**Рисунок 2** – Осциллограммы с выходов отдельных блоков разработанного электронного частотного датчика

Точное начальное значение частоты  $f_0$  выходного сигнала датчика (деформация отсутствует) при заданных значениях величин сопротивлений тензорезисторов  $R_6$ ,  $R_7$  и проволочных резисторов  $R_{10}$ ,  $R_{11}$

тензомоста устанавлюється підбором постійної величини інтегратора, реалізованого на DA8 (удобнее підбор виробить изменением величини резистора  $R_{29}$ ), которая может быть найдена из выражения:

$$\tau_{и} = C_5 R_{26} \quad (1)$$

Расчёт необходимой величины приращений сопро­тивления рабочего тензорезистора  $R_7$  в функции деформации в заданном диапазоне относительных деформаций производится по формуле:

$$\pm \Delta R_7 = R_7 * K * \varepsilon, \quad (2)$$

где  $R_7 = 200$  Ом – величина сопротивления рабочего тензорезистора;

$K = 2,16$  – коэффициент тензочувствительности тензорезистора  $R_7$ ;

$\varepsilon = \pm 10^{-3}$  – величина относительной деформации участка детали.

Подбором величины сопротивления резистора  $R_9$  можно получить практически нулевой коэффициент усиления схемы сложного дифференциального усилителя по отношению к амплитуде синфазной помехи, которая может оказаться на его входах. Коэффициент усиления сложного дифференциального усилителя задаётся одним резистором  $R_2 = \alpha * R$  и вычисляется по формуле [4]:

$$\frac{U_{\text{вых3}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = 1 + \frac{2}{\alpha}, \quad (3)$$

где  $\alpha = (\alpha R) / R, R = R_1 = R_3$ .

В датчике использованы следующие комплектующие изделия (можно применять и аналоги указанных ИМС, диодов, транзисторов): аналоговые интегральные ИМС K140УД6 (DA1, DA2, DA3, DA4, DA8), K140УД1Б (DA5, DA9), K153УД2 (DA6), K140УД2А (DA7); диоды КД503А (VD1, VD2); биполярные транзисторы КТ603А (VT1) и КТ351А (VT2) со статическим коэффициентом усиления  $\beta = 10 \dots 30$ ; конденсаторы  $C_1 = 1000$  пФ,  $C_2 = C_5 = 0,015$  мкФ,  $C_4 = 300$  пФ типа КМ (группа Н10, Н20, Н30, М47), неполярный конденсатор  $C_3 = 20$  мкФ типа К53-21; проволочные тензорезисторы  $R_6, R_7$  величиной по 200 Ом типа 2ФПКН-5-2006 $\pm$ 10% и коэффициентами тензочувствительности  $K=2,16$ ; постоянные проволочные резисторы  $R_{10} = 270$  Ом,  $R_{11} = 269,3$  Ом типов С5-5 или ПТМН с допуском  $\pm 0,2$ ;  $\pm 0,5\%$  (из стандартного ряда необходимо выбрать величины резисторы  $R_{10}, R_{11}$  так, чтобы их разность была  $R_{10} - R_{11} = 0,75 \dots 0,8$  Ом) – они позволяют резко снизить уровень помехи типа "белый шум" в составе сигнала на выходе тензомоста; все остальные постоянные резисторы мощностью 0,125 Вт типа МЛТ или МТ и допуском  $\pm 1\%$   $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = R_8 = R_9 = R_{20} = R_{21} = 20$  кОм,  $R_2 = 1,2$  кОм,  $R_{12} = R_{16} = R_{17} = R_{26} = 10$  кОм,  $R_{13} = R_{19} = R_{27} = R_{28} = 68$  кОм,  $R_{14} = 91$  Ом,  $R_{15} = 33$  кОм,  $R_{18} = R_{25} = 30$  кОм,  $R_{22} = 220$  Ом,  $R_{23} = R_{32} = R_{33} = 2,7$  кОм,  $R_{24} = 5,1$  кОм,  $R_{29} = 120$  Ом,  $R_{30} = R_{31} = 200$  Ом,  $R_{34} = R_{35} = 9,2$  Ом.

