Содержание

РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УСКОРЕНИЯ……..…4

1.1 Классификация ММА……...…….4

1.2. Обзор современных конструкций МЭМС-акселерометров…….…… 5

1.2.1 Пьезоэлектрические акселерометры……. 6

1.2.2 Пьезорезистивные акселерометры…… 8

1.2.3 Емкостные акселерометры…… 9

1.2.3.1 Сервоакселерометры……13

1.2.3.3 Технологии производства емкостных акселерометров без использования кремния……... 17

Выводы и постановка технического задания……..… 18

РАЗДЕЛ 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА…… 20

2.2 Выбор конструкции упругого подвеса…….…….….. 25

2.3 Расчет механических параметров упругого подвеса…….. 31

2.4 Выбор конструкции подвижной части ЧЭ…….. 32

2.5 Выбор конструкции электродов…….…… .. 36

2.7 Анализ температурных коэффициентов и нелинейности преобразователя 36

Выводы …… 43

РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СРЕДЕ COMSOL

MULTIPHYSICS……..…….. 45

3.1 Создание библиотеки геометрических моделей…… 45

3.2 Создание полной модели чувствительного элемента микроакселерометра…….. 57

3.3 Задание механических и электрических параметров……. 64

3.4. Дискретизация конечно-элементной модели……. 67

3.5 Проведение моделирования…….69

РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРОВ …….86

4.1 Метод тестовых испытаний акселерометра на поворотной платформе..86

4.2 Подготовка к проведению контроля параметров АК методом последовательных поворотов в гравитационном поле Земли……...88

4.3. Проведение испытания на поворотной платформе……89

РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА СТАРТАП ПРОЕКТА ……92

Общие выводы……120

Вступление

Акселерометры – это датчики линейного ускорения, которые в виду своих свойств нашли широкое применение для измерения ударных нагрузок, сил инерции и углов наклона тел. Данные датчики широко используются в различных областях науки и техники, Например, в системах навигации и управления, транспортных и летательных средствах, спорте, медицине и в большей части современной бытовой техники.

Разработка новых типов акселерометров и их модификаций является актуальной задачей.

Перспектива развития современного приборостроения тесно связана с конструированием и производством приборов, обладающих компактностью, низкой себестоимостью, большим сроком службы и низким энергопотреблением. С этой точки зрения развитие новых разновидностей микромеханических акселерометров (ММА), как по принципу действия, так и по цене, массе, рабочему диапазону и геометрическим размерам не только не теряет смысла, но и является важным путем развития современной техники для измерения механических величин.

Несмотря на то, что МЭМС – технология предполагает производство недорогих датчиков, кристаллический кремний все еще остается достаточно дорогим конструкционным материалом. А в силу того, что без исследований и испытаний практически невозможно добиться высоких результатов, на помощь конструкторам приходит программный продукт Comsol Multiphysics, позволяющий провести все необходимые этапы моделирования необходимых физических процессов без использования для этого дорогих материалов.

РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ УСКОРЕНИЯ

1.1. Классификация ММА

Принципы построения современных микромеханических акселерометров условно разделяются по таким признакам [1, 2], как:

1) наличие обратной связи:

а) акселерометр прямого действия (пружинный) – акселерометр, в котором предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении по причине разомкнутой схемы, т. е. без применения обратной связи;

б) акселерометр компенсационного типа – акселерометр, в котором осуществляется автоматическое уравновешивание инерционной силы чувствительного элемента с применением обратной связи. С точки зрения снижения относительной погрешности данный тип акселерометра имеет серьезное преимущество перед акселерометрами прямого действия.

Сила, которой производится автоматическое сбалансирование инерционных сил чувствительного элемента, поддается измерению и ее можно подкорректировать для повышения точности. Стоит заметить, что за счет уменьшения результирующей ошибки акселерометра снижается его чувствительность, так как она пропорциональна коэффициенту передачи акселерометра.

2) число измерительных осей:

а) однокомпонентный акселерометр – акселерометр с одной измерительной осью;

б) двухкомпонентный акселерометр - акселерометр с двумя взаимно перпендикулярными измерительными осями;

в) трехкомпонентный акселерометр - Акселерометр с тремя взаимно перпендикулярными измерительными осями;

3) тип деформации механического подвеса рис. 1:

а) деформации изгиба

б) деформации кручения

в) сложных деформаций

Рис.1.1 Тип деформации механического подвеса а) Деформации изгиба, б) Деформации кручения, в) Сложных деформаций

4) по форме выходного сигнала:

а) с непрерывным в виде тока или напряжения

б) с дискретным в виде цифрового или частотного сигнала

По характеру перемещения инерционной массы:

а) осевые - Акселерометры с прямолинейным перемещением чувствительного элемента в системе координат, жестко связанной с корпусом прибора.

б) маятниковые - Акселерометры с угловым перемещением чувствительного элемента в системе координат, жестко связанной с корпусом прибора [2]

Типы акселерометров по способу съема выходного сигнала:

а) пьезоэлектрические

б) пьезорезистивные

в) пьезопленочные

г) емкостные

д) струнные, магнитные (эффекта Холла, магниторезисторы и т. п.) конвекционные (тепловые акселерометры Memsic) и др.

1.2. Обзор современных конструкций МЭМС-акселерометров

Наибольший интерес на данный момент имеется в производстве пьезоэлектрических, пьезорезистивных или емкостных датчиков измерения ускорения. [2]

1.2.1. Пьезоэлектрические акселерометры

Прямой пьезоэлектрический эффект дает возможность преобразовать механическое воздействие на кварцевый кристалл или на пьезокерамический элемент. После смещения кристаллической решетки на поверхности чувствительного материала появляется пропорциональный приложенной силе электрический заряд.

Природные кристаллы кварца являются одним из наилучших материалов для пьезоэлектрических сенсорных элементов. Кварц обладает способностью работы при температурах выше 300 °C, однородной чувствительностью в температурном диапазоне, высокой прочностью, линейностью эффекта, отсутствием гистерезиса при воздействиях различного рода, высоким выходным сопротивлением порядка 1014 Ом, допускающим работу при частотах менее 1 Гц . Кварцевые пьезоэлектрические (ПЕ) элементы представляют собой одиночные пластины или конфигурации, набранные из тонких пластин, соединенных в стеки рис.2. На рис.3 приведена иллюстрация физических принципов пьезоэлектрических акселерометров. [2]

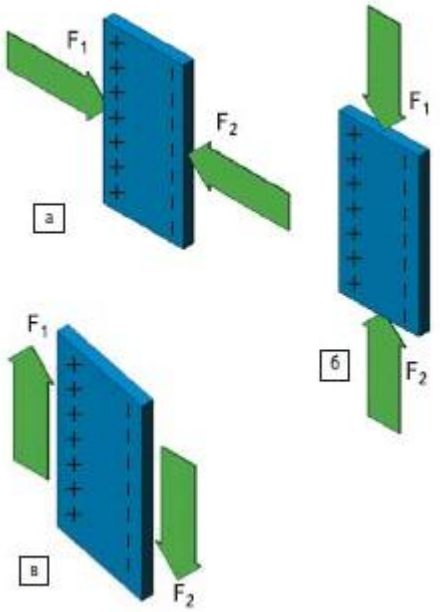


Рис. 1.2. Иллюстрации физических принципов пьезоэлектрических акселерометров: а–в — иллюстрации зависимости поляризации пьезоэлемента от направления действующей силы F: а — продольная поляризация; F1, F2 — поперечные воздействующие силы; б — поперечная поляризация; F1, F2 — вертикальные силы; в — поляризация при сдвиге; F1, F2 — силы сдвига одной поляризуемой поверхности пьезоэлемента относительно другой; [2]

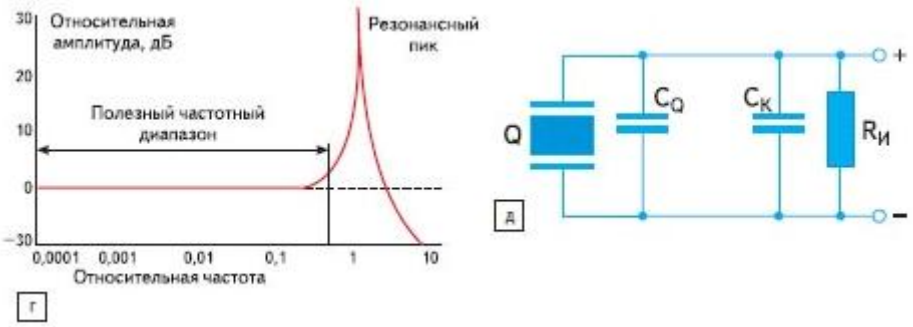


Рис. 1.3. Иллюстрации физических принципов пьезоэлектрических акселерометров: г — типичная рабочая частотная характеристика пьезоэлектрического акселерометра (иллюстрация из [2]); д — эквивалентная схема пьезоэлектрического акселерометра с высоким импедансом; [2]

Большинство ПЕ-акселерометров представляет собой устройства нерезонансного типа, рабочая частотная полоса которых ограничивается сверху

резонансной частотой ω, в модели слабодемпфируемой системы с одной степенью свободы *x*, определяемой из выражения:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Как правило, чувствительность и резонансная частота зависят от массы акселерометра. Примеры конструкции пьезоэлектрических акселерометров приведены на рис.4

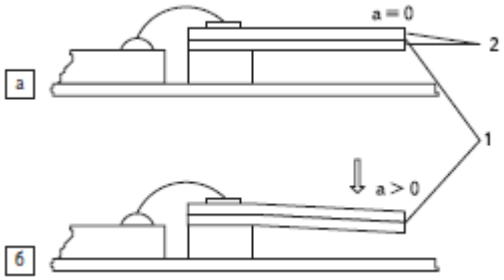


Рис. 1.4. Примеры пьезоэлектрических акселерометров: а, б — принцип работы биморфного пьезоэлектрического датчика, работающего на изгиб (концепция Bosch для аварийных натяжителей ремней и датчика неровности дороги [49]): а — в состоянии покоя; б — под действием ускорения: 1 — пьезокерамический биморфный упругий элемент, работающий на изгиб («measuring beam»); 2 — слои с антипараллельным (противоположным) направлением поляризации; а — ускорение;

Преимуществами пьезодатчиков являются высокий динамический диапазон, однородная чувствительность, точности и такие выгодные физические и геометрические свойства, как возможность реализации акселерометра с малым весом и размером.

1.2.2. Пьезорезистивные акселерометры

Для измерения ускорения в пьезорезистивных акселерометрах используются изгибаемые кремниевые резисторы также известные, как измерители механического напряжения. Конструкция подобных датчиков измерения

ускорения представляет собой одну или несколько консольных балок на которых закреплена подвижная масса. В следствие изгиба консолей сопротивление кремниевых резисторов меняется и вследствие изменения сопротивления измерительных плеч моста Уинстона посредством измерения напряжения появляется возможность детектировать воздействие ускорения на чувствительный элемент акселерометра. Благодаря особенностям конструкции пьезорезистивные МЭМС-датчики позволяют измерять статическое ускорение, что дает данному типу интеллектуальной системы преимущество перед ПЕ-акселерометрами. Из-за высоких рабочих характеристик разработка новых датчиков ускорений данного типа не теряет актуальность. [2]

На рис. 5 показана типичная пьезорезистивная МЭМС – структура. Кремниевую пластину протравливают так, чтобы инерционная масса поддерживалась на консольных балками, которые являются собой диффузионными резисторами, чувствительными к деформации.

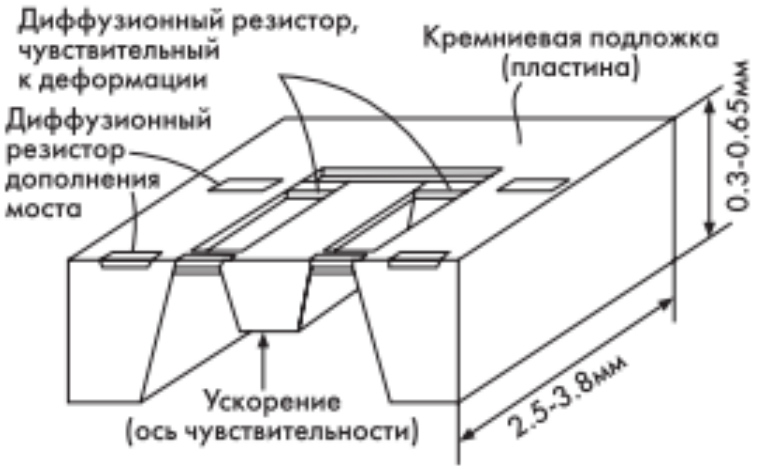


Рис. 1.5. Типичная пьезорезистивная микромеханическая структура:

Основными недостатками пьезорезистивных акселерометров являются узкий температурный диапазон и повышенная уязвимость перед механическими воздействиями, что приводит к разрушению. [2]

1.2.3. Емкостные акселерометры

Наибольшее распространение среди МЭМС-акселерометров получили емкостные датчики ускорения, основанные на емкостном преобразовании микроперемещений инерционной массы.

В сравнении с пьезоэлектрическими датчиками, которым требуются только специальные материалы и динамический вход минимальной частоты, емкостные акселерометры могут быть построены на кремнии и обеспечивают способность детектирования DC-ускорения без ослабления сигнала и значимого нулевого смещения (что важно, например, в системах инерциальной навигации). [3]

В сравнении с недорогими микромеханическими пьезорезистивными акселерометрами, которые могут эффективно использоваться в комбинации с недорогой мостовой обрабатывающей электроникой, причем именно в низкочастотных или статических измерениях ускорения, емкостные датчики предлагают низкую температурную чувствительность. Температурный коэффициент сопротивления допированного кремния на два порядка выше, чем температурный коэффициент емкости, несмотря на изменения в геометрии емкостного акселерометра вследствие температурного расширения. [2]

Классическая конструкция емкостного МЭМС -акселерометра представляет собой дифференциальный конденсатор. Он состоит из двух жестко зафиксированных электродов между которыми находится механически связанный с подвижной массой электрод – обкладку рис.6.

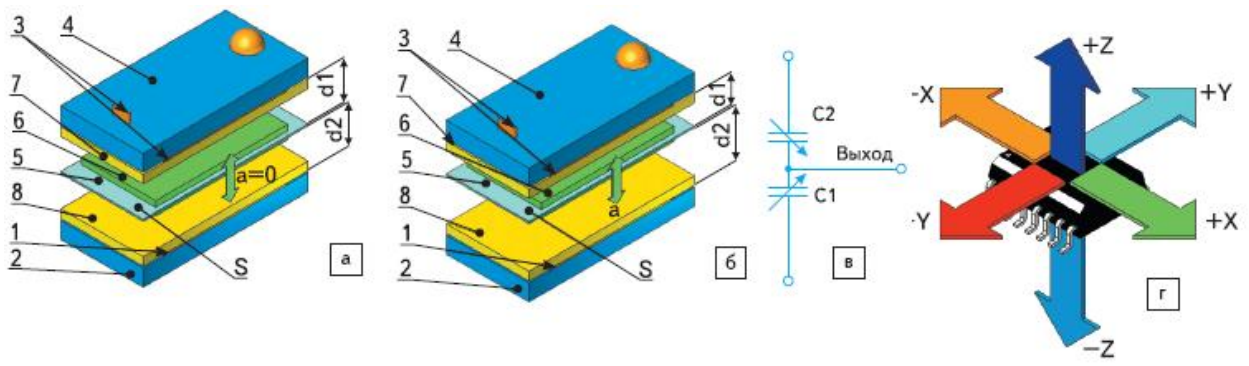


Рис. 1.6. Иллюстрация измерительного принципа дифференциального емкостного акселерометра: а, б — физическая модель измерительной структуры (корпус преобразователя условно не показан): 1, 3 — неподвижные металлические обкладки; 2, 4 — зафиксированные печатные платы; 5 — подвижная обкладка; 6 — инерционная масса (металл или диэлектрик); 7, 8 — слои диэлектрика; S — фиксированная площадь перекрытия обкладок; d1, d2 — переменные расстояния между обкладками; а — акселерометр в состоянии покоя; б — под действием ускорения а; в — эквивалентная электрическая схема; г — размещение измерительных осей и степеней свободы (полуосей) относительно корпуса ИС в корпусе SOIC [3]

Дифференциальный режим соединения двух конденсаторов C1 и C2 (рис. 19в) позволяет увеличить амплитуду и улучшить линейность сигнала, так как зависимость емкости от перемещения является нелинейной. Большинство дифференциальных емкостных акселерометров объединяет электронику, которая завершает мост Уитстона (аналогично пьезорезистивным датчикам) и обрабатывает сигнал, используя, например, соотношение C1/C2 или (C1–C2)/(C1+C2). [2]

Чувствительный элемент (ЧЭ) емкостного акселерометра выполнен в виде массы, которая является подвижной обкладкой дифференциального конденсатора и закреплена на упругом подвесе с жесткостью k. Упрощенная схема показана на рис.1.7. При перемещении незафиксированной обкладки

дифференциальные емкости будут меняться. Например, при уменьшении емкости C1, емкость C2 будет увеличиваться.

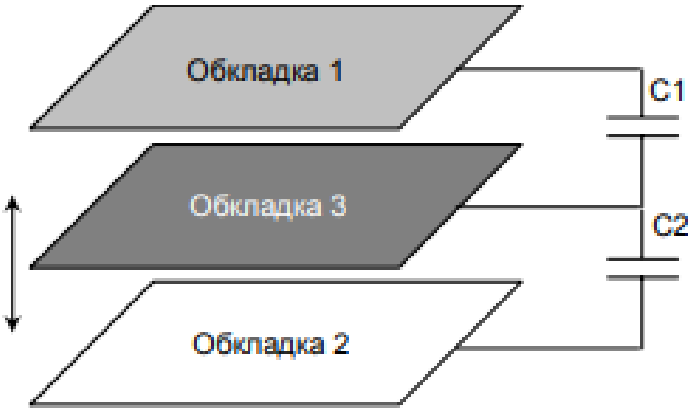


Рис. 1.7 Упрощенная конструкция дифференциального конденсатора емкостного акселерометра

Наиболее актуальной на данный момент конструкцией дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра является встречно-штыревое расположение электродов (рис.1.8). В качестве емкостной структуры был выбран вариант с переменным зазором, что обусловлено высокой чувствительностью данного варианта. [2]

В целях минимизации нелинейности выходной характеристики рабочий диапазон данного прибора лежит в линейной зоне при малых перемещениях.

Подход к измерению емкости заключается в измерении импеданса на переменном токе, обычно при подаче на электроды возбуждающего сигнала источника питания в виде синусоидальных или прямоугольных импульсов напряжения. Выходной сигнал емкостного элемента является высокоимпедансным (1–100 МОм), для снижения которого целесообразно подавать питание высокой частоты (выше 50 к Гц). Высокие частоты помогают снизить уровень шумов.

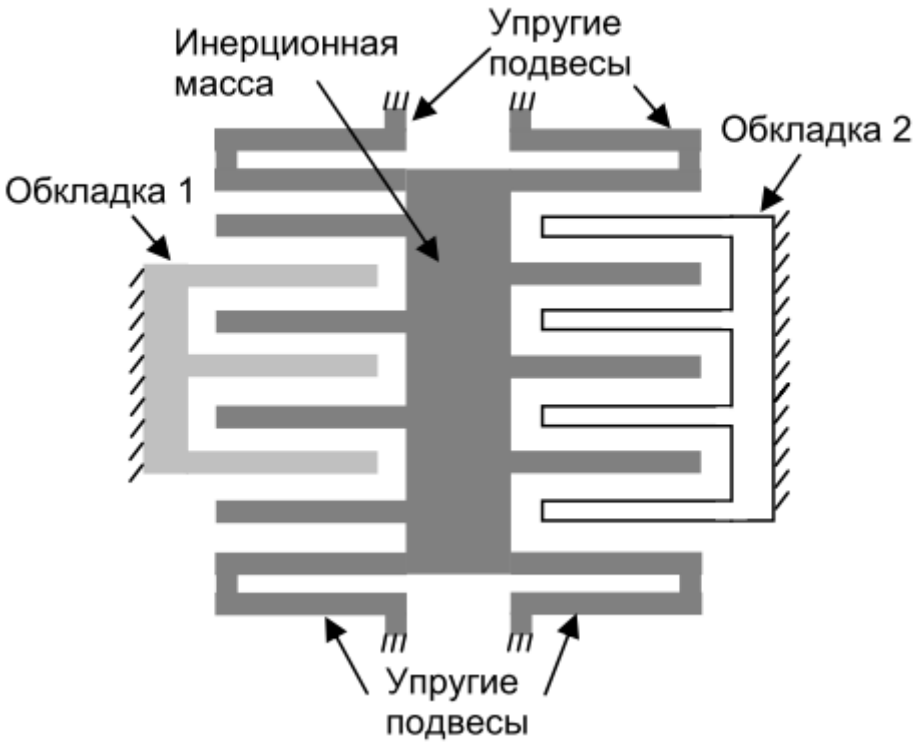


Рис. 1.8. Конструкция дифференциального емкостного МЭМС – акселерометра

Обработка сигнала емкостного чувствительного элемента обычно производится в цепи демодулятора. Дополнительные элементы схемы осуществляют усиление и фильтрацию сигнала.

Датчики, возбуждаемые непрерывным волновым сигналом, используют синхронные демодуляторы, обеспечивающие высокую точность и минимизирующие влияние рабочих частот.

Дифференциальные акселерометры используют для питания неподвижных обкладок равные, но противофазные напряжения частотой порядка 1 МГц — при нулевом положении подвижной обкладки они дадут нулевое выходное напряжение на входе демодулятора. Такой метод питания позволяет достигнуть нелинейность меньше 0.2%. [3]

Также для измерения емкости применяется метод, представляющий собой преобразование отношения измеряемой и опорной емкостей в электрический

сигнал. Обычно этот метод дает нелинейность порядка 1%, но применение усилителя напряжения позволяет уменьшить значение нелинейности зависимости напряжения до 0.5% [3]

Важной особенностью и преимуществом емкостного способа детектирования ускорения перед другими типами является сравнительная простота конструирования. Развитие направления разработки интегральных датчиков и систем позволяет реализовать разные конструкции, повышать степень интеграции и находить способы решения сложных технологических задач.

Емкостные акселерометры позволяют измерять ускорения в направлении любой из шести степеней свободы за счет различных расположений чувствительного элемента. Рабочий диапазон частот емкостных сенсоров лежит в диапазоне от измерения статического ускорения до сотен g. На данный момент применение емкостной техники является основным направлением в сфере измерения ускорения, и имеют большое количество вариантов реализации. Рассмотрим их подробнее.

1.2.3.1. Сервоакселерометры

Среди емкостных акселерометров широко распространены устройства, работающие в режиме замкнутого цикла, — force balanced (балансируемые силой) или servo (следящие) акселерометры [3], которые используют полученный сигнал изменения в емкости в качестве напряжения обратной связи, противодействия движению массы и удержания ее в центральном положении (принудительная обратная связь).

Эквивалентная линейная физическая модель, иллюстрирующая принцип работы сервоакселерометра в направлении одной степени свободы (полуоси), показана на рис. 7.

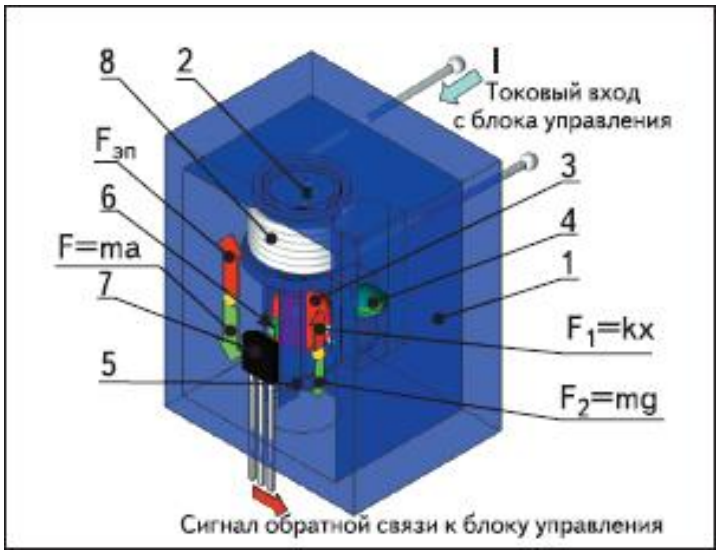


Рис. 1.7. Сервоакселерометр: а— направление ускорения, действующего на датчик; 1— корпус устройства; 2— пружина; 3— инерционная масса (с ферромагнитным материалом); 4— демпфер; 5— механический ограничитель перемещений при перегрузках (выходе за допустимые рабочие пределы ускорения а); 6— постоянный магнит, прикрепленный к массе 3; 7— датчик Холла; 8— электромагнит; Fэл, F, F1, F2 — силы, действующие в модели [3]

В следящих датчиках ускорения напряжение обратной связи, полученное с выхода предусилителя возвращается на конденсатор, что приводит к появлению электростатической силы между обкладками, которая стремится удержать подвижную массу в изначальном положении.

В силу низких показателей линейности сигнала, сложности настройки и высокой температурной чувствительности был создан аналог пьезорезисторных методов измерения ускорения в емкостном варианте – емкостные датчики, которые представляют собой герметичную МЭМС - структуру, состоящую из мембраны, соединенной с двумя неподвижными обкладками. Подвижная и неподвижные обкладки изолируются друг от друга материалами с малым коэффициентом теплового расширения во избежание залипания или перегрузки. Корпусирование трехслойной кремниевой структуры позволяет

использовать разные способы демпфирования. На рисунке 8 показана физическая модель кремниевого емкостного акселерометра.

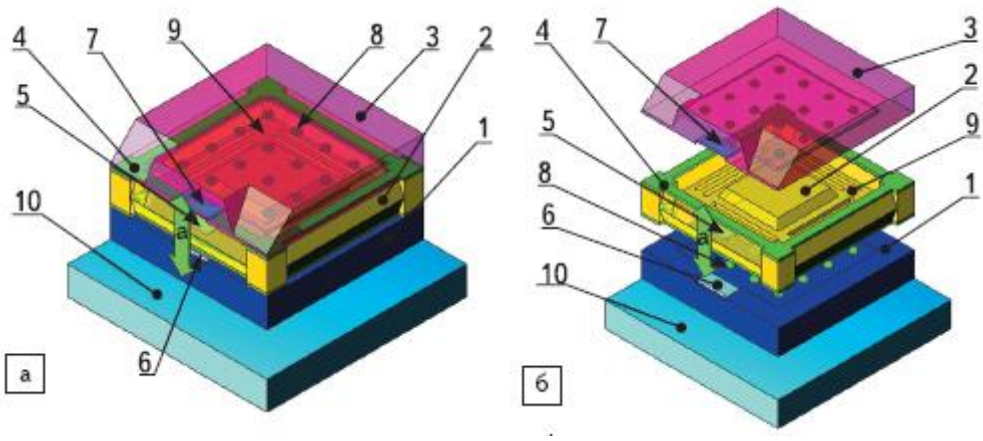
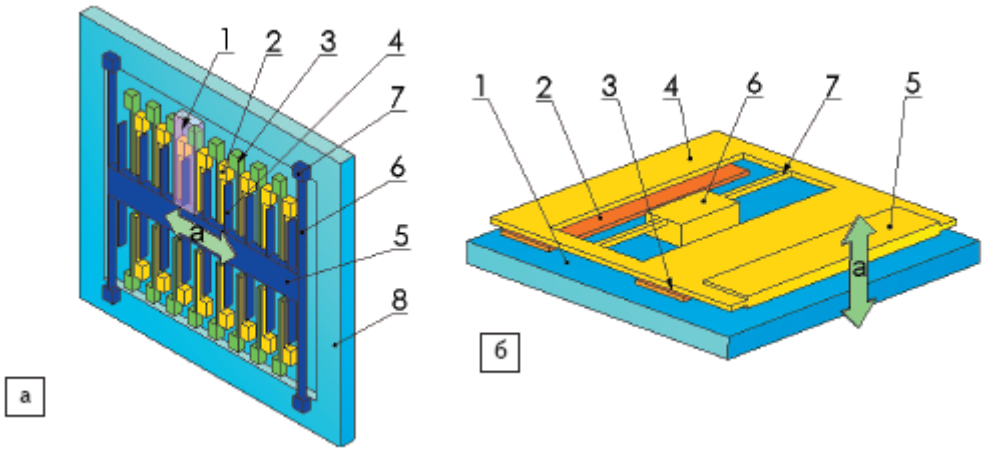


Рис.1.8. Физическая модель кремниевого емкостного акселерометра: а — вид в сборке; б — модульный дизайн: а — направление действия ускорения; 1 — нижняя кремниевая пластина — обкладка; 2 — инерционная масса (центральная кремниевая пластина); 3 — верхняя кремниевая пластина — обкладка; 4 — оксид кремния SiO2; 5, 6, 7— терминалы; 8 — ограничители перегрузок (остановы при значительных ударных нагрузках); 9 — пружинный подвес инерционной массы; 10 — стеклянная подложка

Технологии, именуемые поверхностными, позволяют значительно уменьшить габаритные размеры интегрального датчика ускорения, снизить цену на готовое изделие в силу экономичной структуры, а также детектировать ускорения в плоскости, параллельной поверхности кристалла в высоком диапазоне – от статического до высоких значений. Типичный чувствительный элемент поверхностного кремниевого акселерометра — это поликремневая микромеханическая структура, представляющая собой массу с пружинными подвесами, удерживающими массу выше подложки в горизонтальном положении и обеспечивающими сопротивление перемещению под действием ускорения (рис. 27а). Такая структура, показанная на рис. 27 в одномерном исполнении, может быть преобразована в двумерный или трехмерный вариант. На рис. 27б показан еще один вариант — асимметричная емкостная Z-

структура, которая в полностью кремниевом исполнении используется компаниями Bosch, Ford, а в объемном варианте с применением никеля — компанией Silicon Designs. [5]



“Рис. 1.9. Физические модели двух перспективных емкостных -структур датчиков ускорения: а — одноосевая поверхностная микромеханическая структура: 1 — элементарная измерительная ячейка; 2, 3 — фиксированные обкладки параллельно соединенных конденсаторов; 4 — подвижная обкладка (палец); 5 — инерционная масса; 6 — упругий элемент, работающий на растяжение; 7 — анкерные точки крепления; 8 — кремниевая подложка; а — ускорение в направлении измерительной оси (X); б — асимметричная одноосевая микромеханическая структура, детектирующая ускорение в направлении Z — оси датчика: 1 — кремниевая подложка; 2, 3 — фиксированные обкладки двух дифференциальных конденсаторов; 4 — элемент — крыло с подвижными обкладками (обкладкой) конденсаторов — асимметричное крыло; 5 — инерционная масса; 6 — крепление крыла к подложке; 7 — упругий элемент, работающий на кручение; а — ускорение в направлении измерительной оси (Z)“[4]

1.2.3.3. Технологии производства емкостных акселерометров без использования кремния

Существуют технологии производства датчиков ускорения, чувствительный элемент которых производится из никеля и его сплавов. материалов с большой плотностью. Данный выбор материала позволяет создавать акселерометры для измерения как статического, так и динамического ускорение с очень широким диапазоном – от 1g до 20 000g. Данный тип сенсоров позволяет противостоять ударам порядка 10 000 g/c и работать при температуре выше 200°C [6].

