

У Т В Е Р Ж Д А Ю

Д.т.н., профессор

«_____» _____ 20 г.

**МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
АКСЕЛЕРОМЕТР
ММА**

***ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К
ТЕХНИЧЕСКОМУ ПРОЕКТУ***

на _____ листах

20 г.

Список авторов пояснительной записки

№	Ф. И. О.	Лаборатория	Должность уч. степень	Раздел записки	Подпись
1.					
2.					
3.					
4.					

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
В в е д е н и е	4
1. Обзор существующих конструкций акселерометров и анализ информационных материалов	8
2. Анализ технико-экономических требований к акселерометру ММА и основные технические решения по созданию этого изделия	22
3. Выбор конструкции проектируемого ММА	23
4. Описание принципа действия ММА	25
5. Расчет основных узлов ММА	39
6. Расчеты точностных характеристик акселерометра ММА, подтверждающие работоспособность конструкции	45
7. Расчет надежности и специальной стойкости конструкции	64
8. Результаты экспериментальных работ	65
З а к л ю ч е н и е	65
Список литературы	66

Введение

В настоящее время микроэлектромеханические структуры широко применяются в навигационных и управляющих системах всех типов транспортных средств: автомобилях, самолетах, вертолетах, космических ЛА, а также на кораблях, подводных лодках и различных боеприпасах: ракетах, торпедах и т.д. Существуют также системы подземной навигации для исследования профиля скважин при буровых работах - гироскопические и магнитные инклинометры, выполненные в виде микроэлектромеханических систем и реализующие инерциальный принцип счисления пути и координат места.

На современном этапе развития конструкций летательных аппаратов, инклинометров и боеприпасов проявилась тенденция микроминиатюризации конструкций отдельных компонентов таких систем, в частности приборов первичной информации - датчиков линейных ускорений (ДЛУ, акселерометров), датчиков угловых скоростей (ДУС, двухстепенных гироскопов) и датчиков угловых координат (трехстепенных гироскопов), при сохранении и дальнейшем увеличении их точности, надежности, временной стабильности и снижении энергопотребления. Причем, если для гироскопических приборов эта тенденция едва прослеживается и имеет поисковый характер, то акселерометры успешно поддаются миниатюризации на протяжении последних 20-и лет как в нашей стране, так и за рубежом. Происходит это в основном благодаря интегральным технологиям, заимствованным из микроэлектроники (фото- и рентгенолитография, изотропное и анизотропное травление, ионная имплантация, эпитаксия и т.д.), а чувствительные элементы (ЧЭ) самих датчиков изготавливаются из кремния или кварца групповым способом. Из зарубежных разработчиков наиболее известны разработчики в области микросистемных приборов навигации в настоящее время являются фирма Analog Devices (Doshier J., США), Scientific Honeyweller (Askc. V.H., США), LITEF GmbH (ФРГ). Перечислим отечественные фирмы, разрабатывающие микросистемные датчики: НИИФИ (г. Пенза), ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА» (г. Арзамас), МИЭТ (г. Зеле-

ноград), ОАО РПКБ (г. Раменское), ФГУП НПЦ (г. Москва) и др. Сервисная электроника датчиков первичной информации увеличивает степень своей интеграции, и на данный момент обозначился переход от гибридных интегральных схем (ГИС) со многими активными и пассивными компонентами на керамической подложке к специальным большим интегральным схемам (спецБИС) на одном кремниевом кристалле, имеющем источник опорного напряжения, генератор для измерительной схемы, фазочувствительный выпрямитель, измерительный усилитель с корректирующим устройством и усилитель мощности.

По принципу действия все акселерометры можно разделить на приборы прямого измерения и компенсационные: чувствительный элемент первых непосредственно передает информацию о входной величине на вторичный преобразователь, и при этом все погрешности измерительного тракта присутствуют в выходном сигнале датчика, а вторые частично или полностью (с интегратором в контуре - астатизм первого порядка) уравнивают измеряемую величину с помощью главной отрицательной обратной связи (ГООС), т.е. реализуют силовую разгрузку ЧЭ с помощью выходного сигнала, подаваемого на элемент компенсации. В последнем случае точность прибора зависит в основном от элемента компенсации - датчика силы или момента обратной связи. Поэтому к их электронному блоку не предъявляют каких либо особых требований. В приборах прямого измерения, напротив, точность зависит от всех узлов, что приводит к усложнению схемотехники таких конструкций. Таким образом, проблема улучшения характеристик (точности, технологичности, массогабаритных показателей) электронных блоков для приборов прямого измерения все еще актуальна.

Несмотря на перекрестную чувствительность, наиболее широко применяемыми ДЛУ в современных навигационных и управляющих системах для всех видов ЛА по-прежнему остаются традиционные маятниковые акселерометры компенсационного типа с камневыми виброопорами или упругим подвесом инерционной массы. Причем последние имеют существенные пре-

имущества, поскольку у них отсутствует порог чувствительности в традиционном понимании, который можно было бы измерить, а минимальное значение измеряемого ускорения определяется моментом превышения выходным сигналом прибора уровня шума сервисной электроники.

В настоящее время, бурно развивается нефтяная отрасль в связи, с чем характерен бурный рост объемов наклонно направленного бурения. Это связано с развитием и широким распространением кустового бурения, когда с одной подготовленной площадки бурят несколько скважин – куст.

Цель бурения состоит в том, чтобы, во-первых, забой скважины достиг проектной точки, во-вторых, был подготовлен ствол такого профиля и такого качества, которые обеспечивали бы нормальную дальнейшую эксплуатацию скважины. Соответственно, существуют и требования как к допустимому отклонению забоя от проектной точки, так и к профилю ствола скважины.

Под задачей инклинометрии понимают контроль за положением в пространстве оси ствола наклонно направленной скважины. В результате проведения инклинометрических измерений и их обработки должны быть получены данные о положении каждой точки ствола скважины в пространстве, например, в виде вертикальных и горизонтальных проекций ствола, об отклонениях фактического профиля от проектного, о положении конечного забоя и о попадании его в круг допуска.

Требования к точности контроля пространственного положения ствола наклонно-направленных скважин постоянно растут. Это однозначно связано с ужесточением требований к соблюдению проектного профиля скважины. На многих месторождениях повторно разбуриваются площади с уплотнением сетки скважин.

Инклинометр – это прибор для определения пространственных координат ствола скважины. Существует большое разнообразие типов таких приборов. Наибольшей точностью обладают приборы, которые производят одновременное измерение угла отклонения ствола скважины от вертикали и азимута в

точке замера с последующим пересчетом этих показаний в пространственные координаты ствола скважины с учетом координат предыдущей точки замера.

Погрешность расчетных значений координат ствола скважины по отношению к истинным зависит от ряда причин: удары; вибрации; вариации напряжения питания, температуры, давления; переменные магнитные и электрические поля; переменные параметры каротажного кабеля. В большинстве случаев, эти погрешности учитываются при измерении параметров скважины.

В связи с тем, что в последнее время наметилась тенденция развития ИД с объединением микромеханических ЧЭ и электрических схем, стала актуальной тема разработки акселерометра интегрального исполнения на основе монокристаллического кремния. Три таких акселерометра, закрепленные вдоль трех взаимно перпендикулярных осей, реализуют измеритель ускорения свободного падения строительных осей инклинометра. По показаниям акселерометров определяют зенитный угол и угла наклона скважины к вертикали места. Расчет узлов акселерометра также имеет прикладное значение в развитии перспективного направления в отрасли интегрального приборостроения.

Целью пояснительной записки является проектирование акселерометра компенсационного типа, рассчитанного на диапазон измерений $\pm 1,7$ g и исследование характеристик его узлов с целью оптимизации их параметров.

Задачами проектирования являются:

- выбор конструкции акселерометра входящих в блок;
- расчет подвижного узла датчика;
- расчет датчика момента обратной связи;
- составление математической модели акселерометра и построение ЛАЧХ, ЛФЧХ, переходной характеристики;
- Анализ точности путем расчета основных составляющих погрешностей;
- Расчет надежности проектируемого акселерометра.

1 Обзор существующих конструкций акселерометров и анализ информационных материалов

Проведенный анализ по возможным областям применения акселерометров – ИНС ЛА большой дальности, ЛА средней и малой дальности, системам управления подвижными объектами, блокам датчиков, инклинометрам, системам виброметрии, диагностики и т. д. показал, что по критерию точности могут быть условно выделены четыре класса, каждый из которых соответствует своим объектам применения.

Первый класс точности – это ИНС ЛА большой дальности, с возможным выделением подклассов систем, отличающихся диапазоном измерения и условиями эксплуатации. Основные требования, предъявляемые к акселерометрам первого класса:

- смещение нуля – $(1 \div 5) \times 10^{-4} \text{ g}$;
- погрешность масштаба – 0,05 %;
- диапазон измерения – до 30 g (10 g – самолетный);
- стоимость - 1500÷10000 долларов США.

Второй класс точности – ИНС ЛА средней дальности, инклинометры, измерительные блоки.

Основные требования, предъявляемые к акселерометрам второго класса:

- смещение нуля - $(1 \div 2) \times 10^{-3} \text{ g}$;
- погрешность масштаба – 0,1÷0,2 %;
- диапазон измерения – до 50 g;
- стоимость – около 1000 долларов США.

Третий класс точности – САУ ЛА, системы стабилизации и телеметрии.

Основные требования, предъявляемые к акселерометрам третьего класса:

- смещение нуля – $(1 \div 2) \times 10^{-2} \text{ g}$;
- погрешность масштаба – 0,5÷1 %;
- диапазон измерения – до 15 g;

- стоимость – 500÷1000 долларов США.

Четвертый класс точности – робототехника, автомобилестроение, медицинская и бытовая техника.

Основные требования, предъявляемые к акселерометрам четвертого класса:

- смещение нуля – $(1 \div 2) \times 10^{-1} \text{ g}$;
- погрешность масштаба – 5÷10 %;
- диапазон измерения – 1 ÷ 10 g;
- стоимость – 5 ÷ 100 долларов США.

Настоящий обзор составлен по ДЛУ первого и второго класса точности. Характеристики рассматриваемых конструкций могут несколько отличаться от приведенных выше, однако приборы таких классов точности должны обладать очень высокой временной стабильностью и повторяемостью метрологических параметров, что является необходимым условием эффективной алгоритмической компенсации их погрешностей с помощью бортовой ЦВМ в реальном масштабе времени.

1.2 Акселерометры Q-Flex фирмы *Sundstrand* (США)

Фирма *Sundstrand Data Control*, входящая в число ведущих производителей акселерометров в США, разработала в начале 80-х годов серию компенсационных маятниковых датчиков линейных ускорений *Q-Flex* (модели: *QA-1000*, *QA-1100*, *QA-1200*, *QA-2000* и т. д.), которые имеют кварцевый ЧЭ (маятник, упругий подвес и основание), емкостный датчик угла и магнитоэлектрический датчик момента обратной связи (ДМОС) (рисунок 1).

Отличительная особенность данного прибора – низкая стоимость при достаточно высоких метрологических характеристиках. Простая и прочная его конструкция может выдержать ударные ускорения до $a_{\text{уд}} = 200 \text{ g}$.

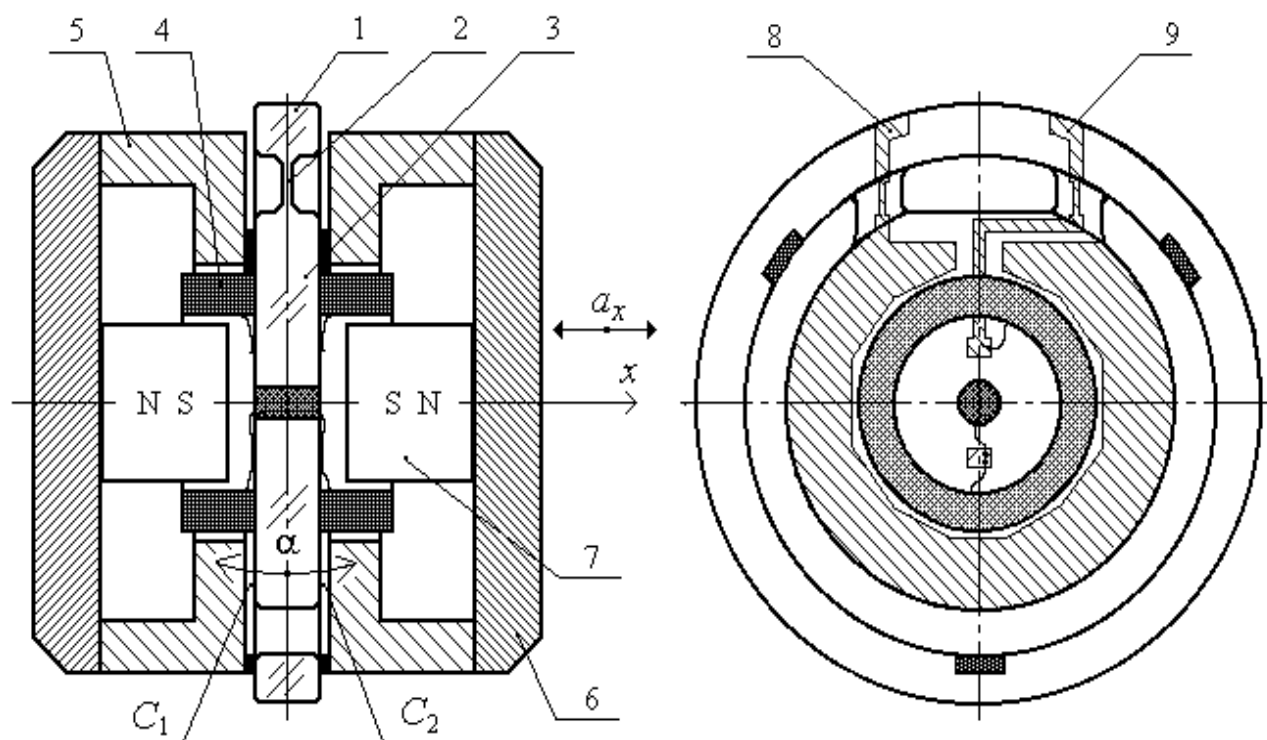


Рисунок 1 - Чувствительный элемент *Q-Flex*: a_x - измеряемое ускорение, 1 - основание подвижного узла; 2 - интегральный упругий подвес; 3 - инерционная масса; 4 - катушка ДМОС; 5, 6 - детали магнитопровода; 7 - постоянный магнит; C_1 - C_2 - дифференциальные измерительные емкости; 8 - контактная площадка датчика угла; 9 - контактная площадка ДМОС

Подвижный узел изготавливается из цельного диска (аморфный плавленый кварц SiO_2) с помощью травления и воздушной шлифовки. Маятник перемещается в двух направлениях на величину начального зазора $d_0 \approx 19$ мкм (до упора). Демпфирование подвижного узла – газодинамическое и контурное (электрическое корректирующее устройство в усилителе обратной связи).

Металлизированные части кварцевой инерционной массы и плоские поверхности магнитных систем из нержавеющей инвариантного сплава с ТКЛР, соизмеримого с ТКЛР плавленого кварца, жестко закрепленные на корпусе, являются обкладками емкостного датчика перемещения, который собран по схеме сбалансированного моста. Непосредственно на узле ЧЭ смонтирован датчик

температуры, что придает возможность эффективной алгоритмической компенсации температурного дрейфа параметров акселерометра.

Встроенный электронный преобразователь (рисунок 2) – в виде ГИС с собственным регулятором напряжения питания $U_{пит} = \pm 13 \div \pm 28$ В постоянно-го тока относительно средней точки. Усилитель имеет изодромное корректирующее устройство $W_{ку}(S) = (\tau_2 S + 1) / (\tau_1 S)$ на операционном усилителе DA1, обладающее на низких частотах свойствами идеального интегратора, устойчивость которого обеспечивается замыканием ГООС. Такой вариант прибора – чисто компенсационного типа с полной силовой (моментной) разгрузкой ЧЭ.

Эти датчики нашли применение в бесплатформенных ИНС с лазерными кольцевыми датчиками угловых скоростей (ДУС ЛГ).