Питание ИМС и транзисторов датчика осуществляется от источника постоянного тока с стабилизированным постоянным напряжением на его выходе  $\pm 9$  В и коэффициентом пульсаций  $< 0,05\%$ .

Макет частотного датчика для измерения деформаций деталей машин испытан при воздействии на них внутренних и внешних температур в интервале от "минус" 10<sup>0</sup>С до "плюс" 80<sup>0</sup>С и имеет следующие технические характеристики:

- диапазон измеряемых деформаций на растяжение (сжатие) деталей, относительные единицы деформации (о.е.д.)  $\pm 10^{-3} \dots \pm 10^{-5}$ ;

- начальное значение частоты  $f_0$  выходного сигнала датчика (деформация отсутствует), кГц; 6;

- уровень девиации частоты выходного сигнала  $f_{\text{вых}} = f_0 \pm \Delta f$  датчика, кГц  $\pm 2,8$ ;

- чувствительность датчика о.е.д.  $\pm 10^{-5}$ ;

- динамический диапазон исследуемых процессов, Гц 0...500;

- нестабильность частоты выходного сигнала датчика, % 0,07;

- относительная нестабильность частоты выходного сигнала датчика без применения специальных мер по температурной стабилизации при его непрерывной работе в течении 8 час, % / град 0,05;

- погрешность при измерении величины деформации, % 0,5;

- уровень амплитуды выходного сигнала, В 200;

- потребляемая мощность, мВт 100\*30\*30.

Монтаж датчика с встроенным блоком питания выполнен на 5 платах с двухсторонним печатным монтажом и размерами 25\*25 мм из которых две платы – датчик, а три – прецизионный источник питания постоянного тока. Проволочные тензорезисторы  $R_7$  и  $R_6$  наклеиваются соответственно на подверженную и не подверженную деформациям поверхности детали, используя при этом подложку из папиросной бумаги и бакелитовый клей. При размещении ИМС на платах необходимо учитывать их склонность к самовозбуждению, поэтому входные и выходные цепи этих ИМС необходимо разносить. С целью обеспечения стабильной работы датчика на протяжении, например 12 – 24 час. в его схеме использованы дискретные элементы, обладающие высокой термостабильностью. Платы вставлены в пазы фрезерованного металлического корпуса и разделены металлическими перегородками, последние выполняют роль электродинамических экранов. Всё свободное пространство внутри корпуса заливается эпоксидным клеем, так как датчик может быть подвержен внешним возмущениям и в виде различных вибраций. Входные цепи от тензорезисторов до проволочных резисторов тензомоста должны быть выполнены экранированными проводниками с покрытием в тефлоновой или фторопластовой изоляциях. Датчик помещается в углубление зубчатого колеса, находящегося в составе редуктора с машинным маслом.

Наладку датчика начинают с подборки постоянной времени выходного сигнала датчика [8]. Точное значение величины  $f_0$  обеспечивается подбором резистора  $R_{29}$ , а приближённое значение  $f_0$  обеспечивает

ся разбросом на 0,2...0,7 Ом величин тензорезисторов и (или) проволочных резисторов в составе тензомоста. Операции при наладке и тарировке датчика выполняют при подключении его цепей питания к прецизионному стабилизированному источнику постоянного тока. В цепях питания "минус" – "корпус" – "плюс" от источника до датчика могут быть включены С – фильтры, состоящие из двух пар параллельно включенных емкостей по 0,1 и 100 мкФ типа К53-21.

Процесс снижения до минимума синфазной помехи на выходе дифференциального усилителя DA3 осуществляют выполнением следующих операций. Выводы резисторов R<sub>4</sub> и R<sub>5</sub> отключают от выходов ИМС DA1 и DA2, затем их объединяют и подают на них синусоидальный сигнал амплитудой 0,3...1 В и частотой 6...10 кГц от внешнего генератора. С поверхности резистора R<sub>9</sub>, снимают часть углеродного слоя, с помощью малогабаритного напильника (надфиля), и добиваются минимальной (практически нулевой) величины (амплитуды) синфазной помехи на выходе DA3.