Базовая структура сенсорного элемента SDI, чувствительного к оси Z, показана на рис. 34а. Сенсорный элемент представляет собой асимметричную плоскую обкладку из никеля, поддерживаемую выше поверхности подложки двумя стержнями кручения, прикрепленными к центральному пьедесталу.

Одна сторона асимметричной структуры тяжелее, чем другая, поэтому центр тяжести смещен относительно оси кручения. Под действием ускорения вокруг оси кручения подвижной обкладки возникает крутящий момент, поворачивающий крыло на угол, ограничиваемый жесткостью пружинных стержней.

На поверхности подложки под подвижным крылом с каждой стороны оси кручения симметрично зафиксированы две проводящих обкладки, формирующие дифференциальные конденсаторы с общим электродом.

Площадь крыла составляет приближенно 1000×600 мкм, его толщина — 5–10 мкм, расстояние от крыла до подложки 5 мкм. Емкость каждой из фиксированных обкладок примерно 0,15 пФ. [6]

При вращении крыла под действием ускорения среднее расстояние между крылом и одной обкладкой уменьшается, а между крылом и другой обкладкой — увеличивается, изменяя соотношение емкостей. Чувствительность

регулируется массой сенсорного элемента, расстоянием от центра тяжести массы до оси кручения, механическими свойствами пружины кручения (жесткостью). Стандартные измерительные диапазоны акселерометров SDI — 1×1000 g. [6]

Для того чтобы обеспечивать дополнительную защиту от чрезмерных механических воздействий при высоких ударных ускорениях, могут быть добавлены механические ограничители в четырех внешних углах каждого крыла. Каждый законченный сенсорный чип SDI включает два крыла для формирования четырех конденсаторов с общим электродом рис.10.

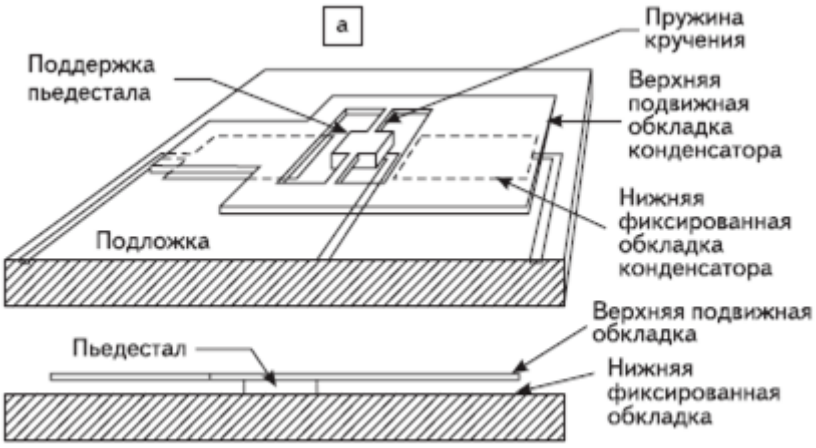


Рис. 1.10. Технологии и спектр продукции никелевых акселерометров Silicon Designs a — базовая структура сенсорного элемента SDI;

Недостатки устройства — очень малая емкость и соответственно малое изменение в выходном сигнале. В дальнейшем изменение в емкости становится нелинейным. Малый выходной сигнал и повышенная склонность к нелинейности создают необходимость в дополнительных специализированных микросхемах. [6]

Выводы и постановка задачи

На основании проведенного анализа литературы можно сделать следующие выводы:

- наибольший практический интерес представляют емкостные МЭМС – акселерометры выполненные по технологии поверхностной микромеханики:

- основными преимуществами акселерометров являются широкий диапазон измерений, низкие шумы, малые габаритные размеры, невысокая цена:

- основными параметрами ММА являются диапазон измерений, чувствительность, основная погрешность, диапазон рабочих температур, дрейф нуля.

Для дальнейшего расчета и проектирования МЭМС-акселерометра выберем осевую схему подвеса ЧЭ с складчатой пружиной и емкостную электродную структуру преобразователя. Диапазон измерений $\pm 50g$. основная погрешность не более 3% в нормальных лабораторных условиях.

РАЗДЕЛ 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЭМС - **АКСЕЛЕРОМЕТРА**

К ЧЭ ММА предъявим такие требования:

- перемещение подвижной обкладки на всем рабочем диапазоне не должно вызывать разрушение ЧЭ, залипание, короткое замыкание или пробой конденсатора:

- нелинейность выходной характеристики не должна быть более 1%.

Основными элементами конструкции ЧЭ ММА являются - подвижная перфорированная масса, упругие подвесы и непосредственно преобразователь в виде гребенчатой структуры электродов.

Масса соединена с упругим подвесом, который в свою очередь будет жестко зафиксирован к корпусу с одной стороны и к подвижной массе с другой.

Жесткость подвеса позволяет массе свободно перемещаться только вдоль оси чувствительности под воздействием ускорения, параллельно основанию.

Материал таких элементов МЭМС - акселерометра, как анкеры и ЧЭ - кристаллический кремний. Подложка обычно представляет собой стеклянную пластину. При производстве датчика стеклянная подложка металлизируется. Потом к подложке прикрепляется кремниевая пластина, из которой вытравливают части ЧЭ. В состав чувствительного элемента входят подвижная масса (ПМ), как подвижные, так и фиксированные обкладки конденсатора, упругие подвесы.

Ускорение при воздействии на ЧЭ будет пропорционально разности перемещения основания и инерциальной массы: $x = x_{осн} - x_{ИМ}$ (1).

ЧЭ одноосевого ММА описывается как колебательное звено второго порядка: $\ddot{x} + \frac{b}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{F}{m}$ (2), где x – разность перемещений основания и инерционной массы; $\dot{x}$ - скорость; $\ddot{x}$ -ускорение; F – разность инерциальной и внешней сил.

Для описания затухания колебаний подвижной массы в системе применяется демпфер с соответствующим коэффициентом демпфирования b.

При практической реализации необходимо учитывать влияние перекрестной связи и паразитных эффектов. Математическую модель ЧЭ ММА без учета вращательных движений можно описать как:

$$m \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x & b_{xz} & b_{xz} \\ b_{yx} & b_y & b_{yz} \\ b_{zx} & b_{zy} & b_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & k_{xz} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix},$$

где x, y, z – перемещения вдоль координатных осей X, Y, Z;

$\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ – скорости перемещения вдоль координатных осей X, Y, Z;

$\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\dot{z}$ – ускорения перемещения координатных осей X, Y, Z;

b_i , b_{ij} – соответственно диагональные и недиагональные элементы матрицы коэффициентов демпфирования;

k_i, k_{ij} – соответственно диагональные и недиагональные элементы матрицы коэффициентов жесткости;

F_x, F_y, F_z – проекции разности инерциальной и внешней сил на оси координат X, Y, Z [2]

Количественной характеристикой колебательности системы является добротность $Q = \frac{\omega_0 m}{b}$, где b - коэффициент демпфирования, ω_0 - собственная частота колебаний, m – эффективная масса. [6]

“Абсолютный и относительный коэффициенты демпфирования можно рассчитать на основе допущения об упругих свойствах тонкого воздушного слоя, заключенного между зубьями МЭМС- акселерометра, по следующим формулам : $b = n\mu \frac{h^3 l}{d^3}$, $\xi = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}$,

где n – количество пар зубьев встречно-штыревого конденсатора, μ – вязкость воздуха, h – высота зубьев, l – длина зубьев, d – расстояние между зубьями” [6].

Параметры чувствительного элемента можно разделить на две категории: механические и электрические. В категорию механических параметров можно отнести зависимость механической силы от перемещения инерциальной массы, собственные частоты колебаний, механические напряжения в разных частях конструкции. В категорию электрических параметров можно отнести сопротивление электродов, зависимость емкости от перемещения, емкость покоя.

На основе выше перечисленной информации главными параметрами влияющими на емкостной МЭМС-акселерометр являются свойства упругих подвесов, демпфирование и электродная структура.

Также, существенным параметром для корректной работы емкостного датчика ускорения является баланс между электростатической и механической силами. В случае преобладания электростатической силы между обкладками может произойти залипание [1]. Данное явление может привести к короткому замыканию или механическому разрушению уязвимых частей прибора.

Во избежание данного явления в конструкции датчика необходимо использовать ограничители движения подвижной массы.

Рассмотрим электродную структуру, выполненную в виде плоскопараллельного конденсатора (рис. 2.3)

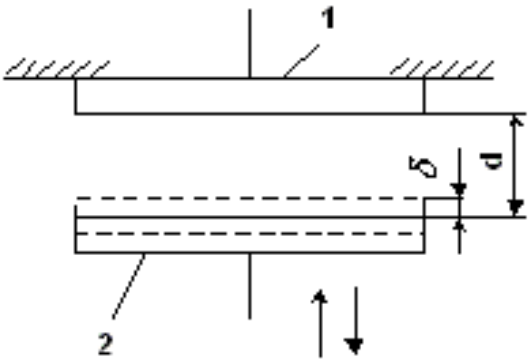


Рис. 2.3 Конструкция плоскопараллельного конденсатора

Емкость между обкладками описывается как $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 Lh}{d}$ (5),

где ε – диэлектрическая проницаемость среды;

ε0 – диэлектрическая постоянная;

S – площадь перекрытия электродов;

L – длина перекрытия электродов;

h – ширина электрода;

d – зазор между электродами.

Рассмотрим конструкции с принципом действия основанным на:

- Изменении зазора δ_0 (Рис.2.4,а)
- С переменной площадью перекрытия $S = L \cdot h$ (Рис.2.4,б)

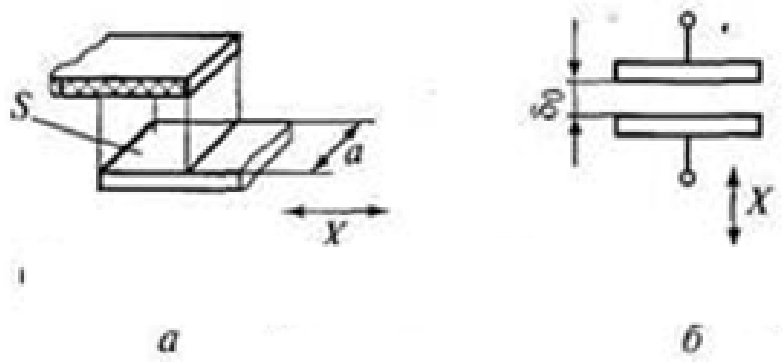


Рис. 2.4 Схемы емкостных датчиков с изменяющимися параметрами: а) переменный зазор б) переменная площадь перекрытия

Зависимость емкости от изменения зазора между обкладками можно описать как $C_{\Delta x}(x) = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 Lh}{d + x}$ (6)

Зависимость емкости от изменения площади перекрытия можно описать как $C_{\Delta S}(x) = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 (L + x)h}{d}$ (7)

Продифференцируем приведенные выше зависимости для сравнения чувствительности: $dC_{\Delta S}(x) = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 h}{d}$, $dC_{\Delta x}(x) = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 Lh}{(d + x)^2}$ [9] (8)

В силу того, что емкость обратно пропорциональна перемещению можно сделать вывод, что зависимость изменения емкости от зазора между

обкладками нелинейная в отличии от зависимости емкости от изменения площади перекрытия.

Перемещение подвижного электрода в электродной структуре, основанной на принципе изменения зазора между обкладками, обычно состоящими из нескольких электродов, ограничивается величиной зазора d.

В случае превышения длины электрода по сравнению с шириной зазора больше, чем в четыре раза, то минимальная чувствительность конструкции с переменным зазором будет в $\frac{L}{4d}$ раз больше конструкции с переменной площадью при аналогичных размерах.

В силу линейности зависимости емкости от площади и большего диапазона перемещения структура с переменной площадью более применима в акселерометрах прямого действия. Чувствительность же улучшается с помощью увеличения количества электродов.

2.2. Выбор конструкции упругого подвеса

Самым важным требованием к свойствам интегральных подвесов является как можно более высокая стойкость к разрушению при минимальном коэффициенте жесткости. По этой причине для упругих консолей ставятся задачи по оптимизации и главным параметром в их решении является постоянство изгибных напряжений в сечениях по всей длине интегрального подвеса и около жестких заделок и крепления к подвижным элементам.

Значение собственных частот упругого подвеса акселерометра определяют полосу пропускания датчика и являются одним из наиболее важных параметров для расчета: $\omega_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{M}}$,

где ω_0 – собственная частота колебаний; k – коэффициент жесткости пружины; M – эффективная масса (масса подвижной части ЧЭ ММА). [6]

Значения жесткости подвеса k и масса m подбираются таким образом, чтобы избежать явления резонанса, который пагубно влияет на ЧЭ за счет повышения деформации и напряжения в конструкции. Значения собственных частот подбирают так, чтобы их значение превышали частотный диапазон не менее, чем в 2 раза. [1]

В силу того, что формулы 8 и 10 являются обратными расчет упругого подвеса сводится к поиску оптимального значения его жесткости. Результатом этого поиска должны служить высокие значения чувствительности, линейности и прочности конструкции при воздействии механических сил. Необходимо обратить внимание на то, что оптимальное снижение значения жесткости необходимо только по главной оси, а жесткость по неглавным осям должна быть существенно выше.

Рассмотрим разные формы упругих подвесов:

1) Прямая балка является базовой формой упругого подвеса. Важным преимуществом данной конструкции является то, что пружина занимает мало места и позволяет использовать больше пространства для фиксированных электродов. Данная конструкция позволяет точно расположить фиксированные электроды относительно пружины за счет высокой жесткости по побочным осям. Это означает, что фиксированные пальцы неизменно расположены относительно пружины. Данная форма балки представляет собой длинную прямую пружину (рис.2.5).

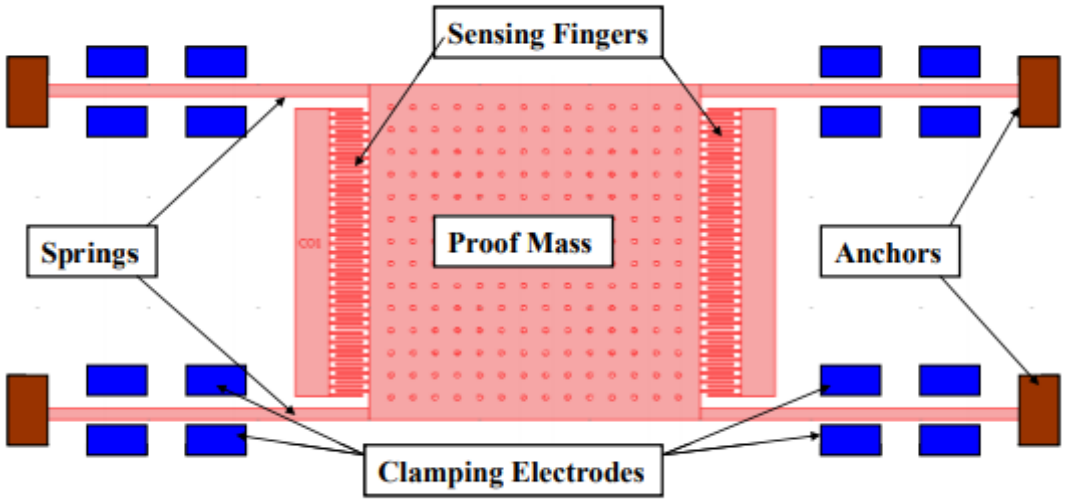


Рис. 2.5. Прямые консольные балки [11]

Недостатками данной формы является то, что ее применение увеличивает общий размер изделия МЭМС-акселерометров и в зависимости от увеличения прогиба у нее увеличивается жесткость.

2) Пружина в форме нескольких прямых балок – составная балочная форма (Рис. 2.6).

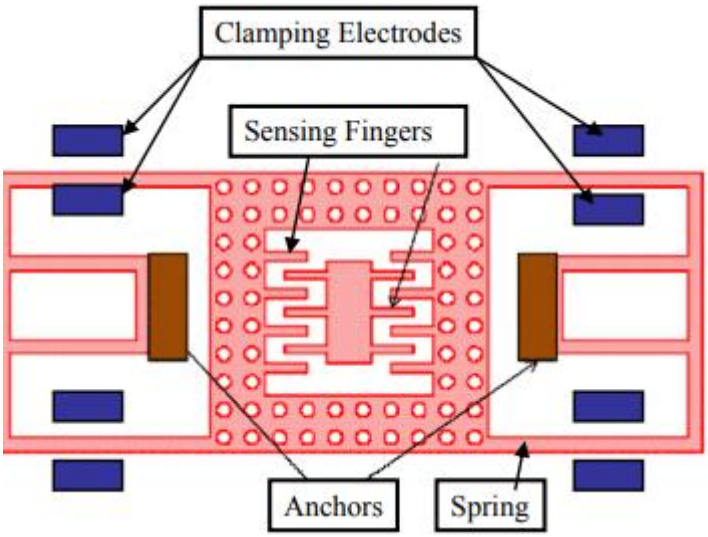


Рис 2.6. Составная балочная форма[11]

Применение нескольких балок вместо одной позволяет повысить жесткость и прочность. Дополнительным преимуществом перед однобалочной опорой является то, что данный тип пружины занимает меньше пространства.

Применение конструкции из нескольких балок предотвращает залипание и гасит амплитуды в нежелательных направлениях. Недостатками этой формы является то, что она ограничивает возможность перестройки за счет ограничения пространства для фиксированных электродов.

3) Пружина в форме “ноги краба” (Рис 2.7.) позволяет повысить чувствительность за счет снижения жесткости по основной оси. “Данная конструкция занимает мало места. Симметричное расположение пружины обеспечивает большую стабильность перемещения ЧЭ ММА” [11]

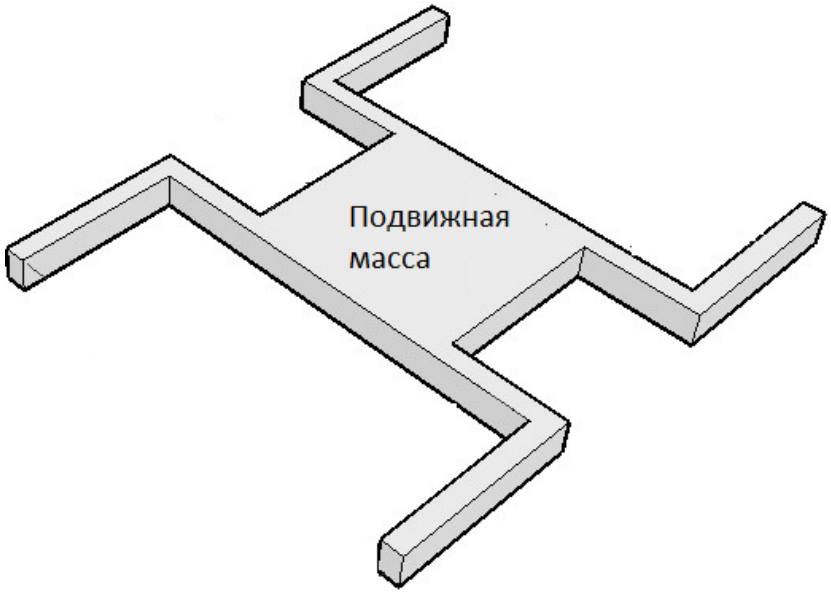


Рис. 2.7 Пружина в форме “нога краба”

4) Складчатая пружина (Рис. 2.8.) позволяет значительно снизить коэффициент жесткости. Благодаря своим изгибам она дает возможность повысить чувствительность без увеличения длины, благодаря чему занимает мало места в датчике. Наилучшим вариантом упругого подвеса для ЧЭ ММА в силу таких описанных выше свойств, как компактность, повышение чувствительности без увеличения длины, высокая степень линейности коэффициента жесткости. Из перечисленных выше форм упругих элементов у складчатой пружины самая лучшая линейность коэффициента упругости. На данный

момент это одна из наиболее оптимальных форм упругих подвесов среди вышеперечисленных.

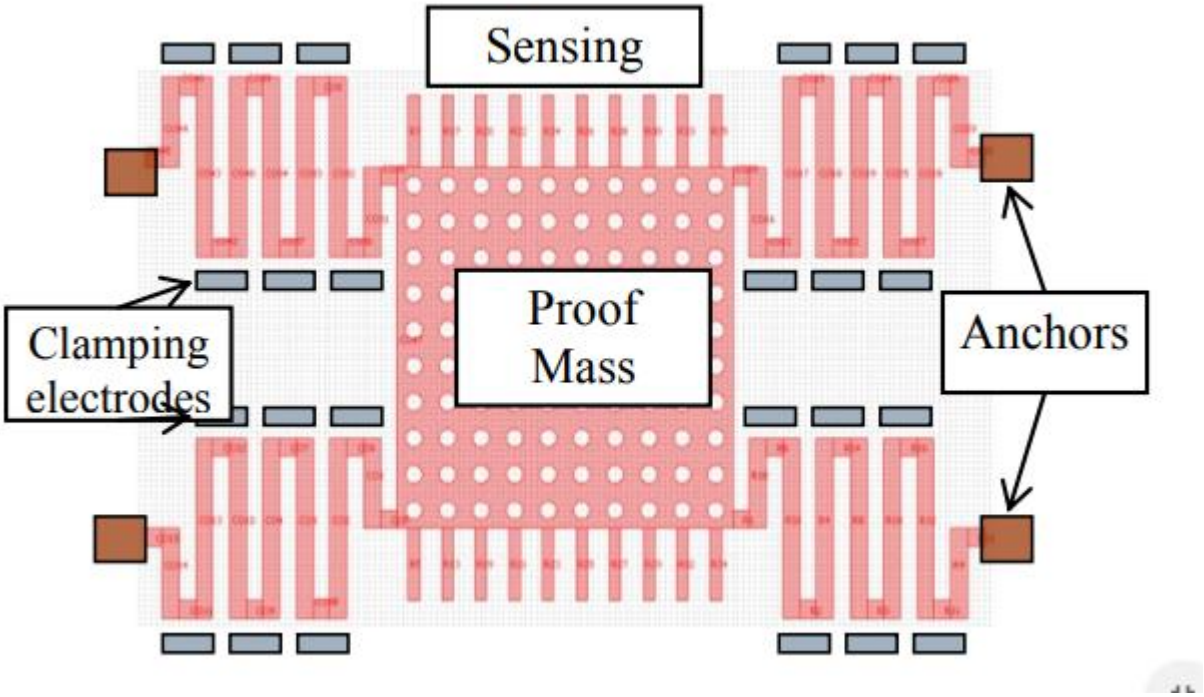


Рис. 2.8 Складчатая пружина [11]

Коэффициент жесткости зависит не только от формы, но и от материала. В силу таких физико-механических особенностей кремния как высокая хрупкость, подвес может разрушаться под действием внутренних напряжений. Повреждение пружины может спровоцировать разрушение всего чувствительного элемента. Как показывает анализ работы [12] при задании высоких значений частоты и ускорений пружина всегда разрушается в месте крепления с корпусом или с чувствительной массой. Для снижения нагрузки рекомендуется дополнительно укреплять концы пружины и делать округления. Немаловажным параметром при проектировании упругих подвесов являются геометрические размеры.

Выбор геометрии упругого подвеса во многом определяется ограничениями топологии и технологических процессов. Для получения высокой чувствительности и небольших размеров подвеса необходимо

уменьшать его ширину, однако уменьшение ширины приводит к тому, что на характеристики подвеса существенное влияние начинает оказывать воспроизводимость технологического процесса.

Увеличение ширины подвеса, для снижения чувствительности к отклонениям технологического процесса, приводит к необходимости увеличения его длины, что увеличивает размер кристалла.

В результате анализа упругих подвесов акселерометров была выбрана складчатая форма пружины, так как она обеспечивающую такие высокие эксплуатационные характеристики, как чувствительность в направлении измерительной оси и значительную жесткость к перекрестным ускорениям. Также, складчатая пружина позволит снизить жесткость и повысить чувствительность без изменения размера ЧЭ. На рис. 3.6 показано схематическое изображение пружины складчатого типа.

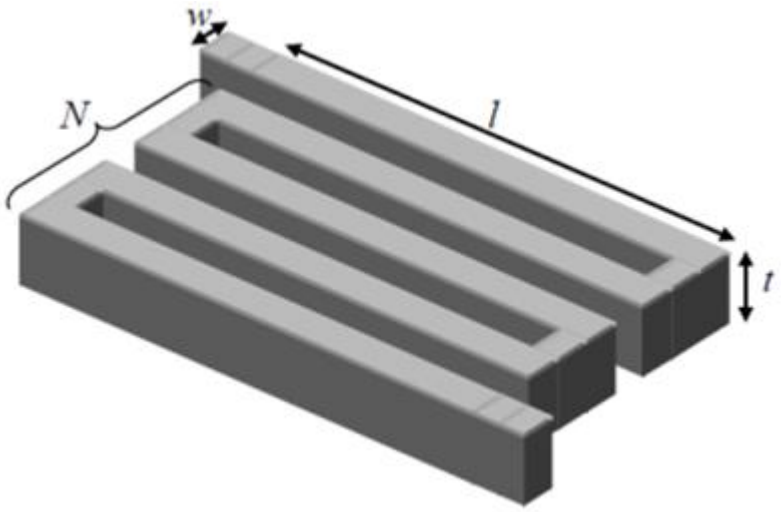


Рис. 2.9 Схематическое изображение пружины складчатого типа

В данной работе будет использоваться пружина формы изображенной на рисунке 2.10. В качестве исследуемой модели выбран пример использования электромеханического интерфейса Comsol Multiphysics на основе модели из [13].

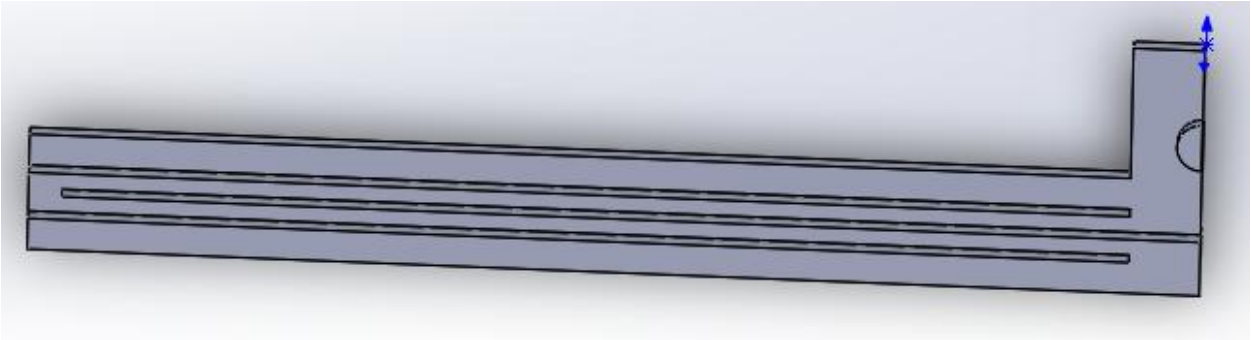


Рис. 2.10 Конструкция упругого подвеса пружины

В таблице 3.3 приведены геометрические размеры половины пружины, изображенной на рис. 3.7

Таблица 3.3

t_sp	4	нм	Толщина пружины
w_f	4	нм	Ширина электрода
l_sp	280	нм	Длина пружины
w_sp	2	нм	Ширина пружины
g_sp	1	нм	Зазор на пружине
w_sp_conn	4	нм	Ширина пружинного соединения
l_anch_base	17	нм	Длина основания анкера
w_anch_base	17	нм	Ширина основания анкера
r_anch	3	нм	Анкерный радиус

2.3. Расчет механических параметров упругого подвеса

В силу того, что ЧЭ крепится на четырех параллельно соединенных пружинах, общий коэффициент жесткости запишется, как сумма всех четырех подвесов:

$$k_{\Sigma} = 4k \, .$$

Граничными условиями будут:

1) Симметричность боковых граней ПМ:
2) Запрещение перемещения якоря, являющегося частью пружины
3) Направление силы зависит от того, какой элемент матрицы коэффициентов жесткости рассчитывается.