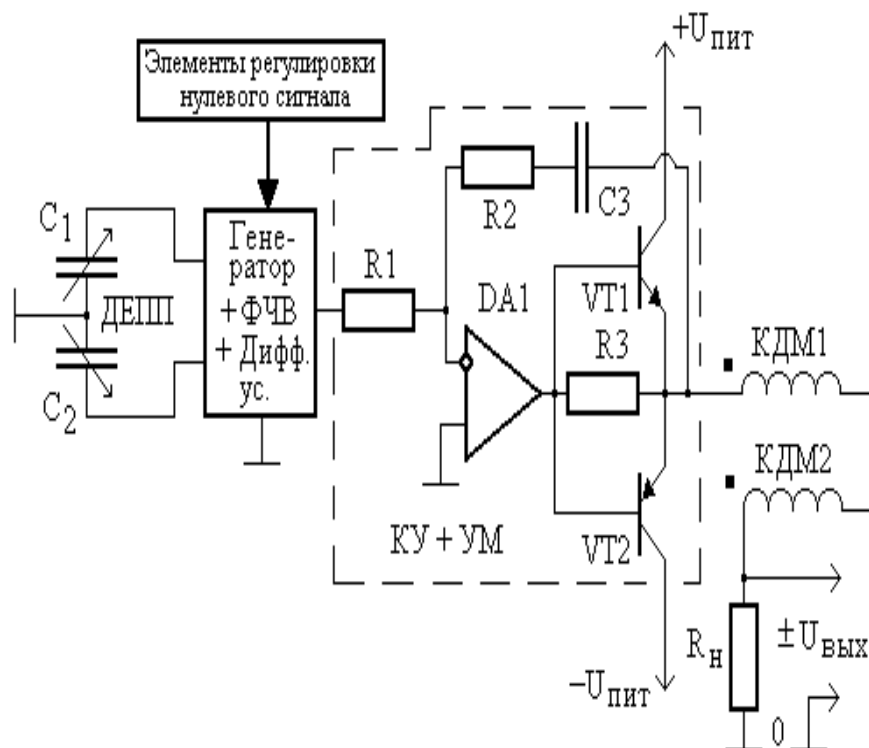


Рисунок 2 - Предположительная функциональная электрическая схема Q-Flex: ДЕПП – дифференциальный емкостный преобразователь перемещения, ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель, КУ – корректирующее устройство, МУ – масштабирующий усилитель, КДМ1-2 – катушки ДМОС, R_n – встроенный (ОА-1000 ОА-1100) или внешний (ОА-2000) резистор

Характеристики акселерометров сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Модель акселерометра		
	QA-650	QA-2000	QA-3000
Диапазон измерения, g	± 30	± 60	± 60
Нулевой сигнал, не более, mg	15	4	4
Комплексная повторяемость нулевого сигнала в течение года, mg	2,5	0,16	0,04
Температурная чувствительность нулевого сигнала, не более, $mg/^\circ C$	0,1	0,03	0,015
Крутизна статической характеристики, mA/g	$1,3 \pm 0,1$	$1,33 \pm 0,13$	$1,33 \pm 0,13$
Комплексная повторяемость крутизны статической характеристики в течение года, не более, mg	2,5	0,31	0,08
Температурная чувствительность крутизны статической характеристики, не более, $mg/^\circ C$	0,2	0,18	0,12
Погрешность базирования, не более, $мрад$	15	2	1
Комплексная повторяемость погрешности базирования в течение года, не более, $мрад$	0,1	0,1	0,07
Собственный шум(среднеквадр. значение), mg , в диапазонах от 0 Гц до 10 Гц от 10 Гц до 500 Гц от 500 Гц до 10000 Гц	0,01	0,007	0,007
	0,1	0,07	0,07
	3	1,5	1,5
Диапазон рабочих температур	от минус 55 до 95	от минус 55 до 95	от минус 28 до 78
Чувствительность/разрешение, μg	1	1	1
Устойчивость к широкополосной случайной вибрации в диапазоне частот, g	25 от 30 до 500 Гц	15 от 20 до 2000 Гц	15 от 20 до 2000 Гц
Ударопрочность, g	200	250	100
Напряжение питания, В	от ± 13 до ± 28	от ± 13 до 28	от ± 13 до 28
Потребляемая мощность, при напряжении питания ± 15 В не более, Вт	0,48	0,48	0,48
Полоса пропускания, не менее, Гц	300	300	300

Масса, не более, г	65	75	75
Габаритные размеры, не более, мм	Ø28,5×21,5	Ø38,1×27,2	Ø38,1×27,2
Стоимость, долл. США	995	3000	17000

Следует, однако, заметить, что по сути, $QA - 3000$ – это выборка по параметрам акселерометров $QA - 2000$.

Недостатки: сложность изготовления ЧЭ, возможная временная нестабильность нулевого сигнала из-за токоведущих дорожек на подвесах инерционной массы, малая полоса пропускания из-за астатизма 1-ого порядка в контуре отработки при наличии изодромного КУ, высокая стоимость, наличие экспортных ограничений.

1.2 Акселерометр ДА-11 фирмы РПКБ (Россия)

В середине 70-х годов Раменское приборостроительное конструкторское бюро разработало высокоточный датчик линейных ускорений ДА-11 для применения в прецизионных ИНС ЛА.

Дифференциальный датчик угла – трансформаторного (индукционного) типа, неподвижные катушки в каркасах установлены непосредственно в симметричные магнитные системы, а подвижные бескаркасные катушки наклеены на маятник. Катушки датчика момента обратной связи имеют алюминиевый каркас и установлены соосно с датчиком угла.

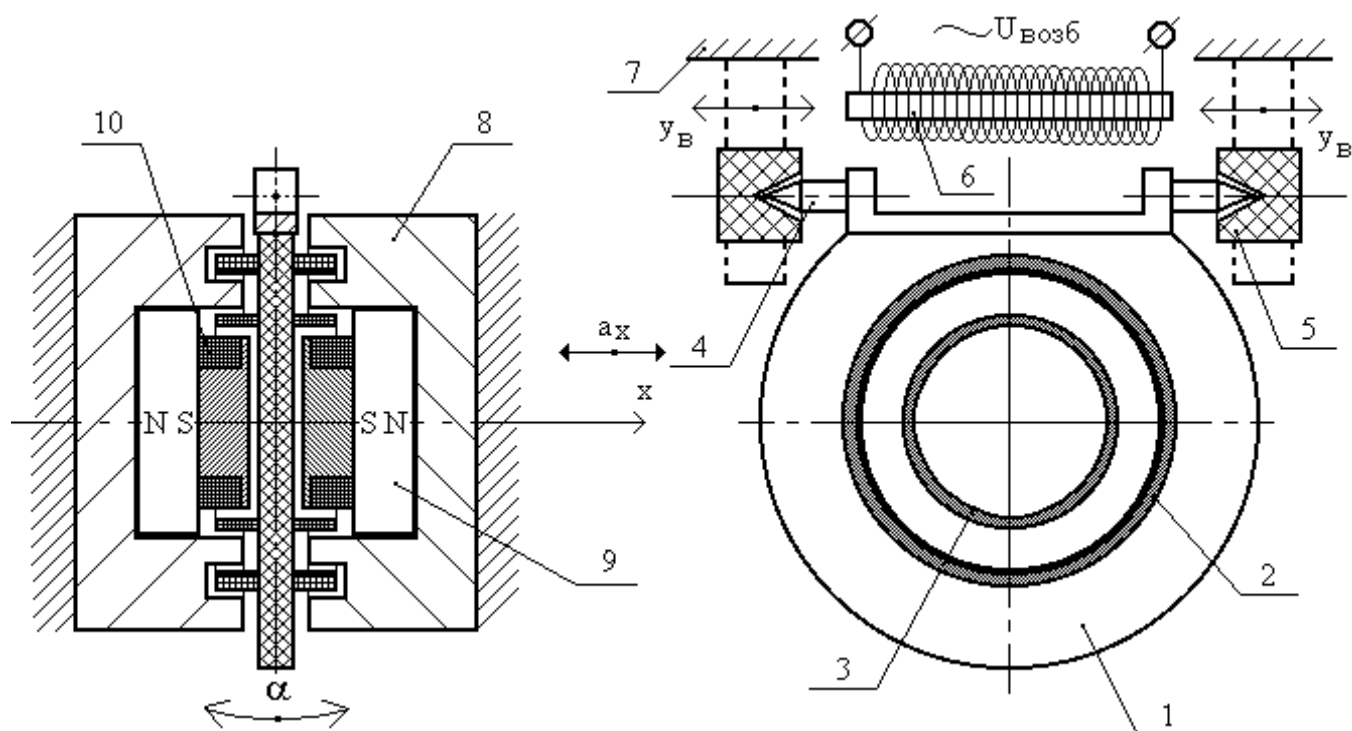


Рисунок 3 - Электрокинематическая схема ДА-11: a_x - измеряемое ускорение, 1 – инерционная масса, 2, 3 – катушка ДМОС и подвижная катушка датчика угла, 4 – кривые оси маятника, 5 – каменные опоры, 6 – электромагнит возбуждения виброопор, 7 – основание, 8 – магнитопровод, 9 – постоянный магнит, 10 – неподвижная катушка датчика угла, y_B - виброперемещение камертона опор.

Магнитные системы имеют вставные стержневые термошунты для стабилизации магнитной индукции в рабочем зазоре ДМОС. Электропитание прибора осуществляется от трех источников: $U_{\text{пит } 1} = 1 \text{ В}$ с частотой $f_1 = 12 \text{ кГц}$, $U_{\text{пит } 2} = 2,5 \text{ В}$ с частотой $f_2 = 19,2 \text{ кГц}$, $U_{\text{пит } 3} = 36 \text{ В}$ с частотой $f_3 = 400 \text{ Гц}$. Прибор выдерживает ударные ускорения $a_{\text{уд}} = 25 \text{ g}$ в количестве $n = 10000$ с длительностью импульса $\tau_{\text{и}} = 25 \text{ мс}$ [6].

Недостатки: низкая надежность из-за применения виброопор, 3 вида электропитания, отсутствие сервисной электроники.

1.3 Семейство акселерометров АК5

Капиллярный датчик линейных ускорений АК5 был разработан и освоен в серийном производстве в ОКБ «Темп» (г. Арзамас) в конце 70-х годов. АК5 имеет выходной сигнал по постоянному току.

Это - прибор компенсационного типа с частичной силовой (моментной) разгрузкой ЧЭ с помощью магнитоэлектрической ГООС, маятниковый ЧЭ - в виде прямоугольной рамки (электрокинематическая схема – на рис. 1.4). Датчик угла – вихретокового типа: флажок из алюминиевой фольги, закрепленный на конце маятника-рамки перемещается между 2-х катушек переменной индуктивности, жестко закрепленных на основании и имеющих общую точку (дифференциальная схема), при изменении расстояния между флажком и катушкой, последняя изменяет свой электрический импеданс. Катушка ДМОС установлена на обечайку, а флажок имеет ребро жесткости. Маятник подвешен на основании с помощью торсионов-растяжек прямоугольного сечения из бериллиевой бронзы типа БрБ2. Торсионы работают на кручение и установлены в капилляры, которые приклеены к катушке ДМОС. В капилляры закачана вязкая кремнийорганическая жидкость полиметилсилоксан (ПМС) для демпфирования вертикальных колебаний подвижного узла. Корпусные детали изготовлены из ковариантного сплава с низким ТКЛР.

Электронный блок акселерометров (ГИС) содержит генератор питания датчика угла, фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), масштабирующий усилитель (МУ), корректирующее устройство (КУ - RC-цепь), низкочастотный фильтр (НЧФ) и усилитель мощности (УМ). АК5 выпускается с 3-мя диапазонами измерения: $\pm 15 \text{ g}$, $\pm 50 \text{ g}$, $\pm 100 \text{ g}$ (соответственно АК5-15, АК5-50, АК5-100) и комплектуется двумя сериями КУ.

Частота напряжения питания датчика угла $f_{\text{ду}} = 3,5 \text{ МГц}$. Общий коэффициент передачи усилителя обратной связи в одном из вариантов $K_{\text{ус}} \approx 20$. Электропитание приборов осуществляется от 1 источника постоянного тока: напряжение $U_{\text{пит}} = \pm 15 \text{ В}$ относительно средней точки. Приборы выдерживают одиночные удары до $a_{\text{уд}} = 80 \text{ g}$ с длительностью импульса $\tau_{\text{и}} = 2 \div 6 \text{ мс}$ [5].

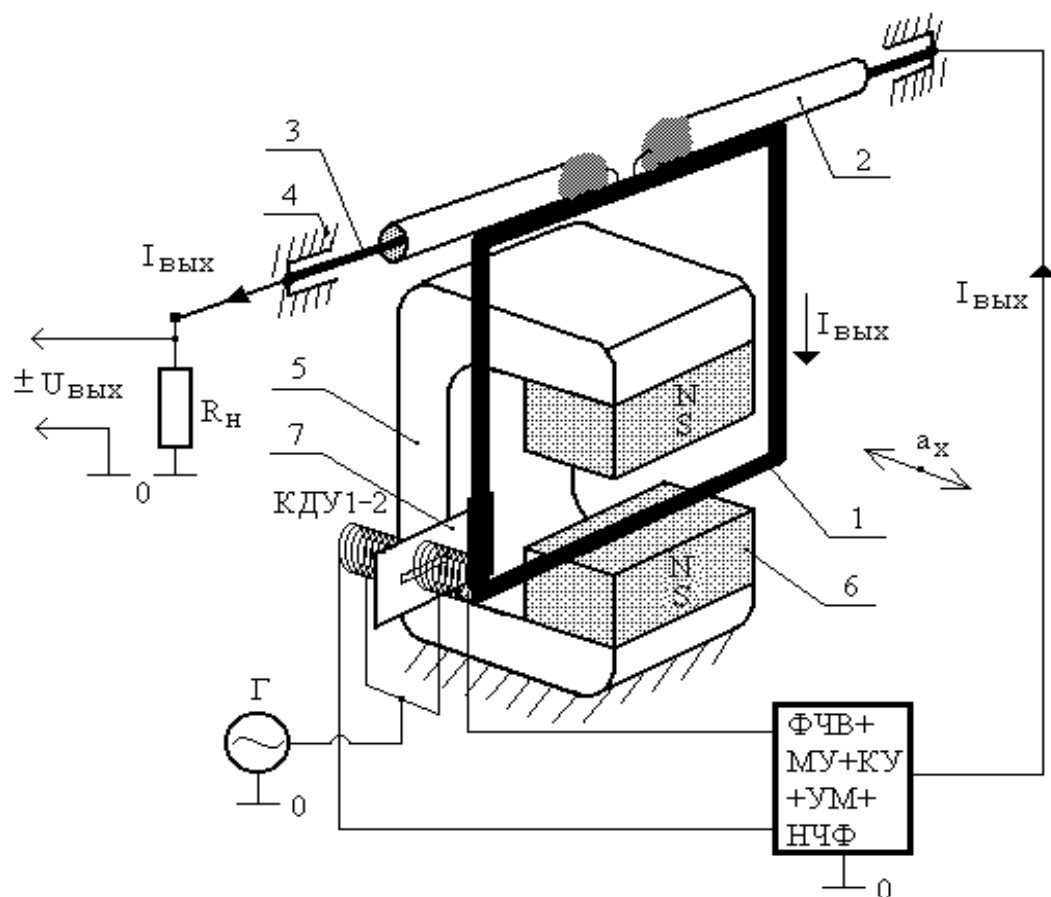


Рисунок 4 - Электрокинематическая схема АК5: a_x - измеряемое ускорение, 1 – рамка-инерционная масса, 2 – демпфирующий капилляр, 3 – торсионный подвес, 4 – основание, 5 – магнитная система ДМОС, 6 – постоянный магнит ДМОС, 7 – флажок-подвижная часть датчика угла, КДУ1-2 – катушки датчика угла, закрепленные на основании, ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель, МУ – масштабный усилитель, КУ – корректирующее устройство, УМ – усилитель мощности, НЧФ – низкочастотный фильтр, Г - генератор датчика угла, $I_{\text{ВЫХ}}$ - выходной ток

$U_{\text{ВЫХ}}$

R_H

Недостатки: высокая стоимость и трудоемкость изготовления ЧЭ, большая вибрационная погрешность из-за слабого демпфирования по неизмерительным осям, низкая надежность из-за возможности обрыва упругого подвеса при ударах и вибрации, достаточно малый диапазон линейного преобразования датчика угла и датчика момента.

1.4 Сервоакселерометры фирмы *Bricett* (Турция) [3]

На протяжении нескольких последних лет компания *Innalabs*, основанная в России в 2001 г., направляла все усилия на разработку инерциальных датчиков и систем с наиболее конкурентоспособным сочетанием параметров точности и размеров для задач навигации, управления, контроля и стабилизации. Результатом разработок стали кварцевые сервоакселерометры, динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ), кварцевые гироскопы, инерциальные измерительные блоки (ИИБ), а также курсовертикали навигационного, тактического и измерительного классов. Завершив разработку и дизайн, компания *Innalabs* передала технологии производства этих продуктов компании *Bricett* (Турция), которая имеет идеальное месторасположение на стыке границ Востока и Запада.

Область применения:

- бесплатформенные инерциальные навигационные системы для авиации (вертолеты, удаленно и автономно управляемые воздушные аппараты);
- системы навигации, ориентации, гирокомпасирования для морских судов, субмарин, автономных подводных аппаратов;
- системы наведения для стратегических и тактических снарядов и ракет;
- системы ориентации для буровых аппаратов.

Кварцевые акселерометры навигационного класса *INN-202* и тактического класса *INN-203* разработаны как для военных, так и для коммерческих применений. Данные акселерометры используются в бесплатформенных инерциальных системах для задач навигации, ориентации, и стабилизации, например,

инерциальных навигационных системах (БИНС), инерциальных измерительных блоках (ИИБ), курсовертикалях.

Внешний вид акселерометра *INN-202* показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Акселерометр *INN-202* фирмы *Bricett* (Турция)

Тактико-технические характеристики акселерометров приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Тактико - технические характеристики *INN-202*, *INN-203*

Параметр	Единица измерения	<i>INN-202</i>	<i>INN-203</i>
Диапазон измерения	<i>g</i>	± 50	
Смещение нуля	<i>mg</i>	<3	<20
Повторяемость за 1 год	μg	<80	<200
Темп. чувствительность	$\mu g/^{\circ}C$	<50	<300
Масштабный коэффициент	<i>mA/g</i>	от 1,1 до 1,4	
Повторяемость за 1 год	<i>ppm</i>	<50	<200
Темп. чувствительность	<i>ppm/^{\circ}C</i>	<50	<200
Нелинейность	$\mu g/g^2$	<50	<100
Разрешение	μg	1	<5
Погрешность базирования	мрад	<2	
Повторяемость за 1 год	мрад	$<0,1$	
Диапазон рабочих температур	$^{\circ}C$	от минус 55 до 85	
Вибропрочность	<i>g</i> , Гц	8 <i>g</i> в диапазоне от 20 Гц до 2000 Гц	
Ударопрочность	<i>g</i>	70	

Полоса пропускания	Гц	от 0 до 200	
Потребляемый ток	мА	<16	
Потребляемая мощность при ± 15 В	Вт	<0,48	
Напряжение питания	В	от ± 12 до ± 18	
Термокомпенсация смещения нуля		есть	по требованию
Термокомпенсация масштабного коэффициента		есть	по требованию
Габаритные размеры	мм	$\varnothing 38 \times 26$	
Вес	г	<80	
Материал корпуса		нержавеющая сталь	

В настоящее время *Bricett* продолжает разработку акселерометров с повышенной температурной устойчивостью до $+125$ °С. Генеральные дистрибьюторы *Bricett* находятся в Китае, Италии, Южной Корее, Израиле. Продукция фирмы не требует экспортных лицензий. *INN-202* – это отбор по параметрам *INN-203*.