Проведение тарировки датчика выполняется следующим образом (при наличии возмущающих воздействий, внутренних и (или) внешних температур в заданном интервале):

- по формуле (2) рассчитывают величину приращения  $\pm\Delta R_7$  сопротивления рабочего тензорезистора R<sub>7</sub>, как функции величины деформации исследуемой детали. Например, если при t=20<sup>0</sup>С, R<sub>7</sub>=200 Ом; K=2,16;  $\varepsilon_{\max} = \pm 10^{-3}$  о.е.д., то  $\pm\Delta R_{7\max} = 0,416$  Ом; при  $\varepsilon_{\min} = \pm 0$  о.е.д., то  $\pm\Delta R_{7\min} = 0$  Ом;

- изменяют величину рабочего тензорезистора R<sub>7</sub> с точностью (с шагом дискретизации) до 0,01 Ом, заменив его магазином сопротивлений (используйте мест сопротивлений, например, МСР – 63), который включают в состав тензомоста вместо R<sub>7</sub>;

- увеличивают (уменьшают) начальную величину сопротивления магазина с выбранным шагом дискретизации до максимальной величины  $\pm\Delta R_{7\max}$  и снимают с помощью частотомера типа ЧЗ-34 показания частоты выходного сигнала датчика f<sub>вых</sub> ( $\Delta R_7 / R_7$ );

При проведении экспериментальных исследований по тарировке датчика в лабораторных условиях рабочий тензорезистор R<sub>7</sub> можно наклеить на тарировочную металлическую балочку равного сопротивления изгибу (рис. 3).

Металлическая балочка выполнена из стали СТЗХ18 с высоким пределом пропорциональности  $\sigma_b = 200$  МПа. Для обеспечения прочности по отношению к касательным напряжениям и наименьшая ширина балочки была определена из условия [1]:

$$b_{\min} = \frac{3P}{2h[\tau]}, [\tau] = \frac{[\sigma]}{2}, \quad (4)$$

где  $[\tau]$  – допускаемое касательное напряжение;

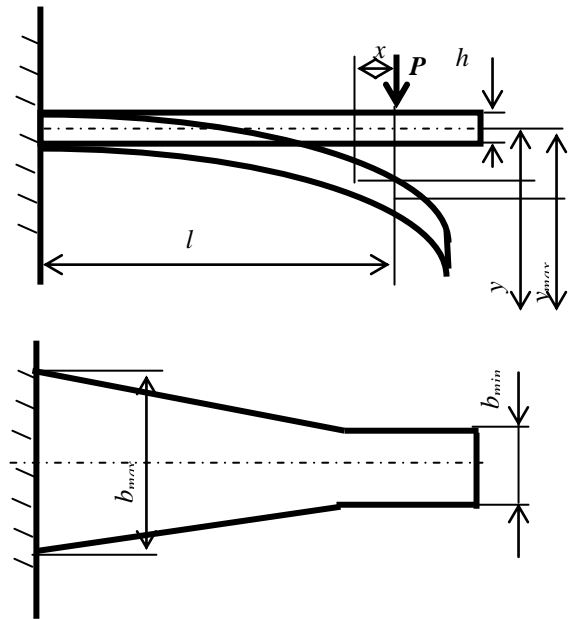
$[\sigma]$  – допускаемое нормальное напряжение.

Приложение механической силы P даёт на рабочих поверхностях балочки постоянную относитель-

ную деформацию  $\varepsilon_x$ , определяемую по формуле (выражению) [8]:

$$\varepsilon_x = \frac{6Pl}{Eb_0h^2}, \quad (5)$$

где E = 2\*10<sup>5</sup> МПа – модуль продольной упругости.



