

УДК 621.382.2/.3

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА МЭМС-ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ MICROSOFT PROJECT

Сергей Сергеевич Бланк, Виктор Юрьевич Здоровьев, Алексей Андреевич Фадеев,
Артем Павлович Федюнин, Вячеслав Валерьевич Хриченко,
Артем Александрович Ярмов

*Магистры 1 года,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.Б. Цветков,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»*

Введение

Электронная промышленность – одна из важнейших отраслей для любого государства, поскольку она обеспечивает электронной компонентной базой (ЭКБ) практически все остальные отрасли промышленности.

Сегодня при производстве военной и специальной продукции в Российской Федерации используется 65% импортной ЭКБ. Импортные микросхемы составляют 90% в секторе ВВСТ. Элементная база отечественного производства значительно устарела и технически отстала от мирового уровня.

В настоящее время России закрыт доступ к новейшим зарубежным изделиям микроэлектроники, в первую очередь - специального исполнения, предназначенным для военной отрасли. Единственный способ преодолеть отставание - восстановить собственную электронную промышленность [1, стр. 6].

Данная работа предлагает проект по организации производства гироскопов и акселерометров, основанных на технологии МЭМС (микроэлектромеханических систем), в нашей стране. Промышленные мощности разрабатываемого производства предполагается направить не только на удовлетворение нужд военно-промышленного комплекса Российской Федерации, но и на насыщение российского рынка микроэлектронными системами гражданского назначения.

Принцип работы разрабатываемых устройств

Принцип работы МЭМС-акселерометра

Акселерометр – это прибор, предназначенный для измерения кажущегося ускорения. Кажущееся ускорение – это разница между гравитационным и истинным ускорениями объекта. Принципиально акселерометр состоит из корпуса, подвижной массы и датчиков (рисунок 1).

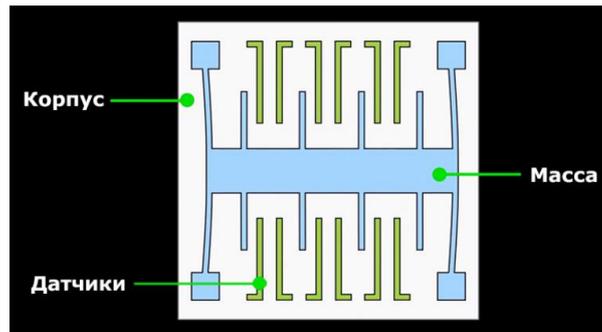


Рисунок 1 - Принципиальная схема акселерометра

Работа акселерометра основывается на конденсаторном принципе. Подвижная часть такой системы представляет собой обыкновенный грузик, который смещается в зависимости от ускорения устройства. По мере его смещения изменяется ёмкость конденсатора, а именно меняется напряжение. Исходя из этих данных, можно получить величину смещения грузика, а вместе с тем и искомое ускорение (рисунок 2).

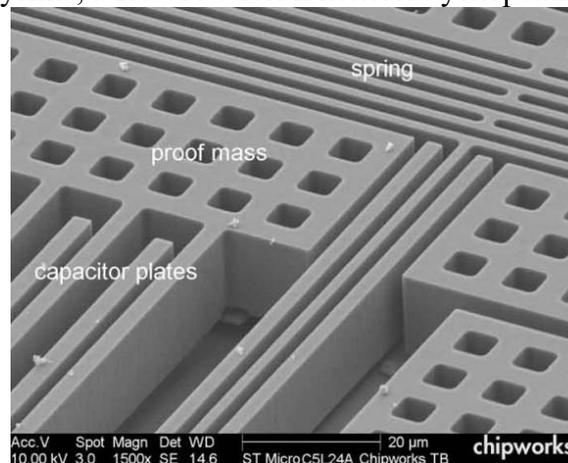


Рисунок 2 - Конденсаторная структура акселерометра

Конструкция акселерометра такова, что он реагирует только на ту составляющую ускорения, которая совпадает с направлением перемещения грузика, так называемой осью чувствительности прибора. Если ось только одна, датчик сможет передать данные об изменении положения объекта в пространстве только в пределах чувствительности оси. Чтобы увеличить чувствительность датчика, и получить точные данные об ускорении и направлении наклона объекта, необходимо две, а еще лучше три оси. Объединив в один прибор сразу три оси, можно вычислить положение объекта в трехмерном пространстве.