Достоинства:

- высокая временная стабильность параметров;
- наличие встроенного датчика температуры для алгоритмической компенсации погрешностей.

Недостатки:

- высокая стоимость (2500 - 4000 долл. США в зависимости от класса);
- относительно большая масса.

Габаритно-присоединительные размеры датчиков указаны на рисунке 6.

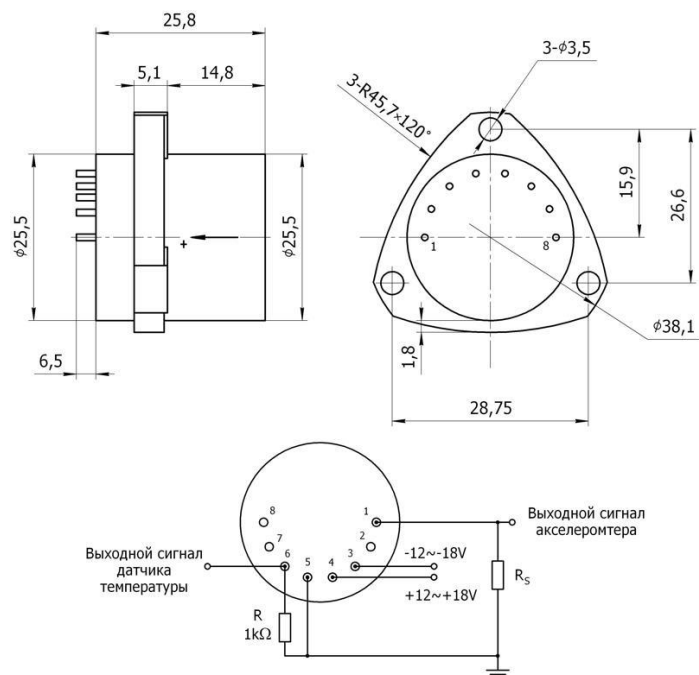


Рисунок 6 – Внешний вид, габаритные размеры и схема включения *INN-202*

Цоколевка выводов акселерометра указана в таблице 3.

Таблица 3

№	Назначение
1	Выход датчика (датчик момента Lx1)
2	Датчик момента Lx2 (для производственных целей)
3	-12 В ... -18 В (рекомендовано -15 В)
4	+12 В ... +18 В (рекомендовано +15 В)
5	Общий
6	Выход датчика температуры
7	Дифференциальная емкость Sx2 (для производственных целей)
8	Дифференциальная емкость Sx1 (для производственных целей)

1.5 Акселерометр АТ1104 фирмы ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА» (Россия)

В 1994 г. предприятие ОАО АНПП «Темп-Авиа» разработало и начало производство линейного акселерометра АТ1104 с магнитоэлектрической обратной связью и диапазоном измерения ± 10 g. Изделие обеспечивает выдачу постоянного тока, величина которого пропорциональна действующему по измерительной оси ускорению, а полярность соответствует направлению этого ускорения, а также постоянного напряжения, величина которого пропорциональна температуре внутри корпуса изделия. Акселерометр имеет герметичный

корпус, в котором расположены емкостной чувствительный элемент, ДМОС, сервисная электроника в гибридном исполнении. Корпус акселерометра соединён со средней точкой электропитания. Основные области применения – измерение параметров движения, измерение отклонения от вертикали (горизонтали), измерение параметров вибрации и инклинометрия. Основные характеристики АТ1104 приведены в таблице 4.

Таблица 4

Параметр	Значение
Диапазон измерения, g (устанавливается номиналом внешнего нагрузочного резистора)	$\pm 1 \dots \pm 10$
Крутизна выходной характеристики по току, мА/g	$1 \pm 0,15$
Отклонение реального значения крутизны выходной характеристики от паспортного значения, не более, %:	
- при нормальных климатических условиях	0,2
в диапазоне рабочих температур без алгоритмической компенсации	1,5
при алгоритмической компенсации потребителем	0,3
Нулевой сигнал (постоянная составляющая), не более, $\times 10^{-3} \text{ g}$	± 20
Отклонение реального значения нулевого сигнала от паспортного значения, не более, $\times 10^{-3} \text{ g}$:	
при нормальных климатических условиях	± 1
в диапазоне рабочих температур	± 10
при алгоритмической компенсации в соответствии с паспортным значением	2
Нелинейность, не более, %	0,1
Частотная характеристика: полоса пропускания по уровню минус 3 дБ, не менее, Гц	0 ... 100
Параметры встроенного датчика температуры:	
выходное напряжение при н.у., В	$- 2,7 \pm 0,5$
крутизна выходной характеристики, мВ/°C	$8 \pm 0,5$
Диапазон рабочих температур, °C	-50 ... + 120
Габариты, мм	Ø29×23,2
Напряжение электропитания, В	$\pm 15 \pm 1,5$
Масса, не более, г	35
Цена, долл. США	900

Вывод: наилучшее соотношение «цена/качество» имеет АТ1104, поэтому принимаем его за прототип нашей разработки.

2 Анализ технико – экономических требований к акселерометру ММА и основные технические решения по его созданию

2.1 Цель разработки

Основной целью разработки интегрального микромеханического магнитоэлектрического датчика акселерометра ММА является сохранение и укрепление позиций МИЭТ на рынке датчиковой аппаратуры, а также внедрение в новые сегменты этого рынка, основными тенденциями развития которого являются:

- снижение цен на датчики первичной информации (ДПИ) вследствие повышенного предложения в данной области;
- увеличение ресурса и надежности приборов и ИНС на их основе;
- значительное повышение точностных требований и требований долговременной стабильности метрологических характеристик ДПИ;
- уменьшение трудоемкости изготовления.

Выпускаемые в настоящее время акселерометры второго класса, имеющие соответствующие точностные характеристики, частично не удовлетворяют технико-экономическим требованиям, предъявляемым ко вновь разрабатываемым системам инклинометрии. Так, например, акселерометр АТ1104, рассмотренный выше, имеет достаточно высокую трудоемкость изготовления, обусловленную, прежде всего, единичными объемами производства (очень велика доля ручного труда).

Поэтому необходимо разработать и освоить в собственном производстве линейный акселерометр, удовлетворяющий требованиям перспективных систем инклинометрии.

2.2 Анализ технико – экономических характеристик по ТЗ и выбор ближайших аналогов

Основные точностные характеристики из технического задания (ТЗ) на разработку акселерометра ММА:

- минимальный и максимальный диапазон измеряемых линейных ускорений $D_{\min} = \pm 1 \text{ g}$, $D_{\max} = \pm 20 \text{ g}$, где $g = 9,8158 \text{ м/с}^2$ на широте г. Зеленограда;
- средняя крутизна статической характеристики по току в нормальных условиях $1 \pm 0,15 \text{ мА/г}$;
- номинальное выходное напряжение (падение напряжения на резисторе нагрузки) $\pm 5 \text{ В}$;
- нулевой сигнал в нормальных условиях – не более $\pm 20 \times 10^{-3} \text{ g}$;
- рабочий диапазон температур – от минус $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- погрешность базирования в нормальных условиях $\delta_{\text{баз}} = 0,5^{\circ}$;
- полоса пропускания по уровню минус 3 дБ $f_{\text{п}} \geq 100 \text{ Гц}$;
- токи, потребляемые при максимальном измеряемом ускорении $I_{\text{потр}} \leq 40 \text{ мА}$;
- время готовности – не более 1 с ;

– значение выходного напряжения встроенного термодатчика в нормальных условиях $U_{т/д} = -2700 \pm 150$ мВ, крутизна его характеристики $K_{т/д} = 8 \pm 0,5$ мВ/°С;

– нестабильность нулевого сигнала при всех видах ВВФ – не более $\pm 0,5 \times 10^{-3}$ g;

– нестабильность крутизны статической характеристики при всех видах ВВФ – не более $\pm 0,3$ %;

– трудоемкость серийного производства 20 н/ч;

– назначенный ресурс 5000 часов;

– назначенный срок службы 10 лет (предварительно).

На основании проведенного обзора существующих конструкций датчиков линейных ускорений и анализа технико-экономических характеристик разрабатываемого прибора можно заключить, что требуемую точность обеспечивает компенсационный метод измерения линейного ускорения, т. е. измерительный контур с главной отрицательной обратной связью. Для высоких метрологических характеристик такой схемы необходимо отсутствие вредных моментов внутри упругого подвеса физического маятника ЧЭ и как можно большее отношение жесткости электрической пружины $C_{эл}$ к угловой жесткости механического подвеса G_y (так называемый “безмоментный” подвес). В данном случае точность прибора будет зависеть в основном от точности и стабильности узла обратной связи – магнитоэлектрического или электростатического ДМОС. Ближайшие аналоги по конструктивно-технологическим признакам – маятниковые компенсационные акселерометры АТ1104 (ТЕМП-АВИА) и Q-flex (Sundstrand, США), ЧЭ и электронный узел которых изготовлены по интегральным технологиям микроэлектроники, что значительно снижает трудоемкость изготовления компенсационных ДЛУ, а также значительно увеличивает их надежность, ресурс и срок службы по сравнению с традиционными конструкциями объемного монтажа.

3 Выбор конструкции проектируемого ММА

В конструкциях интегральных акселерометров могут быть использованы различные принципы построения: принцип прямого измерения ускорений и принцип измерения с силовой компенсацией. Подвижный узел может быть осевого или маятникового типа, а для выявления их движений могут использоваться датчики перемещений или деформаций. Последние чаще всего применяются в приборах прямого измерения, т. к. для создания деформаций ощутимых тензопреобразователями требуются упругие подвесы значительной жёсткости, что в конечном итоге требует значительных мощностей от датчиков силовой отработки. В конструкциях интегральных акселерометров нашли применение два типа датчиков силовой отработки: магнитоэлектрические и электростатические.

Интегральные акселерометры прямого измерения с ёмкостными преобразователями перемещений имеют отличные характеристики (точность порядка 1

%) и для случая газового демпфирования обладают оптимальными значениями относительного коэффициента демпфирования.

В интегральных датчиках электронные преобразователи перемещений (или деформаций) конструктивно выполняют на одном узле с чувствительными элементами. При этом степень интеграции определяется числом функциональных элементов объединённых в одном узле.

Чувствительный элемент маятникового типа (рисунок 7) в наиболее общем случае представляет собой консольную балку с жесткой заделкой на одном конце и с сосредоточенной массой на другом. Такой ЧЭ как динамическая система имеет две степени свободы: линейное и угловое перемещение, и соответственно его положение описывается двумя обобщенными координатами $q_1 = y$ и $q_2 = \varphi$. Однако в практических конструкциях акселерометров в целях подавления влияния тех или иных боковых составляющих ЧЭ выполняют чисто осевого или чисто маятникового типа. При этом исключаются взаимные влияния между линейными и угловыми перемещениями, соответственно уравнения для каждого вида движения имеет вид [5]:

$$\text{для ЧЭ осевого типа} \quad m \ddot{y} + K_d \dot{y} + Gy = ma, \quad (1.1)$$

$$\text{для ЧЭ маятникового типа} \quad J_{AZ} \ddot{\varphi} + K_{д\varphi} \dot{\varphi} + G_y \varphi = mal_{цм}, \quad (1.2)$$

где m - масса маятника,

y - линейное перемещение маятника,

$K_d, K_{д\varphi}$ - линейный и угловой коэффициенты газодинамического демпфирования,

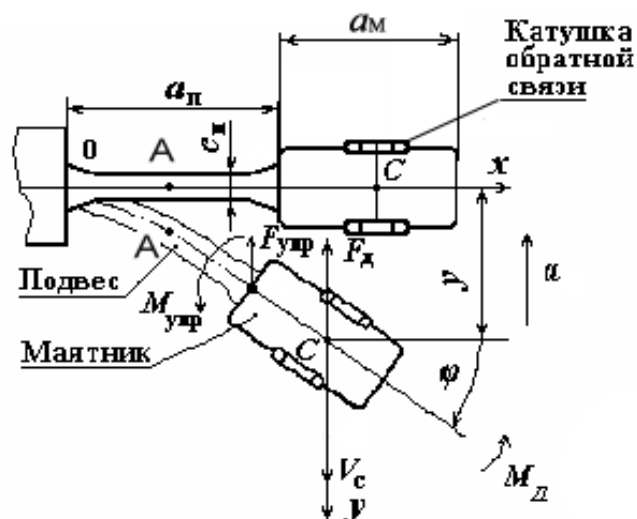
G, G_y - линейная и угловая жесткости подвеса,

a - действующее ускорение,

J_{AZ} - момент инерции маятника относительно точки А,

φ - угол отклонения маятника от первоначального положения,

$l_{цм}$ - расстояние до центра масс.



4 Описание принципа действия ММА

Под действием измеряемого линейного ускорения подвижный узел отклоняется, при этом появляется разбаланс дифференциальной измерительной емкости, которая представляет собой проводящий маятник, движущийся между двух статорных обкладок. Дифференциальный емкостной преобразователь перемещений опрашивается схемой ШИМ. Таким образом, выделяется разность напряжений, прямо пропорциональная разности измерительных емкостей. Далее эта разность напряжений усиливается по амплитуде и мощности измерительным усилителем со встроенным активным корректирующим устройством, предназначенным для повышения устойчивости контура обратной связи. С выхода усилителя сигнал, пропорциональный измеряемому линейному ускорению, подается в цепь датчика момента обратной связи (в нагрузочную цепь). Ток, проходящий через нагрузочную цепь и прямо пропорциональный измеряемому линейному ускорению, при взаимодействии с полем постоянного магнита в магнитной системе создает силу Ампера, которая при взаимодействии с подвесом маятника (подвижного узла) создает момент обратной связи полностью или частично компенсирующий инерционный момент от действия линейного ускорения. Внешний резистор нагрузки задает жесткость «электрической пружины» и таким образом, определяет диапазон измерения. Информацией о действующем измеряемом линейном ускорении является падение напряжения на резисторе нагрузки. Датчик температуры представляет собой четыре последовательно соединенных $p-n$ перехода, которые включены в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя, на инверсный вход которого подается стабилизированное опорное напряжение. Информацией о температуре внутри корпуса изделия является выходное напряжение данного операционного усилителя. У каждого $p-n$ перехода коэффициент термочувствительности составляет примерно $2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

5 Расчёт основных узлов ММА

5.1 Расчет чувствительного элемента

5.1.1 Расчет масс-инерционных характеристик подвижного узла ММА

В качестве чувствительного элемента (ЧЭ) разрабатываемого изделия был выбран маятниковый ЧЭ, изготовленный из кремниевой пластины. Чувствительным элементом маятникового акселерометра является подвижная часть кремниевой пластины соединенная с заземленной частью тремя упругими элементами. Изготовлен ЧЭ методом анизотропного травления. Кремниевая пластина по периметру заземлена между стеклянными обкладками. Пластина и стекла имеют примерно равные коэффициенты теплового расширения. На ЧЭ (маятнике) с обеих сторон жестко закреплены кронштейны, выполненные из титана, на которых смонтированы катушки (составная часть датчика момента

(ДМ)) для реализации обратной связи (ОС). Чувствительный элемент с кронштейнами и катушками представлен на рисунке 8.

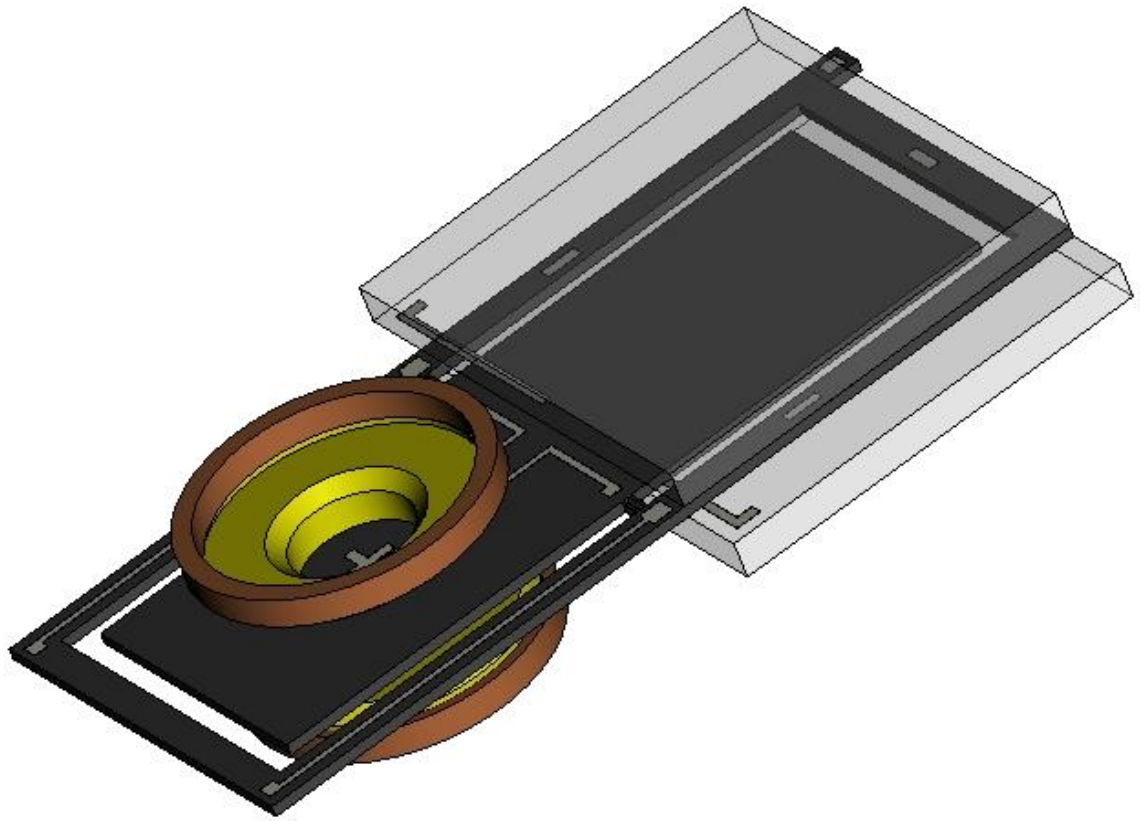


Рисунок 8 – Чувствительный элемент

Расчет ЧЭ заключается в нахождении параметров маятника: массы, момента инерции.