**Рисунок 3** – Тарировочная металлическая балочка для замера относительных величин деформаций с рабочего тензорезистора R<sub>7</sub> (h=1,2 мм; l=70 мм; b<sub>min</sub> = 5 мм; b<sub>max</sub> = 24 мм)

Дифференциальное уравнение изогнутой оси, при определении прогибов для балочек с переменным сечением, имеет вид [1]:

$$E \cdot J(x) \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x), \quad (6)$$

где J(x) – переменный момент инерции сечений балочки;

M(x) – изгибающий момент.

$$J(x) = J \frac{x}{l} = \frac{b_0 h^3}{12} \cdot \frac{x}{l}. \quad (7)$$

Решение уравнения формулы (6) имеет вид:

$$Y = -\frac{Pl^3}{2EJ} \left[ 1 - 2\frac{x}{l} + \frac{x^2}{l^2} \right]. \quad (8)$$

Наибольший прогиб определяется при X=0:

$$Y_{\max} = \frac{Pl^3}{2EJ}, \quad (9)$$

$$P = \frac{2EJ}{l^3} \cdot Y_{\max}. \quad (10)$$

Подставляя выражение (10) в выражение (5) получим уравнение связи величины прогиба балочки в точке X=0 с относительной деформацией  $\varepsilon_x$ :

$$\varepsilon_x = \frac{h}{l^2} \cdot Y_{\max}. \quad (11)$$

Для создания деформации в заданных пределах ( $10^{-5} \dots 10^{-3}$  о.е.д.) необходимо, согласно формулы (10), изменить  $Y$  от 0,04 мм до 4 мм.

Справедливость закона Гука в этих пределах легко проверить, исходя из:  $\sigma = E \cdot \varepsilon \ll [\sigma]$  с учётом выражения (11) получаем  $\sigma = E \cdot 2,448 \cdot 10^{-4} \cdot Y_{\max} = 195,8$  МПа < 200 МПа.

Для определения  $b_{\min}$  в формуле (4) воспользуемся полученным уравнением связи  $P$  с  $Y_{\max}$  из формулы (10), тогда:

$$b_{\min, \text{расч.}} = \frac{3P}{2h[\tau]} = \frac{b_0 h}{2l} \quad (12)$$

При выбранных геометрических размерах балочки:  $b_0, h, l$  получим:

$$b_{\min, \text{расч.}} = 0,2 \text{ мм.}$$

Исходя из практических (конструктивных) соображений выберем  $b_{\min} = 5$  мм.

Между изменением величины сопротивления рабочего тензорезистора  $R_7$ , и деформации, которая вызвала его, существует простая зависимость [1]:

$$\frac{\Delta R_7}{R_7} = K \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

где  $K = 2,16$  – коэффициент тензочувствительности тензорезистора  $R_7$  типа 2ФКПА – 5 – 200 б;

$\varepsilon$  – относительная деформация.

Определим пределы изменения  $\Delta R_7$  для тензорезистора  $R_7$  при  $\varepsilon = 10^{-5} \dots 10^{-3}$  о.е.д. :

$$\Delta R_{7\min} = 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad \Delta R_{7\max} = 4,32 \cdot 10^{-1} \text{ Ом.}$$

В измерительной диагонали моста при величине сопротивления  $R_0 = \infty$  (не показано) и при  $R_n = 0$  (величина выходного сопротивления источника питания – не показано) напряжение на измерительной диагонали моста может быть найдено из выражения

$$u_0 = u_n \frac{R_{10} \cdot R_7 - R_6 \cdot R_{11}}{(R_6 + R_{10})(R_7 + R_{11})} \quad (14)$$

Под влиянием температуры изменяются величины сопротивлений  $R_6, R_7, R_{10}, R_{11}$  в плечах моста. Если величины данных резисторов и тензорезисторов равны, то действие температуры на них влияет примерно одинаково в составе моста. Тогда в общем случае при  $R_7 = R + \Delta R_m$  и  $R_6 = R_{10} = R_{11} = R + \Delta R_m$  получаем величину  $u_0$ :

**Таблица 2** – Зависимость изменения величины сопротивления рабочего тензорезистора  $R_7$  от изменения величины деформации балочки, работающей на растяжение при внешних температурах  $\theta$ : "-" 10°C, "+" 25°C "+" 75°C.