Точный расчет коэффициента жесткости возможет лишь для простых форм подвеса. Для более сложных вариантов обычно используются приближенные уравнения расчета. Из [6] и [15] известно, что после сравнения результатов и проверки их с помощью МКЭ погрешность достигает недопустимых значений.

2.4. Выбор конструкции подвижной части ЧЭ

Подвижная масса (ПМ) состоит из прямоугольного параллелепипеда с длиной - l, шириной - w. Толщина параллелепипеда t_PM определяется заданной толщиной всей пластины. По длине l_PM с обеих сторон будут расположены блоки электродов. Следует заметить, что расположение ПМ в центре всей конструкции дает возможность увеличить жесткость конструкции.

Выбор других параметров зависит от:

1) Ограниченного пространства, выделенного под массу;
2) Прочностных характеристик конструкции;

3) Механического шума $a_n = \sqrt{\frac{4k_B T\omega_0}{mQ}}$ (14), где T – температура, ; m – масса; ω_0 – собственная частота колебаний, k_B – коэффициент Больцмана; Q – добротность ЧЭ ММА.

Из выражения (14) можно сделать вывод, что увеличение массы позволяет уменьшить значение механического шума и повысить жесткость подвижной массы, а следовательно и прочность конструкции. По этой причине резонно проектировать ПМ так, чтобы она максимально захватывала незанятое место в конструкции.

Немаловажным конструкционным решением является перфорация ПМ. В данной работе форма отверстий представляет собой квадрат с сторонами w_f, периодом между отверстиями p_eh. В зависимости от периода и размера количество отверстий n_eh вдоль ширины и m_eh вдоль длины могут варьироваться с целью баланса между значениями демпфирования и максимально возможной массой. Изначально примем размер отверстия 4x4 мкм^2, период 18 мкм. При размере ширине w_PM=100мкм и длине l_PM=448мкм матрица n_eh x m_eh отверстий будет равна 6x45.

Толщина электродов совпадает с толщиной кремниевой пластины и составляет 2 мкм.

Геометрические размеры ПМ приведены в таблице 3.4 [14]

Таблица 3.4.

l_PM	440	Длина ЧМ
w_PM	100	Ширина ЧМ
t_PM	2	Толщина пластины, из которой изготовлена ЧМ

l_f	114	Длина электрода
w_f	4	Ширина электрода
n_st	3	Количество селфтест электродов
n_f	7	Количество чувствительных электродов
g_f	3	Зазор между чувствительными электродами
g_st	3	Зазор между селфтест электродами
w_eh	2	Сторона квадрата отверстия
p_eh	20	Период отверстий
n_eh	22	Количество отверстий на длину
m_eh	3	Количество отверстий на ширину

На рисунке 2.14 показана 3D модель подвижной массы

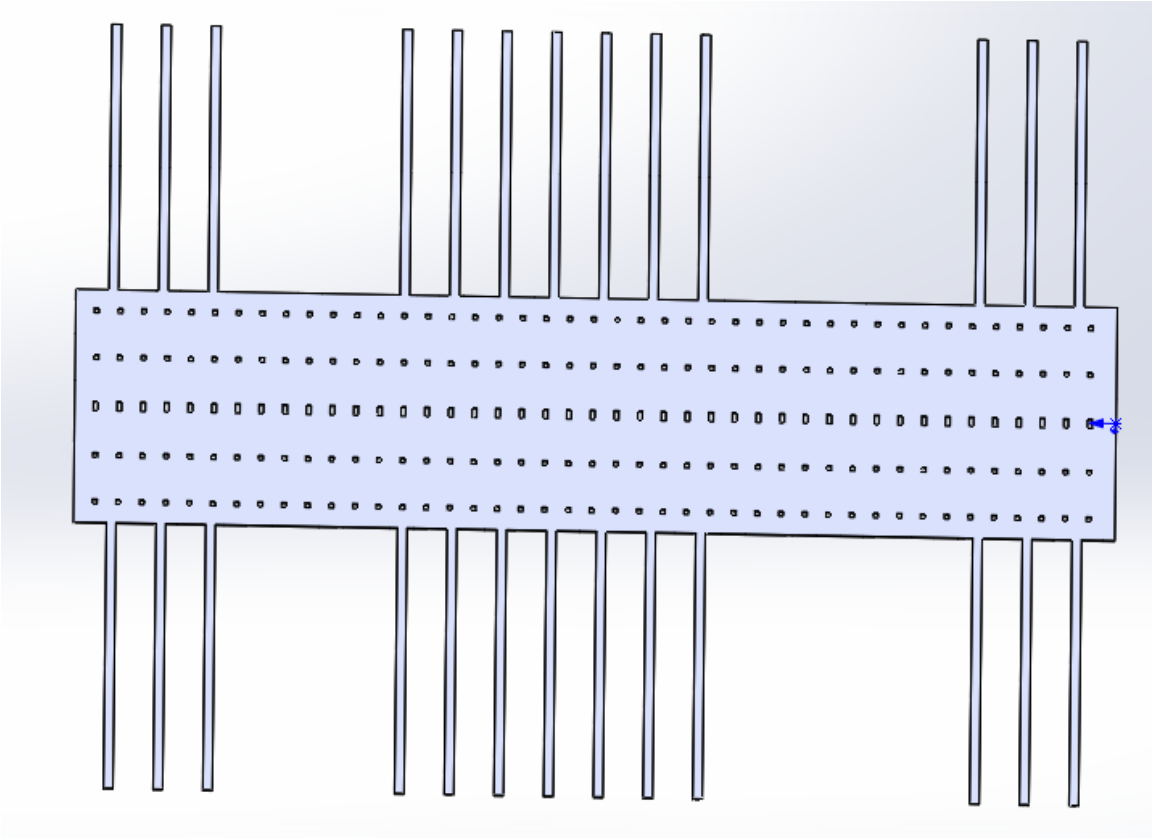


Рис.2.14 Конструкция подвижной массы ЧЭ ММА.

Для корректной работы чувствительного элемента во избежание нестабильности системы и электростатического залипания максимальное перемещение подвижных электродов необходимо ограничить величиной равной не более, чем треть величины наименьшего зазора. Минимальный зазор между обкладками составляет 1 мкм.

2.5. Выбор конструкции электродов

В качестве электродов были использованы прямоугольные пластины г-образной формы с длиной электрода l_e, шириной w_e. В качестве контактной площадки с подложной использовалась контактная площадка с размерами длиной l_p и шириной w_p. Анкер выполнен в форме цилиндра с радиусом r_an и толщиной t_an. Электрод показан на рисунке 2.15. В таблице 3.5 приведены геометрические размеры элементов электрода. [14]

Рис. 2.15 Конструкция электрода

Таблица 3.5

l_e	120	мкм	Длина электрода
w_e	4	мкм	Ширина электрода
l_p	16	мкм	Длина контактной площадки
w_p	8	мкм	Ширина контактной площадки
r_an	2	мкм	Радиус анкера
t_e	2	мкм	Толщина электрода
t_an	1,6	мкм	Толщина анкера

Зная перемещение можно рассчитать коэффициент жесткости по закону Гука $k_y = \frac{F}{\delta_y}$, где $F = m \cdot a_{\max}$ - максимальная сила, действующая на пружину, δ_y - перемещение пружины

Массу найдем из выражения

$$m = (w_pm \cdot l_pm - w_eh^2 \cdot n_eh + w_f \cdot l_f \cdot n_f) \cdot tSi \cdot E,$$

где w_pm, l_pm - ширина и длина ПМ в м, w_eh-сторона отверстия в м, n_eh - количество отверстий в м, w_f, l_f - ширина и длина неподвижного электрода в м, n_f - количество неподвижных электродов в м, tSi - толщина пластины в м, ρ-плотность кремния в кг/м^3. Например, для пластины

толщиной 11 мкм, масса равна 1,41724E-09 кг. Следовательно сила воздействующая на пружину будет 6,94446E-07 Н/м.

Результаты моделирования ЧЭ ММА в среде Comsol Multiphysics с разной вариацией геометрических размеров подвеса без изменения длины и ширины подвижной массы (толщина пластины 11 мкм). приведены в таблице 3.7.-3.8.

Таблица 3.7

Размер изменяемых величин	Перемещения по главной оси, мкм	Коэффициент жесткости, Н/м
w_sp_conn=2,g_sp=1, l_sp=280	0,0027254	159,9720515
w_sp_conn=2,g_sp=1.5, l_sp=280	0,0033742	129,2122071
w_sp_conn=3,g_sp=1, l_sp=280	0,003061	142,433136
w_sp_conn=3,g_sp=1.5, l_sp=280	0,0031431	138,7126815
w_sp_conn=2,g_sp=1, l_sp=350	0,0047224	92,32335872
w_sp_conn=2,g_sp=1.5, l_sp=350	0,0050662	86,05815586
w_sp_conn=3,g_sp=1, l_sp=350	0,0050813	85,80241851
w_sp_conn=3,g_sp=1.5, l_sp=350	0,0051982	83,80835593

Таблица 3.8 Коэффициенты жесткости при толщине пластины 11 мкм

Размер изменяемых величин	Перемещение по главной оси, мкм	Коэффициент жесткости, Н/м
w_sp_conn=2,g_sp=1, l_sp=280	0,0027254	58,1716551
w_sp_conn=2,g_sp=1.5, l_sp=280	0,0033742	46,98625713

w_sp_conn=3,g_sp=1, l_sp=280	0,003061	51,79386762
w_sp_conn=3,g_sp=1.5, l_sp=280	0,0031431	50,44097509
w_sp_conn=2,g_sp=1, l_sp=350	0,0047224	33,57213044
w_sp_conn=2,g_sp=1.5, l_sp=350	0,0050662	31,29387486
w_sp_conn=3,g_sp=1, l_sp=350	0,0050813	31,20087946
w_sp_conn=3,g_sp=1.5, l_sp=350	0,0051982	30,47576579

Из таблицы 3.7-3.8 можно сделать вывод, что с увеличением толщины пластины жесткость пружины по главной оси не меняется. Также коэффициент жесткости можно менять меняя значения длины, ширины и зазора между витками. Зная коэффициент жесткости можно рассчитать собственную частоту с помощью выражения $\omega_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{M}}$, где k-коэффициент жесткости, M – эффективная масса.

Из этого выражения можно сделать вывод, что чем больше коэффициент жесткости, тем выше будет собственная частота пружины.

Промоделируем изменение толщины пластины при ускорении по неглавным осям таблица 3.9

Таблица 3.9

Размер изменяемых величин	Перемещение, мкм	Перемещение, м	Коэффициент жесткости по исследуемым осям, Н/м
ay=50, tSi=2 мкм	1,55E-08	1,55E-14	5118850,21
ay=50, tSi=8мкм	1,44E-08	1,44E-14	27305380,03
az=50, tSi=2мкм	0,13554	1,36E-07	0,58
az=50, tSi=8мкм	0,009301	9,30E-09	42,15

Из таблицы 3.9 можно сделать вывод, что использование складчатой пружины существенно снижает жесткость не только по главной оси x, но и по одной из побочных (z). Также, из данной таблицы видно, что увеличение толщины пластины позволяет увеличить коэффициент жесткости по неглавной оси.

Результаты расчета механических параметров сведены в таблицу 3.5

2.7. Анализ коэффициента нелинейности преобразователя

Температурный коэффициент главным образом зависит от свойств материалов, из которых изготовлен ЧЭ ММА. Температурная нагрузка появляется в силу несоответствия термического расширения между рабочим слоем, подложкой и корпусом.

Схемы компенсации позволяют снизить как нелинейность, так и значение температурного коэффициента, это приводит к тому, что появляется необходимость усложнения схемотехники. По этой причине использование обратной связи обоснованно при проектировании высокоточных датчиков, хотя одних только компенсационных схем недостаточно.

Низкая нелинейность входных и выходных характеристик, а также высокая чувствительность являются главными параметрами для высокоэффективной работы емкостных МЭМС – акселерометров.

Нелинейность (или ошибка линейности) – существенный недостаток, свойственный емкостным преобразователям по причине изменения зазора, на котором основан принцип детектирования ускорения. Даже в случае использования обратной связи в компенсационных акселерометрах, нелинейность все еще присутствует из-за таких факторов, как производственные ошибки.

На рисунке 2.18 показана упрощенная схема дифференциального емкостного преобразователя МЭМС-акселерометра

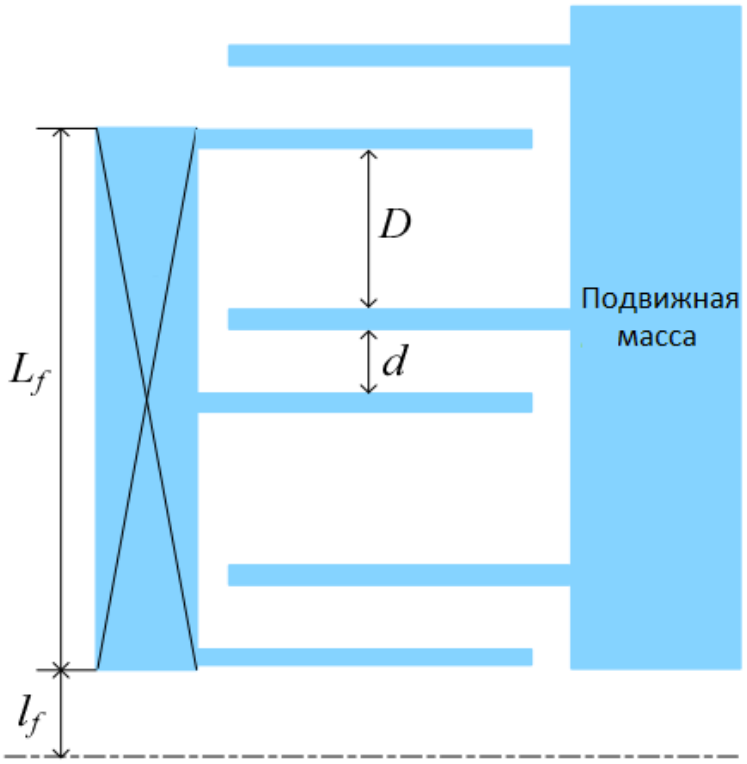


Рис. 2.18 Упрощенная схема дифференциального емкостного преобразователя МЭМС-акселерометра

Емкость нижнего конденсатора: $C_1 = \varepsilon\varepsilon_0 Lh\left(\frac{N}{d-x} + \frac{N-1}{D+x}\right)$

Емкость верхнего конденсатора: $C_2 = \varepsilon\varepsilon_0 Lh\left(\frac{N}{d+x} + \frac{N-1}{D-x}\right)$, где x – перемещение, d, D – соответственно меньший и больший зазоры между обкладками рис.3.1, L - длина перекрытия обкладок, h - толщина обкладки, N-количество фиксированных электродов, ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Выведем формулу для разности емкостей, передаваемой на выход:

$$\Delta C = \varepsilon\varepsilon_0 Lh(\frac{N}{d-x} + \frac{N-1}{D+x} - \frac{N}{d+x} - \frac{N-1}{D-x})$$

$$\Delta C = \varepsilon\varepsilon_0 Lh\left[\frac{N}{d-x} - \frac{N}{d+x} - \frac{N-1}{D-x} + \frac{N-1}{D+x}\right]$$

$$\Delta C = \varepsilon\varepsilon_0 Lh\left[N(\frac{2x}{d^2-x^2}) - (\mathrm{N}-1)(\frac{2x}{\left(D^2-x^2\right)})\right]$$

Результирующее выражение $\Delta C = 2\varepsilon\varepsilon_0 Lh\frac{x\left(N\left(D^2-d^2\right)+d^2-x^2\right)}{\left(d^2-x^2\right)\left(D^2-x^2\right)}$ (10), характеризует чувствительность.

Нелинейность будет иметь вид: $Нелинейность = \frac{\Delta C - \Delta C_{лин}}{\Delta C_{лин}}$, где

Для выражения нелинейности линеаризованная зависимость ΔC будет иметь вид: $\Delta C_{лин} = 2\varepsilon\varepsilon_0 Lh\frac{x\left(N\left(D^2-d^2\right)+d^2-x^2\right)}{d^2D^2}$.

Как было описано выше, демпфирование можно описать с помощью абсолютного и относительного коэффициентов $b = n\mu\frac{h^3 l}{d^3}$, $\xi = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}$. Из этого можно сделать предположение, что если менять значения M и k, не меняя геометрические размеры h, l, d и количество электродов, то можно добиться оптимального коэффициента относительного демпфирования.

Выведем формулу коэффициента жесткости для значения $\xi = 0.65$:

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{Mk}} \Rightarrow b = \xi 2\sqrt{Mk} \Rightarrow K = \frac{b^2}{1.69 \cdot M}$$

На таблице 3.11 приведены значения оптимальных параметров разных вариантов ЧЭ в зависимости от толщины пластины.

Таблица 3.11 Значения оптимальных параметров разных вариантов ЧЭ в зависимости от толщины пластины

Толщина пластины, мкм	Масса,кг	Сила при 50g, Н	Оптимальная жесткость, Н/м	Собственная частота	Оптимальное перемещение, мкм
3	4,8533E-10	2,37812E-07	0,01362302	1687,3	17,457
4	6,47106E-10	3,17082E-07	0,05740729	2999,6	5,5234
5	8,08883E-10	3,96353E-07	0,17519313	4686,9	2,2624
6	9,70659E-10	4,75623E-07	0,29062438	5510,7	1,6366
7	1,13244E-09	5,54894E-07	0,9422307	9186,3	0,5889
8	1,29421E-09	6,34164E-07	1,83703312	11998	0,3452
9	1,45599E-09	7,13435E-07	3,31039334	15186	0,2155

Проведя моделирование при длине пружины 400 мкм и с вариацией стороны отверстия для пластины 8 мкм были получены значения близкие к оптимальным таблица 3.12

Таблица 3.12 Коэффициент жесткости при изменении стороны отверстия

Перемещение, мкм	Масса, кг	Сторона отверстия, мкм	Коэффициент жесткости

0,21893	1,29421E-09	4	2,89665242
0,2113	1,1779E-09	8	2,7315213
0,20773	1,1367E-09	9	2,68129396

Проведем параметрическое испытание для нескольких значений длины пружины с приложенным ускорением к оси x таблица 3.13

Таблица 3.13

Длина пружины, мкм	Перемещение, мкм	Относительный коэффициент демпфирования	Абсолютный коэффициент демпфирования	Коэф. Жесткости, Н/м	Собственная частота, Гц
360	0,15563	0,4364331	6,3388E-05	4,07481922	403,6395353
370	0,17099	0,4574634	6,3388E-05	3,70877896	385,0835795
390	0,20302	0,4984716	6,3388E-05	3,12365341	353,4035799

Масса 1,29421E-09 кг, Механический шум 6,4637E-05

Выводы

В данном разделе был проведен:

- обзор технологий построения акселерометров, основанных на использования емкостного принципа детектирования ускорения;
- приведена математическая модель ЧЭ ММА;
-приведены аналитические выражения для добротности, как количественной характеристики колебательности системы;
-приведены выражения для оценки качества демпфирования.

- в результате сравнения разных вариантов была выбрана конструкция подвеса в форме складчатой структуры обеспечивающей лучшую линейность, компактность и повышенную жесткость к перекрестным ускорениям.

В результате аналитического расчета были получены такие значения параметров ЧЭ ММА: эффективная масса 1,29421E-09 кг, абсолютный коэффициент демпфирования 6,3388E-05, относительный коэффициент демпфирования 0,498, Жесткость k по оси чувствительности 3,124 Н/м, собственная частота 353 Гц, максимальное смещение пружины при 50g 203 нм, механический шум подвижной массы 6,4637E-05 м/с^2/√Гц.

РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЭМС -АКСЕЛЕРОМЕТРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СРЕДЕ COMSOL MULTIPHYSICS

Моделирование МЭМС-акселерометра проводилось с использованием метода конечно-элементного моделирования в среде Comsol Multiphysics, которая применяется для решение оптимизационных задач при моделировании микромеханических систем в блоке Electrostatics с использованием библиотек МЭМС. Среда Comsol Multiphysics по сравнению с более доступными программами наподобие Ansys, является профессиональной программой для использования МКЭ. Неоспоримым преимуществом данной программы перед другими для решения задач поставленных в данной работе среда Comsol значительно упрощает проектирование и моделирование микромеханических систем. За счет наличия в нем специального блока МЭМС с так называемыми интерфейсами для физики Electrostatics с возможностью использования библиотеки наиболее широко используемых материалов решение поставленных оптимизационных задач значительно упрощается.

3.1. Создание библиотеки геометрических моделей

Первым этапом для задания исследуемых параметров для рассматриваемой задачи было создание геометрических моделей. Размеры и такие количественные характеристики, как количество электродов и отверстий

заданы параметрическим методом и могут быть изменены путем изменения их значения в разделе локальных или глобальных переменных.

Особенностью среды Comsol является возможность создания библиотеки геометрических моделей с возможностью обращения к ней при создании других проектов.

В силу того, что конструкция ЧЭ ММА симметрична и состоит из повторяющихся элементов с целью экономии вычислительных ресурсов можно использовать только половину чувствительной массы с электродами, а после проведения необходимых операций результат удвоить.

Создание библиотеки элементов

1. Запустить Comsol Mutliphysics
2. Создать новый проект, выбрав кнопку “Model Wizard” рис. 1

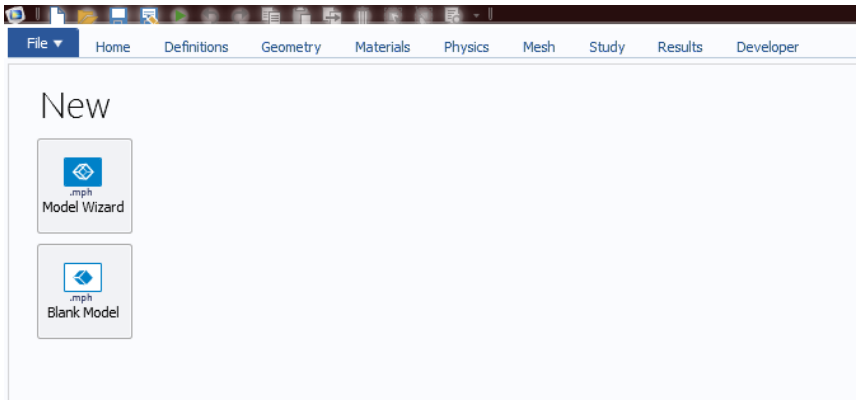


Рис.1 Создание нового проекта

3. Выбрать 3D рис.2

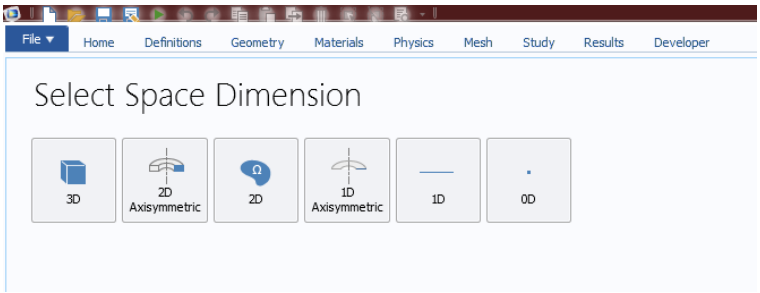


Рис.2 Выбор типа модели

4. В появившемся выбираем Electromechanics двойным кликом для выбора рабочего интерфейса и нажимаем Done рис.3

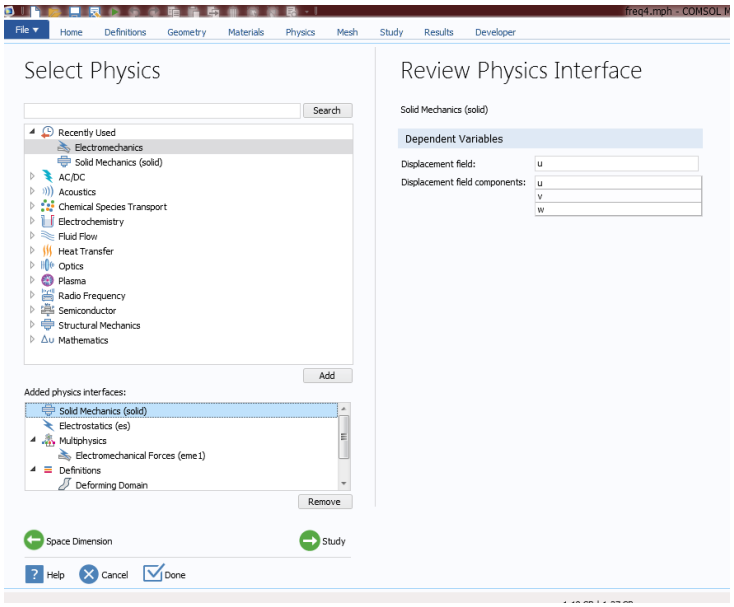
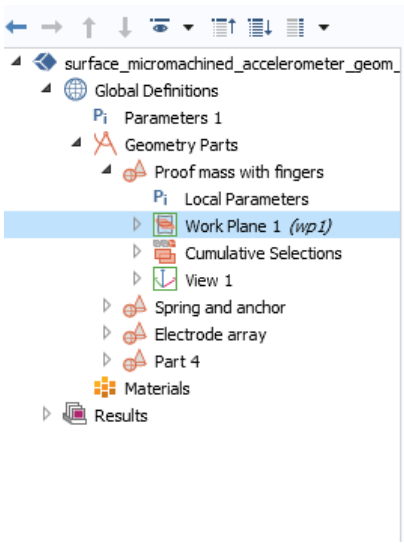


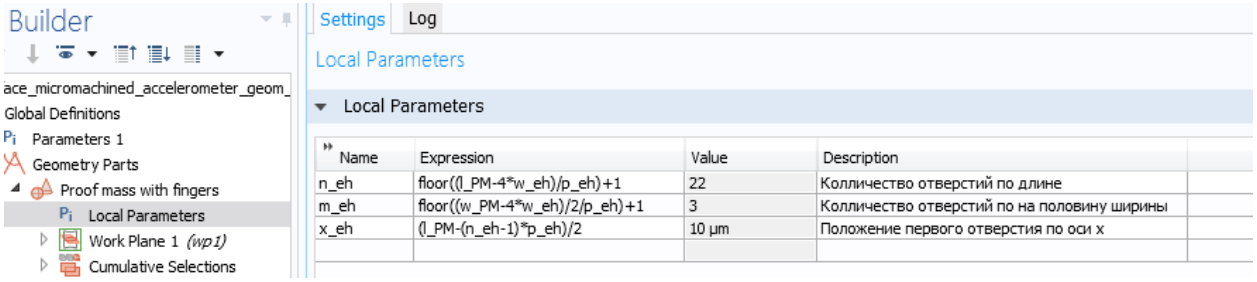
Рис. 3 Выбор рабочего интерфейса

5. Задаем через локальные переменные уравнения для определения изменяемых от размеров и количества элементов будущих моделей.
6. Сначала создадим модель подвижной массы. Для этого добавляем 3D геометрию через контекстное меню Geometry parts, даем ей имя Proof mass with fingers. Задаем локальные переменные и рабочую плоскость

   На рис.4 Показано дерево проекта и список геометрических переменных.



Name	Default expression	Value	Description
l_PM	440[um]	440 µm	Длина ПМ
w_PM	100[um]	100 µm	Полная ширина ПМ
t_PM	2[um]	2 µm	Толщина слоя кремния
l_f	114[um]	114 µm	Длина электрода
w_f	4[um]	4 µm	Ширина электрода
n_st	3	3	Количество электродов д...
n_f	7	7	КОличество чувствитель...
g_f	1[um]	1 µm	Зазор между чувствитель...
g_st	3[um]	3 µm	Зазор между электродами
x_st	14[um]	14 µm	Начальная точка для пос...
x_f	173[um]	173 µm	Начальная точка для пос...
w_eh	2[um]	2 µm	Размер стороны отверстия
p_eh	20[um]	20 µm	Период отверстий



Name	Expression	Value	Description
n_eh	floor((l_PM-4*w_eh)/p_eh)+1	22	Колличество отверстий по длине
m_eh	floor((w_PM-4*w_eh)/2/p_eh)+1	3	Колличество отверстий по на половину ширины
x_eh	(l_PM-(n_eh-1)*p_eh)/2	10 µm	Положение первого отверстия по оси x

Рис.4 Дерево проекта и список геометрических переменных.