В предположении, что вся масса маятника (кремниевой пластины, кронштейнов и катушек) сосредоточена в точке C (см. рисунок 9), момент инерции J_{CZ} относительно оси, проходящей через центр масс (точка C) и параллельный Z [5]:

$$J_{CZ} = \frac{m}{12} (a_M^2 + c_M^2), \quad (1.3)$$

где J_{CZ} - момент инерции маятника относительно центра масс,

m - масса маятника,

a_M - длина маятника,

c_M - толщина маятника.

Момент инерции маятника J_{AZ} относительно оси, проходящей через точку A и параллельной оси Z равен [5]:

$$J_{AZ} = J_{CZ} + m \frac{(a_M + a_{\Pi})^2}{4} . \quad (1.4)$$

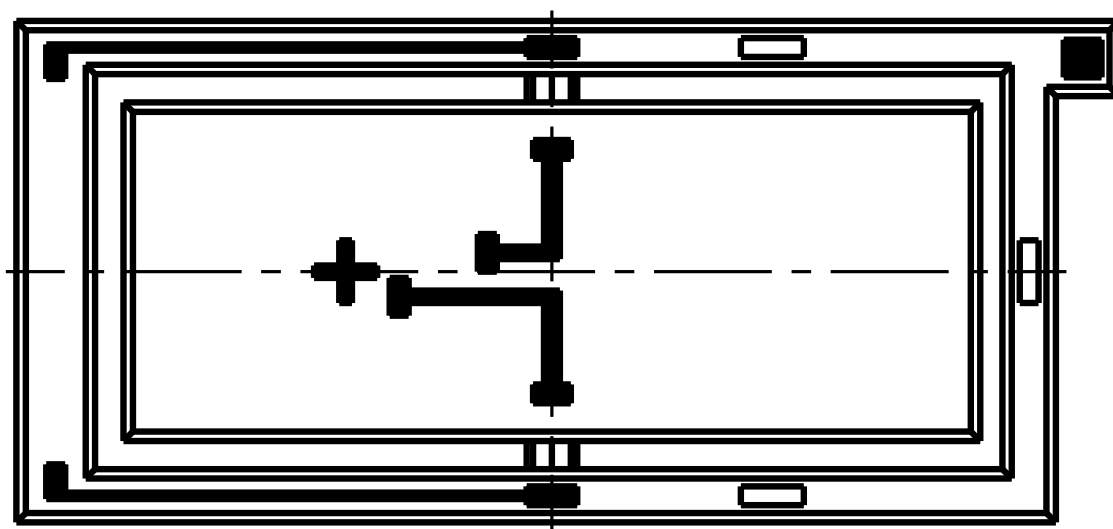


Рисунок 9 - Эскиз маятника

Вычислим общую массу маятника m . Для этого необходимо вычислить отдельно массу элемента кристаллического $m_{\text{ЭК}}$, массу кронштейна $m_{\text{кр}}$, массу катушки $m_{\text{кат}}$. Таким образом, общая масса маятника:

$$m = m_{\text{ЭК}} + 2 \cdot m_{\text{кр}} + 2 \cdot m_{\text{кат}} . \quad (1.5)$$

Найдём массу элемента кристаллического (ЭК).

Элемент кристаллический имеет сложную конфигурацию (см. рисунок 10).

Массу ЭК рассчитаем, используя программу ЭВМ T-Flex CAD 3D: $m_{\text{ЭК}} = 0,0504$ г.

Массу кронштейна и катушки (см. рисунок 11) найдем аналогичным образом, используя программу ЭВМ T-flex CAD 3D: $m_{\text{кр}} = 0,139$ г, $m_{\text{кат}} = 0,104$ г

Рассчитаем общую массу и момент инерции ЧЭ.

Зная значения масс для составляющих маятника, по формуле 1.5 вычислим общую массу, которая равна: $m = 5,3 \cdot 10^{-4}$ кг.

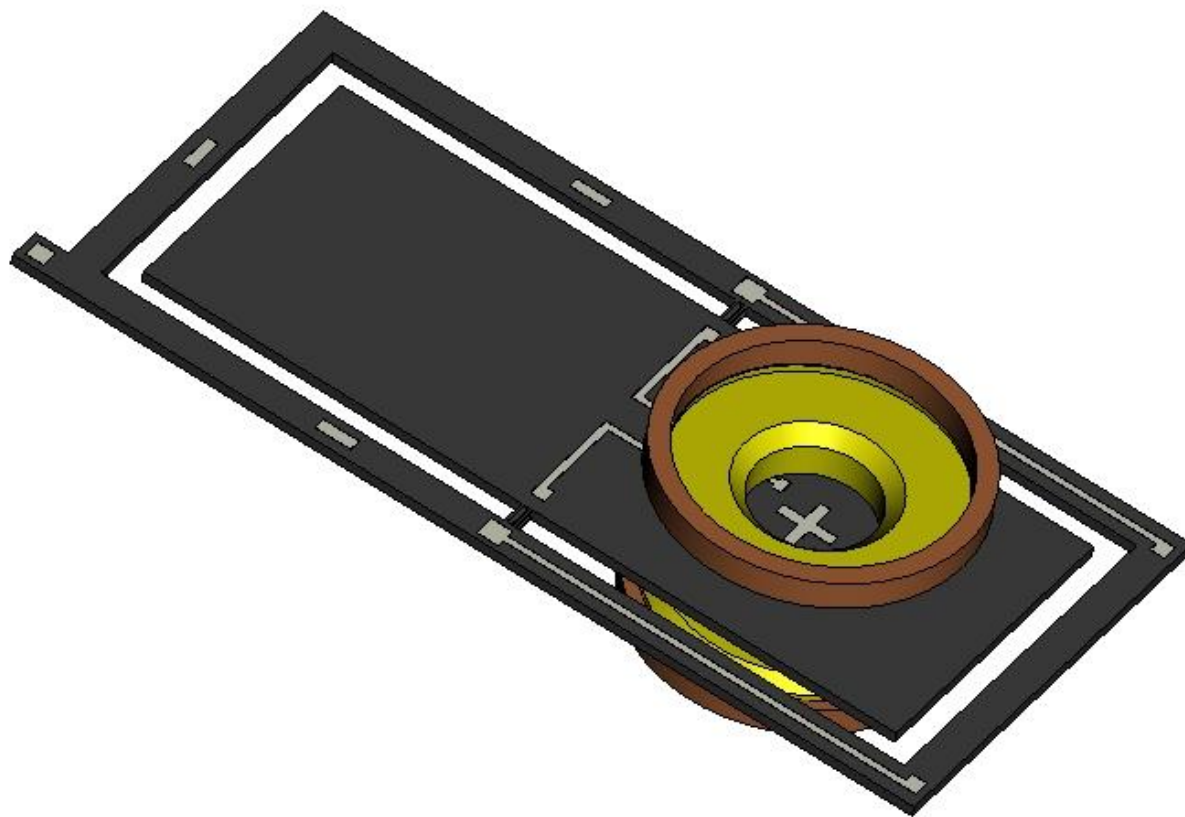


Рисунок 10 – Элемент кристаллический

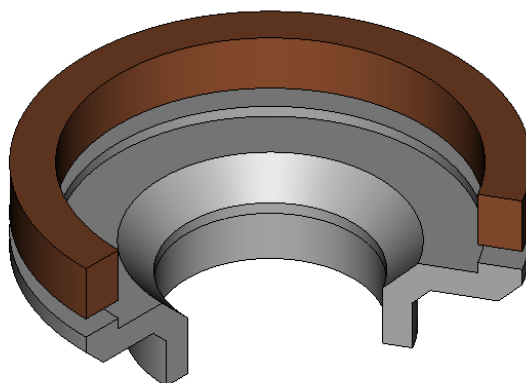


Рисунок 11 – Трехмерная модель катушки и кронштейна

Момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс (точка С) найдём по формуле 1.3:

$$J_{CZ} = \frac{5,3 \cdot 10^{-4}}{12} \left((8,8 \cdot 10^{-3})^2 + (0,34 \cdot 10^{-3})^2 \right) = 3,42 \cdot 10^{-9} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку А найдём по формуле 1.4:

$$J_{AZ} = 3,42 \cdot 10^{-9} + 5,3 \cdot 10^{-4} \cdot (4,73 \cdot 10^{-3})^2 = 1,52 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

5.1.2 Расчет жесткости упругого подвеса

Наиболее ответственным узлом в чувствительных элементах механо-электрических преобразователей интегрального исполнения является упругий подвес. Для упругих подвесов как интегральных, так и не интегральных характерным является одно общее свойство – это острая противоречивость требований к их характеристикам. Например, получение подвесов со сколько угодно малой жёсткостью при одновременной их идентичности и надёжности, представляет собой одну из труднейших технических задач. Требование минимальной жёсткости необходимо в основном для одной цели - обеспечения точности измерительного прибора, которая в свою очередь обратно пропорциональна отношению жёсткости "электрической пружины" к жёсткости упругого подвеса. Живучесть интегрального подвеса в основном определяется сведением к минимуму концентрации напряжений в местах его переходов к несущей корпусной пластине или к телу подвижной массы. В свою очередь, концентрация напряжений обуславливается несколькими причинами: несовершенством геометрической формы подвеса, несовершенством химико-технологических приёмов при размерной обработке, а также наличием различных дефектов в кристаллах.

Для упругого подвеса с переменной толщиной подвеса расчетная формула угловой жесткости имеет вид [4]:

$$G_y = \frac{E_{[100]} \cdot b_{\Pi} \cdot c_{\Pi \min}^3}{3 \cdot a_{\Pi} \cdot (2 + a_{\Pi} / l_{\Pi \text{М}})} \left[\frac{3 \cdot \arctg \sqrt{2 \cdot \gamma}}{4 \cdot \sqrt{2 \cdot \gamma}} + \frac{5 + 6 \cdot \gamma}{4 \cdot (1 + 2 \cdot \gamma)^2} \right], \quad (1.6)$$

$$\gamma = \frac{c_{\Pi \max} - c_{\Pi \min}}{c_{\Pi \min}}.$$

В конструкции чувствительного элемента данного акселерометра сделано два упругих подвеса (см. рисунок 13): два крайних, имеющие одинаковые размеры.

Рисунок 13- Эскиз упругих подвесов ЧЭ

Данные необходимые для расчета:

$E_{[100]} = 1,295 \cdot 10^{11}$ Па - модуль упругости кремния для направления [100];

$l_{\text{ЦМ}} = 4,73 \cdot 10^{-3}$ м - расстояние от оси качения до ц. масс маятника;

$a_{\text{II}} = 0,66 \cdot 10^{-3}$ м - длина упругого подвеса;

$c_{\text{IImin}} = 20 \cdot 10^{-6}$ м - минимальная толщина упругого подвеса;

$c_{\text{IImax}} = 60 \cdot 10^{-6}$ м - максимальная толщина упругого подвеса;

$b_{\text{Iкр}} = 0,75 \cdot 10^{-3}$ м - ширина крайних упругих подвесов;

$b_{\text{IIкр}} = 1,13 \cdot 10^{-3}$ м - ширина среднего упругого подвеса.

Таким образом жесткость крайнего упругого подвеса будет равна $G_{y_{\text{кр}}} = 1,07 \cdot 10^{-4}$ Н·м/рад, жесткость среднего упругого подвеса будет равна $G_{y_{\text{ср}}} = 1,61 \cdot 10^{-4}$ Н·м/рад.

Общая угловая жесткость подвесов равна:

$$G_y = 3,76 \cdot 10^{-4} \text{ Н·м/рад}.$$

5.1.3 Расчет газодинамического демпфирования подвижного узла ДЛУ

В интегральных измерительных преобразователях с инерционной массой одним из важных вопросов является демпфирование подвижных узлов. В компенсационных приборах оптимизация динамических характеристик возможна за счёт введения в электрический контур скоростной обратной связи. В приборах прямого измерения такой возможности нет, поэтому вопрос демпфирования подвижных узлов ставится ещё острее. В интегральных микродатчиках с малыми зазорами между подвижными и неподвижными узлами, как в приборах прямого измерения, так и в компенсационных приборах, представляется возможность эффективно решать вопросы демпфирования посредством вязкого трения газа, перемещаемого через малые зазоры при движении подвижных узлов. Поскольку в интегральных датчиках подвижные узлы выполняют несколько функций, например, являются механическими преобразователями ускорений или давлений в пропорциональные перемещения и одновременно преобразователями разности потенциалов, приложенной между подвижными и неподвижными электродами в пропорциональную электростатическую силу, препятствующую механическим перемещениям, то к демпфирующему газу, кроме стабильности вязкости, предъявляются ещё требования и к стабильности диэлектрической проницаемости. Наиболее полно этим требованиям отвечает газ – сухой азот, который к тому же является химически нейтральным, т.е. представляет собой не агрессивную среду к микромеханическим и электронным компонентам.

Осевой коэффициент демпфирования для инерционного элемента прямоугольной формы находится по формуле:

$$K_{\text{Дос}} = \frac{\mu \cdot (a_{\text{м}} \cdot b_{\text{м}})^2}{h_0^3}, \quad (1.7)$$

где $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5}$ кг/(м · с) - вязкость газа;

$h_0 = 8 \cdot 10^{-6}$ м - расстояние между обкладками (зазор);

$a_{\text{м}} = 8,8 \cdot 10^{-3}$ м - длина маятника;

$b_{\text{м}} = 9,15 \cdot 10^{-3}$ м - ширина маятника;

Подставив численные значения в формулу 1.6 получим:

$$K_{\text{Дос}} = 226,66 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$$

Маятниковый коэффициент демпфирования для инерционного элемента прямоугольной формы находится по формуле:

$$K_{\text{Дв}} = K_{\text{Дос}} \cdot l_{\text{ЦМ}}^2. \quad (1.8)$$

Численно маятниковый коэффициент демпфирования равен:

$$K_{\text{Дв}} = 5,07 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

5.2 Расчет датчика перемещения

В чувствительном элементе данного блока акселерометров применим емкостную схему съема сигнала, которая предполагает наличие в составе прибора емкостей, значения которых изменяются в зависимости от отклонения подвижного элемента.

Емкость плоского конденсатора определяется по формуле [3]:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h_0}, \quad (1.9)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

S – рабочая площадь обкладок конденсатора;

h_0 – расстояние между обкладками (зазор).

Обкладка конденсатора представляет собой фигуру прямоугольной конфигурации (см. рисунок 14).

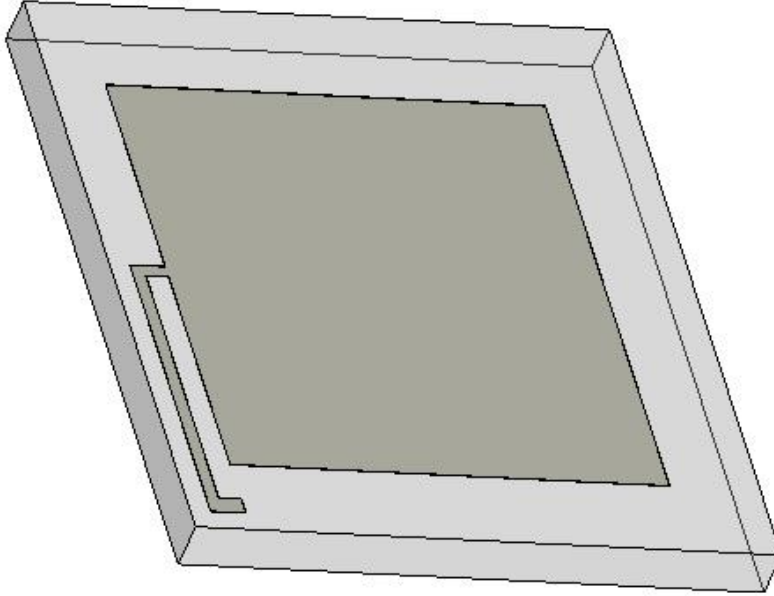


Рисунок 14 – К расчету площади обкладки

Найдем площадь обкладки, используя программу *T-Flex CAD 10*:

$$S_{\text{раб}} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

В данном случае используется зависимость емкости от расстояния между обкладками. Из формулы видно, что эта зависимость имеет гиперболический характер, поэтому в схемах с использованием плоского конденсатора целесообразно работать при малых зазорах, что обеспечивает сочетание линейности характеристики с высокой чувствительностью. Для обеспечения этого условия рабочий угол отклонения маятника принимается равным от 10 % до 20 % от максимального отклонения пластины: $\alpha_{\text{раб}} = (0,1 \div 0,2) \cdot \alpha_{\text{max}}$.