Положительная деформация балочки (удлинение)				
Величина изгиба балочки $Y, \text{ мм}$	Относительное удлинение балочки $+\varepsilon \cdot 10^{-3}, \text{ о.е.д.}$	Изменение величины сопротивления рабочего тензорезистора (при воздействии внешних температур $\theta$ : -10°C, +25°, +75°) $R_7, \text{ Ом}$		
		при $\theta = -10^\circ\text{C}$	при $\theta = +25^\circ\text{C}$	при $\theta = +75^\circ\text{C}$
0	0	204,63	204,65	204,65
0,35	0,0857	204,65	204,68	204,68
0,80	0,196	204,68	204,71	204,73
1,75	0,428	204,71	204,78	204,89
2,85	0,698	204,76	204,84	204,94
3,95	0,967	204,80	204,91	205,05

$$u_0 = u_n \frac{(R + \Delta R + \Delta R_T)(R + \Delta R_T) - (R + \Delta R_T)^2}{2 \cdot (R + \Delta R_T)(2R + 2\Delta R_T + \Delta R)} = \frac{u_n \frac{\Delta R}{R}}{4 \cdot (1 + \frac{\Delta R_T}{R} + \frac{\Delta R}{2R})} \quad (15)$$

Для практических расчётов величины  $u_0$  можно использовать приближённую формулу:

$$u_0 = \frac{u_n}{4} \cdot \frac{\Delta R_7}{R_7} = \frac{u_n}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \quad (16)$$

При измерении деформации в пределах  $\varepsilon = 10^{-5} \dots 10^{-3}$  о.е.д. равноплечным мостом ( $R_6 = R_7 = R_{10} = R_{11} = 200$  Ом) напряжение на измерительной диагонали моста при, например,  $u_n = 3$  В будет изменяться в диапазоне:  $u_{0\max} =$  (от  $1,62 \cdot 10^{-5}$  до  $1,62 \cdot 10^{-3}$ ) В.

В таблице 1 приведена зависимость изменения величины деформации (удлинения) балочки в о.е.д. от перемещения её свободного конца (величина  $Y$ ) в миллиметрах (пересчётный коэффициент в о.е.д. в перемещение  $Y$  в составляет  $2,448 \cdot 10^{-4}$  1/мм).

**Таблица 1** – Зависимость изменения величины деформации (удлинения) балочки от величины её изгиба

$\varepsilon \cdot 10^{-3}, \text{ о.е.д.}$	$Y, \text{ мм}$
0	0
0,00979	0,04
0,04896	0,2
0,08568	0,35
0,17136	0,70
0,19584	0,80
0,30600	1,25
0,42840	1,75
0,55080	2,25
0,69768	2,85
0,83232	3,4
0,96696	4

В таблицах 2 и 3 приведены зависимости изменения величины сопротивления рабочего тензорезистора  $R_7$  от изменения величины деформации балочки, которая соответственно работает на растяжение или сжатие при воздействиях внешних температур  $\theta$ : "-" 10°C, "+" 25°C "+" 75°C.

**Таблиця 3** – Зависимость изменения величины сопротивления рабочего тензорезистора  $R_7$  от изменения величины деформации балочки, работающей на сжатие при внешних температурах  $\theta$ : "-10°C, "+25°C "+75°C.

Отрицательная деформация балочки (сжатие)				
Величина изгиба балочки $Y$ , мм	Относительное удлинение балочки $-\varepsilon \cdot 10^{-3}$ , о.е.д.	Изменение величины сопротивления рабочего тензорезистора (при воздействии внешних температур $\theta$ : -10°C, +25°C, +75°C) $R_7$ , Ом		
		при $\theta = -10^\circ\text{C}$	при $\theta = +25^\circ\text{C}$	при $\theta = +75^\circ\text{C}$
0	0	204,65	204,65	204,65
0,70	0,171	204,56	204,59	204,60
1,25	0,306	204,52	204,53	204,56
2,25	0,551	204,44	204,43	204,49
3,40	0,832	204,32	204,31	204,41
3,95	0,967	204,24	204,26	204,36

В табл. 4 и 5, и рис. 4 приведены зависимости изменения величины частоты сигнала на выходе датчика от величины изменения относительной деформации балочки, соответственно работающей на растяжение или сжатие при воздействиях внешних температур  $\theta$ : "-10°C, "+25°C "+75°C.