7. Добавляем на Work Plane прямоугольник с параметрами, указанными на рис.5

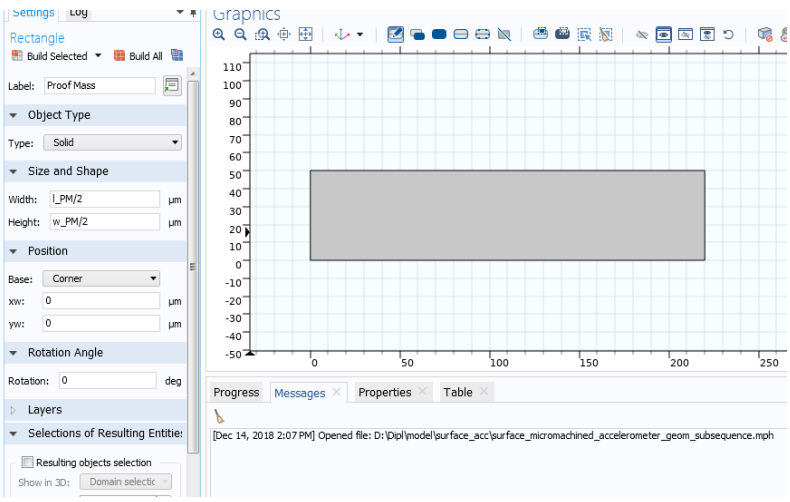


Рис.5 Добавление примитива

8. Добавляем электрод прямоугольником с параметрами, указанными на рис

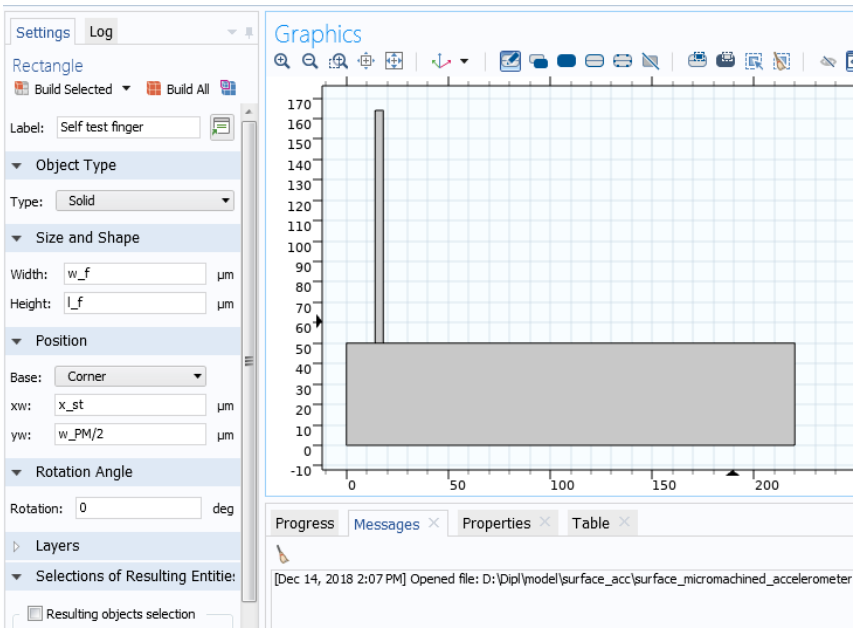


Рис.6 Добавление примитива

9. Делаем массив, с параметрами, указанными на рис.7

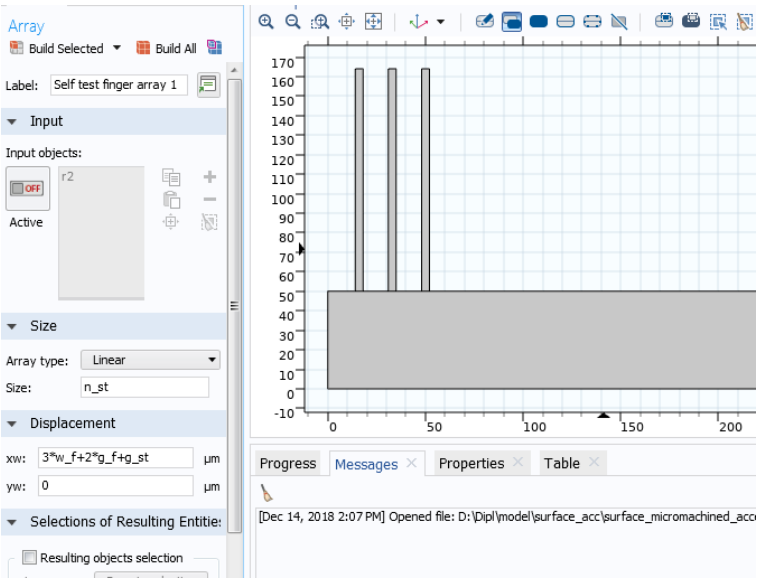


Рис.7 Создание массива

10. Зеркально отображаем полученные фигуры с помощью добавления блока Mirror рис.8.

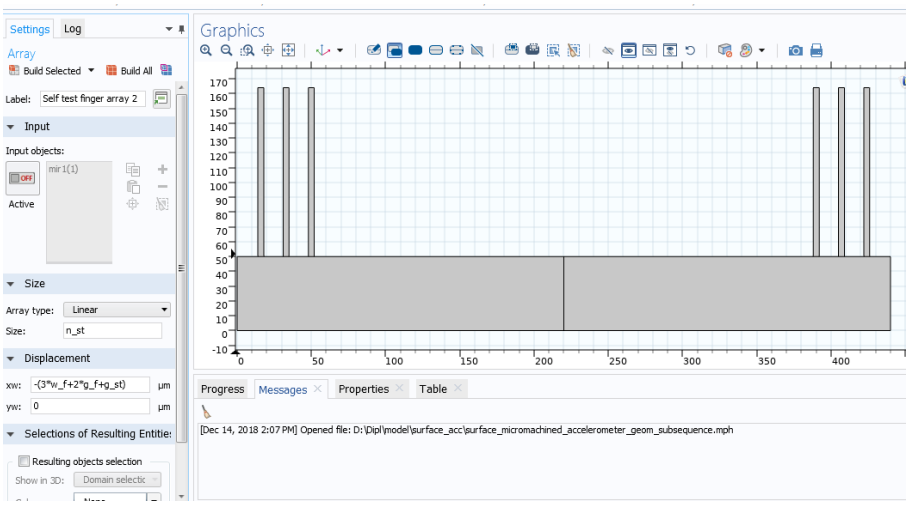


Рис.8 Применение зеркального отображения

11.Создаем чувствительный электрод, добавляем массив из чувствительных электродов с параметрами, указанными на рис.9

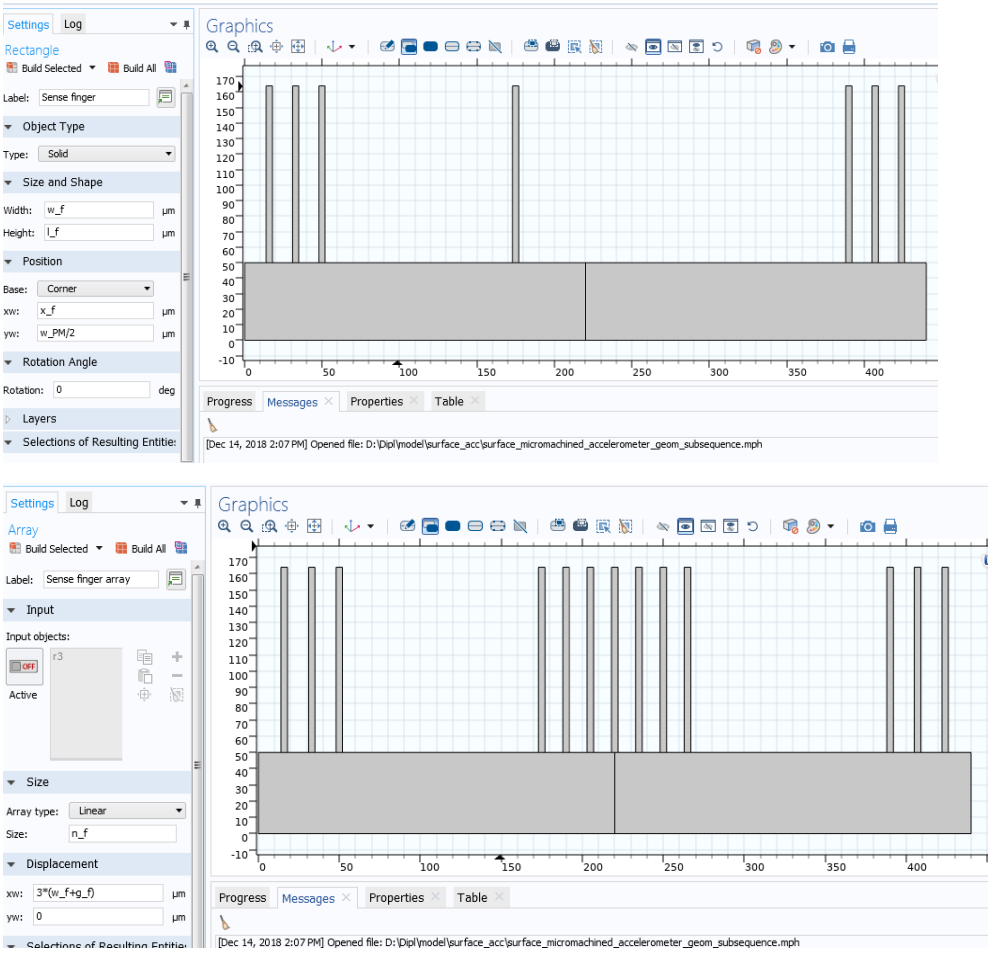


Рис.9 Создание массива

12.Объединяем массу и электроды блоком Union рис. 10

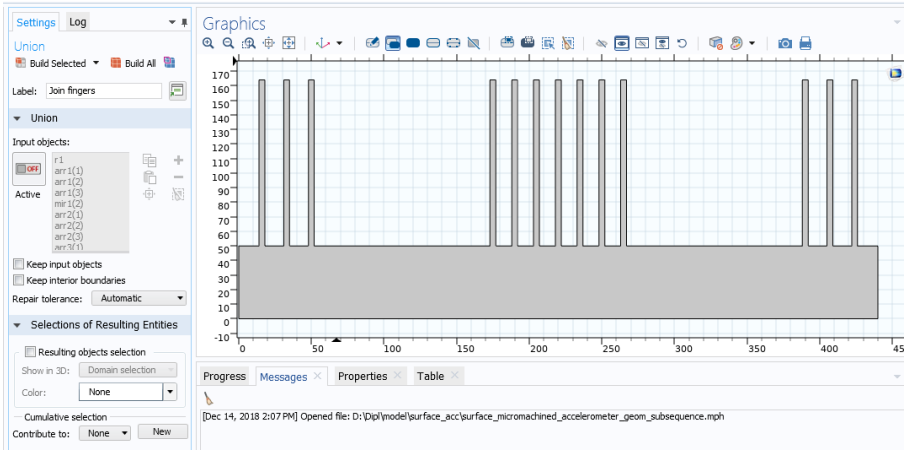


Рис. 10 Объединение элементов ПМ

13.Добавляем отверстие (квадрат на плоскости модели) рис.11

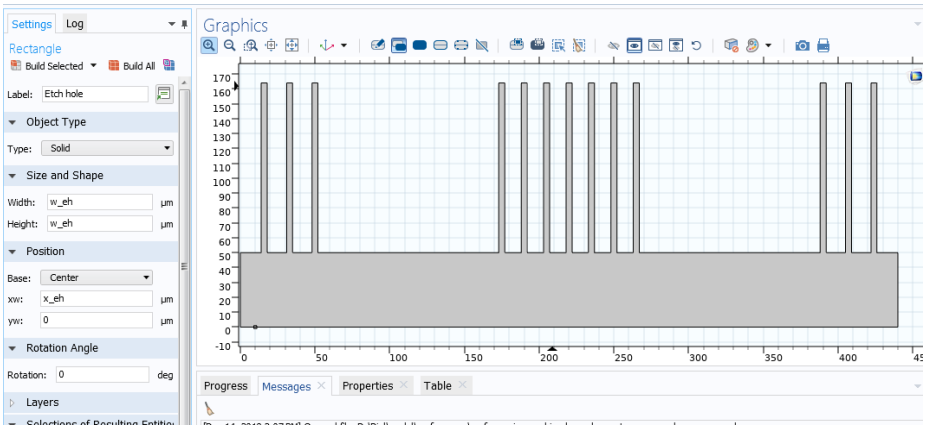


Рис. 11. Создание отверстия

14.Задаем массив из отверстий рис. 12

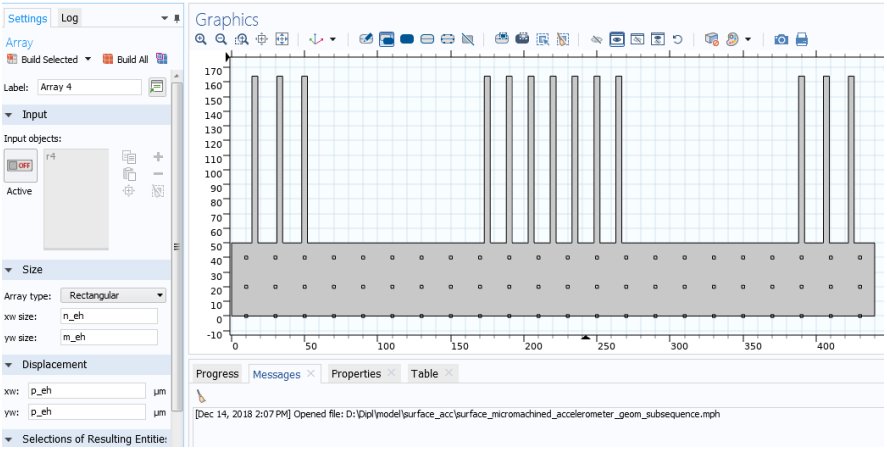


Рис.12 Создание массива отверстий

15.Делаем отверстия функцией Difference. Полученное дерево геометрии на рабочей плоскости изображено на рис. 13

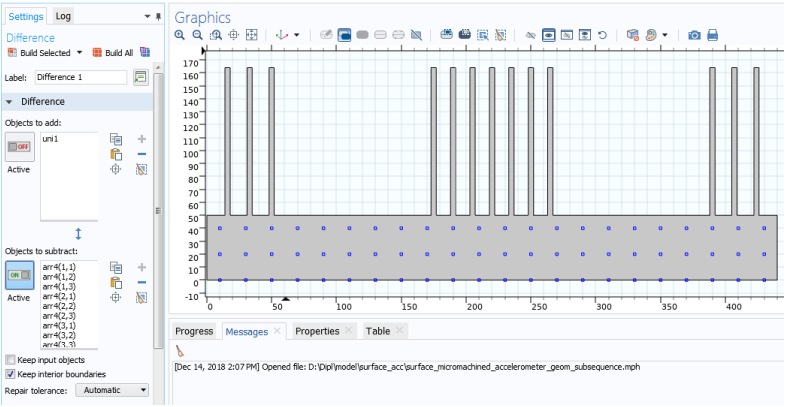


Рис.13 Создание отверстий функцией Difference

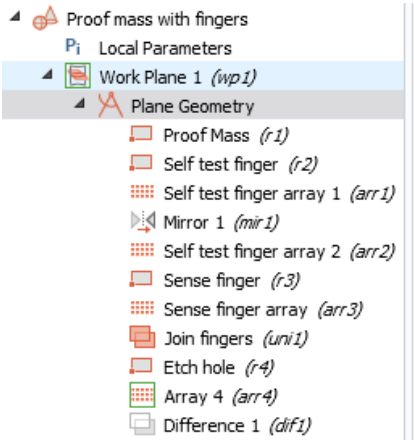


Рис. 14 Полученное дерево геометрии на рабочей плоскости

16. Следующим этапом построения геометрии является создание упругого подвеса. Создадим аналогичным п.6 образом пружину. Добавляем 3D геометрию, даем ей имя Spring and anchor рис.15. Дерево геометрии показано на рис.16.

Input Parameters

Name	Default expression	Value	Description
mirror	1	1	0: no mirror. 1: mirror
l_sp	320[um]	320 µm	Длина пружины
w_sp	2.5[um]	2.5 µm	Ширина пружины
g_sp	1.25[um]	1.25 µm	Зазор между витками
w_sp_c...	4[um]	4 µm	Ширина контактной площ...
w_f	4[um]	4 µm	Ширина электрода
l_anch...	17[um]	17 µm	Длина базового витка
w_anc...	17[um]	17 µm	Ширина базового витка
r_anch	3[um]	3 µm	Радиус анкера
x_anch	12[um]	12 µm	Расположение анкера
t_sp	2[um]	2 µm	Толщина пружины
t_anch	1.6[um]	1.6 µm	Толщина анкера
x_sp	0[um]	0 µm	Переменная для перемещ...

Рис.14 Параметры пружины

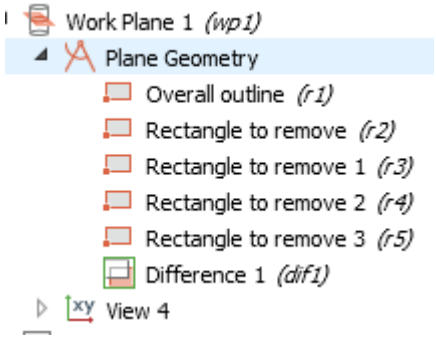


Рис.15 Дерево геометрии пружины

17.Задаем прямоугольник на рабочей плоскости рис.16

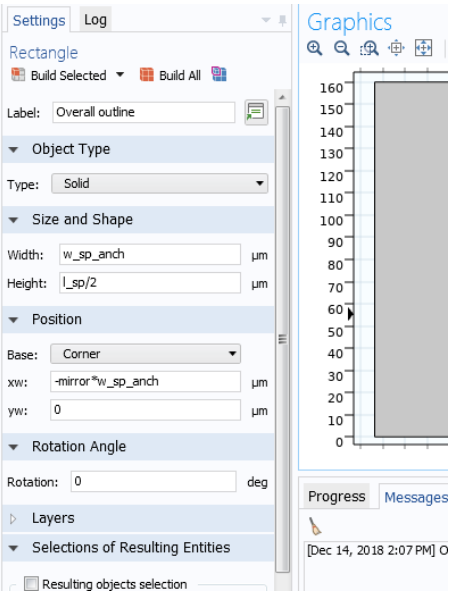


Рис.16 Создание примитива

18.Задаем прямоугольник, который будет вырезан для того, чтобы сделать анкерную базу рис. 17

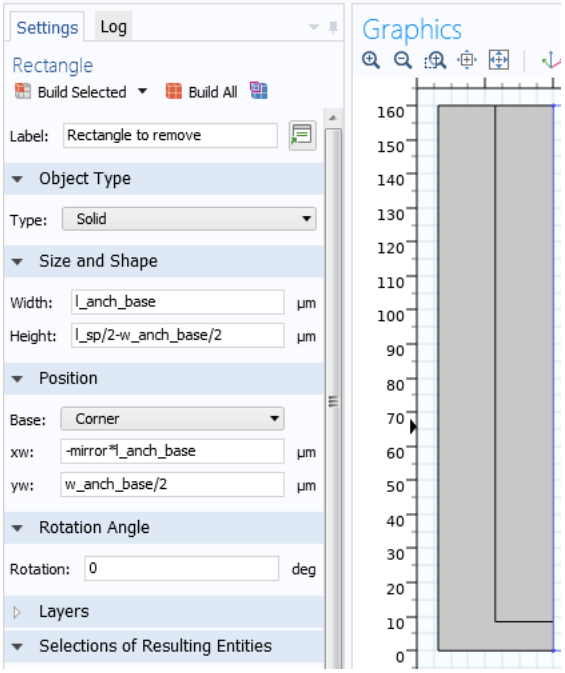
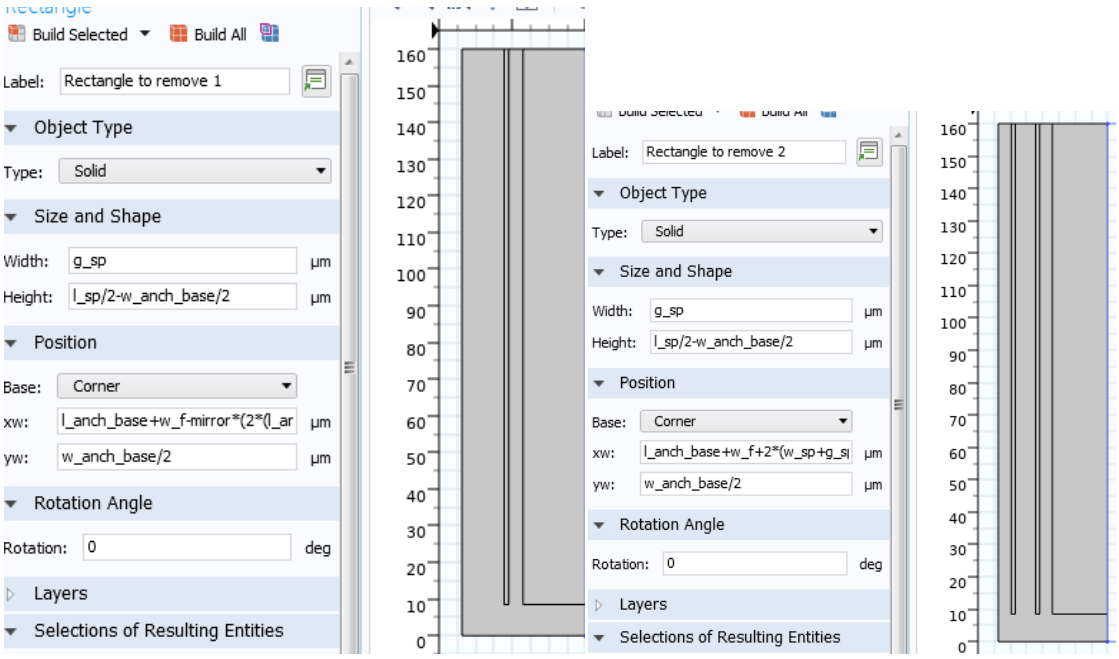


Рис. 17Создание примитива

19.Создаем промежутки между витками прямоугольниками рис.18.



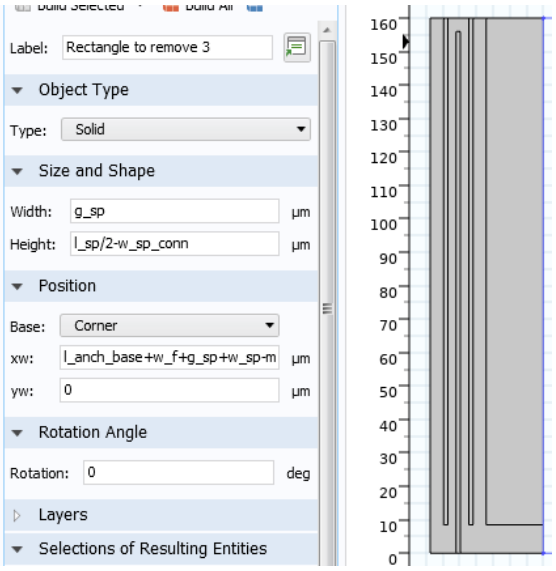


Рис.18 Создание зазоров

20.Вырезаем все маленькие прямоугольники из большого через Difference рис.19.

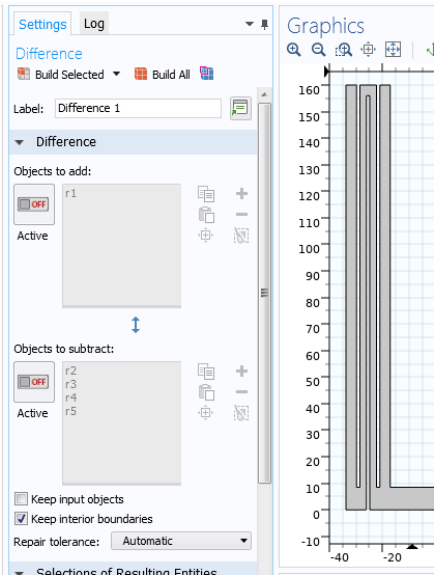


Рис.19 Создание зазоров

21.Вытягиваем пружину с помощью extrude рис.20

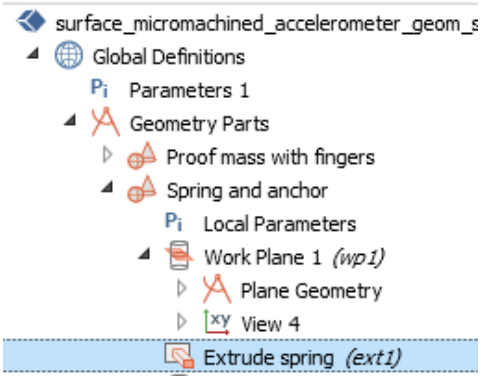


Рис.20 Дерево с блоком extrude

22.Создаем анкер на отдельной плоскости

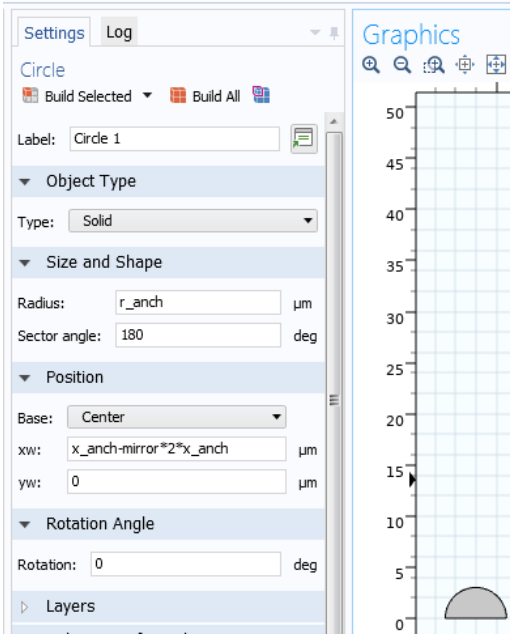


Рис. 21 Создание примитива анкера

23.Вытягиваем анкер с помощью extrude рис.22

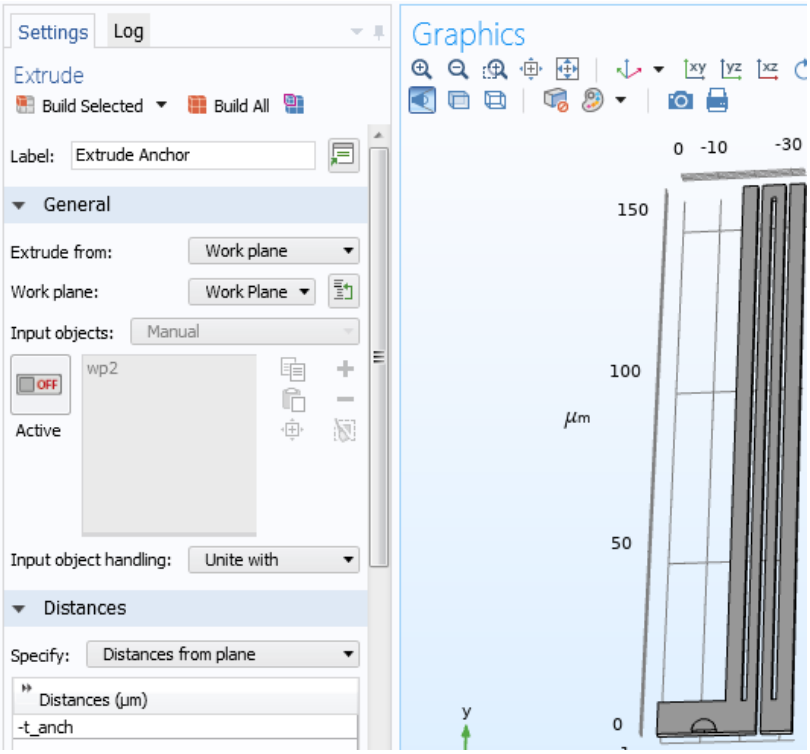


Рис.22 Вытягивание анкера

24. Теперь создадим конструкцию электрода. Добавляем 3D геометрию в общее дерево, задаем параметры рис.23 , даем ей имя Electrode array. Добавляем на плоскость два прямоугольника – для электрода и контактной площадки рис.24.