Максимальный угол отклонения маятника α_{max} :

$$\alpha_{\text{max}} = \arctg \left(\frac{h_0}{\frac{a_{\text{п}}}{2} + a_{\text{м}}} \right). \quad (1.10)$$

Подставив численные значения получим:

$$\alpha_{\max} = \operatorname{arctg} \left(\frac{8 \cdot 10^{-6}}{\frac{0,66 \cdot 10^{-3}}{2} + 8,8 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,00087$$

Максимальный угол отклонения маятника равен $\alpha_{\max} = 0,00087$ рад.

Рабочий угол примем равным 20 % от максимального: $\alpha_{\text{раб}} = 0,000175$ рад.

Рабочий зазор $d_{\text{раб}}$ (перемещение центра пластины) исходя из рабочего угла отклонения:

$$d_{\text{раб}} = l_{\text{ЦМ}} \cdot \sin(\alpha_{\text{раб}}) \approx l_{\text{ЦМ}} \cdot \alpha_{\text{раб}}. \quad (1.11)$$

Численно рабочий зазор равен $d_{\text{раб}} = 0,83 \cdot 10^{-6}$ м.

Находим зависимость емкостей от угла отклонения пластины или от ее перемещения по формулам:

$$C_1 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h_0 + d}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h_0 - d}, \quad (1.12)$$

где $d = l_{\text{ЦМ}} \cdot \alpha$ - перемещение пластины в зависимости от угла отклонения.

Таблица 1.4 – Изменение дифференциальных емкостей от угла отклонения пластины

$\alpha \cdot 10^{-4}$, рад	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2
$d \cdot 10^{-6}$, м	0	0.1892	0.3784	0.5676	0.7568	0.9460
$C_{1-} \cdot 10^{-12}$, Ф	33,19	32,42	31,69	30,99	30,32	29,68
$C_{2+} \cdot 10^{-12}$, Ф	33,19	33,99	34,84	35,72	36,66	37,64

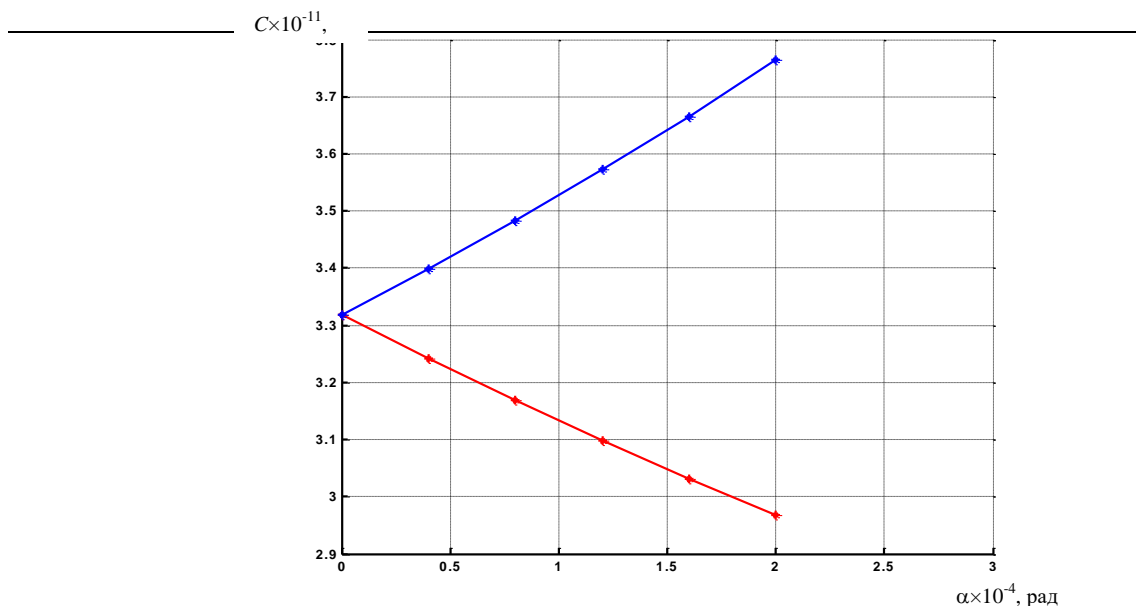


Рисунок 15– Изменение дифференциальных емкостей

Рассчитаем выходное напряжение с датчика угла.

В дифференциальных емкостных преобразователях функция преобразования должна представляться в виде отношения разности плеч измерительных емкостей к их сумме. Это дает следующие преимущества:

- исключается ошибка от изменения диэлектрической проницаемости;
- исключается тяжение между подвижными и неподвижными электродами;
- функция преобразования получается достаточно линейной;

В рассматриваемой схеме функция преобразования представляется отношением разности измерительных емкостей к их сумме. Алгоритм преобразования ёмкостей обкладок в выходное напряжение имеет следующий вид:

$$U_{\text{ДП}} = U_{\text{оп}} \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = U_{\text{оп}} \cdot \frac{d}{h_0} = U_{\text{оп}} \cdot \frac{l_{\text{ЦМ}} \cdot \alpha}{h_0}, \quad (1.13)$$

где $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение питания;

C_1, C_2 – переменные емкости (датчика угла).

Находим зависимость выходного напряжения от угла отклонения пластины или от ее перемещения по выше приведенной формуле.

Таблица 1.5 - Изменение выходного напряжения с датчика угла (положительная ветка)

$\alpha \cdot 10^{-4}$, рад	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
$d \cdot 10^{-6}$, м	0	0,189	0,378	0,567	0,756	0,946
$U_{\text{ВЫХ}}$, В	0	0,151	0,302	0,4541	0,6054	0,756

График зависимости выходного напряжения от угла отклонения пластины или от ее перемещения представлен ниже (см. рисунок 1.17).

Вычислим коэффициент передачи датчика перемещения по формуле:

$$K_{\text{ДП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{\alpha}. \quad (1.14)$$

Численно коэффициент передачи датчика перемещения равен:

$$K_{\text{ДП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{\alpha} = 3784 \frac{\text{В}}{\text{рад}}.$$

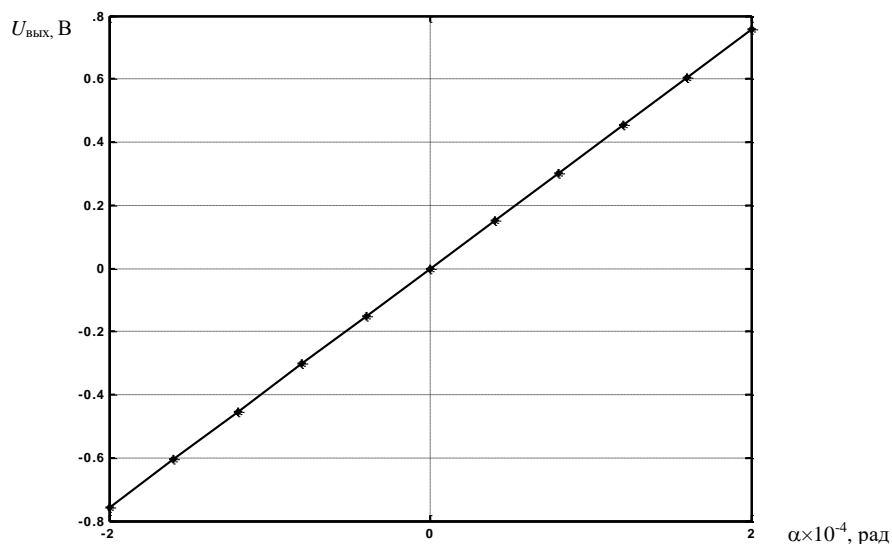


Рисунок 16 – Изменение напряжения на выходе датчика угла

5.3 Расчет характеристик датчика момента обратной связи

В компенсационных приборах нашёл широкое применение в качестве обратного силового преобразователя магнитоэлектрический датчик. Основными положительными свойствами магнитоэлектрического датчика силы являются: линейность характеристики, возможность компенсации температурной ошибки и сравнительно с другими преобразователями, большая величина развиваемой силы.

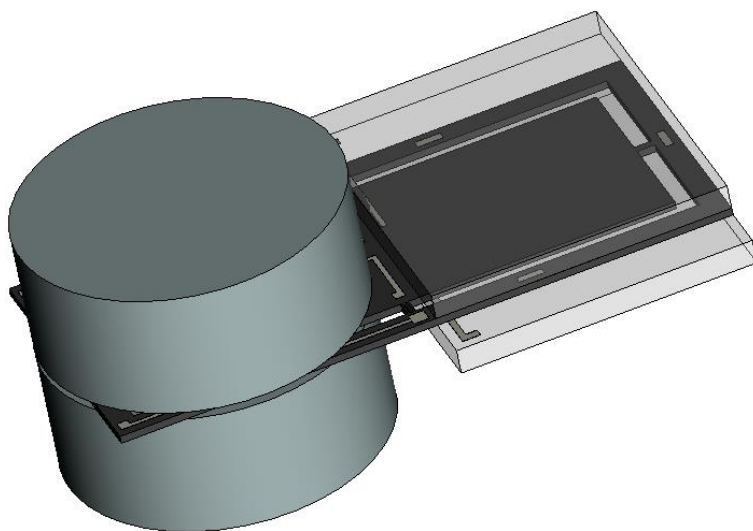


Рисунок 17а – ЧЭ ММА в сборе

Рассчитаем магнитную индукцию.

Расчет магнитной системы сводится к выбору магнита и параметров всей магнитной цепи (см. рисунок 17а; рисунок 17). При этом строится кривая состояния магнита, определяются потоки рассеяния и рабочие потоки, далее индукция в среднем сечении магнита и в рабочем зазоре.

На рисунке представлена магнитная система с рабочим потоком G_p и основными потоками рассеяния G_1, G_2, G_3 .

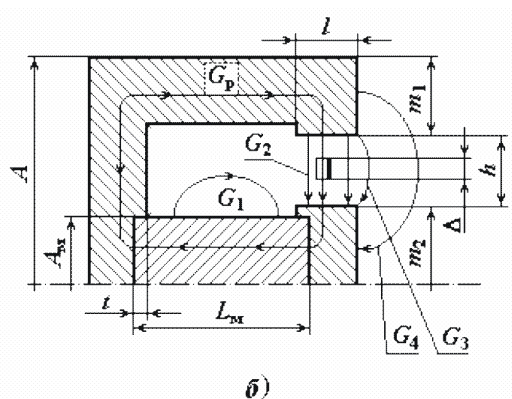
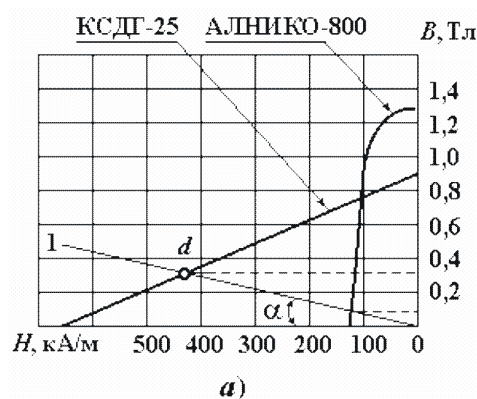


Рисунок 17 – Кривая размагничивания (а), рабочий поток и потоки рассеяния в зазоре (б)

Значения проводимостей найдём по формулам 1.15 [1]:

$$\begin{aligned} G_p &= 4\mu_0 m_2 l_K / (h - \Delta), \\ G_1 &= 2\mu_0 A_M / \pi, \\ G_2 &= 4\mu_0 m_2 l / h, \\ G_3 &= 0,26\mu_0 m_2, \\ G_4 &= \mu_0 \frac{l}{\pi(m_1 + m_2)} \left[m_1 \ln \left(1 + \frac{m_1}{h} \right) + m_2 \ln \left(1 + \frac{m_2}{h} \right) \right]. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Обозначения и их величины, принятые в формулах:

$\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6}$ - магнитная проницаемость вакуума;

$m_2 = 6,5 \cdot 10^{-3}$ м - диаметр полюсного наконечника;

$h = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м - рабочий зазор;

$l_K = 1 \cdot 10^{-3}$ м - высота витков возвращающей катушки;

$\Delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м - ширина катушки;

$A_M = 6,1 \cdot 10^{-3}$ м - диаметр магнита;

$m_1 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м - длина полюсного наконечника;

$l = 1,3 \cdot 10^{-3}$ м - высота полюсных наконечников.

Подставив численные значения в формулы 1.15, получим результаты для проводимостей:

$$G_p = 6,53 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/м},$$

$$G_1 = 4,88 \cdot 10^{-9} \text{ Гн/м},$$

$$G_2 = 3,39 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/м},$$

$$G_3 = 2,12 \cdot 10^{-9} \text{ Гн/м},$$

$$G_4 = 8,44 \cdot 10^{-10} \text{ Гн/м}.$$

Индукцию в теле магнита B_0 определим по кривой размагничивания (см. рисунок 1.18) и рассчитанному углу:

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{L_M}{S_M} \sum G_i \frac{m_H}{m_B}, \quad (1.16)$$

где $L_M = 2,7 \cdot 10^{-3}$ м - длина магнита,

$S_M = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ - площадь сечения постоянного магнита,

G_i - геометрические проводимости,

m_H, m_B - масштабные коэффициенты.

Сумма проводимостей находим по формуле:

$$\sum G = G_p + G_1 + G_2 + G_3 + G_4. \quad (1.17)$$

Численно сумма проводимостей равна: $\sum G = 0,107 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$.

Подставив численные значения в формулу 1.16 найдем, $\operatorname{tg}(\beta) = 3,19$, откуда следует, что $\beta = 72^\circ$.

Из графика определим $B_0 = 0,78 \text{ Тл}$.

Индукция в рабочем зазоре B_p определяется:

$$B_p = \frac{B_0 S_M}{\sigma S_p}, \quad (1.18)$$

$$\sigma = \frac{\sum G}{G_p}, \quad (1.19)$$

где σ – коэффициент рассеивания.

Подставив численные значения в формулу 1.18, найдем $B_p = 0,36$ Тл .

Рассчитаем катушку датчика момента.

Расчет катушки сводится к нахождению ее параметров: числа витков, длины провода, сопротивления обмотки.

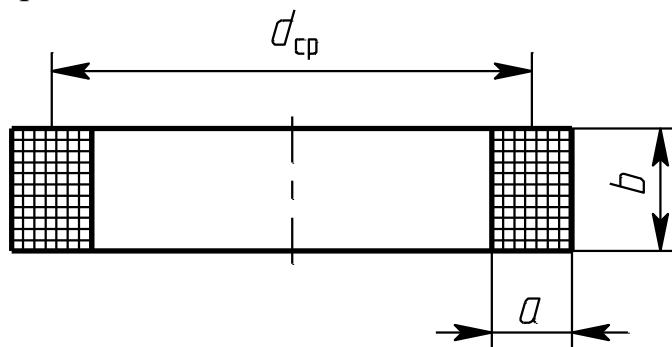


Рисунок 18 – Катушка ДМ

Число витков: $w = \frac{k \cdot a \cdot b}{S_{\text{пр}}}.$ (1.20)

Длина провода: $l_{\text{пр}} = w \cdot \pi \cdot d_{\text{cp}}.$ (1.21)

Сопротивление: $R = \rho \frac{l_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}}.$ (1.22)

Численные значения, входящие в формулы следующие:

$k=0,4$ - коэффициент заполнения;

$a = 0,75$ мм, $b = 1$ мм - размеры окна катушки (см. рисунок 1.19);

$d_{\text{пр}} = 0,04$ мм - диаметр провода;

$S_{\text{пр}} = \pi d_{\text{пр}}^2 / 4 = 0,00125$ мм² - площадь сечения провода;

$d_{\text{cp}} = 7,75 \cdot 10^{-3}$ м - средний диаметр катушки;

$\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м - удельная проводимость провода (меди).

Подставив численные значения в формулы 1.20 – 1.22 получим:

число витков $w = 239$ витков;

длина провода $l_{\text{пр}} = 5,81$ м;

сопротивление обмотки $R = 81$ Ом .

Подберём сопротивление нагрузки.

Ток, протекающий через датчик момента (катушки), должен скомпенсировать вызванное действием внешнего момента отклонение, таким образом можно записать, что ток в датчике момента при действии расчетного ускорения $1,5 g$ должен быть равным:

$$i = \frac{m \cdot l_{\text{ЦМ}} \cdot 1,5 \cdot g - G_y \cdot \alpha_{\text{раб}}}{2 \cdot B \cdot l_{\text{ПР}} \cdot l_{\text{ОС}}} \quad (1.23)$$

Подставив численные значения, получим, что $i = 1,86$ мА.

Соответственно исходя из того что максимальное выходное напряжение должно быть 5 В можно рассчитать исходя из закона Ома нагрузочный резистор по формуле:

$$R_{\text{Н}} = \frac{5 \text{ В}}{1,86 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 2688 \text{ Ом}$$

Рассчитаем момент ДМ.

Момент, развиваемый датчиком момента, определяется по формуле:

$$M = 2 \cdot B_p \cdot l_{\text{ПР}} \cdot l_{\text{ОС}} \cdot i = K \cdot i, \quad (1.24)$$

где $B_p, l_{\text{ПР}}, l_{\text{ОС}}$ - индукция в рабочем зазоре, длина провода, расстояние от оси качения до точки приложения силы ДМ;

i – ток, подаваемый на датчик момента.

Можно записать момент ДМ как $M = 0,0197 \cdot i$.

Находим зависимость момента возникающего в ДМ от проходящего тока таблица 1.6.