**Таблиця 4** – Зависимость изменения величины частоты  $f_{\text{вых}}$  сигнала на выходе датчика от изменения величины относительной деформации  $\varepsilon$  балочки, работающей на растяжение при внешних температурах  $\theta$ : "-10°C, "+25°C "+75°C.

Положительная деформация балочки (удлинение)			
Относительное удлинение балочки $+\varepsilon \cdot 10^{-4}$ , о.е.д.	Изменение величины частоты сигнала на выходе датчика при внешних температур $\theta$ : -10°C, +25°C, +75°C) $f_{\text{вых}}$ , Гц		
	при $\theta = -10^\circ\text{C}$	при $\theta = +25^\circ\text{C}$	при $\theta = +75^\circ\text{C}$
0	5985	5985	5990
0,0098	6004	5996	5988
0,0857	6231	6213	6193
0,1961	6472	6460	6447
0,4282	6992	6988	6988
0,6982	7587	7545	7500
0,9671	8172	8105	8024

**Таблиця 5** – Зависимость изменения величины частоты  $f_{\text{вых}}$  сигнала на выходе датчика от изменения величины относительной деформации  $\varepsilon$  балочки, работающей на сжатие при внешних температурах  $\theta$ : "-10°C, "+25°C "+75°C.

Отрицательная деформация балочки (сжатие)			
Относительное удлинение балочки $-\varepsilon \cdot 10^{-4}$ , о.е.д.	Изменение величины частоты сигнала на выходе датчика при внешних температур $\theta$ : -10°C, +25°C, +75°C) $f_{\text{вых}}$ , Гц		
	при $\theta = -10^\circ\text{C}$	при $\theta = +25^\circ\text{C}$	при $\theta = +75^\circ\text{C}$
0	5985	5985	5990
0,0098	5980	5974	5982
0,0171	5594	5587	5576
0,3062	5281	5277	5267
0,5512	4685	4665	4630
0,8321	3920	3813	3790
0,9675	3310	3275	3225

## ВЫВОДЫ

1. Разработан макет электронного частотного датчика высокой точности для измерения деформаций механических деталей в широком интервале температур.

2. При измерении относительной деформации детали в пределах  $10^{-5} \dots 10^{-3}$  о.е.д. начальная частота выходного сигнала датчика  $f_0 = 6$  кГц изменяется в пределах  $\pm 2,5$  кГц ( $f_{\text{вых}} = 6 \pm 2,5$ ) кГц.

3. Погрешность (с учётом нелинейности) при измерении постоянной деформации в статическом режиме (изгиб, кручение, удар, растяжение, сжатие) не превышает  $\pm 0,5\%$ , при воздействии на деталь и датчик внешних температур в интервале "минус" 10°C до "плюс" 80°C.

4. Небольшие размеры датчика позволяют крепить его непосредственно на (в) детали.