Input Parameters

Name	Default e>	Value	Description
LH	1	1	0: RH, 1: LH
l_e	120[um]	120 µm	Длина электрода
w_e	4[um]	4 µm	Ширина электрода
l_p	16[um]	16 µm	Длина базы электрода
w_p	8[um]	8 µm	Ширина базы электрода
r_an	2[um]	2 µm	Радиус анкера
t_e	2[um]	2 µm	Толщина электрода
t_an	1.6[um]	1.6 µm	Толщина анкера
n_e	3	3	Число электродов
p_e	15[um]	15 µm	Период электродов
x_e	0[um]	0 µm	Положение по оси X
y_e	0[um]	0 µm	Положение по оси Y

Рис. 23 Переменные для электрода

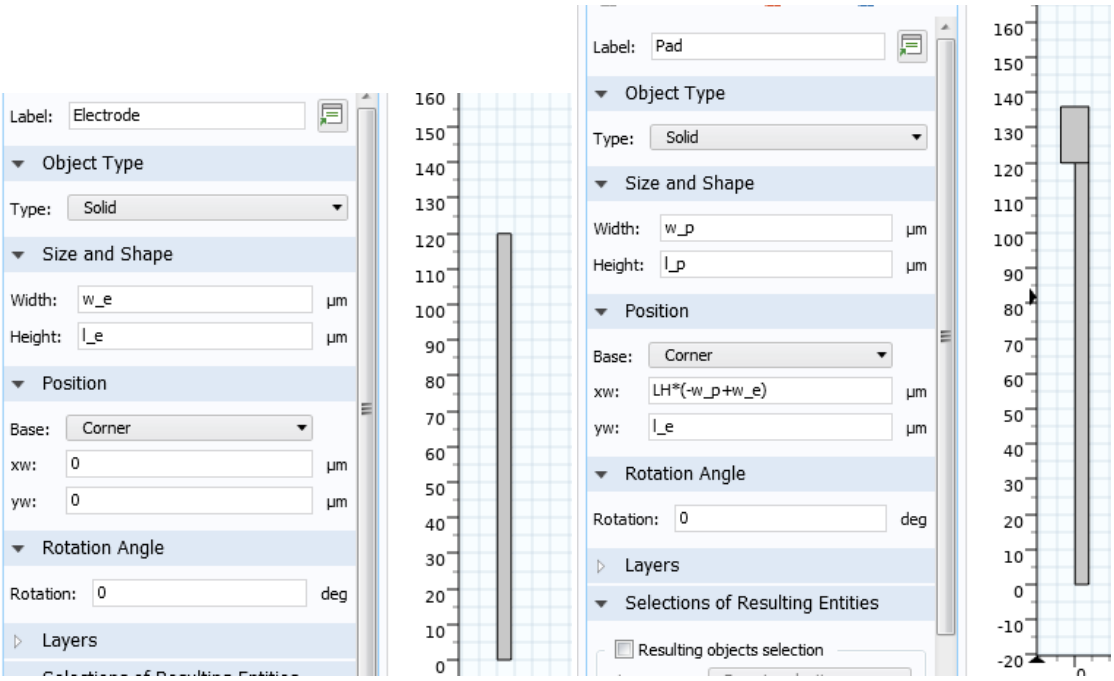


Рис.24 Создание примитивов электрода

25.Вытягиваем электрод с помощью extrude рис.25.

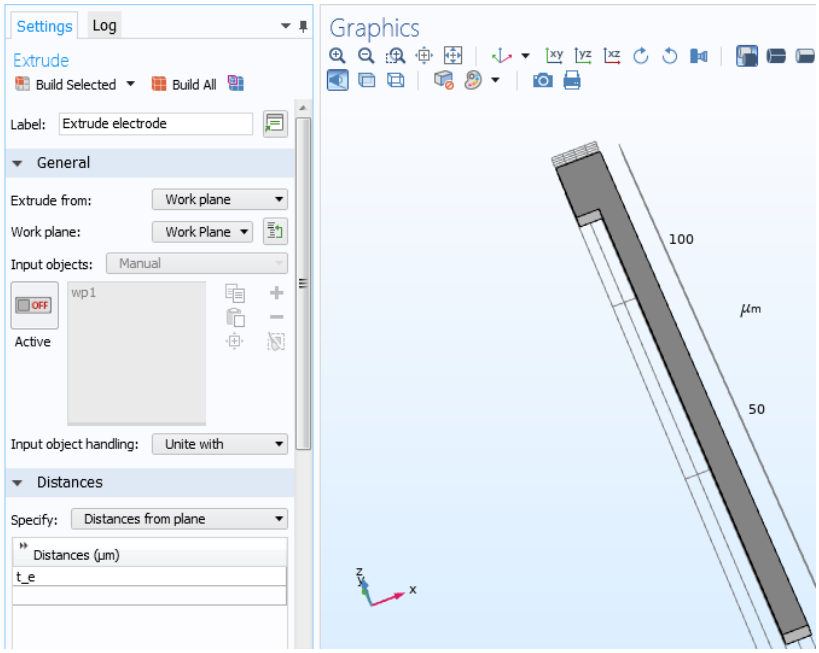


Рис.25 Вытягивание электрода

26.Создаем анкер через Circle на контактной площадке и вытягиваем с помощью extrude рис. 26.

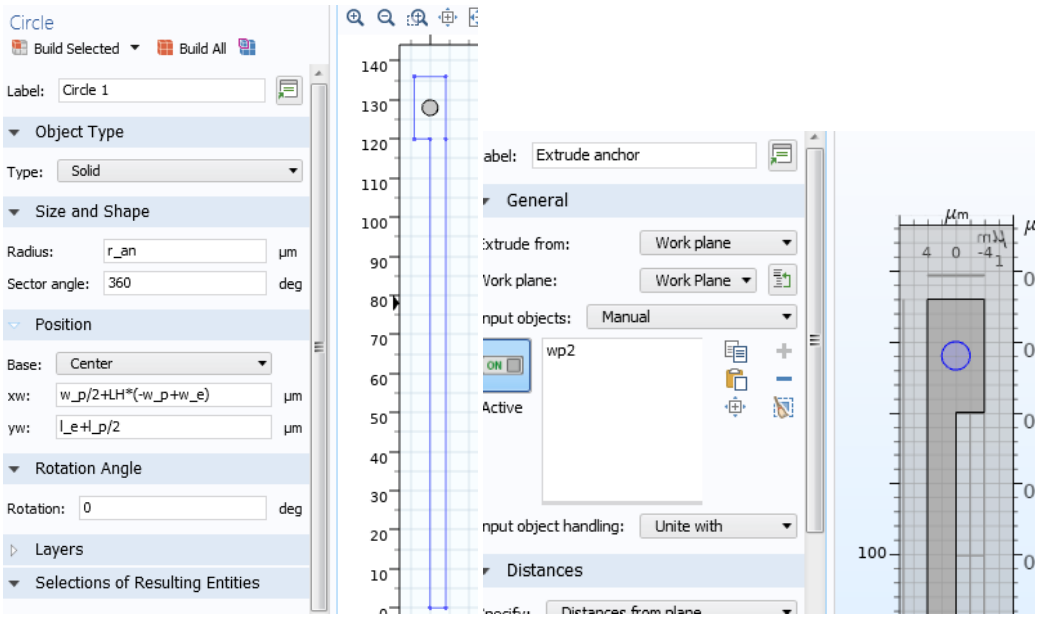


Рис.26 Создание анкера электрода

27.Задаем массив из электродов рис.27.

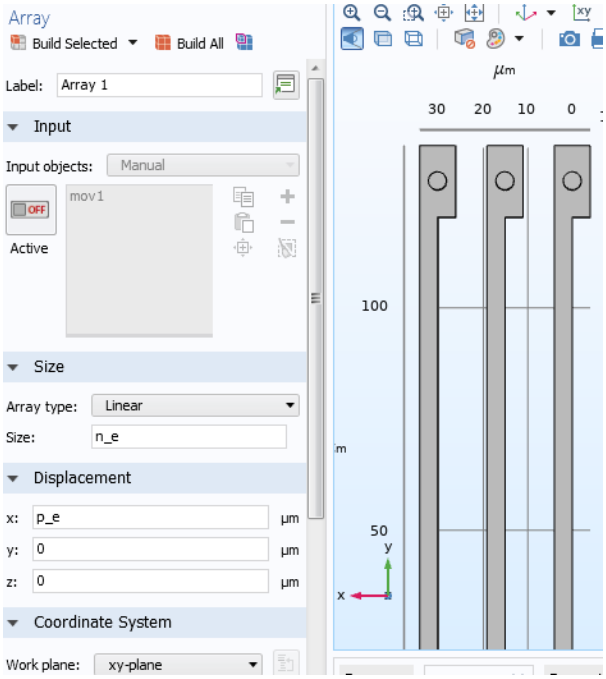


Рис. 27 Задание массива

28.Сохраняем файл и открываем новый проект

3.2. Создание полной модели чувствительного элемента микроакселерометра

Следующим этапом является создание нового документа с заданием пути к файлу библиотеки с геометрическими элементами. Заметим, что при

изменении файла библиотеки в новом документе будет возможность обновления. Конструкция была скомпонована путем дублирования и зеркального отображения с помощью изменения параметров проекта. На рис.3.4 изображена полученная сборная модель половины датчика.

1. Создать новый проект, выбрав кнопку “Model Wizard”
2. Выбрать 3D
3. В появившемся окне нажимаем Done
4. Ссылаемся на библиотеку через Load Part в контекстном меню геометрии рис.28.

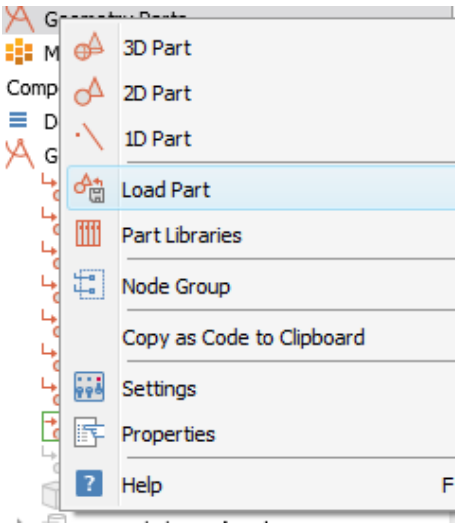


Рис. 28 Добавление геометрических элементов

5. Добавляем ссылку на библиотеку и выбираем файл, видим в списке модели элементов, выбираем все и нажимаем ОК рис. 29.

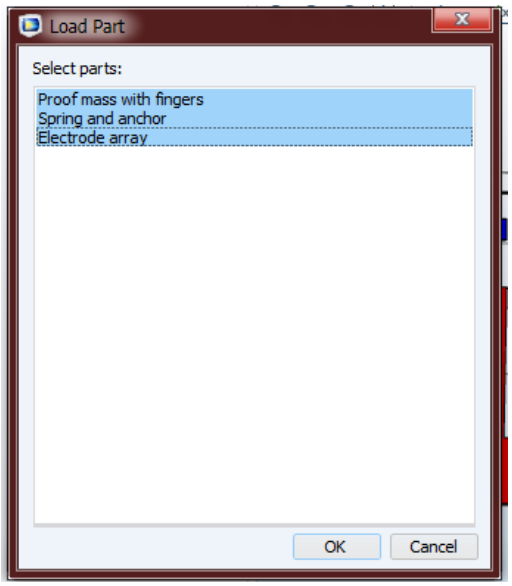


Рис.29 Добавление геометри

6. Добавляем части геометрии через Part-> необходимые элементы библиотеки рис.30

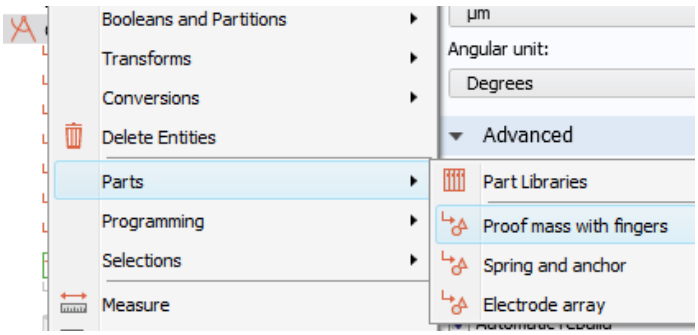


Рис.30 Добавление геометрии

7. Добавляем массу рис. 31

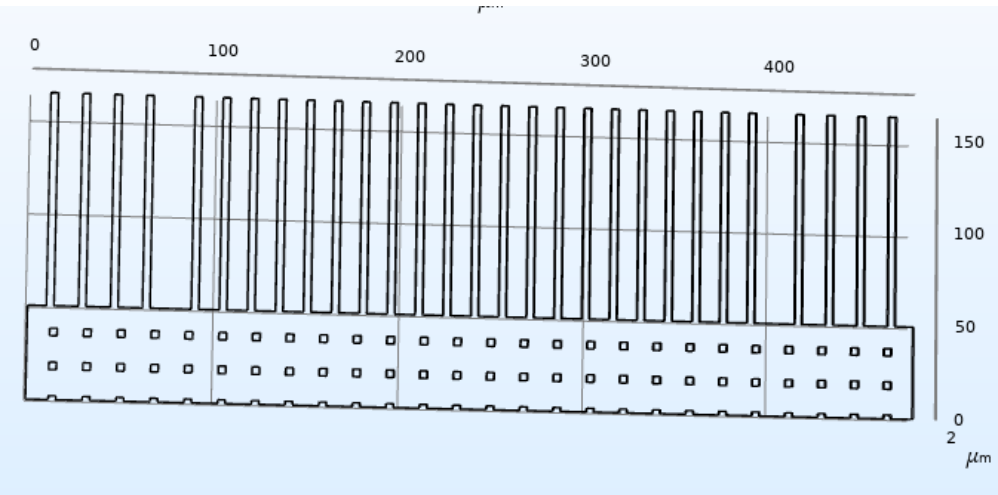


Рис.31 Добавление массы

8. Добавляем по очереди левую и правую пружины рис.32.

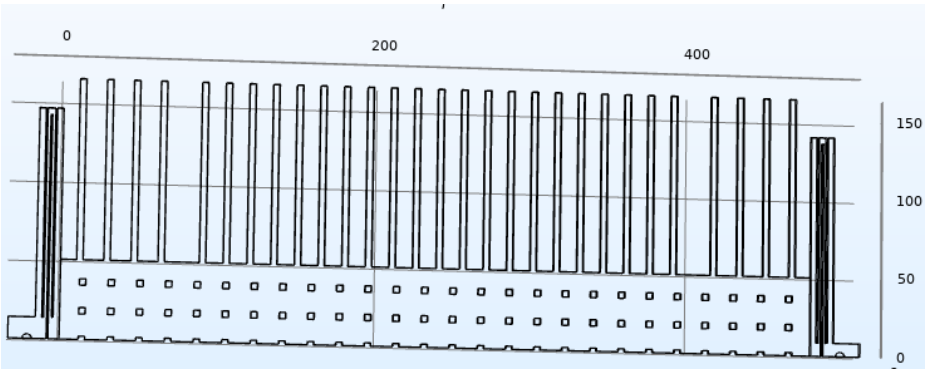


Рис. 32 Добавление пружин

9. Добавляем левые чувствительные электроды рис.33.

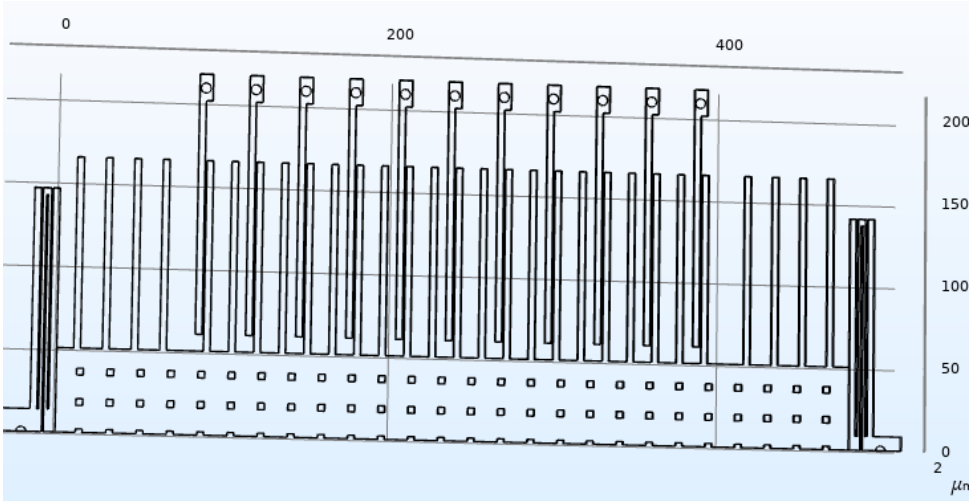


Рис.33 Добавление электродов

10.Добавляем правые чувствительные электроды рис.34.

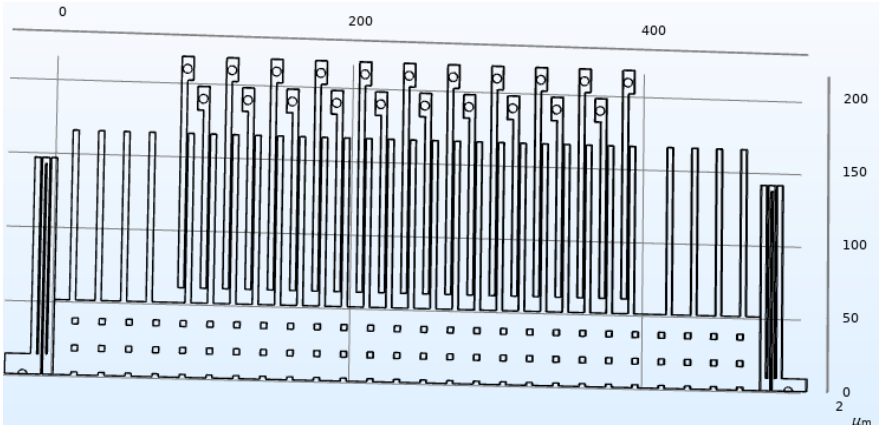
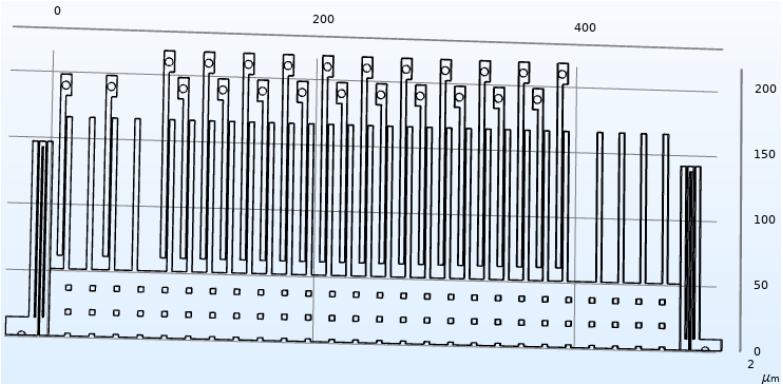


Рис. 34 Добавление электродов

11. Добавляем левые электроды самотестирования с двух сторон рис. 35-36.



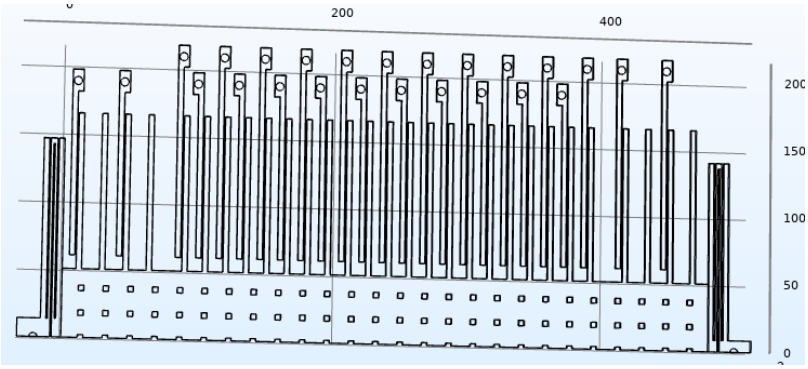
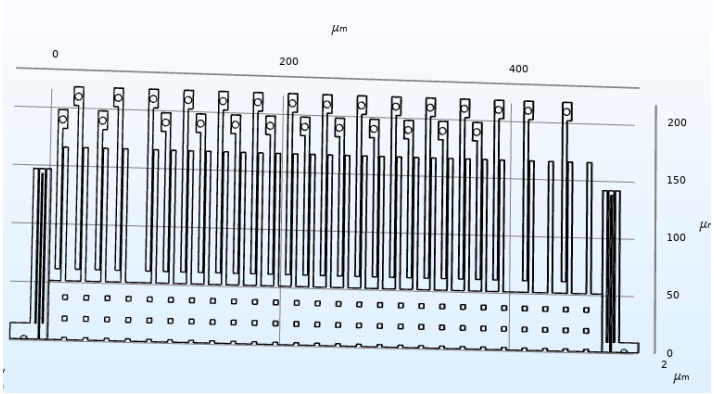


Рис. 35 Добавление электродов для самотестирования.

12. Добавляем правые электроды самотестирования с двух сторон рис.36



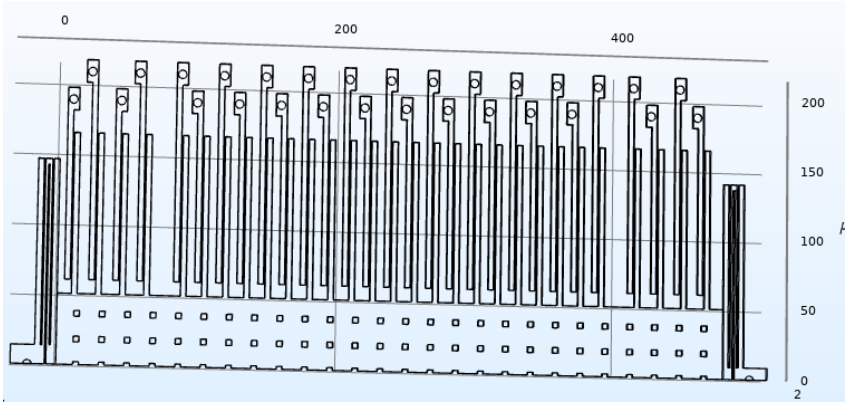


Рис. 36 Добавление электродов для самотестирования.

13. Добавляем среду через контекстное меню геометрии (прямоугольник) и вытягиваем ее.
14. Задаем значения переменных таблицы 1-3.

Таблица 3.1 Параметры ПМ

Имя переменной	Значение		Описание
l_PM	478	мкм	Длина подвижной массы
w_PM	100	мкм	Ширина подвижной массы
t_PM	4	мкм	Толщина кремниевой пластины
l_f	114	мкм	Длина электрода
w_f	4	мкм	Ширина электрода
g_st	3	мкм	Зазор между электродами самотестирования
x_st	14	мкм	Начальная точка построения чувствительных электродов по оси X

x_f	173	мкм	Начальная точка построения электродов для самотестирования по оси X
w_eh	2	мкм	Сторона отверстия
p_eh	20	мкм	Расстояние между отверстиями
x_eh	10	мкм	Начальная точка для построения первого отверстия по оси X
n_st	4	шт	Количество электродов для самотестирования
n_f	21	шт	Количество чувствительных электродов
n_eh	26	шт	Количество отверстий вдоль длины
m_eh	2.5	шт	Количество отверстий вдоль ширины

Таблица 3.2 Параметры пружины

Имя переменной	Значение		Описание
t_sp	2	мкм	Толщина пружины
w_f	4	мкм	Ширина электрода
l_sp	280	мкм	Длина пружины
w_sp	2	мкм	Ширина пружины
g_sp	1	мкм	Зазор на пружине

w_sp_conn	4	мкм	Ширина пружинного соединения
l_anch_base	17	мкм	Длина основания анкера
w_anch_base	17	мкм	Ширина основания анкера
r_anch	3	мкм	Анкерный радиус
x_anch	12	мкм	Положение якоря относительно оси X
p_eh	18	мкм	

Таблица 3.3

Имя переменной	Значение		Описание
l_e	120	мкм	Длина электрода
w_e	4	мкм	Ширина электрода
l_p	16	мкм	Длина пэда
w_p	8	мкм	Ширина пэда
r_an	2	мкм	Радиус анкера
t_e	2	мкм	Толщина электрода
t_an	1,6	мкм	Толщина анкера
n_e	3		Количество электродов
p_e	15	мкм	Период
x_e	0	мкм	x position
y_e	0	мкм	y position

На рис. 37-38 Показано итоговое дерево геометрии и итоговая модель

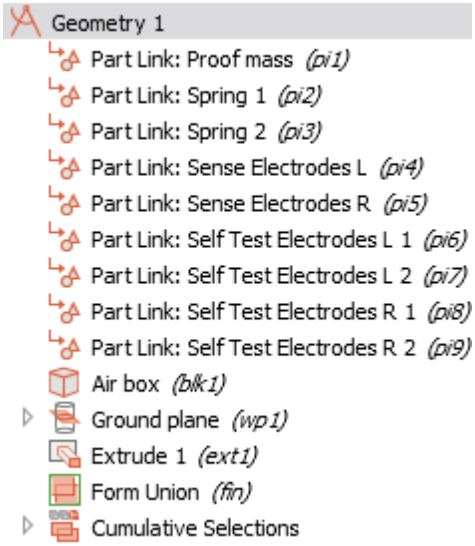


Рис. 37. Итоговое дерево геометрии компонента

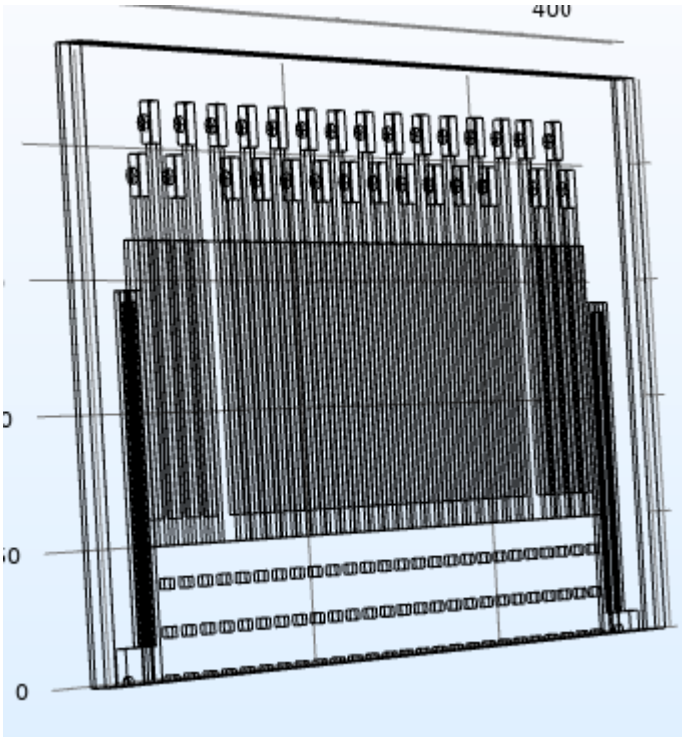


Рис. 38 Итоговая геометрия с скрытым блоком демпфирующей среды

3.3. Задание механических и электрических параметров

1. Задаем материал – кремний и воздух из стандартных бибилиотек MEMC и Build In соответственно. Выбираем домены демпфирующей среды для воздуха и кремний для всех остальных(ЧЭ). Рис. 39.

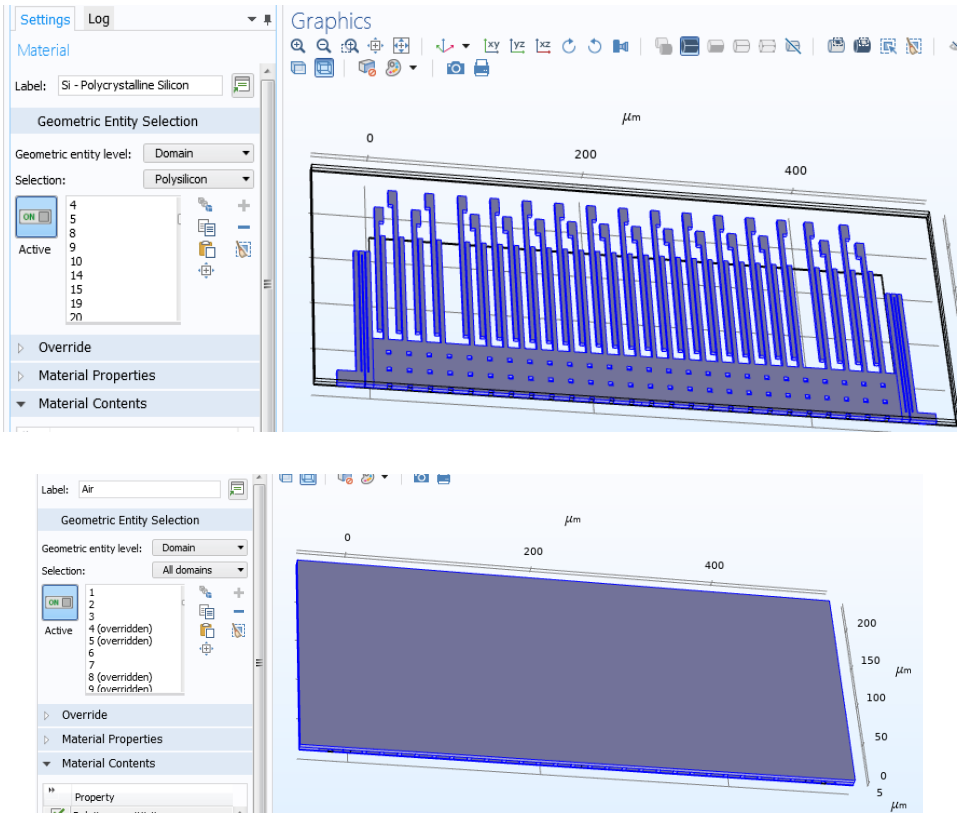


Рис. 39 Задание материала

2. Задаем механические параметры: демпфирование через Solid Mechanics-> Linear Elastic, нагрузку на ЧЭ через Body Load рис. 40

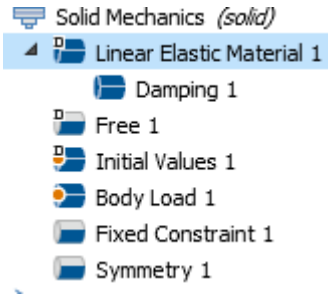


Рис. 40 Настройка механических параметров

В качестве типа демпфирование выбираем Рэлеевское, а коэффициенты демпфирования задаются, но должны быть высчитаны отдельно см. раздел 1.