Таблица 1.6 – Зависимость момента ДМ от проходящего тока

$i \cdot 10^{-3}, \text{ А}$	0	0,5	1	1,5	2
$M \cdot 10^{-5}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	0,98	1,97	2,96	3,95

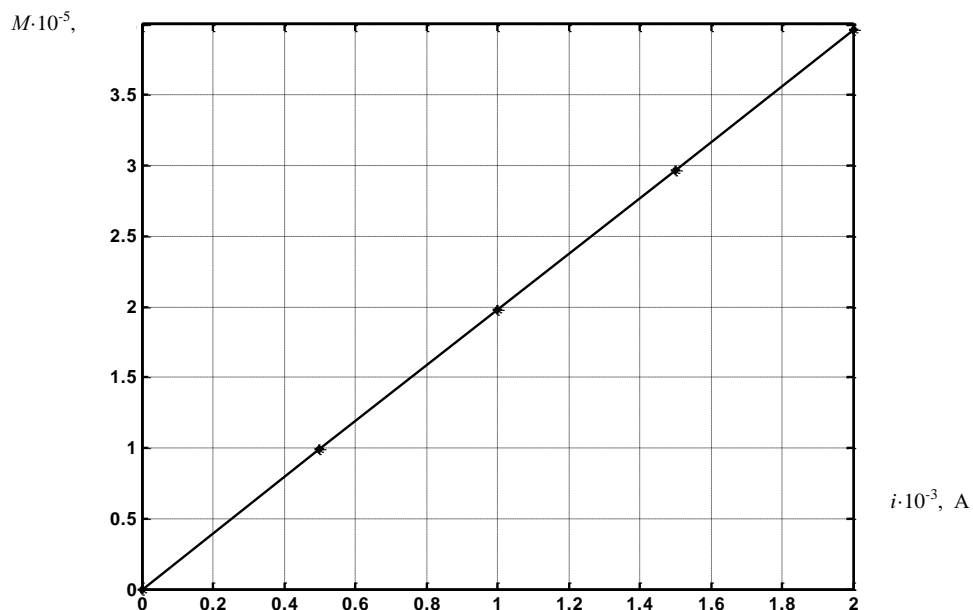


Рисунок 19 – Момент, развиваемый катушками

5.4 Расчёт блока сервисной электроники

Сервисная электроника проектируемого ММА, в отличие от аналогичных изделий представляет собой более интегрированную структуру. Усилитель-преобразователь, (может быть реализован на ситалловой плате-подложке) представляет собой преобразователь, реализованный по технологии ГИС. На плате присутствуют бескорпусные электрорадиоэлементы, напыленные резистивные и проводящие слои и специальная БИС 5515XT1АН2. В специальной БИС реализованы множество элементов схемы, что снижает трудоемкость изготовления усилителя-преобразователя и увеличивает его надежность. Усилитель-преобразователь имеет 5 функциональных узлов (см. рисунок 1.23)

Широтно-импульсный модулятор измерительной схемы (ШИМ) на RS-триггере Т и двух КМОП-ключах К1, К2, управляемых триггером и поочередно разряжающих измерительные емкости С1, С2 на общую шину “0”. ШИМ, представляющий собой генератор прямоугольных импульсов ГПИ с парафазным выходом, “опрашивает” измерительные емкости ЧЭ и выдает по двум каналам прямоугольные импульсы одинаковой частоты $f_{\text{ШИМ}} \approx 500$ кГц, но разной длительности, прямо пропорциональной этим емкостям. Таким образом, меняется скважность импульсов.

Пассивные низкочастотные RC-фильтры НЧФ ($R_{\text{ф}}$, $C_{\text{ф}}$), преобразующие прямоугольные импульсы на выходах ШИМ в постоянное напряжение, прямо пропорциональное длительности импульса.

Инструментальный (измерительный) усилитель, реализован на трех операционных усилителях ОУ: входные каскады неинвертирующие, прецизионные по нулевому смещению DA1, DA2, выходной каскад – быстродействующий ОУ DA3.

Двухтактный усилитель мощности УМ VT1 ($n-p-n$) и VT2 ($p-n-p$), охваченный локальной отрицательной обратной связью оконечного ОУ DA3 для повышения устойчивости, необходим для выдачи в цепь ДМОС большого тока для компенсации ГООС инерционного момента маятника ЧЭ при действии измеряемого ускорения, поскольку максимальный выходной ток DA3 недостаточен для запитывания им катушек ГООС.

Датчик температуры, реализованный на инвертирующем ОУ, на вход которого подается опорное напряжение $U_{\text{оп}} = + 6,4$ В, а коэффициент передачи усилителя является термочувствительным $U_{\text{вых т/д}} = - K_{\text{м}}(T) \cdot U_{\text{оп}}$, так как в отрицательную обратную связь включены четыре транзистора с закороченными переходами “база-коллектор” в режиме прямосмещенных термочувствительных $p-n$ -переходов «база-эмиттер» (диодов).

Рассчитаем источник опорного напряжения, предварительно рассчитав датчик температуры показанный на рисунке 20.

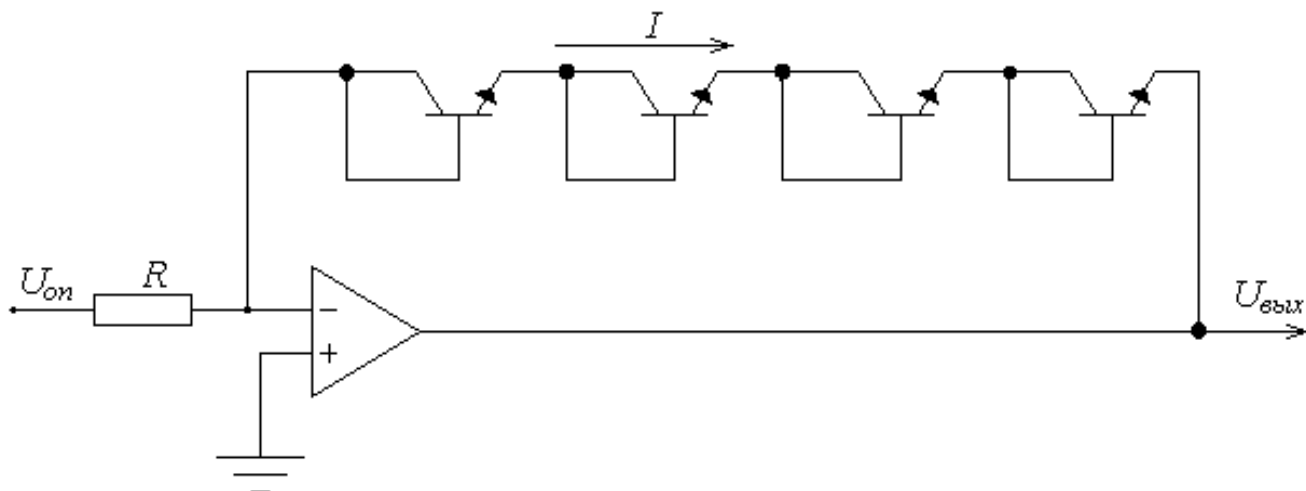


Рисунок 20 – Датчик температуры

При $I = const$ падение напряжения на базо-эмиттерном переходе в нормальных климатических условиях будет равно:

$$U_{бэ} \approx 0,67 \text{ В}, \quad U_{общ} \approx -2,68 \text{ В}.$$

Коэффициенты термочувствительности базо-эмиттерных переходов равны:

$$k_{бэ} = 2,0 \frac{\text{мВ}}{^{\circ}\text{C}}, \quad k_{общ} = 8,0 \frac{\text{мВ}}{^{\circ}\text{C}}.$$

При этом ток I можно определить по формуле:

$$I \approx \frac{U_{оп}}{R} = \frac{6,4}{30 \cdot 10^3} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

После этого необходимо рассчитать передаточную функцию усилителя преобразователя (УП).

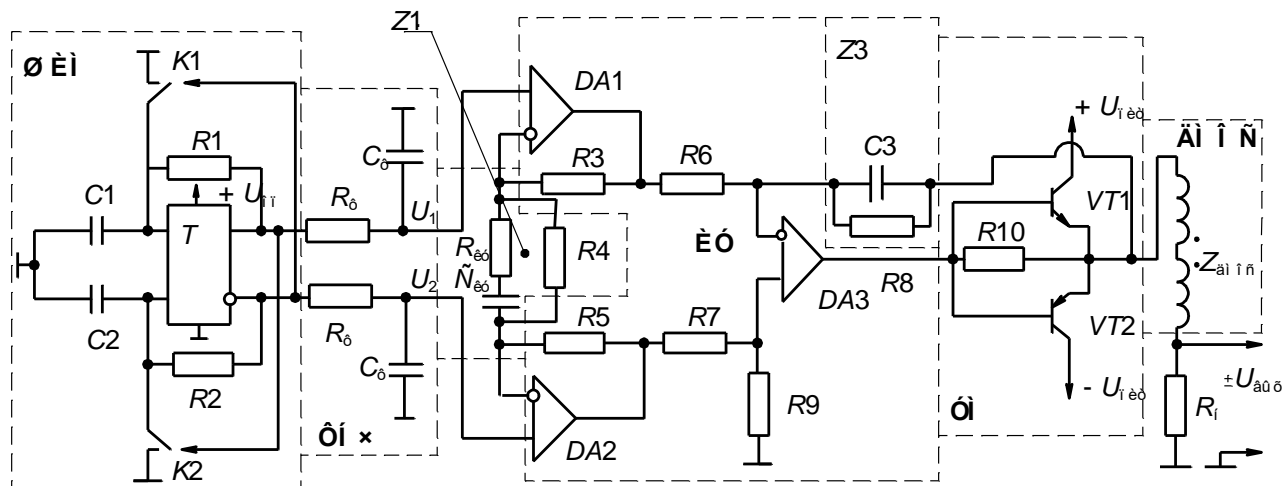


Рисунок 21 – Функциональная электрическая схема УП

Напряжения на выходе пассивных низкочастотных фильтров:

$$\begin{aligned}
U_1 &= \frac{\tau_1}{T} U_{\text{оп}} = \frac{C_1 R_1}{C_2 R_2 + C_1 R_1} U_{\text{оп}} = \left\{ \begin{matrix} R_1 = \\ = R_2 \end{matrix} \right\} = \frac{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 - x}}{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 + x} + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 - x}} U_{\text{оп}} = \\
&= \frac{\frac{U_{\text{оп}}}{d_0 - x}}{\frac{1}{d_0 + x} + \frac{1}{d_0 - x}} = \frac{\frac{U_{\text{оп}}}{d_0 - x}}{\frac{(d_0 - x) + (d_0 + x)}{(d_0 + x) \cdot (d_0 - x)}} = \frac{(d_0 + x) U_{\text{оп}}}{2 d_0} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{x}{d_0} \right) U_{\text{оп}},
\end{aligned} \tag{1.25}$$

$$\begin{aligned}
U_2 &= \frac{\tau_2}{T} U_{\text{оп}} = \frac{C_2 R_2}{C_2 R_2 + C_1 R_1} U_{\text{оп}} = \left\{ \begin{matrix} R_1 = \\ = R_2 \end{matrix} \right\} = \frac{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 + x}}{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 + x} + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 - x}} U_{\text{оп}} = \\
&= \frac{\frac{U_{\text{оп}}}{d_0 + x}}{\frac{1}{d_0 + x} + \frac{1}{d_0 - x}} = \frac{\frac{U_{\text{оп}}}{d_0 + x}}{\frac{(d_0 - x) + (d_0 + x)}{(d_0 + x) \cdot (d_0 - x)}} = \frac{(d_0 - x) U_{\text{оп}}}{2 d_0} = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{x}{d_0} \right) U_{\text{оп}}.
\end{aligned} \tag{1.26}$$

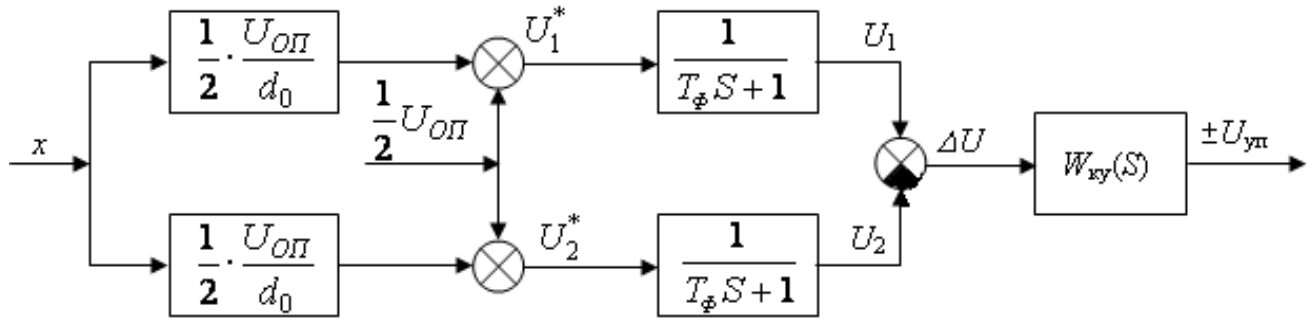


Рисунок 22 – Структурная схема усилителя преобразователя

Разность напряжений между каналами, образующая алгоритм измерения (дифференциально-логометрический):

$$\begin{aligned}
\Delta U &= U_1 - U_2 = \frac{C_1 R_1}{C_2 R_2 + C_1 R_1} \cdot U_{\text{оп}} - \frac{C_2 R_2}{C_2 R_2 + C_1 R_1} \cdot U_{\text{оп}} \\
&= \frac{C_1 R_1 - C_2 R_2}{C_2 R_2 + C_1 R_1} \cdot U_{\text{оп}} = \left\{ \begin{matrix} R_1 = \\ = R_2 \end{matrix} \right\} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \cdot U_{\text{оп}} \equiv \frac{x}{d_0} \cdot U_{\text{оп}},
\end{aligned} \tag{1.27}$$

где x – перемещение подвижного узла.

Выражение для выходного напряжения усилителя преобразователя УП будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
U_{\text{УП}} &= \frac{z_2}{R_6} \cdot \left(\frac{R_3 + R_5}{z_1} + 1 \right) \cdot \left(\frac{U_1 - U_2}{T_\Phi S + 1} \right) = \frac{R_8}{R_6 \cdot (C_3 R_8 j\omega + 1)} \cdot \frac{\Delta U}{j\omega T_\Phi + 1} \times \\
&\times \left(\frac{R_3 + R_5}{R_4} \cdot \frac{j\omega C_{\text{КУ}} (R_{\text{КУ}} + R_4) + 1}{j\omega C_{\text{КУ}} R_{\text{КУ}} + 1} + 1 \right) = \left\{ \begin{array}{l} \text{далее без} \\ \text{учета } T_\Phi S + 1 \end{array} \right\} = \\
&= \frac{R_8}{R_6} \cdot \frac{1}{C_3 R_8 j\omega + 1} \cdot \left(\frac{R_3 + R_5}{R_4} \cdot \frac{j\omega C_{\text{КУ}} (R_{\text{КУ}} + R_4) + 1}{j\omega C_{\text{КУ}} R_{\text{КУ}} + 1} + 1 \right) \cdot \frac{\Delta U}{j\omega T_\Phi + 1} = \\
&= \left\{ \begin{array}{l} j\omega = \\ = S \end{array} \right\} = \frac{k_2 \Delta U}{T_2 S + 1} \cdot \left(k_1 \cdot \frac{\tau_1 S + 1}{\tau_2 S + 1} + 1 \right) \\
U_{\text{УП}} &= \frac{1}{1,8 \cdot 10^{-6} S + 1} \cdot \left(6,5 \cdot \frac{9,9 \cdot 10^{-5} S + 1}{3,3 \cdot 10^{-5} S + 1} + 1 \right) \cdot \Delta U,
\end{aligned} \tag{1.28}$$

где $k_{\text{СТ УП}} = 7,5$.

Передаточная функция усилителя преобразователя УП:

$$W_{\text{УП}}(S) = \frac{U_{\text{УП}}(S)}{X(S)} = \frac{k_2}{T_2 S + 1} \cdot \left(k_1 \cdot \frac{\tau_1 S + 1}{\tau_2 S + 1} + 1 \right) \cdot \frac{U_{\text{ОП}}}{d_0}; \tag{1.29}$$

$$W_{\text{УП}}(S) = \frac{800000}{1,8 \cdot 10^{-6} S + 1} \cdot \left(6,5 \cdot \frac{9,9 \cdot 10^{-5} S + 1}{3,3 \cdot 10^{-5} S + 1} + 1 \right),$$

где $k_{\text{СТ УП}} = 6000000 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ – с учётом датчика перемещения.

С учётом пассивных низкочастотных фильтров ШИМ–преобразователя получим следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{УП}}(S) = \frac{U_{\text{УП}}(S)}{X(S)} = \frac{k_2}{T_2 S + 1} \cdot \left(k_1 \cdot \frac{\tau_1 S + 1}{\tau_2 S + 1} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_\Phi S + 1} \cdot \frac{U_{\text{ОП}}}{d_0} \tag{1.30}$$

$$W_{\text{УП}}(S) = \frac{1}{1,8 \cdot 10^{-6} S + 1} \cdot \left(6,5 \cdot \frac{9,9 \cdot 10^{-5} S + 1}{3,3 \cdot 10^{-5} S + 1} + 1 \right) \cdot \frac{1}{7,5 \cdot 10^{-6} S + 1} \cdot \frac{6,4}{8 \cdot 10^{-6}},$$

где частоты сопряжения (величины, обратные постоянным времени):

$$f_\Phi = \frac{1}{2\pi T_\Phi}; \quad f_{\text{ДАЗ}} = \frac{1}{2\pi T_2}; \quad f_{\text{1КУ}} = \frac{1}{2\pi \tau_1}; \quad f_{\text{2КУ}} = \frac{1}{2\pi \tau_2}. \tag{1.31}$$

Численно частоты сопряжения равны:

$$f_\Phi = 21231 \text{ Гц}; \quad f_{\text{ДАЗ}} = 88464 \text{ Гц}; \quad f_{\text{1КУ}} = 1608 \text{ Гц}; \quad f_{\text{2КУ}} = 4825 \text{ Гц}.$$

6 Полная математическая модель канала измерения ускорений

На рисунке 23 представлена структурная схема проектируемого канала ТБАКТ.