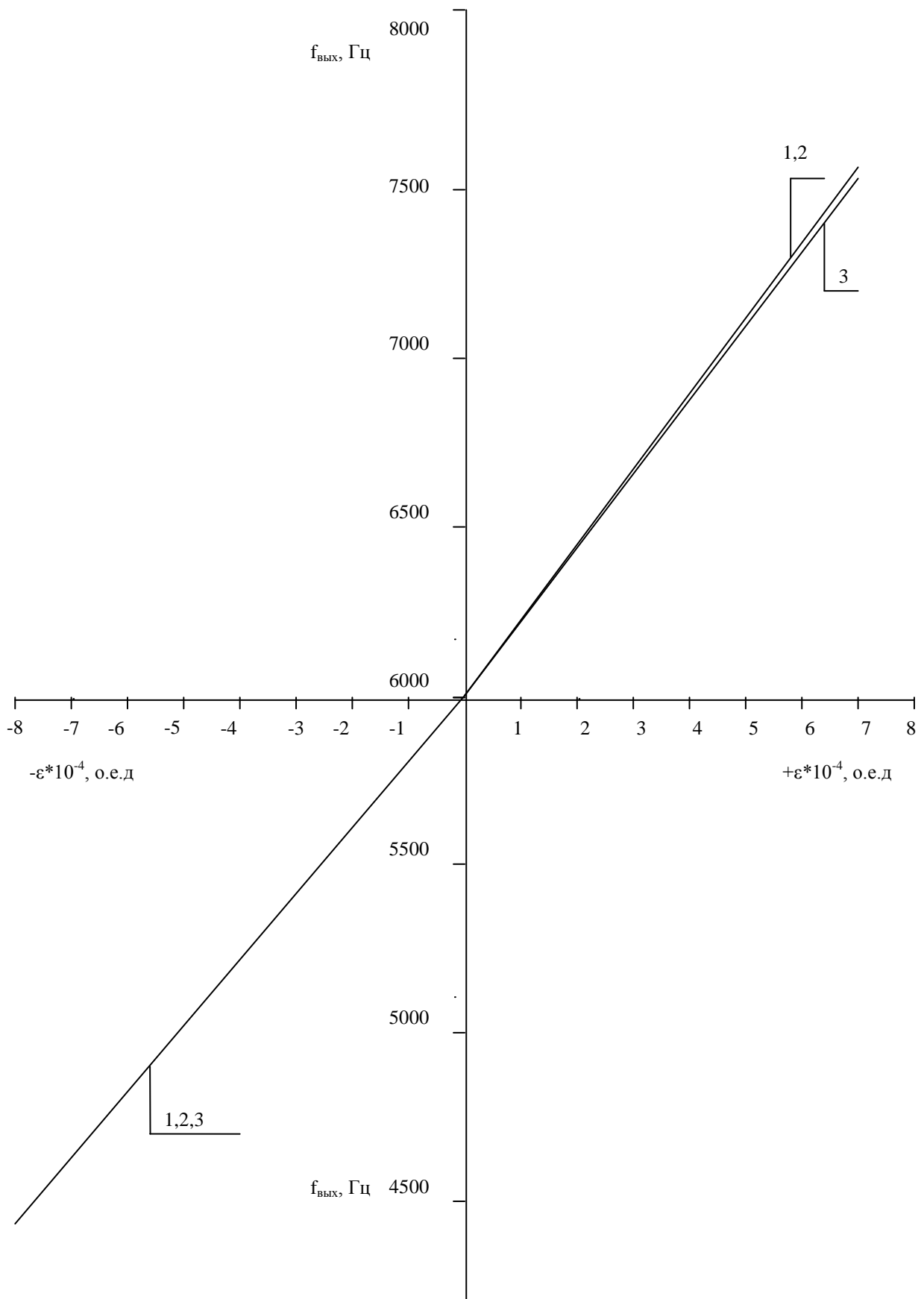
5. Использование предложенного датчика в области холодильной техники позволит повысить надёжность работоспособности деталей машин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляев Н. М.** Сопротивление материалов: Учеб. пособие для вузов / Н. М. Беляев. – 15-е изд., перераб. – М.: Наука, 1976. – 607с.
2. **Груздев С. В., Прошин Е. М.** Импульсная тензометрия / С. В. Груздев, Е. М. Прошин. – М.: Энергия, 1976. – 89с. (Б-ка по автоматике: Вып. 576).
3. **Касаткин А. С.** Автоматическая обработка сигналов частотных датчиков / А. С. Касаткин. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 120 с. (Б-ка по автоматике: вып. 171).
4. **Кофлин Р., Дрисколл Ф.** Операционные усилители и интегральные схемы / Р. Кофлин, Ф. Дрисколл. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
5. **Махнанов В. Д., Милохин Н. Т.** Устройства частотного и время-импульсного преобразования / В. Д. Махнанов, Н. Т. Милохин. – М.: Энергия, 1970. – 129с. (Б-ка по автоматике: Вып. 378).
6. **Meyer-Ebrecht Dictrich, Bethe Klans, Hoefert Reimar, Lemmrich Jurgen.** Signale frequenzanalog dargestellt // Elektronik 1976, № 6, p. 36-41.
7. **Николенко И. Н.** Частотный датчик для измерения деформаций деталей машин // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2001. – Вып. 2 (14). – С. 44-48.
8. Эспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справ. пособие / Б. С. Косаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. – Киев: Наук. думка, 1981. – 584 с.