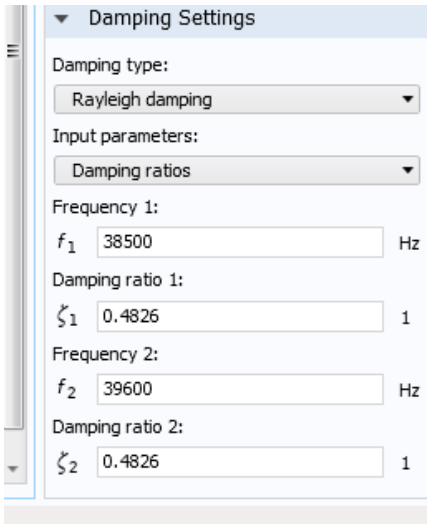


Рис. 41. Задание параметров демпфирования

3. Задаем механические параметры: для ограничения перемещений и корректного расчета для половины модели задаем симметрию для нижней части детали рис.42.

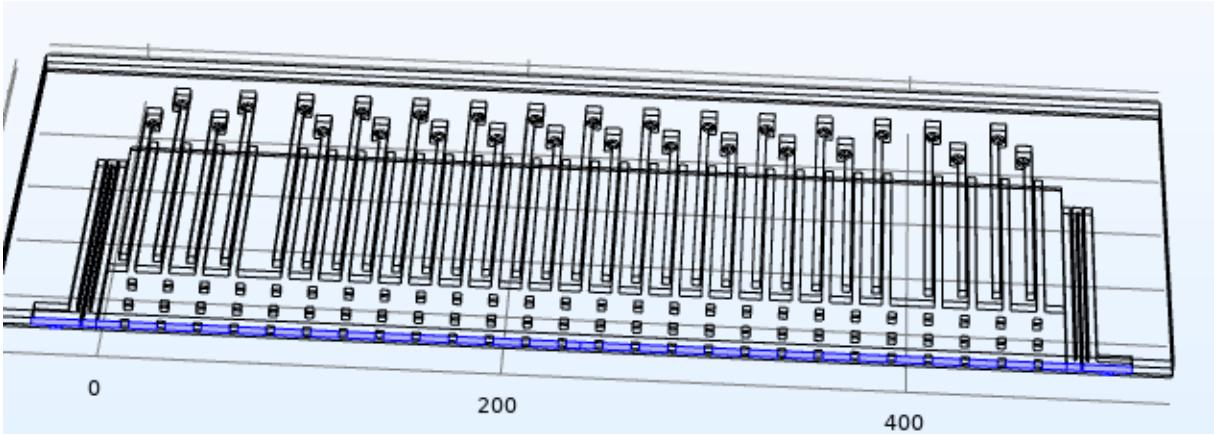


Рис.42 Задание симметрии

4. В блоке Electrostatics задаем заземление на подвижную массу, задаем Terminal для левых и правых чувствительных обкладок и обкладок самотестирования рис.43.

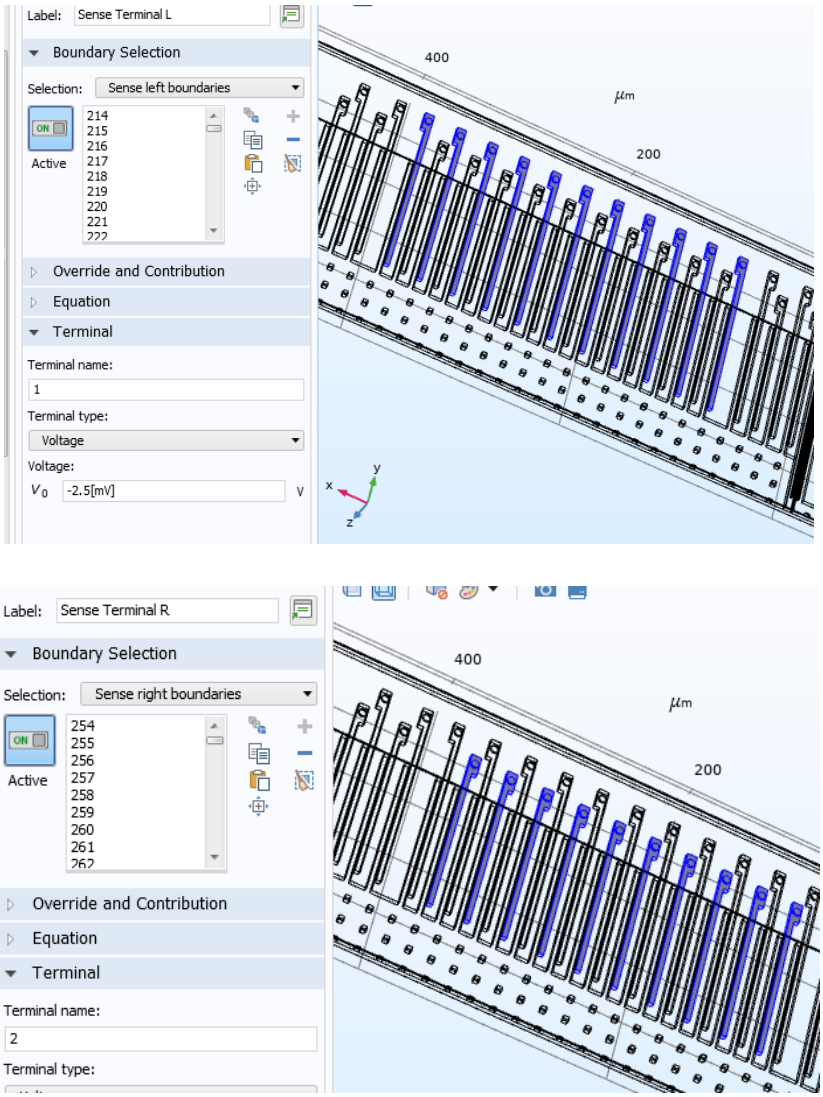


Рис.43. Задание терминалов

5. Для подвижных электродов задаем Floating Potential через контекстное меню Electrostatics

6. Задаем заземление Ground через контекстное меню Electrostatics рис. 44.

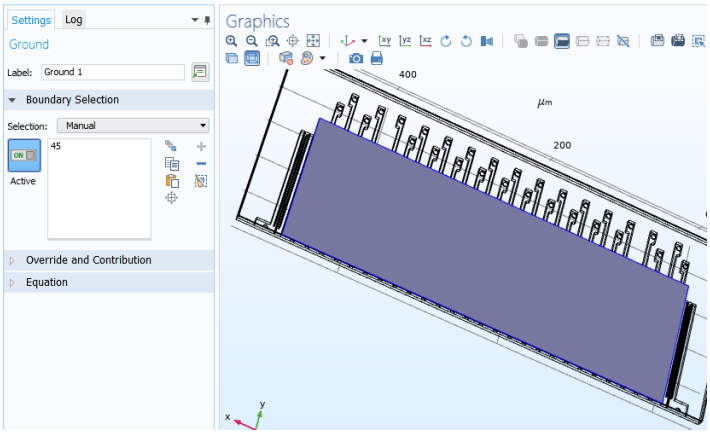


Рис. 44. Задание заземления.

7. Добавляем терминал для электродов самотестирования рис. 45.

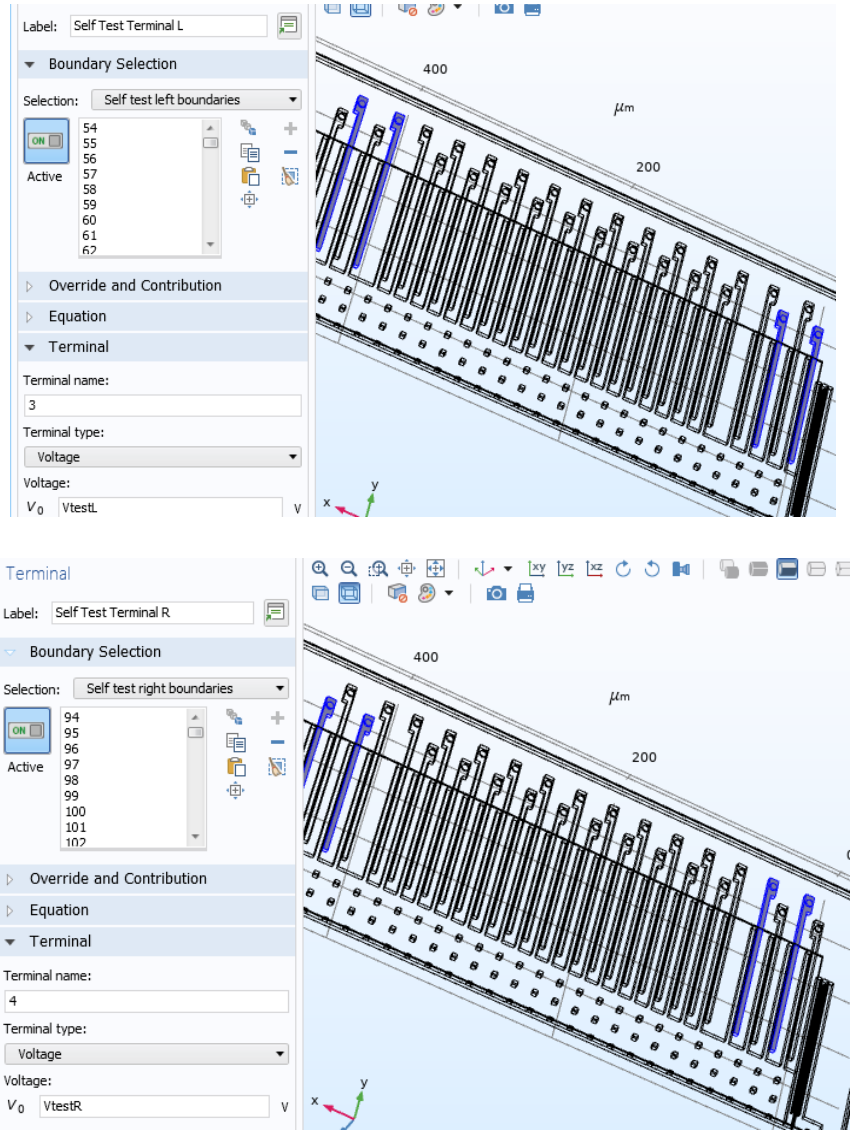


Рис. 45 Задание электродов самотестирования

Итоговое дерево электрических настроек модели показано на рис. 46.

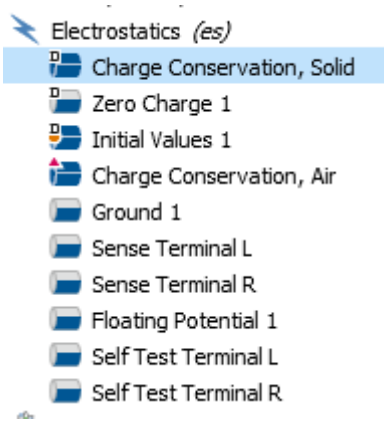


Рис. 46. Итоговое дерево Electrostatics

3.4. Дискретизация конечно-элементной модели

Следующим этапом для задания исследуемых параметров являлась дискретизация конечно-элементной модели расчетной области реализовано путем задание с помощью функций Mesh сетки. Для элементов из кремния была задана сетка, состоящая из элементарных элементов в форме тетраэдров. В силу важности изучения процессов происходящих в упругих элементах размер элементарных элементов был задан минимальным. Для демпфирующей среды была задана стандартная протяженная сетка.

1. Задаем триагональную сетку Free Tangular для всех доменов через контекстное меню Mesh рис.47

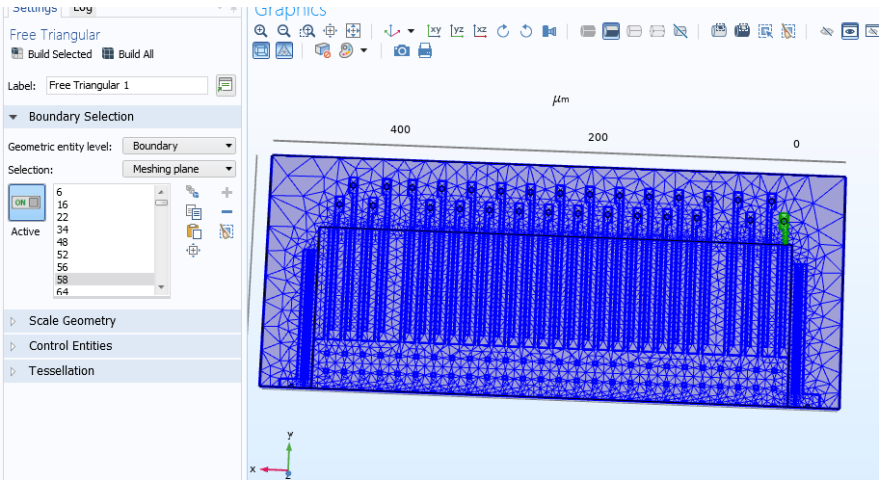


Рис. 47 Сгенерированная сетка на геометрической модели ЧЭ ММА

2. Для того, чтобы результаты моделирования механических процессов были более точные сгущаем сетку для для пружин через контекстнове меню Free Triangular->Size рис. 48.

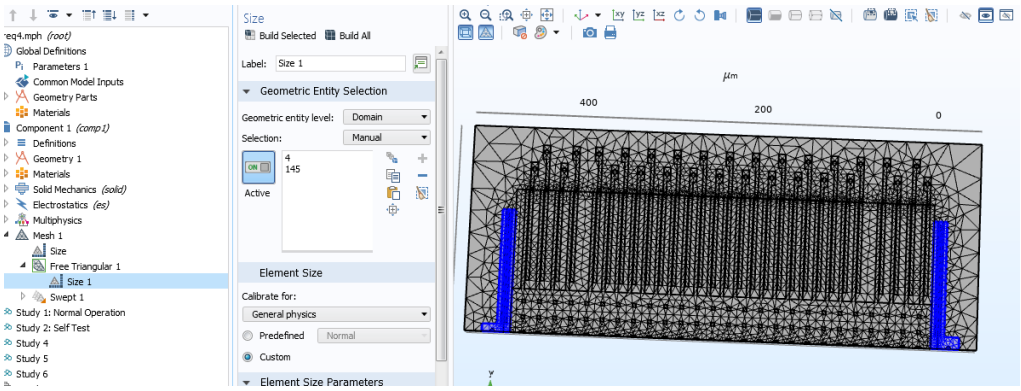


Рис. 48 Сгущение сетки

3. Для верхнего слоя воздуха сгущаем сетку через протяжку Swept рис. 49

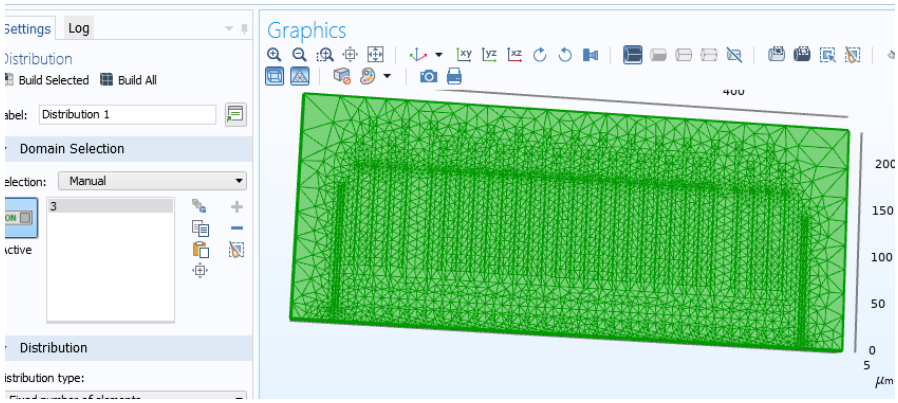


Рис. 49 Добавление протяжки

3.5. Проведение моделирования

1. Создадим новое статическое исследование в зависимости от ширины пружины для этого нажмем кнопку Add Study и в появившемся окне выберем Stationary рис. 50

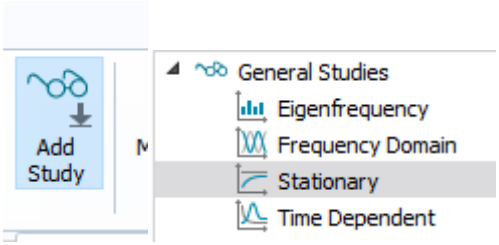
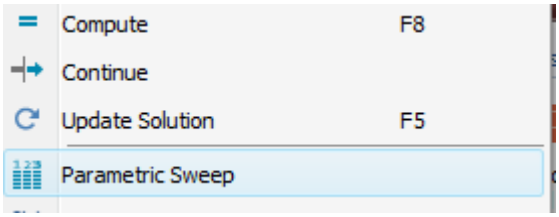


Рис. 50 Добавление исследования

2. Для задания нескольких значений ширины пружины выберем параметрический свип через контекстное меню рис. 51



Добавление параметрического свипа

3. Создадим статическое исследование через контекстное меню для изучения действия ускорения в заданном диапазоне, диапазон значений выбираем, поставив галочку в меню Study Extension рис. 50.

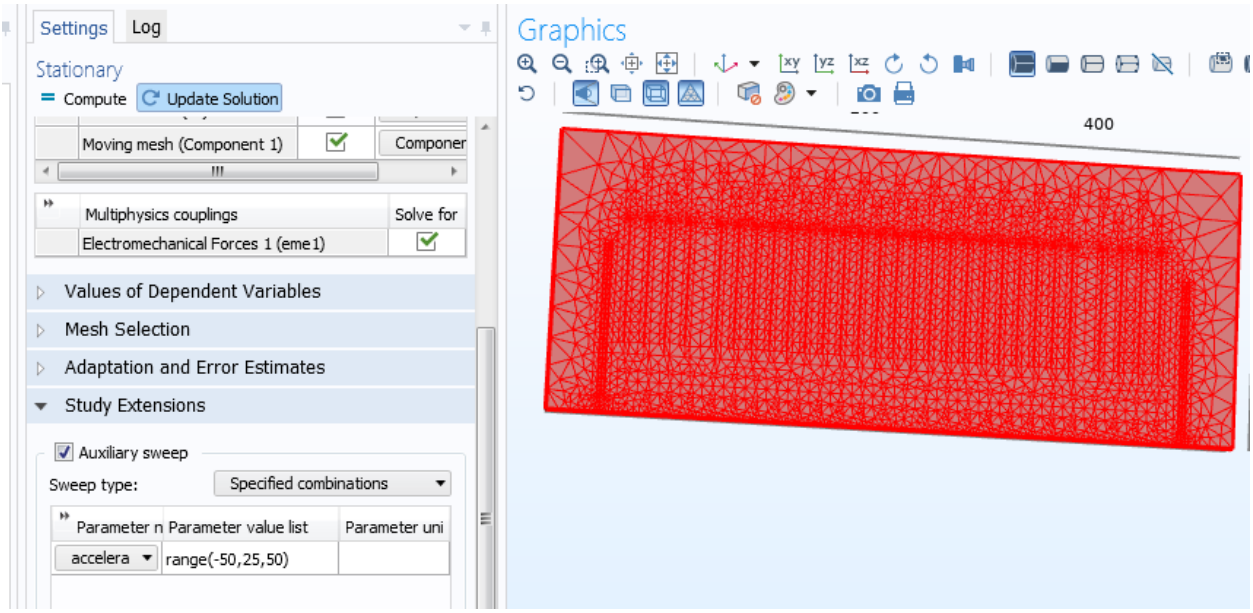


Рис. 50 Задание диапазона статического исследования

Первым испытанием модели является задание ускорения по главной оси в диапазоне от -50g до 50g с шагом 25. Результаты с изображением перемещения пружины в результате действия ускорения диапазоне от -50g до 50g показаны на рис.51. а-г. Напряжение на ЧЭ ММА на рис.52.

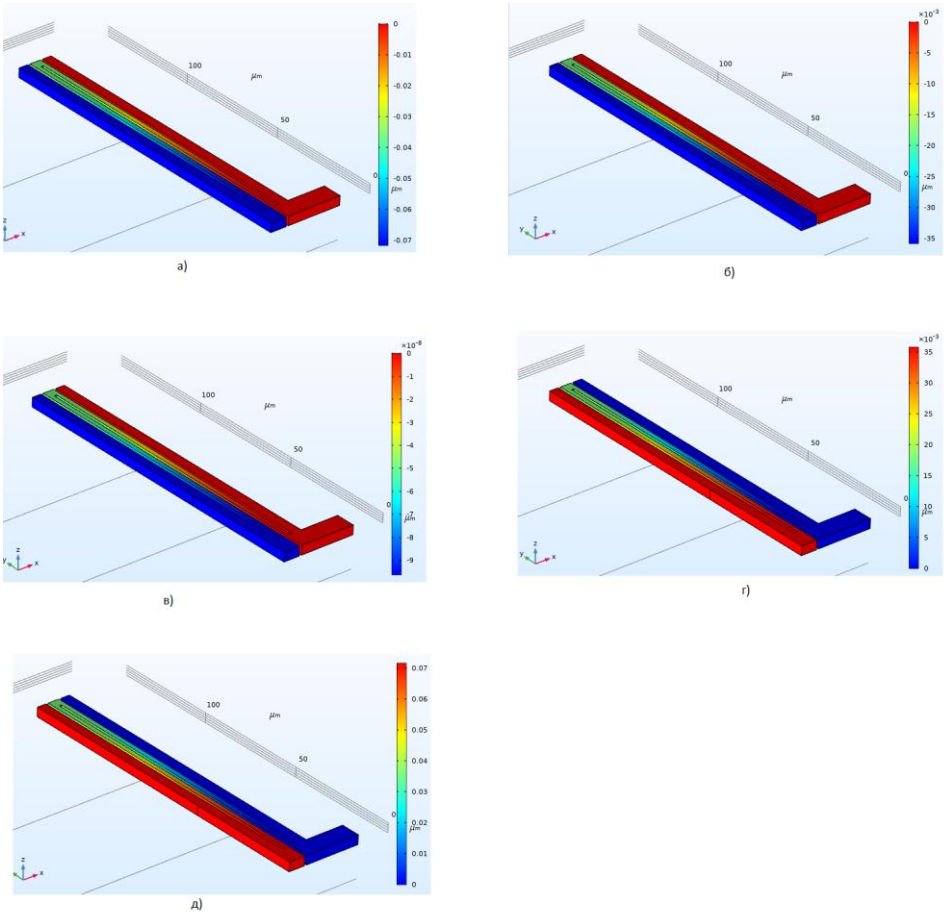


Рис. 51. Результаты с изображением перемещения пружины в результате действия ускорения диапазоне от -50g до 50g: а) -50g; б) -25g; в) 0g; г) 25g; д) 50g;

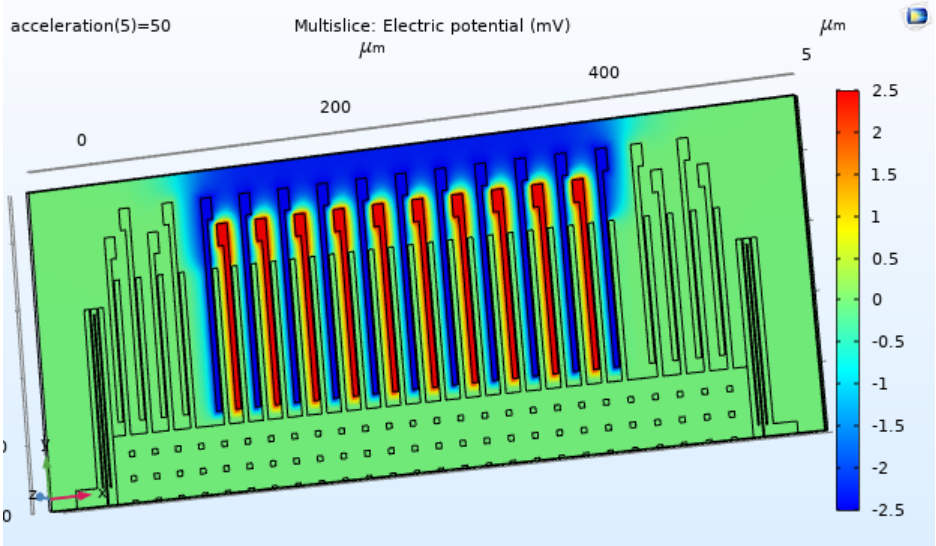


Рис. 53. Отображение напряжения на электродах

По данным полученным из первого исследования были построены график перемещения в зависимости от ускорения рис. 54 и график зависимости напряжения на подвижных обкладках от ускорения рис.55, график зависимости емкости между электродами с малым зазором от ускорения рис. 56, и график зависимости емкости между электродами с малым зазором от ускорения рис. 57.