По этой структурной схеме найдём полную математическую модель измерения ускорения проектируемого ММА.

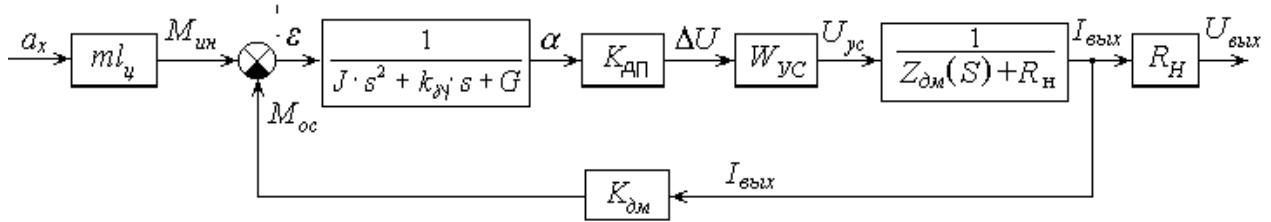


Рисунок 23 – Структурная схема ММА

На рисунке 23 введены следующие обозначения:

a_x – действующее ускорение,

$M_{ин}, M_{ос}$ – момент инерции и компенсационный момент,

ε – рассогласование,

α – угол отклонения маятника,

ΔU – напряжение, снимаемое с датчика перемещения,

$U_{ус}$ – выходное напряжение усилителя,

$I_{вых}$ – ток, подаваемый в катушки датчика момента,

$U_{вых}$ – выходное напряжение для акселерометра,

$l_{ц}$ – плечо маятника,

J – момент инерции,

$K_{д\gamma}$ – коэффициент демпфирования,

G_y – жесткость подвеса,

$W_{ус}$ – передаточная функция усилителя,

R_H – сопротивление нагрузки,

$Z_{дм}$ – комплексное сопротивление катушек датчика момента.

Полную передаточную функцию канала БДЛУ можно найти по следующей формуле:

$$W_{длу}(s) = \frac{ml_{цм} W_{пр.ц}(s) R_H}{1 + W_{пр.ц}(s) K_{дм}}, \quad (1.32)$$

$$W_{пр.ц}(s) = \frac{K_{дп} W_{ус}(s)}{(Js^2 + K_{д\gamma} s + G_y) \cdot (Z_{дм}(s) + R_H)}, \quad (1.33)$$

т.к. $K_{дп} W_{ус}(s) = W_{уп}(s)$, а $Z_{дм}(s) = R_{дм} + L_{дм} s$, где $L_{дм} s$ – пренебрежительно мало, то перепишем общую передаточную функцию канала измерения ТБАКТ:

$$\begin{aligned}
W_{\text{дл}}(S) &= \frac{\frac{ml_{\text{цм}} W_{\text{уп}}(S) R_{\text{н}}}{(JS^2 + K_{\text{д}} S + G_{\text{в}}) \cdot (R_{\text{дм}} + R_{\text{н}})}}{1 + \frac{W_{\text{уп}}(S) K_{\text{дм}}}{(JS^2 + K_{\text{д}} S + G_{\text{в}}) \cdot (R_{\text{дм}} + R_{\text{н}})}} = \\
&= \frac{ml_{\text{цм}} W_{\text{уп}}(S) R_{\text{н}}}{(JS^2 + K_{\text{д}} S + G_{\text{в}}) \cdot (R_{\text{дм}} + R_{\text{н}}) + W_{\text{уп}}(S) K_{\text{дм}}} = \\
&= \frac{ml_{\text{цм}} \frac{k_2}{T_2 S + 1} \cdot \left(k_1 \cdot \frac{\tau_1 S + 1}{\tau_2 S + 1} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_{\text{ф}} S + 1} \cdot \frac{U_{\text{оп}}}{d_0} \cdot R_{\text{н}}}{(JS^2 + K_{\text{д}} S + G_{\text{в}}) \cdot (R_{\text{дм}} + R_{\text{н}}) + \frac{k_2}{T_2 S + 1} \cdot \left(k_1 \cdot \frac{\tau_1 S + 1}{\tau_2 S + 1} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_{\text{ф}} S + 1} \cdot \frac{U_{\text{оп}}}{d_0} K_{\text{дм}}}, \quad (1.34)
\end{aligned}$$

где $m = 5,3 \cdot 10^{-4}$ кг,

$l_{\text{цм}} = 4,73 \cdot 10^{-3}$ м,

$k_1 = 6,5$,

$k_2 = 1$,

$\tau_1 = 9,9 \cdot 10^{-5}$ с,

$\tau_2 = 3,3 \cdot 10^{-5}$ с,

$T_2 = 1,8 \cdot 10^{-6}$ с,

$T_{\text{ф}} = 7,5 \cdot 10^{-6}$ с,

$U_{\text{оп}} = 6,4$ В,

$d_0 = 8 \cdot 10^{-6}$ м,

$J = 1,53 \cdot 10^{-8}$ кг·м²,

$K_{\text{д}} = 5,07 \cdot 10^{-3}$ м/с,

$G_{\text{в}} = 3,76 \cdot 10^{-4}$ Н м/рад,

$R_{\text{дм}} = 162$ Ом,

$R_{\text{н}} = 2688$ Ом,

$K_{\text{дм}} = 2 \cdot B_{\text{р}} \cdot l_{\text{пр}} \cdot l_{\text{ос}} = 0,0197$.

Подставив численные значения в формулу 1.34, получим:

$$W_{\text{дл}}(S) = \frac{0,34 \cdot (9,02 \cdot 10^{-5} S + 1)}{1,58 \cdot 10^{-25} S^5 + 1,66 \cdot 10^{-19} S^4 + 5,29 \cdot 10^{-14} S^3 + 5,35 \cdot 10^{-9} S^2 + 2,08 \cdot 10^{-4} S + 1}.$$

По этой передаточной функции при помощи пакета программ *Matlab* 6.5 на ЭВМ, построим переходный процесс:

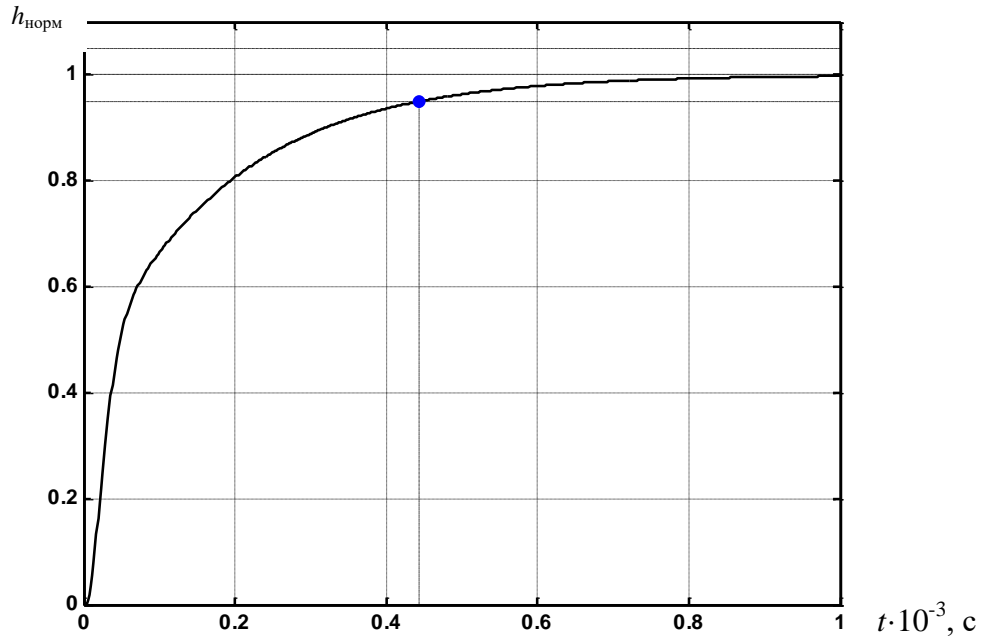


Рисунок 24 – Переходный процесс

По графику найдём время переходного процесса. Время переходного процесса определяем в момент последнего пересечения графика с 5-ти процентной трубкой точности. Таким образом, время переходного процесса равно: $t_{п.п.} = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, перерегулирование отсутствует.

Найдём передаточную функцию разомкнутой системы:

$$W_{\text{раз}}(S) = \frac{ml_{\text{цм}} K_{\text{дп}} W_{\text{yc}}(S)}{(JS^2 + K_{\text{дв}}S + G_{\text{в}})}, \quad (1.35)$$

так как $K_{\text{дп}} W_{\text{yc}}(S) = W_{\text{уп}}(S)$, то перепишем разомкнутую передаточную функцию ДЛУ в виде:

$$\begin{aligned} W_{\text{раз}}(S) &= \frac{ml_{\text{цм}} W_{\text{уп}}(S)}{(JS^2 + K_{\text{дв}}S + G_{\text{в}})} = \\ &= \frac{ml_{\text{цм}} \frac{k_2}{T_2 S + 1} \cdot \left(k_1 \cdot \frac{\tau_1 S + 1}{\tau_2 S + 1} + 1 \right) \cdot \frac{1}{T_{\Phi} S + 1} \cdot \frac{U_{\text{оп}}}{d_0}}{(JS^2 + K_{\text{дв}}S + G_{\text{в}})} \end{aligned} \quad (1.36)$$

Подставив численные значения в формулу 1.36, получим:

$$W_{\text{раз}}(S) = \frac{39963,84 \cdot (9,02 \cdot 10^{-5} S + 1)}{1,80 \cdot 10^{-20} S^5 + 1,90 \cdot 10^{-14} S^4 + 6,03 \cdot 10^{-9} S^3 + 6,10 \cdot 10^{-4} S^2 + 13,47 S + 1}.$$

По этой передаточной функции, с помощью пакета программ *Matlab 6.5*

на ЭВМ, построим ЛАЧХ, ЛФЧХ:

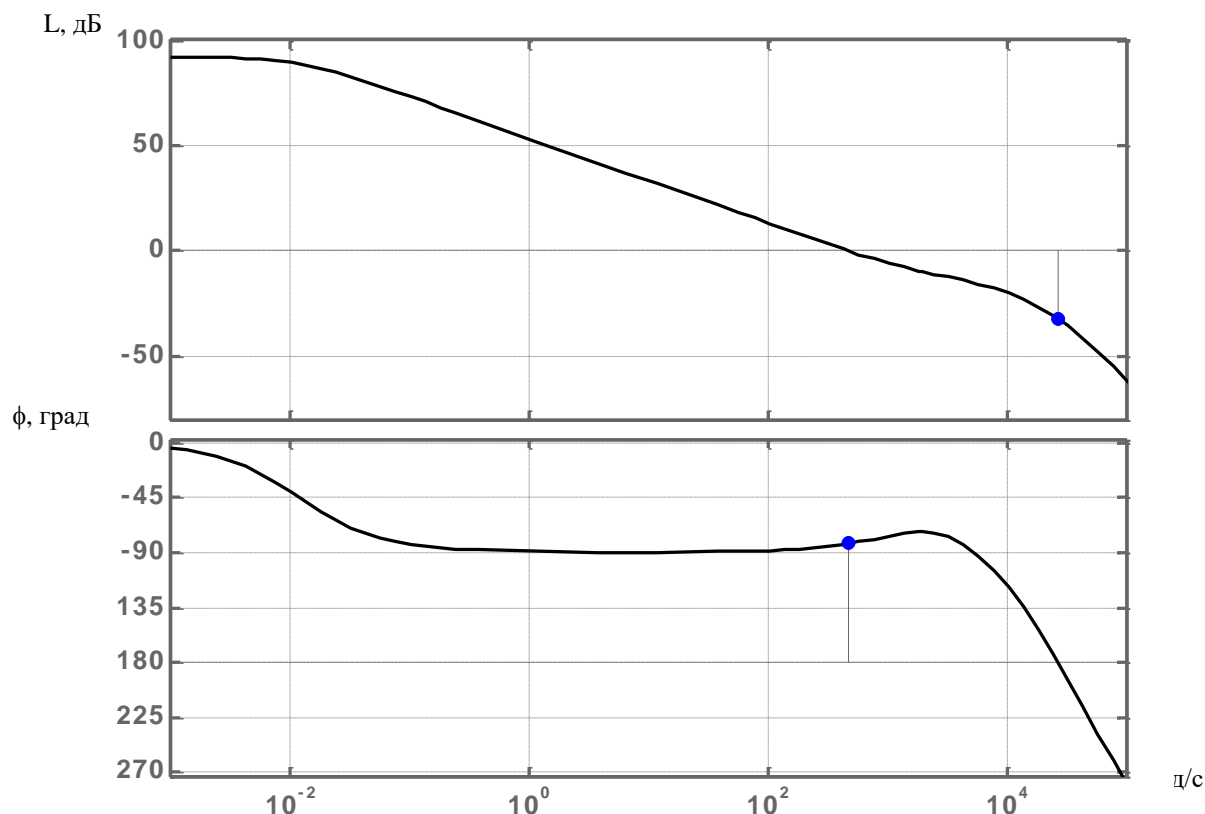


Рисунок 25 – ЛАЧХ и ЛФЧХ

По графику определим запас по фазе, запас по амплитуде и полосу пропускания. Запас по фазе определяем в момент пересечения графика ЛАЧХ с нулём, запас по амплитуде определяем в момент пересечения графика ЛФЧХ с прямой в 180° , а полосу пропускания определяем в момент равенства амплитуды минус 3 dB . Т.о. запас по фазе равен $97,2^\circ$, запас по амплитуде равен 34 dB , а полоса пропускания равна 95 Гц .

Статический коэффициент передачи определяется по формуле:

$$K_{\text{СТ}} = \lim_{S \rightarrow 0} W_{\text{ДЛУ}}(S) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{A}. \quad (1.37)$$

Исходя из (1.37) получаем выражение для выходного напряжения:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{СТ}} \cdot A. \quad (1.38)$$

График зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(A)$ представлен на рисунке 26.

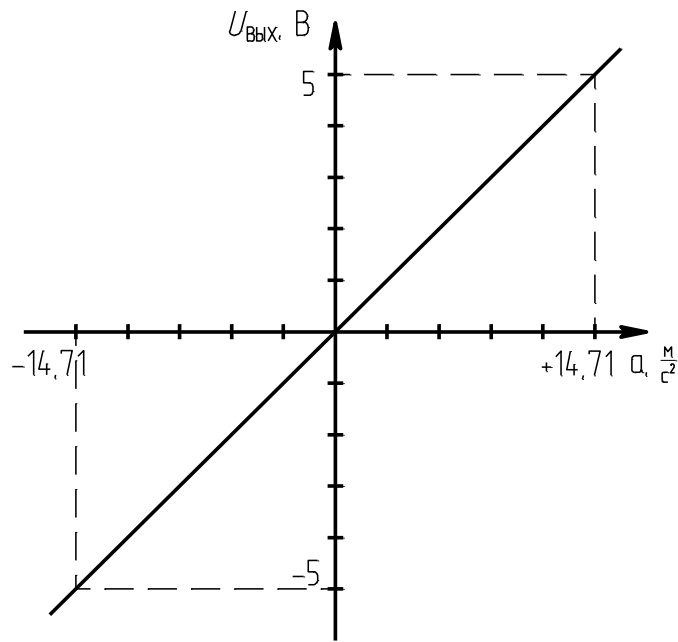


Рисунок 26 – График статической характеристики

7 Анализ погрешностей

7.1 Общая математическая модель статических погрешностей ММА

Выходной сигнал датчика линейных ускорений по напряжению в общем виде:

$$U_{\text{вых}} = k_0 + k_1 \cdot a_x + k_2 \cdot a_x^2 + k_3 \cdot a_x^3 + \dots + k_n \cdot a_x^n + \Delta_y \cdot a_y + \Delta_z \cdot a_z + k_{xy}(a_x) \cdot a_y + k_{xz}(a_x) \cdot a_z, \quad (1.39)$$

где $a_x = a_{\text{изм}}$ – измеряемое линейное ускорение,

a_y, a_z – линейные ускорения по неизмерительным осям (боковые ускорения),

$k_0 = U_0$ – выходной сигнал прибора при отсутствии измеряемого ускорения (нулевой сигнал),

$k_1 = K_{\text{СТ}}$ – статический коэффициент передачи (крутизна статической характеристики),

$k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ – коэффициенты нелинейностей 2-ого, 3-его и т. д. порядков статической характеристики,

Δ_y, Δ_z – коэффициенты погрешностей базирования чувствительного элемента (ЧЭ) по неизмерительным осям y и z ,

k_{xy}, k_{xz} – коэффициенты перекрестной чувствительности (перекрестные связи).

Маятниковый акселерометр является прибором компенсационного типа. Диапазон рабочих температур ΔT_p от минус 50°C до 80°C (по ТЗ).

7.2 Расчёт погрешности от перекрестных связей.