Отримана в редакції 09.09.2016, прийнята до друку 01.11.2016





**Рисунок 4** – Зависимость изменения величины частоты  $f_{\text{ВЫХ}}$  сигнала на выходе датчика от изменения величины относительной деформации  $\epsilon$  балочки при внешних температурах  $\theta$  окружающей среды: 1, 2 при  $\theta = -10^{\circ}\text{C} \dots +25^{\circ}\text{C}$ ; 3 – при  $\theta = +75^{\circ}\text{C}$

*I. N. Nikolenko, V. A. Masur*

Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatnaia str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: victor.mazur@gmail.com

## THE ELECTRONIC SENSOR FOR DETAILS DEFORMATIONS MEASUREMENT IN THE WIDE INTERVAL OF TEMPERATURES

*The analysis of domestic and foreign electronic sensors of high accuracy which are developed for mechanical details deformations measurement in different fields of technique is carried out. But they provide deformations measurements with high accuracy only in a narrow interval of temperatures (from  $+18^{\circ}\text{C}$  to  $+22^{\circ}\text{C}$ ) as external perturbations. In this regard the scientific task of electronic sensor development which allows to measure with high accuracy deformations in a wide interval of temperatures (from  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $+80^{\circ}\text{C}$ ) is defined. Such sensor is developed on the basis of the deformation transformer in the frequency of square pulses for application in refrigeration technique. The transformer provides the continuous noncontact removing of deformation signal and represents the closed system of auto generator type executed on the integrated microcircuits basis. The operational amplifier with the negative "drift of zero" of constant voltage and flexible back coupling is set sequentially in direct channel of the sensor circuit for the purpose of support of its steady functioning. The auto generator operation mode of the sensor (deformation can be absent) is provided at the expense of a small initial imbalance of the tensometric bridge which is located at the beginning of the direct channel of the sensor circuit enveloped by tight back coupling. Removing of deformation signal is provided due to change of tensoresistor which is pasted on a deformable part of a detail value and is a part of the tensometric bridge. This analog signal amplifies and will be transformed to the frequency which in the form of the symmetric heteropolar square pulses arrives on an output of the sensor and through tight back coupling feeds the tensometric bridge.*

**Key words:** *Sensor; Transformer; System of auto generator type; Deformation measurement; High accuracy*

### REFERENCES

1. **Belyaev N. M.** Soprotivlenie materialov: Ucheb. posobie dlya vtuzov. 15-e izdanie., pererab, M.: Nauka, 1976. - 607 p. (In Russian)
2. **Gruzdev S. V., Proshin E. M.** Impulsnaya tenzometriya, M.: Energiya, 1976. - 89 p. (B-ka po avtomatike: Vyp. 576). (In Russian)
3. **Kasatkin A. S.** Avtomaticheskaya obrabotka signalov chastotnich datchikov. M. - L.: Energiya, 1966. - 120 p (B on automatic equipment: Issue 171). (In Russian)
4. **Koflin R., Driscoll F.** Operationnie usiliteli i integralnie shemi, M.: Mir, 1979. - 512 p. (In Russian)
5. **Makhnanov V. D., Milokhin N. T.** Ustroystva chastotnogo i vremya-impulsnogo preobrasovaniya. M.: Energiya, 1970. - 129 p. (B on automatic equipment: Issue 378). (In Russian)
6. **Meyer-Ebrecht Dietrich, Bethe Klans, Hoefert Reimar, Lemmrich Jurgen.** Signale frequenzanalog dargestellt // Elektronik 1976, № 6, p. 36-41. (In Germany)
7. **Nikolenko I. N.** Chastotniy datchik dlya izmereniya deformatsiy detley mashin. Tr. Odes. politechn. un-t. - Odessa, 2001. - Vip. 2 (14). - P. 44 - 48. (In Russian)
8. **Esperimentalnie metodi issledovaniya deformatsiy i napryazheniy: Sprav. Posobie.** Kiev: Naukova dumka, 1981. - 584 p. (In Russian)

Received 09 September 2016

Approved 01 November 2016

Available in Internet 30 November 2016