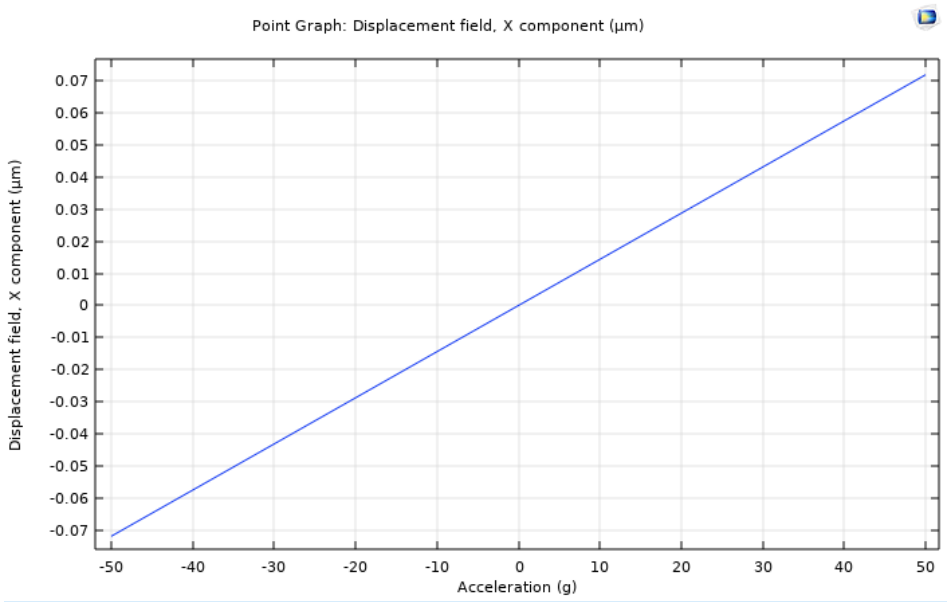


Рис.54 График зависимости перемещения от ускорения

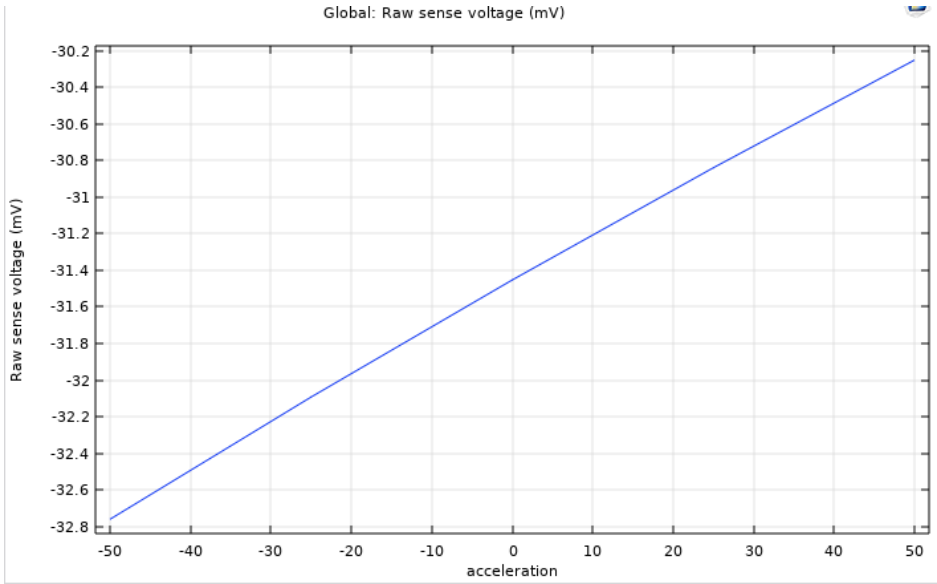


Рис.55 График зависимости напряжения на подвижных обкладках от ускорения

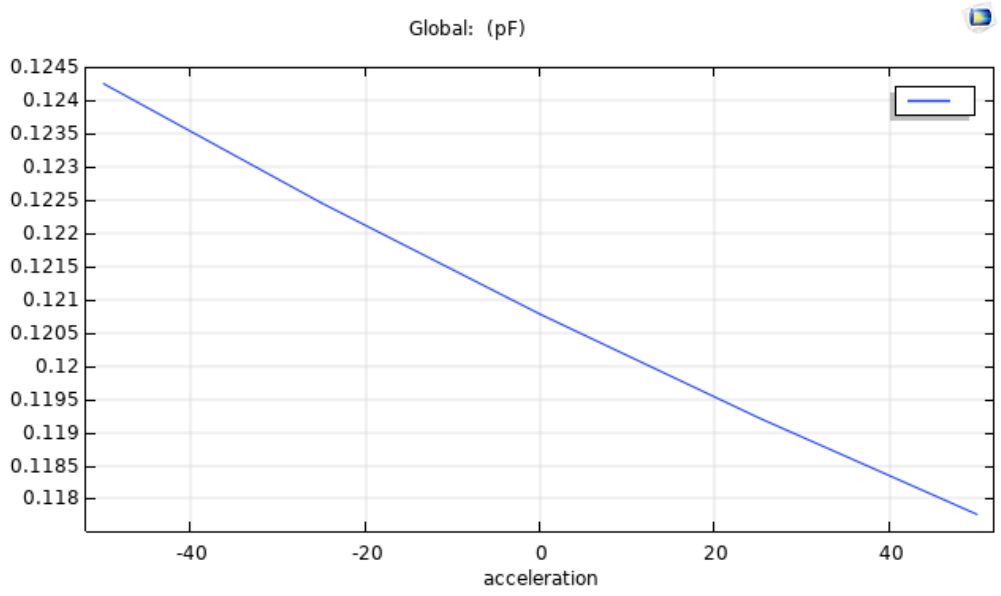


Рис.56 График зависимости емкости между электродами с малым зазором от ускорения

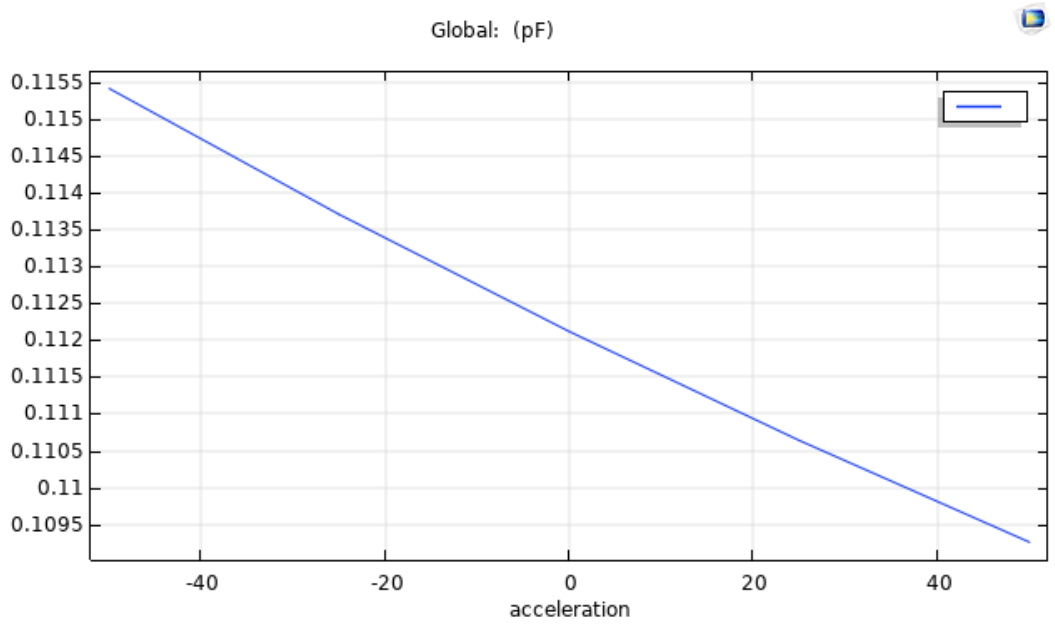


Рис.57 График зависимости емкости между электродами с большим зазором от ускорения

4. Создаем исследование на самотестирование рис. 58.

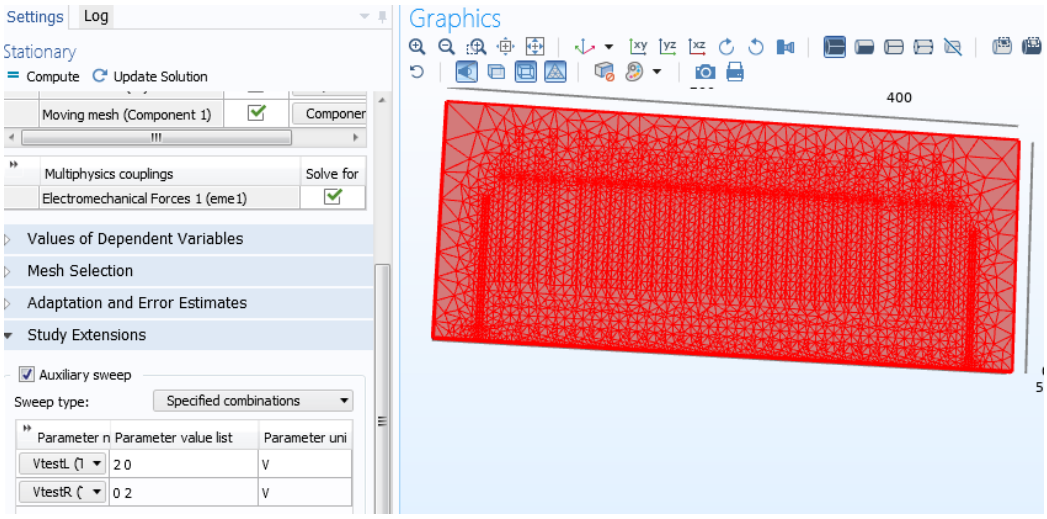
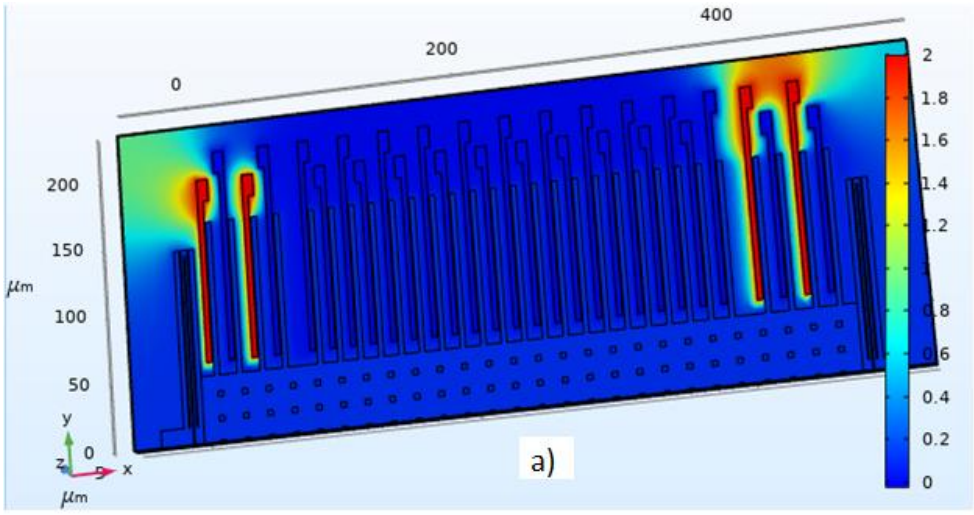


Рис.58. Исследование на самотестирование

Перемещение ЧМ в зависимости от напряжения на электродах самодиагностики показана на рис.59-60



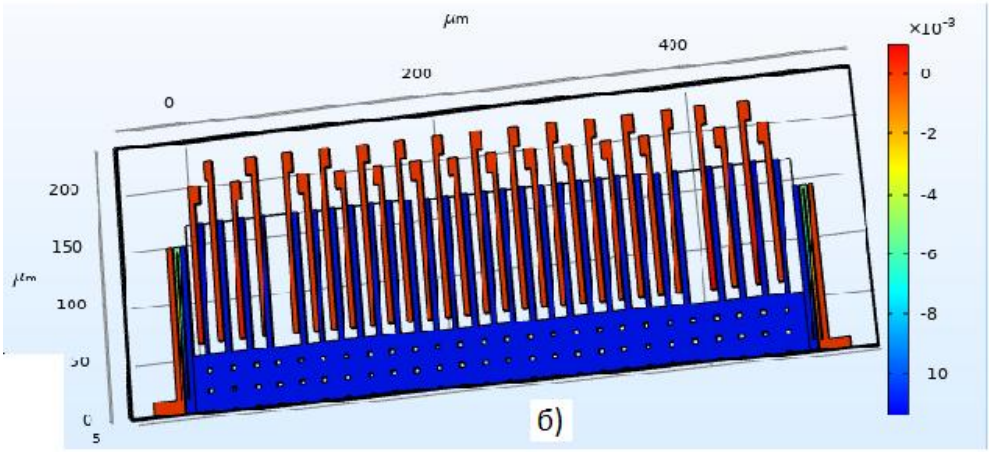


Рис. 59 Результаты самотестирования при подаче напряжения на левые электроды: а) Перемещение ЧМ в зависимости от напряжения на правых электродах самодиагностики а) Отображение напряжения на электродах

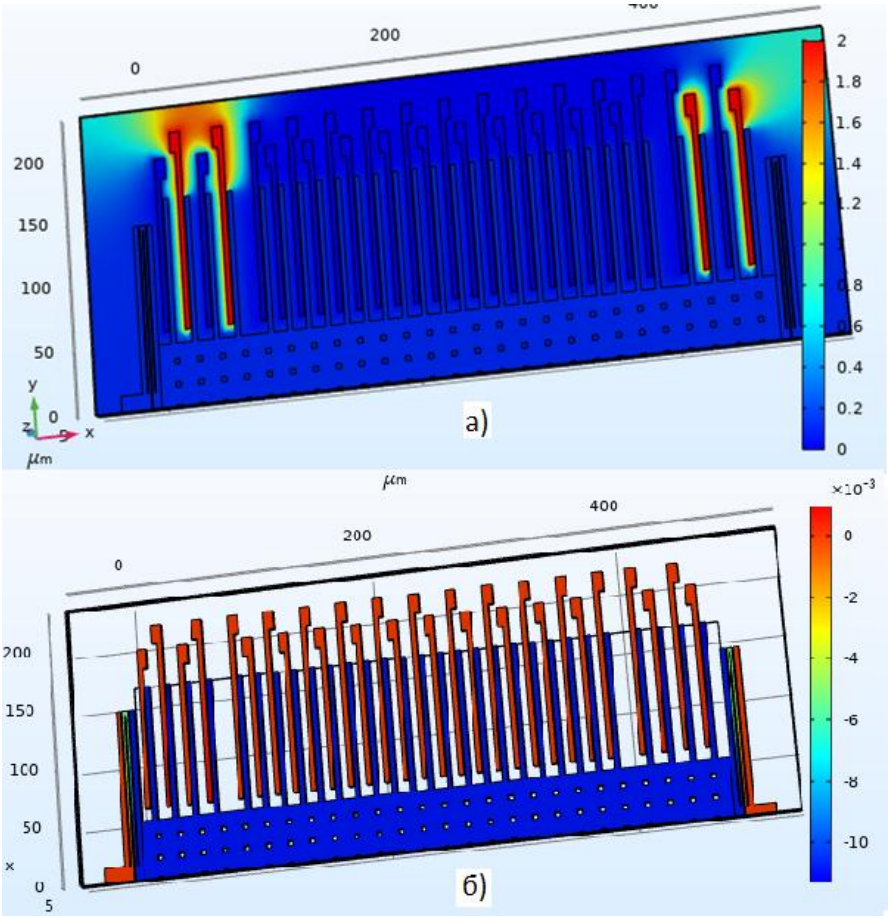


Рис. 60 Результаты самотестирования при подаче напряжения на правые электроды: а) Перемещение ЧМ в зависимости от напряжения на правых электродах самодиагностики а) Отображение напряжения на электродах

График зависимости перемещения от напряжения на электродах самотестирования приведен на рис. 61-63.

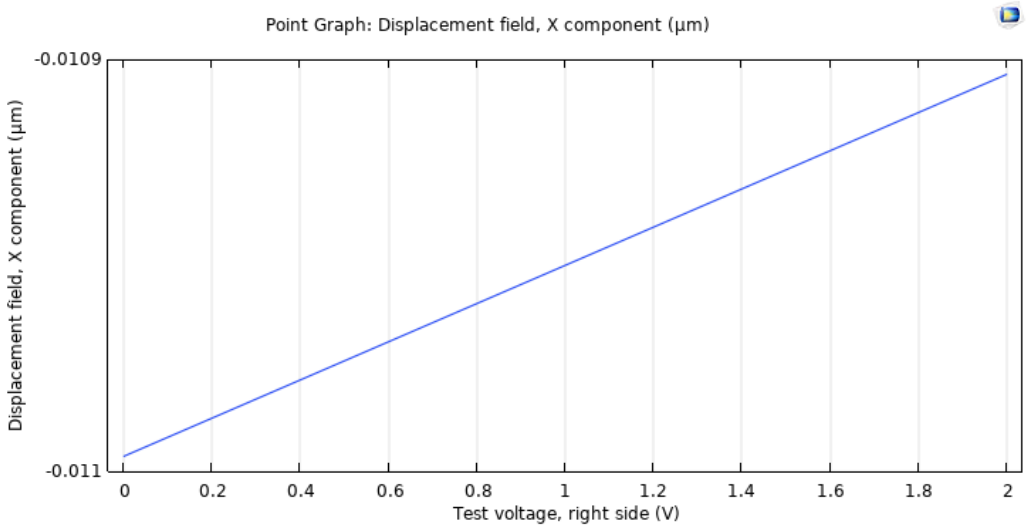


Рис. 61. Зависимость перемещения ЧМ от напряжения, подаваемого на правые электроды самотестирования

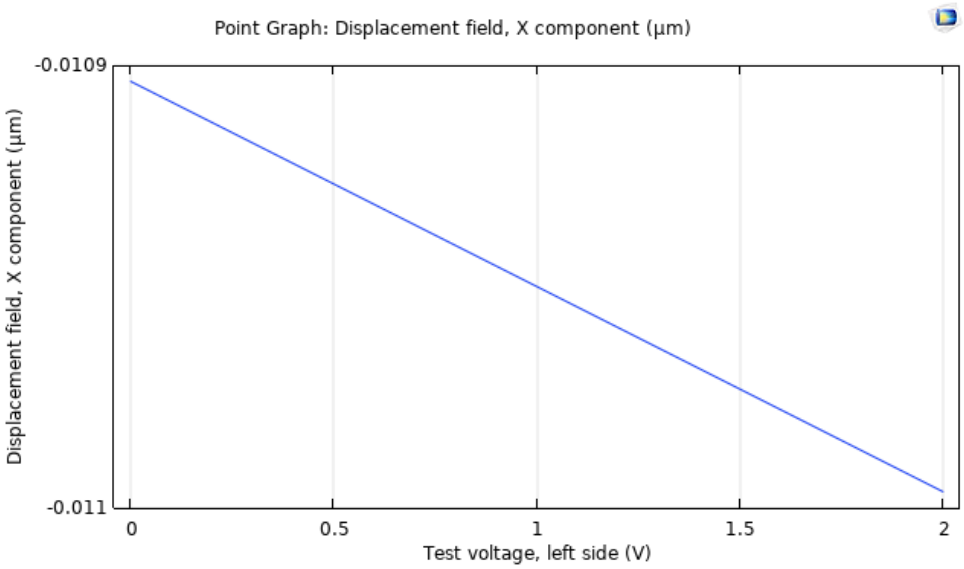


Рис. 62. Зависимость перемещения ЧМ от напряжения, подаваемого на левые электроды самотестирования

Из рис.62 можно сделать вывод, что при подаче на электроды самотестирования напряжения от 0 до 2 мВ перемещение ПМ не должно превышать 0.097 мкм.

5. Добавим исследование с изменением геометрического параметра. Для этого добавляем новое статическое исследование и через контекстное

меню добавляем Parametric Sweep. В качестве переменной величины будет использоваться толщина пластины рис. 69. Результаты моделирования приведены в таблице 3.9

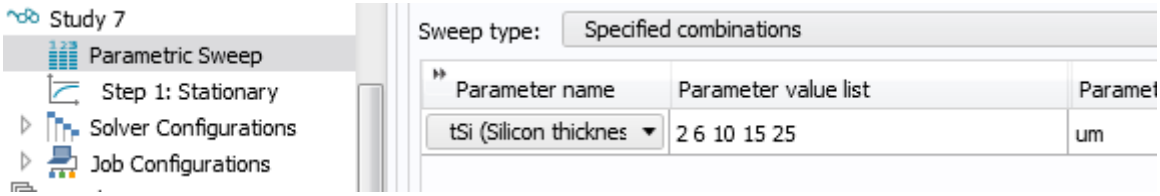


Рис.69

Построим графики перемещения при ускорении 50g в зависимости от толщины пластины рис. 70

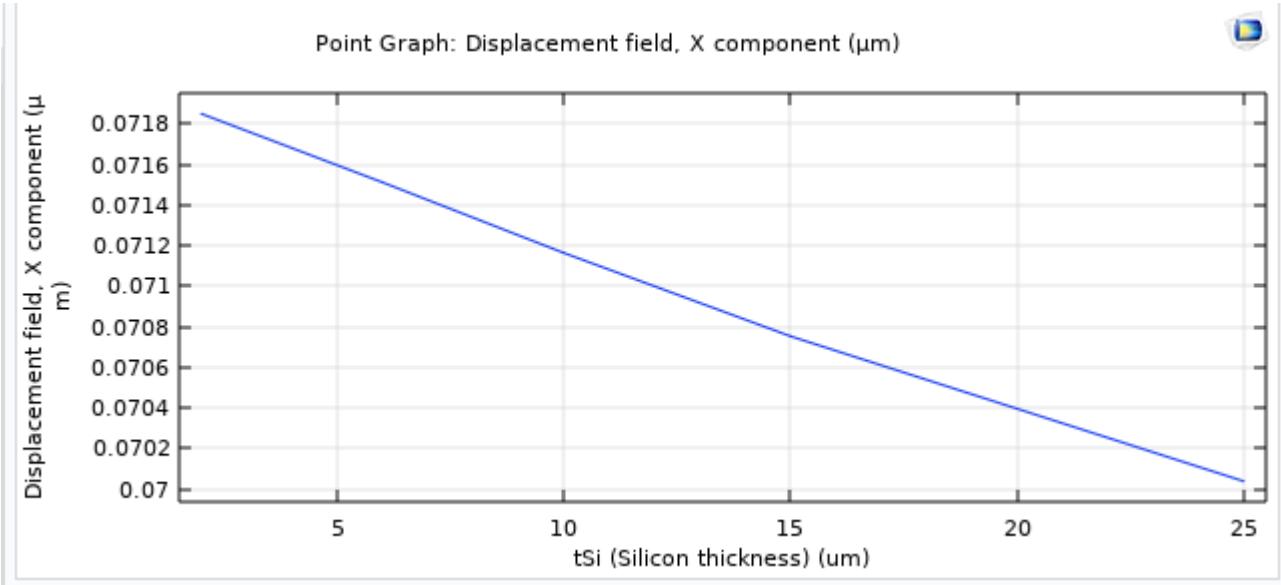


Рис. 70 Перемещение при ускорении 50g в зависимости от толщины пластины

По полученным данным рассчитаем значение параметров таблица. 3.5

Таблица 3.5

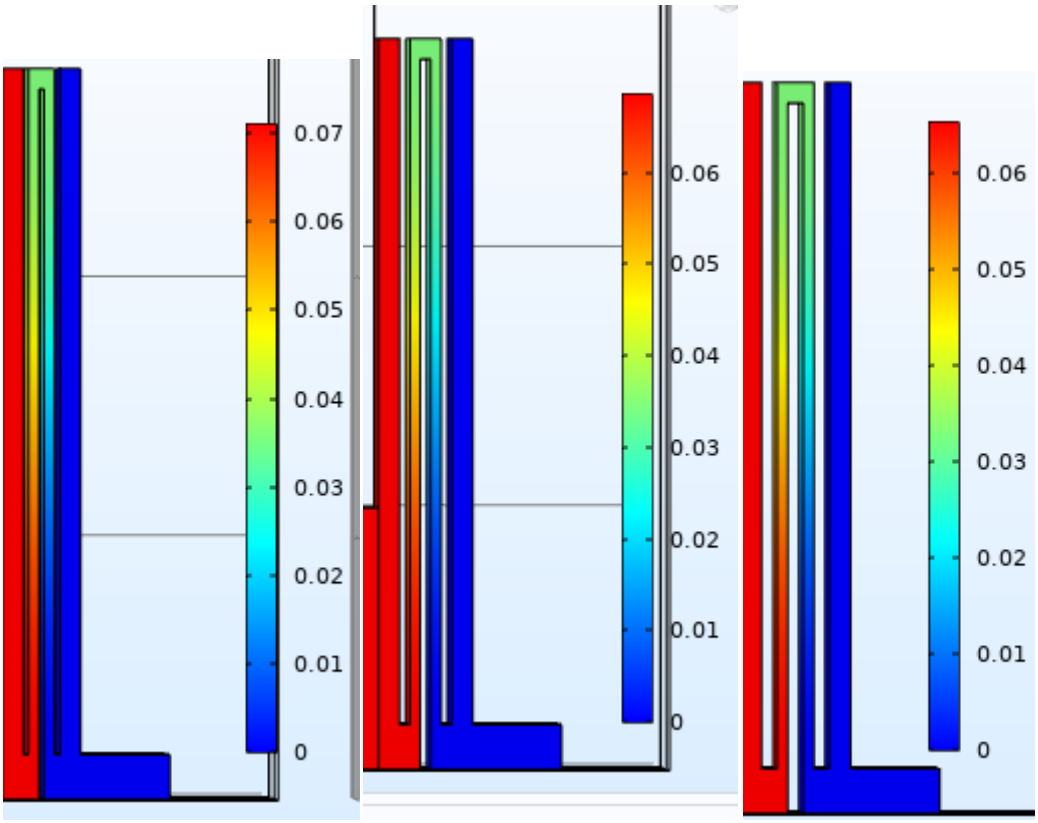
Толщина пластины,м	Жесткость	Собств част	Шум	Относительный коэффициент демпфирования
0,000002	1,2124187	67958	3,92E-05	0,026832376

0,000006	5,3569249	82472,9	6,78E-05	0,198989797
0,00001	9,0285955	82935,2	8,76E-05	0,549667884
0,000015	13,629947	83201,4	0,000107	1,232796872
0,000025	22,948711	83625,4	0,000107	3,407072172

Насколько видно из таблицы, наилучшая толщина пластины для коэффициента демпфирования близкого к 0.65 должна быть равна около 11 мм.

6. Проведем параметрическое исследование изменения перемещения от параметров пружины – длины, ширины и величины зазора.

   Графики перемещения при изменении зазора между витками пружины показаны на рис. 71-72.



а) б) в)

Рис. 71 Максимальное перемещение при изменении зазора между витками а)1 мкм, б) 2 мкм, в) 3мкм

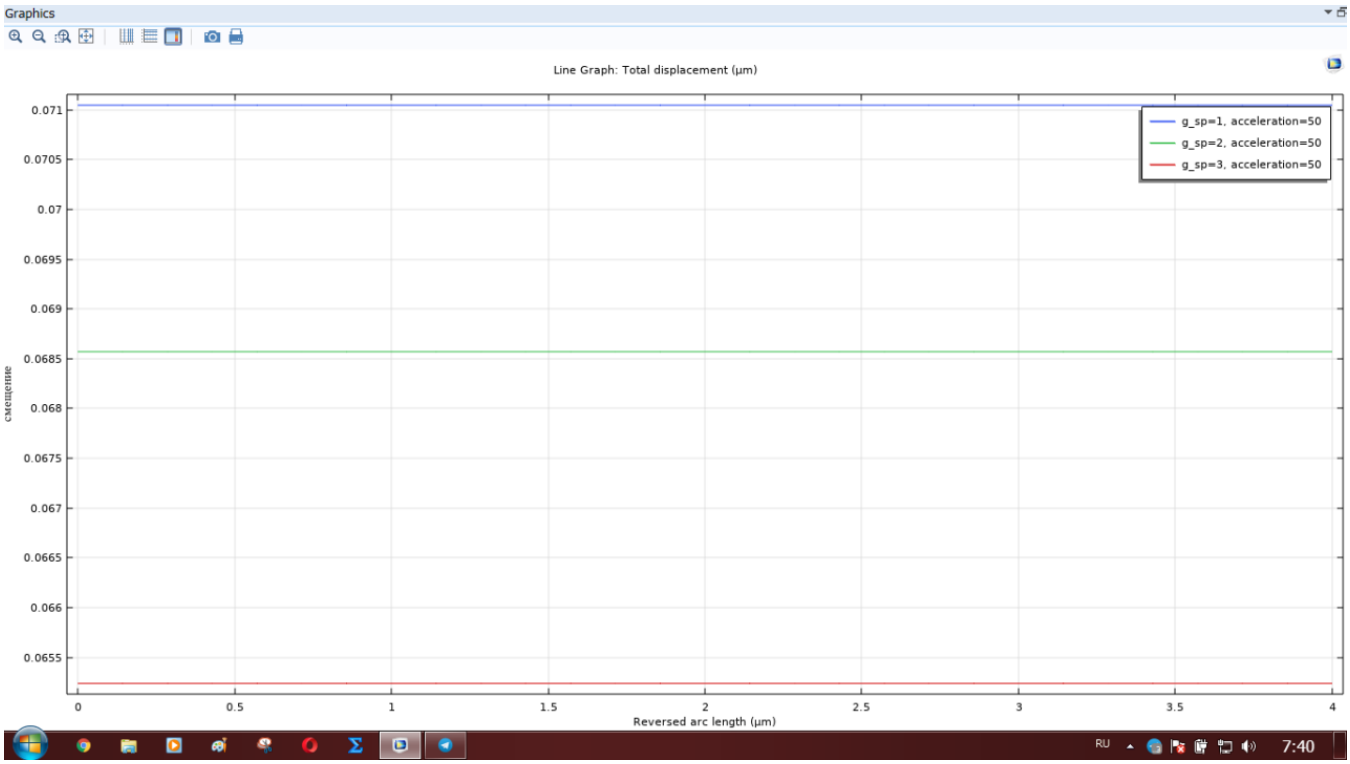


Рис. 71 График перемещения

Графики перемещения при изменении высоты пружины пружины показаны на рис. 73-75.