Из-за нежёсткости восстанавливающей системы электрической пружины маятника он отклоняется на небольшой угол, определяемый коэффициентом

податливости системы, что приводит к измерению акселерометром проекции ускорения действующего по неизмерительной оси $a_z \cdot \sin \alpha$. Составляющая ускорения $a_z \cdot \sin \alpha$ проявляется как вредный момент, пропорциональный углу отклонения маятника от вертикали.

Поскольку контурный коэффициент акселерометра имеет достаточно большое значение, то с высокой точностью статическая характеристика прибора по напряжению определяется выражением $U_{\text{ВЫХ}} = a_x \frac{ml_{\text{ЦМ}}}{K_{\text{ДМ}}} R_H = K_{\text{СТ}U} \cdot a_x$. Выходной сигнал, обусловленный наличием перекрестной чувствительности к линейным ускорениям:

$$U_{\text{ПЕР}} = k_{xz}(a_x) \cdot a_z = K_{\text{СТ}U} \cdot \sin \alpha_{\text{раб}} \cdot a_z \approx a_z \frac{ml_{\text{ЦМ}}}{K_{\text{ДМ}}} R_H \cdot \alpha_{\text{раб}} = a_z \frac{ml_{\text{ЦМ}}}{2B_p l_K l_{\text{ОС}}} R_H \cdot \alpha_{\text{раб}} \quad (1.40)$$

Численно выходной сигнал от перекрестных связей (при действии перекрестного ускорения равного по величине диапазону измерений) составит $U_{\text{ПЕР}} = 0,8 \text{ мВ}$, что составляет $\delta_{\text{ПЕР}} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{5} \cdot 100 \% = 0,017 \%$ от номинального максимального выходного напряжения.

7.3 Расчет погрешности базирования ЧЭ

Т. к. по ТЗ максимальная погрешность базирования не должна превышать $\alpha_6 = 0,01 \text{ рад}$, то чувствительность к линейным ускорениям по неизмерительным осям y и z :

$$\Delta_{y \text{ max}} = \Delta_{z \text{ max}} = K_{\text{СТ}} \cdot \cos(90 - \alpha_6) = K_{\text{СТ}} \cdot \sin(\alpha_6), \quad (1.41)$$

$$\text{откуда } \Delta_{y,z \text{ max}} = K_{\text{СТ}} \cdot \sin(0,01) \approx 0,01 \cdot K_{\text{СТ}}.$$

$$K_{\text{СТ}} = \frac{ml_{\text{ЦМ}}}{K_{\text{ДМ}}} R_H, \quad (1.42)$$

$$\text{Численно: } K_{\text{СТ}} = 0,34, \Delta_{y,z \text{ max}} = 3,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{В} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}.$$

При условии, что ускорения по боковым осям равны максимальному измеряемому ускорению (диапазону измерения) суммарная относительная погрешность базирования:

$$\delta_{\Delta\Sigma} = 2 \cdot \delta_{\Delta y,z \text{ max}} = 2 \frac{K_{\text{СТ}} \cdot a_{y,z} \cdot \sin(\alpha_6)}{K_{\text{СТ}} \cdot a_{\text{ИЗМ}}} = 2 \cdot \sin(\alpha_6) \cdot 100 \% , \quad (1.43)$$

$$\text{откуда } \delta_{\Delta\Sigma} = 2 \cdot \sin(0,01) \cdot 100 \% \approx 2 \% .$$

7.4 Расчет нулевого сигнала.

Нулевой сигнал складывается из величин $U_{0 \text{ ЭЛ}}$ и $U_{0 \text{ ЧЭ}}$.

$$U_{0 \text{ ЭЛ}} = \frac{U_{\Sigma \text{ ОП0}} + U_{0 \text{ ЭКС}}}{K_{\text{КОН}}}, \quad (1.44)$$

где $U_{\Sigma \text{ ОП0}}$ – нулевой сигнал от операционных усилителей,

$U_{0ЭКС}$ – экспериментальная величина,

$K_{\text{кон}}$ – контурный коэффициент.

Нулевой сигнал от электроники $U_{0ЭЛ} = 17$ мВ.

Нулевой сигнал от $\alpha_{\text{нач}}$: $U_{0ЧЭ} = 83$ мВ.

Начальный угол отклонения $\alpha_{\text{нач}}$ возникает из-за несимметричности маятника (рисунок 27.).

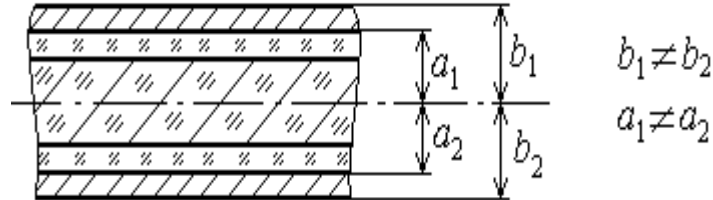


Рисунок 27 – Структура ЧЭ

Несимметричность маятника возникает из-за невозможности создать слои одинаковой толщины, а т.к. температурный коэффициент у кремния, стекла и алюминия разные, и создание этих слоёв происходит при повышенной температуре, то после окончания технологических процессов и доведения температуры кристалла до температуры $T_{\text{ну}} = 20$ °C, появится начальный угол $\alpha_{\text{нач}}$.

При $\alpha_{\text{раб}} = 0,000175$ рад выходной сигнал $U_{\text{вых1}}$ равен 5 В, тогда при выходном сигнале $U_{\text{вых2}}$, равном 83мВ величина $\alpha_{\text{нач}}$ будет равна:

$$\alpha_{\text{нач}} = \frac{\alpha_{\text{раб}} \cdot U_{\text{вых 2}}}{U_{\text{вых 1}}} \quad (1.45)$$

Таким образом. $\alpha_{\text{нач}} = 2,9 \cdot 10^{-6}$ рад, что составляет 1,66 % от рабочего угла $\alpha_{\text{раб}}$.

7.5 Расчет погрешности от температурного изменения крутизны статической характеристики

Максимально возможный статический коэффициент передачи прибора (крутизна статической характеристики) для диапазона измерения $a_{\text{изм max}} = 1,5$ g равен $K_{\text{ст}} = 0,34$.

Относительное температурное изменение крутизны ξ статической характеристики:

$$\xi = \frac{\Delta K_{\text{ст}}(T)}{K_{\text{ст}}} \cdot 100 \%, \quad (1.46)$$

где абсолютное изменение крутизны – разложение статического коэффициента передачи в ряд Тейлора:

$$\Delta K_{\text{ст}}(T) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial (\lim_{S \rightarrow 0} W_{\text{ДЛУ}}(S))}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \equiv \sum_{i=1}^n \frac{\partial K_{\text{ст}}}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i, \quad (1.47)$$

где приращение варьируемого параметра $\Delta x_i = \alpha_{Ti} \cdot x_i \cdot \Delta T$, α_{Ti} – его температурный коэффициент изменения.

Коэффициент крутизны статической характеристики в нашем случае определится формулой:

$$K_{CT} = \frac{m \cdot l_{ЦМ} \cdot R_H}{2 \cdot B \cdot l_{IP} \cdot l_{OC}} \quad (1.48)$$

Частные производные по каждому параметру (коэффициенты влияния) с приращениями:

$$\frac{\partial K_{CT}}{\partial l_{IP}} \cdot \Delta l_{IP} = -\frac{m R_H}{2 \cdot B_p \cdot l_{IP}^2} \cdot \alpha_{\text{ткр } Cu} \cdot l_{IP} \cdot \Delta T, \quad (1.49)$$

$$\frac{\partial K_{CT}}{\partial B_p} \cdot \Delta B_p = -\frac{m R_H}{2 \cdot B_p^2 \cdot l_{IP}} \cdot \alpha_B \cdot B_p \cdot \Delta T, \quad (1.50)$$

Окончательное выражение для относительного температурного изменения крутизны статической характеристики:

$$\frac{\Delta K_{CT}(T)}{\Delta K_{CT}} = -\frac{\Delta l_{IP}}{l_{IP}} - \frac{\Delta B_p}{B_p} = -\alpha_{\text{ткр } Cu} \cdot \Delta T - \alpha_B \cdot \Delta T = \Delta T (-\alpha_{\text{ткр } Cu} - \alpha_B). \quad (1.51)$$

Т.о. относительное температурное изменение крутизны ξ статической характеристики:

$$\xi(100^\circ C) = 100 \cdot (-16,7 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-4}) \cdot 100 \% = 0,83 \%$$

7.6 Математическая модель выходного сигнала ММА

Таким образом математическая модель выходного сигнала акселерометра может быть представлена в виде:

$$U_{\text{ВЫХ}}(T) = U_0(T) + K_{CT} \cdot (1 + \alpha_{\text{ткк}} \cdot \Delta T) \cdot a_{\text{изм}} + \Delta_{\Sigma} \cdot (1 + \alpha_{\text{ткб}} \cdot \Delta T) \cdot a_{y,z} + k_{xy,xz}(a_x) \cdot a_{y,z}, \quad (1.52)$$

где температурный коэффициент базирования ЧЭ $\alpha_{\text{ткб}}$ – случайная величина, зависящая от технологических факторов, и его среднеквадратическое отклонение можно определить статистической обработкой результатов экспериментальных исследований ближайшего аналога – АТ1104, температурный коэффициент крутизны статической характеристики:

$$\alpha_{\text{ткк}} = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ C.$$

7.7 Результаты расчета

Величина нулевого сигнала от ЧЭ составляет $U_0(T) = 83 \text{ мВ}$. Максимальный коэффициент термочувствительности нулевого смещения усилителя-преобразователя УП $N_{0 \text{ УП}} = \pm 0,144 \text{ мВ}/^\circ C$ в диапазоне рабочих температур $T_p = \text{минус } 50^\circ C \text{ до } 120^\circ C$ относительно нормальных климатических условий $T_{HY} = 20^\circ C$. Максимальная относительная температурная погрешность масштаба (крутизны) $\xi \approx 0,83 \%$ в диапазоне рабочих температур $T_p = \text{минус } 50^\circ C \text{ до } 120^\circ C$ относительно нормальных климатических условий $T_{HY} = 20^\circ C$, температурный коэффициент масштаба $\alpha_{\text{ткк max}} \approx 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ C$. Максимальная суммарная погрешность базирования ЧЭ прибора $\delta_{\Delta \Sigma} = 2\%$. Теоретическая нелинейность статической характеристики отсутствует. Влияние пере-

крестных связей оценивается погрешностью $\delta_{\text{пер}} = 0,017 \%$. Нелинейность статической характеристики отсутствует в связи с применением чувствительного элемента компенсационного типа, дифференциального принципа измерения и работе при малом угле отклонения маятника. Так же такие параметры как нулевой сигнал, связанный с начальным отклонением маятника и погрешностью базирования учитываются при алгоритмической компенсации с помощью БЦВМ.

8 Расчет надежности датчика

Важнейшим из качественных показателей является надёжность. Надёжностью называют свойство изделия выполнять заданные функции в течении требуемого интервала времени при определённых условиях эксплуатации.

Надёжность – это физическое свойство изделия, которое зависит от принципа его построения, количества и качества содержащихся в нём элементов, от условия эксплуатации и т.д. Надёжность – требование, которому должны отвечать изделия всех видов. На надёжность изделия влияет целый ряд случайных факторов, поэтому теория надёжности основана на теории вероятности и математической статистике. Целью теории надёжности является разработка методов расчёта и обеспечения надёжности изделия. Изделия с точки зрения теории надёжности могут находиться в двух состояниях: работоспособном и неисправном.

Работоспособность – состояние изделия, при котором оно выполняет заданные функции с параметрами, оговорёнными требованиями технической документации.

Неисправность – состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному параметру, определённому технической документацией.

Оценка ожидаемого уровня надежности получена на основе применения ориентировочного метода расчета надежности изделия по исходным статистическим данным о надежности элементов. Сущность расчета сводится к определению численных значений основных критериев надежности по известным интенсивностям отказов элементов, входящих в состав изделия.

Датчик состоит из определенного количества элементов, следовательно, для расчета надежности необходимо располагать интенсивностями отказов этих элементов и знать их количество.

На надежность датчика различные типы дискретных элементов влияют по-разному и вносят различную долю отказов в их общее количество.

8.1 Исходные данные

Исходными данными для расчета количественных показателей безотказности являются:

- схемы электрические принципиальные с перечнем элементов, сборочный чертеж платы;
- данные по интенсивности отказов ЭРЭ;
- требования ТЗ;

– интенсивность отказов ЧЭ взята по аналогу ЧЭ сходного по конструкции акселерометра.

8.2 Методика расчета

Расчет проводим, используя [5]. Результаты расчета сведены в таблицу 1.7. Среднее время наработки на отказ вычисляется по формуле (1.52):

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}, \quad (1.53)$$

где λ_{Σ} – суммарная интенсивность отказов.

Таблица 1.7 - Интенсивность отказов элементов

Наименование компонента	Позиция на чертеже	Количество, n	Базовая интенсивность отказов, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	Интенсивность отказов n изделий, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч
1	2	3	4	5
K10-17-в	C1-C6	18	0,019	0,342
Спец. БИС	D1	3	0,270	0,81
Резистор напыленный	R1-R3	9	0,001	0,009

Продолжение таблицы 1.7

1	2	3	4	5
Сварка	–	69	0,00005	0,00345
Элемент чувствительный	Z1	3	0,7337	2,2011
Итого:				3,36555

$$T_0 = \frac{1}{3,36555 \cdot 10^{-6}} = 297128 \text{ ч.}$$

Минимальный ресурс изделия найдём, поделив среднее время наработки на отказ на 5: $R = 59425$ ч, что удовлетворяет техническому заданию (5000 ч).

Будем считать отсутствие внезапных отказов у элементов событиями независимыми. Тогда вероятность одновременного наступления этих событий, равная произведению их вероятностей, и будет вероятностью отсутствия внезапных отказов у прибора в целом:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (1.54)$$

где $P_i(t)$ – вероятность отсутствия внезапного отказа у i -го элемента,

t – время эксплуатации, $t = 5000$ ч.

При экспоненциальном законе распределения вероятность отсутствия внезапных отказов элементов можно представить в виде:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t}, \quad (1.55)$$

Найдём эту вероятность за время равное 10 часам:

$$P = e^{-3,36555 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 3600} = 0,9909.$$

9 Выводы

В данной пояснительной записке произведён обзор имеющихся конструкций акселерометров, сделан выбор конструкции разрабатываемого прибора, рассчитана инерционная масса, коэффициент демпфирования, жесткость упругого подвеса, магнитная система. На основании этих расчетов была составлена полная математическая модель ДЛУ, построены ЛАЧХ, ЛФЧХ и переходная характеристика. Также приведен расчет датчика перемещений, датчика момента и электрической схемы. Анализ точности проектируемого ММА, состоящий из анализа температурной погрешности нулевого сигнала и крутизны статической характеристики, показал, что суммарная погрешность не превышает значения, заданного в ТЗ. Расчёт надёжности показал, что надёжность ММА также соответствует ТЗ.

10 Примечание

Тепловой расчет конструкции ММА будет произведен после определения варианта корпусирования и выбора материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Целевая комплексная программа развития микромеханических датчиков линейных ускорений в ОАО АНПП "ТЕМП-АВИА" на 1998 - 2002 годы. Пр. 100 329. ОАО АНПП "ТЕМП-АВИА", 1997 г.
2. . ГОСТ 10160-75 Сплавы прецизионные магнито - мягкие. Технические условия.
3. Единая система конструкторской документации (основные положения). Технический проект. ГОСТ 2.120-73 (переиздание март 1995 г.). М.: ИПК Издательство стандартов, 1995 г.
4. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1970.
23. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3-х томах. М.: Мир, 1993.
5. Акустические кристаллы: справочник. Под ред. Шаскольской М. П. М.: Наука, 1982.
6. Микросборки на платах из ситалла и поликора. Стандарт предприятия СТП 7551160. 04. 142-97. ОАО АНПП "ТЕМП-АВИА", 1997 г.
7. Физические величины: справочник. Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Обоснование выбранного алгоритма преобразования для емкостного датчика линейных ускорений (прямого измерения) с чувствительным элементом маятникового типа. Отчет № РР 100-02. Составитель Рогожин А. Д. Под ред. Былинкина С. Ф. ОАО АНПП "ТЕМП-АВИА", 1999 г.
9. Расчет статических характеристик и нелинейностей емкостного датчика линейных ускорений АТ1105 с чувствительным элементом маятникового типа. Составитель Рогожин А. Д. Под ред. Былинкина С. Ф. ОАО АНПП "ТЕМП-АВИА", 1998 г.
10. Математическое моделирование поведения нелинейностей чувствительного элемента маятникового типа при коррекции геометрии обкладок. Составитель Емельянова Е. В. Под ред. Былинкина С. Ф. ОАО АНПП "ТЕМП-АВИА", 1999 г.
11. Конструирование и расчет БГИС, микросборок и аппаратуры на их основе. Под ред. Б. Ф. Высоцкого. М.: Радио и связь, 1981.
12. Шерстнев В. В. Конструирование и микроминиатюризация ЭВА. М.: Радио и связь, 1984.
13. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. М.: Советское радио, 1976.
14. Поздьяев В. И. Исследование интегральных акселерометров. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. С.-Петербург: С.-П. ИТМО, 1994. Л.Л. Роткоп, Ю.Е. Спокойный. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. М.: «Советское радио», 1976 г.

15.П.П. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Л.: «Энергоатомиздат», 1984 г.

16. . МИКРОСХЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ

на основе БМК

5515ХТ1АН2, 5515ХТ1БН2, 5515ХТ1ВН2,

5515ХТ1ГН2, 5515ХТ1ДН2 Технические условия АЕЯР.431260.747ТУ

17. 3. ТУ16-502.002-82 Провода медные эмалированные полиэфирным лаком ПЭТР.