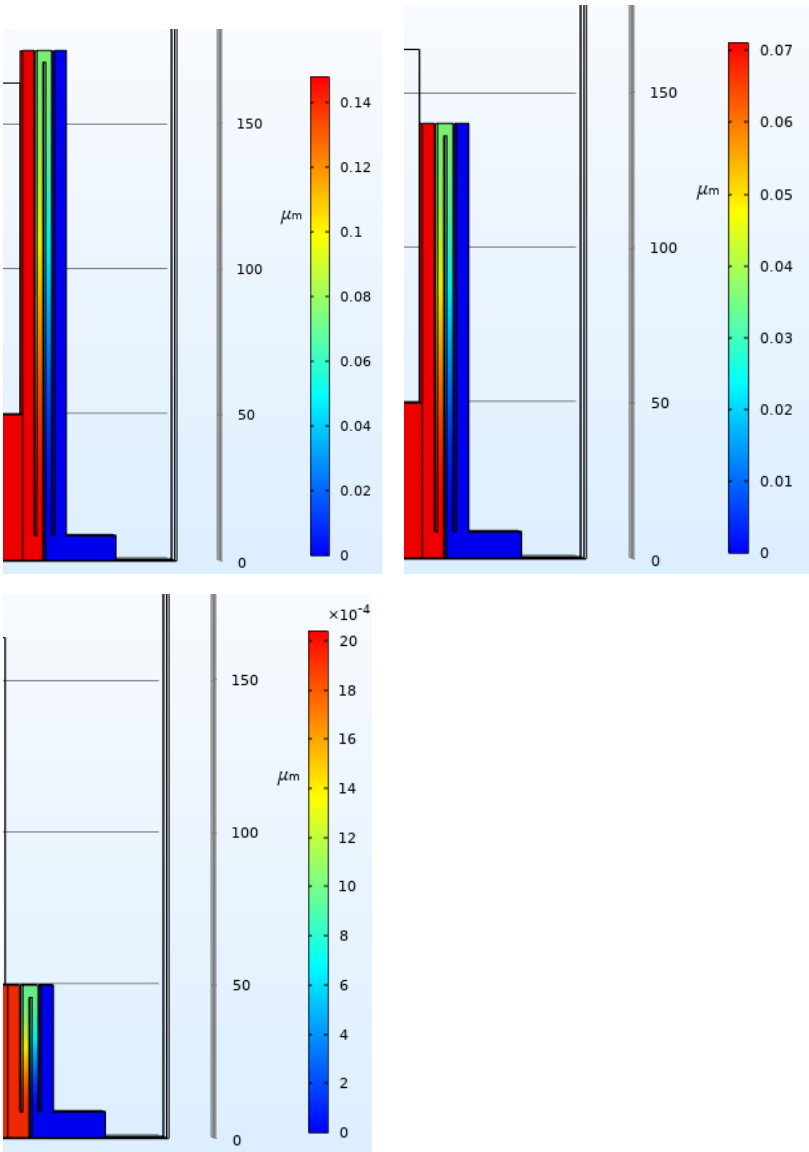


Рис.73 Максимальное перемещение при изменении высоты пружины а)350 мкм: б)280 мкм: в) 100 мкм

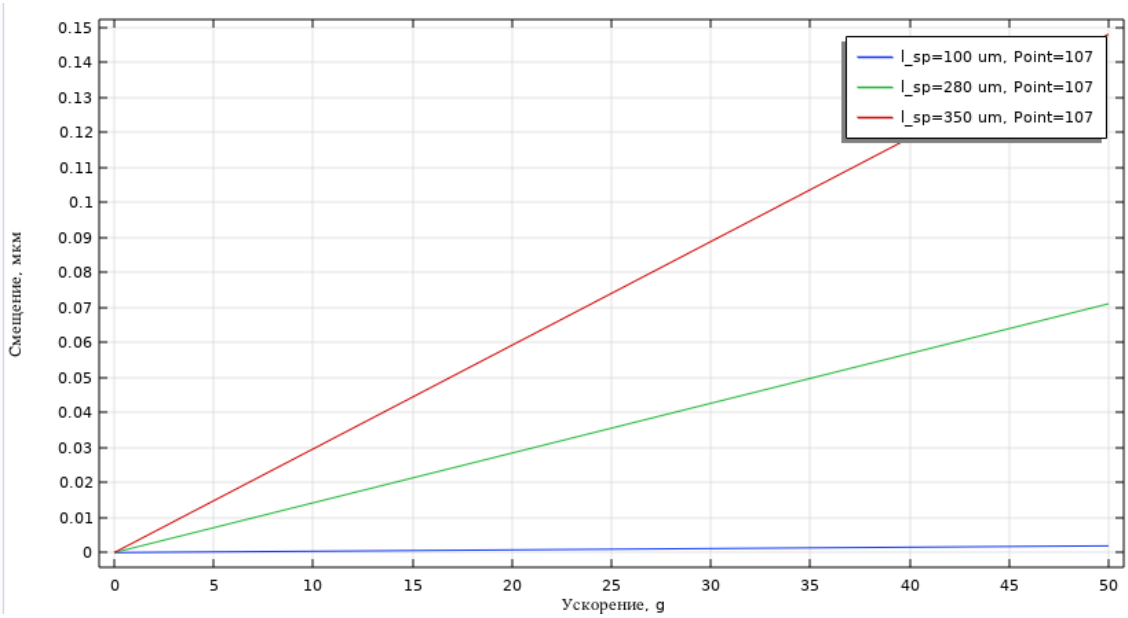


Рис. 71 График перемещения

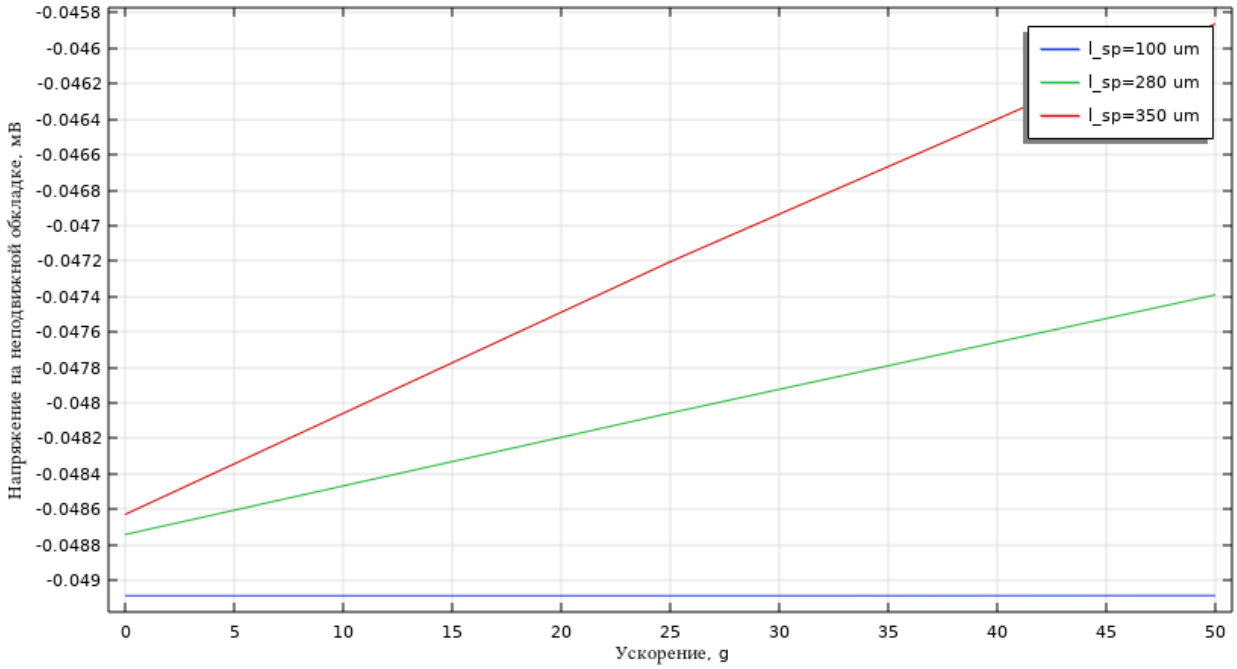
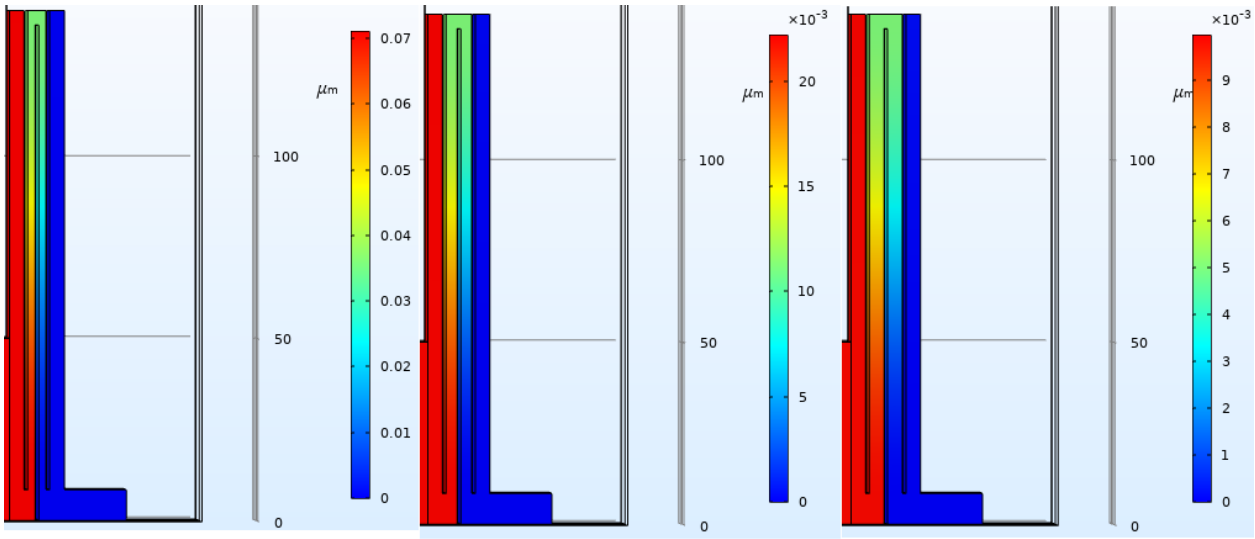


Рис.72 Изменение напряжения.

Графики перемещения при изменении ширины пружины показаны на рис. 73-75.



А) б) в)

Рис.73 Максимальное перемещение при изменении ширины пружины а)2 мкм: б)3 мкм: в) 4 мкм

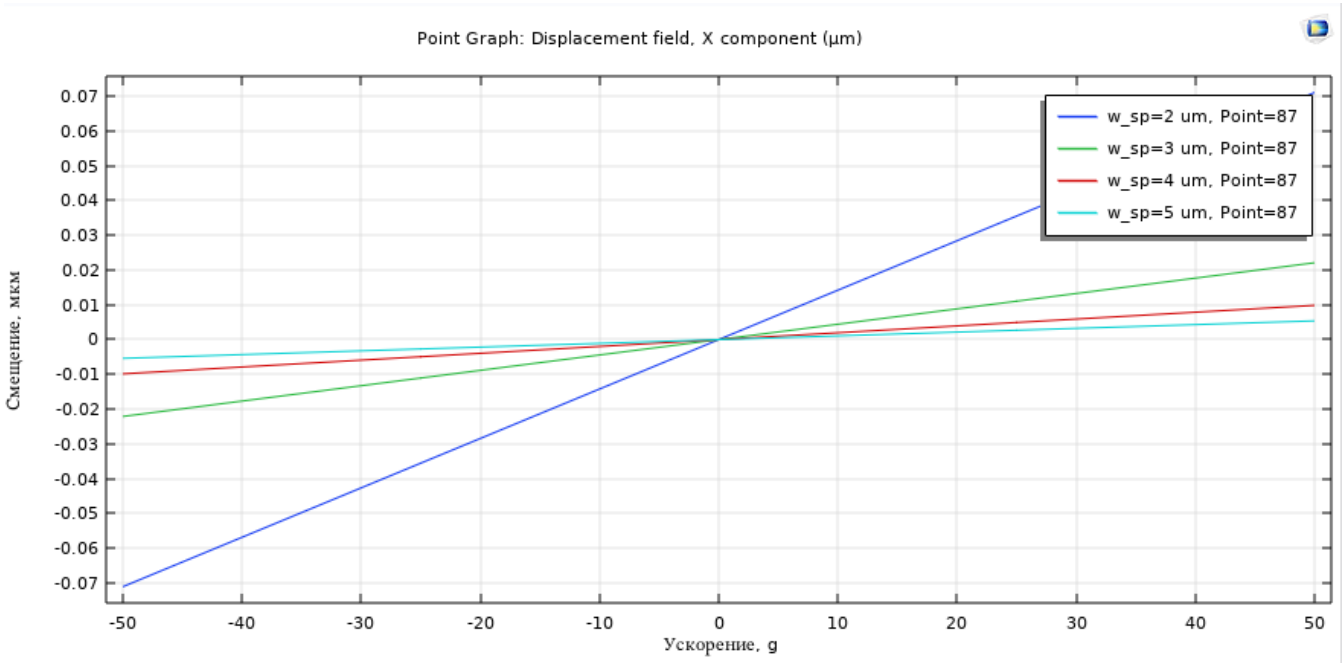


Рис. 71 График перемещения

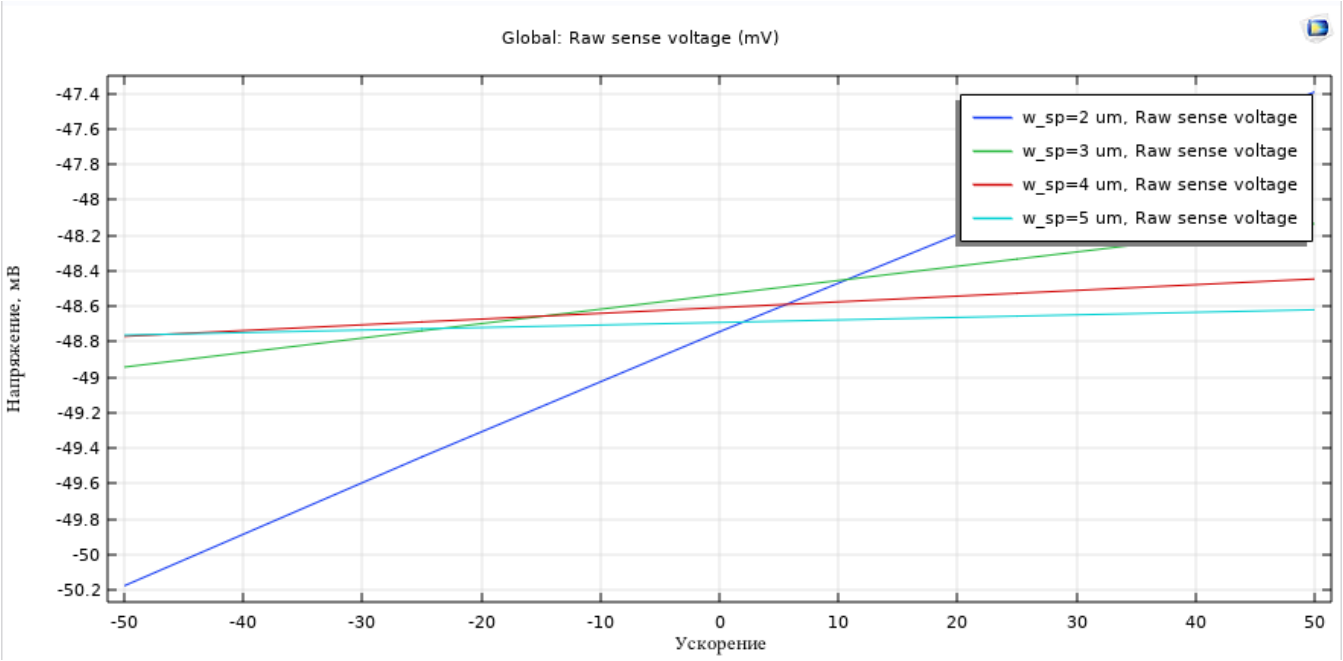


Рис.72 Изменение напряжения.

Графики перемещения при изменении пружины показаны на рис. 73-75.

Из этих графиков можно сделать вывод, что напряжение и перемещение ЧЭ прямо пропорциональны увеличению геометрических размеров пружины – длины и величины зазора.

Увеличим величину пружины до 350 мкм для лучшего значения коэффициента жесткости. Как видно из графиков увеличение геометрических размеров повышает коэффициент жесткости.

Выводы

В данном разделе были описаны, промоделированы и изучены описанные в предыдущем разделе параметры. Разработан алгоритм создания геометрической модели, ее дискретизация с помощью разбития на элементарные элементы путем задания сетки с разной величиной в зависимости от важности узлов и с целью экономии вычислительных ресурсов.

В результате параметрической выборки было определено, что для получения достаточного коэффициента демпфирования можно изменить длину пружины до 360 мкм при толщине пластины 8 мкм.

Добавлена возможность проведения самотестирования акселерометра: при подаче напряжения, а также было проведено исследование влияние температуры на ЧЭ.

По полученным результатам построены зависимости перемещения от ускорения, графики зависимости напряжения на подвижных обкладках от ускорения, графики зависимости емкости между электродами с малым зазором от ускорения, графики зависимости емкости между электродами с большим зазором от ускорения и графики зависимости перемещения ЧМ от напряжения, подаваемого на электроды самотестирования.

Также, для определения собственных частот ЧЭ, был проведен модальный анализ, который показал наличие собственных частот при колебании по оси X, Z и при вращении вокруг оси Y.

В результате проведенного расчета в среде Comsol были получены следующие параметры акселерометра:

- оптимальная толщина пластины 8 мкм,
-линейность шкалы в диапазоне +- 50g ,
- чувствительность - 0.5 мВ/g,

По каталогу Freescale Semiconductor был выбран акселерометр с похожими параметрами ЧЭ, аналогичным промоделированным нами и этим акселерометром является MMA1213D. В результате, для сравнения характеристик в следующем разделе были проведены статические испытания данного акселерометра на поворотной платформе.

РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

“С помощью статических испытаний можно определить такие параметры акселерометра, как масштабный коэффициент, нулевой сигнал и коэффициенты перекрестной связи. В данной работе использовался метод последовательных поворотов рис. 5.1.

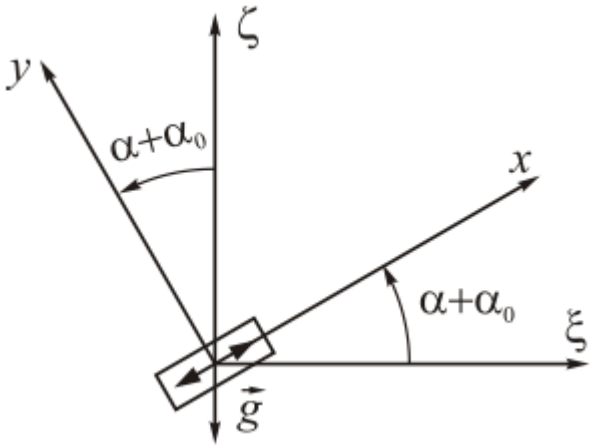


Рис. 5.1 Расположение оси акселерометра с учетом наклона поворотной платформы

α -угол наклона оси Ох над плоскостью горизонта, $\alpha_0 = const$ - погрешность выставления поворотной платформы относительно оси горизонта”[18]

Проекции ускорений на оси X, Y, Z можно выразить, как

$$a_x = g\cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \alpha_0\right);$$

$$a_y = g\cos(\pi + \alpha + \alpha_0);$$

$$a_z = 0.$$

Подставив эти значения в математическую модель акселерометра $u = u_0 + k_x a_x + k_y a_y + k_z a_z + k_{xy} a_x a_y$ и после разложения в ряды Фурье получим

матрицу $u = Ac + \xi$, где – вектор случайных шумов, с – искомые значения коэффициентов Фурье, А- матрица косинусов и синусов.

$$u_1 = C_0 + C_1 \sin\alpha_1 + C_2 \cos\alpha_1 + C_3 \sin 2\alpha_1 + C_4 \cos 2\alpha_1 + \xi_1$$
$$u_2 = C_0 + C_1 \sin\alpha_2 + C_2 \cos\alpha_2 + C_3 \sin 2\alpha_1 + C_4 \cos 2\alpha_2 + \xi_2$$
$$\dots$$
$$u_n = C_0 + C_1 \sin\alpha_n + C_2 \cos\alpha_n + C_3 \sin 2\alpha_n + C_4 \cos 2\alpha_n + \xi_n$$

Оценка выходных сигналов: $\hat{u} = A\hat{c}$, где $\hat{u}$ -вектор оценок u, $\hat{c}$ -вектор оценок параметров.

Решать данное уравнение будем методом наименьших квадратов в матричной форме:

$$\hat{c} = \left(A^T A\right)^{-1} A^T u$$

Зная коэффициенты Фурье получим:

$$u_0 = C_0;$$
$$\alpha_0 = \frac{1}{2} arctg \frac{C_4}{C_3};$$

В результате получим значения коэффициентов:

$$_{xy} = \frac{2}{g^2}\sqrt{C_3^2 + C_4^2}$$
$$k_x = -\frac{1}{g}\sqrt{C_1 \cos\alpha_0 + C_2 \sin\alpha_0}$$ ” [18]
$$k_x = -\frac{1}{g}\sqrt{C_1 \sin\alpha_0 + C_2 \cos\alpha_0}$$

4.1. Подготовка к проведению контроля параметров АК методом последовательных поворотов в гравитационном поле Земли

1) Для проведения контроля необходимо подключить ММА к средству приема информации.

2) Отгоризонтировать установочную поверхность поворотной платформы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Горизонтирование осуществляется с помощью регулировочных болтов поворотного стола
3) Протереть посадочные места АК и установочную поверхность плиты салфеткой, смоченной спиртом.
4) Установить на плиту прибор контроля акселерометров
5) Установить на плиту Поворотного стола испытуемый АК.

4.2. Проведение испытания на поворотной платформе

1) В процессе проведения испытания менять угол φ_jповорота платформы таблица 4.1

Таблица 4.1

№ точки j	Угол DD100, φ_j	Выходное напряжение АК U_{ij1}^T, B					
		1 цикл		2 цикл		3 цикл	
		ПХ $i=1$	ОХ $i=2$	ПХ $i=3$	ОХ $i=4$	ПХ $i=5$	ОХ $i=6$
1	-55º						
2	-50º						
…	…						
n-1	50						
n	60						

Здесь $i = 1,2,\dots,6$ – номер хода измерения ($i = 1,3,5$ – прямой ход (ПХ) от φ_1 до φ_5 , $i = 2,4,6$ – обратный ход (ОХ) от φ_5 до φ_1); $j = 1,2,\dots,5$ – номер тестового положения АК; $l = 1,2$ – номер исходной позиции АК.

2) Снять ММА с платформы

3) Переустановить испытуемый АК в позицию 2, в которой ИО ММА (ось OY) направлена перпендикулярно оси вращения управляемого поворотного стола, направление ИО АК (ось OZ) совпадает с направлением силы тяжести. В положении 2 определяется угол отклонения ИО от базовой установочной плоскости в плоскости ИО-ВО ($\alpha_{б1}$).
4) В процессе проведения испытания менять угол φ_jповорота платформы, заполнить таблицу 4.2

Таблица 4.2.

№ точки j	Угол DD100, φ_j	Выходное напряжение АК U_{ij1}^T, B					
		1 цикл		2 цикл		3 цикл	
		ПХ $i = 1$	ОХ $i = 2$	ПХ $i = 3$	ОХ $i = 4$	ПХ $i = 5$	ОХ $i = 6$
1	-55º						
2	-50º						
…	…						
n-1	50						
n	60						

Здесь $i = 1,2,\dots,6$ – номер хода измерения ($i = 1,3,5$ – прямой ход (ПХ) от φ_1 до φ_5 , $i = 2,4,6$ – обратный ход (ОХ) от φ_5 до φ_1); $j = 1,2,\dots,5$ – номер тестового положения АК; $l = 1,2$ – номер исходной позиции АК.

5) Снять ММА с платформы

В результате испытаний были получены такие усредненные значения для нескольких циклов прямого и обратного хода:

Усредненные значения X, Y и Z при изменении угла наклона исследуемой оси при нулевом значении одной из тех осей, которая не исследуется при закреплении акслерометра на платформе таблица 4.3

Таблица 4.3

№ измерения	Отклонение, °	X	Y	Z
1	-55	5,35	6,04	5,86
2	-50	6,06	6,75	6,63
3	-45	6,75	7,37	7,26
4	-40	7,39	7,94	7,81
5	-35	7,85	8,51	8,375
6	-30	8,36	8,96	8,83
7	-25	8,79	9,34	9,26
8	-20	9,14	9,67	9,57
9	-15	9,41	9,92	9,89
10	-10	9,67	10,06	10
11	-5	9,81	10,14	10,08
12	0	9,89	10,22	10,14
13	5	9,83	10,16	10,1
14	10	9,71	10,06	10,02
15	15	9,53	9,905	9,85
16	20	9,32	9,65	9,61

17	25	8,94	9,28	9,24
18	30	8,59	8,905	8,865
19	35	8,12	8,39	8,34
20	40	7,55	7,85	7,79
21	45	7	7,3	7,3
22	50	6,335	6,63	6,65
23	55	5,63	5,94	5,92
24	60	4,92	5,18	5,2

6) В результате методом наименьших квадратов получили значения масштабных и перекрестных коэффициентов таблица 4.4

Таблица 4.4.

Масштабные коэффициенты, $мВ / g$;	k_x	k_y	k_z
	$1,772$	$1,786$	$2,97$
Перекрестные коэффициенты $мВ / g$;	k_{xy}	k_{yz}	k_{xz}
	$10,41137$	$10,62402$	$12,304$
Нулевой сигнал, мВ	u_{ox}	u_{oy}	u_{oz}
	0,71	0,651	0,765
Погрешность выставки, °	При измерении x	При измерении y	При измерении z
	0,09313326	0,36320809	0,05275475

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Был проведен детальный обзор технологий построения акселерометров, основанных на принципе использования емкостного принципа детектирования ускорения. Было отмечено, что наибольший конструкторский интерес представляют собой датчики с встречно-штыревым расположением электродов. Было отмечено, что данные датчики. В ходе аналитического обзора была приведена математическая модель ЧЭ ММА без учета вращательных движений. Были приведены аналитические выражения для добротности, как количественной характеристики колебательности системы, было обращено внимание на важность демпфирования с приведением выражений для оценки его качества.

Было обращено внимание на то, что одним из самых важных элементов конструкции является упругий подвес и в результате сравнения разных вариантов была выбрана конструкция в форме складчатого подвеса по причине самой лучшей линейности коэффициента упругости, компактности и повышенной жесткости по неглавным осям.

В результате аналитического расчета были получены такие значения параметров ЧЭ ММА: эффективная масса 1,29421E-09 кг, абсолютный коэффициент демпфирования 6,3388E-05, относительный коэффициент демпфирования 0,498, Жесткость k по оси чувствительности 3,124 Н/м, собственная частота 353 Гц, максимальное смещение пружины при 50g 203 нм, механический шум подвижной массы 6,4637E-05 м/с^2/√Гц.

Для исследования параметров акселерометра был описан метод испытания модели в среде Comsol Multiphysics, ее дискретизации с помощью разбития ее на элементарные элементы с помощью задания сетки с разной величиной в зависимости от важности узлов и с целью экономии вычислительных ресурсов.

В результате параметрической выборки было определено, что для получения наилучшего коэффициента относительного демпфирования 0.65 толщина пластины должна быть около 11 мкм.

Было промоделировано испытание ЧЭ ММА путем воздействия на чувствительную ось ускорений в диапазоне -50..50g, была добавлена возможность самотестирования ЧЭ, а также было проведено исследование влияние температуры на ЧЭ. По полученным результатам были построены графики зависимости перемещения от ускорения, графики зависимости напряжения на подвижных обкладках от ускорения, графики зависимости емкости между электродами с малым зазором от ускорения, графики зависимости емкости между электродами с большим зазором от ускорения и графики зависимости перемещения ЧМ от напряжения, подаваемого на электроды самотестирования.

Также, для определения собственных частот ЧЭ, был проведен модальный анализ, который показал наличие собственных частот при колебании по оси X, Z и при вращении вокруг оси Y.

В результате проведенного расчета в среде Comsol были получены следующие параметры акселерометра: самая оптимальная толщина пластины 8 мкм, линейный диапазон ЧЭ акселерометра лежит в пределах 50g , у акселерометра с заданными параметрами была получена чувствительность порядка 0.5 мВ/g.

По каталогу Freescale Semiconductor можно найти акселерометр с похожими параметрами ЧЭ, аналогичным промоделированным нами и этим акселерометром является MMA1213D. В результате, для сравнения были проведены статические испытания данного акселерометра на поворотной платформе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18955-73. Акселерометры низкочастотные линейные. Термины и определения

2. Автомобильные акселерометры. Часть 3. Классификация и анализ Базовых рабочих принципов\Сысоева Светлана\ Компоненты и технологии\ №2\2006

3 Автомобильные акселерометры. Часть 4. Развитие технологий и элементной базы ёмкостных акселерометров\Сысоева Светлана\ Компоненты и технологии\ №3\2006

4.Автомобильные акселерометры. Часть 5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых ёмкостных МЭМС – акселерометров \Сысоева Светлана\ Компоненты и технологии\ №4\2006

5. Автомобильные акселерометры. Часть 6. Некоторые уникальные технологии. Итоговый сравнительный анализ и оценка перспектив Сысоева Светлана\Сысоева Светлана\ Компоненты и технологии\ №5\2006

6. Расчет и моделирование основных параметров дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра\ И.В. Годовицын , Д.А. Сайкин , Р.А. Федоров , В.В.Амеличев\ Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем\2010

7. Интегральные датчики: Учебник\ В.Д. Вавилов\ Нижегород, гос. Техн.. ун-т Н.Новгород\2003

8. Исследование микроэлектромеханических емкостных преобразователей с пленочными элементами\ Ляпунов Данил Юрьевич\ \ Томск\2010

9. Boser E. B. Capacitive interface electronics for sensing and actuation: Presentation. https://people.eecs.berkeley.edu/~boser/presentations/Capacitive%20Interface%20Electronics.pdf

10. Распопов В.Я. - Микромеханические приборы\ Учебное пособие.\ М.: Машиностроение\ 2007.

11. INVESTIGATION OF LOW FREQUENCY WIDE BAND TUNABLE

ACCELEROMTER A Thesis Presented to the Faculty of San Diego State University \ Amandeep Singh\2008
12. Stress optimization of micromechanical torsional spring\ Fraunhofer Institute for Integrated Circuits, Automation Devision EAS, Drezden, Germany\T. Klose, D.Kunze, T.Sander, H.Schenck, H.Lackner, A.Schneider, P. A.Schneider.
13.Microsystem Design\Stephen D. Senturia\Kluwer Academic Publishers\2003
14.https://www.comsol.ru/model/download/545171/models.mems.surface_micromachined_accelerometer.pdf
15. Wai-Chi W., Azid A. A., Majlis B.Y. Formulation of stiffness constant and effective mass for a folded beam \ Arch. Mechl\ 2010.
16. Stephen D. Senturia (Kluwer Academic Publishers, 5th Edition, 2003
17. Structural Designing of a MEMS Capacitive Accelerometer for Low Temperature Coefcient and High Linearity\ Jiangbo He, Wu Zhou, Huijun Yu, Xiaoping He, Peng Peng www.mdpi.com/journal/sensors
18.Испытания инерциальных приборов\Учебное пособие\В.В. Аврутов\ Национальный Технический Университет Украины Киевский Политехнический Институт им. Игоря Сикорского\2016