Для измерения величины ускорения по оси Z также используется подвижная масса, но закреплённая на пьедестале. При возникновении вертикальной силы, масса будет поворачиваться относительно своей точки закрепления, а детектировать величину ускорения можно за счёт разницы расстояния до датчиков (рисунок 3).

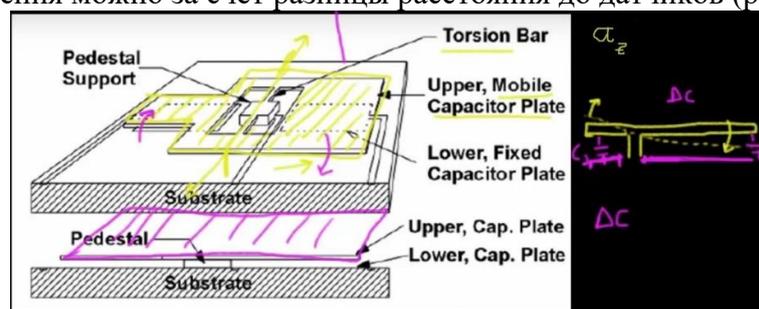


Рисунок 3 - Принцип действия акселерометра по оси Z

Принцип работы МЭМС-гироскопа

Гироскоп – устройство, реагирующее на изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчёта.

Колебания генерируются путем подачи напряжения на гребенчатые приводы. При этом под действием электростатической силы рабочие тела осцилляторов подталкиваются друг к другу. Возвратное движение происходит за счет микропружин. При изменении угловой скорости начинает действовать сила Кориолиса, вызывающая смещение масс, пропорциональное величине угловой скорости (рисунок 4).

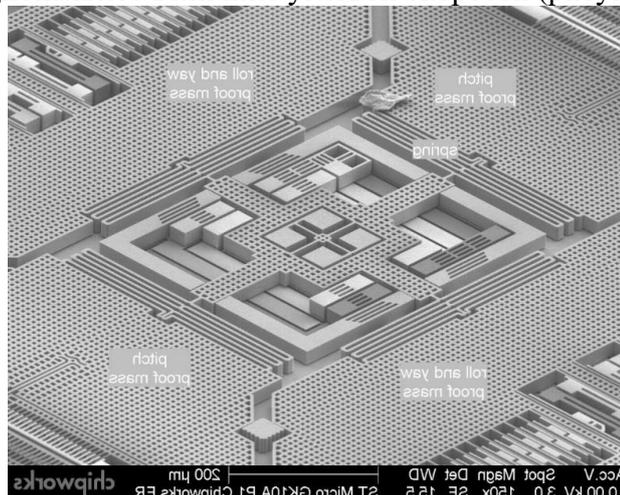


Рисунок 4 - Схема гироскопа

При вращении вокруг оси Y рамка колеблется в вертикальной плоскости (перпендикулярной подложке МЭМС): один осциллятор будет подниматься, другой – опускаться и наоборот. На верхнюю часть рамки и на подложку нанесены тестовые электроды. При колебаниях в вертикальной плоскости емкость между ними начнет изменяться, что можно детектировать и определить угловую скорость вращения. Измерение по оси X осуществляется аналогично, но используются другие две массы.

Для определения углового ускорения вокруг оси Z используются массы, участвующие также и в измерении ускорения вокруг оси Y . Силы Кориолиса в этом случае действуют в горизонтальном направлении и вызывают смещение масс, пропорциональное величине угловой скорости. При колебаниях в горизонтальной плоскости емкость между обкладками массы и гребёнки начнет изменяться, что можно измерить и аналогичным образом определить угловую скорость вращения. На рисунке 5 представлен эскиз устройства, совмещающего в себе функции трехосного акселерометра и гироскопа.

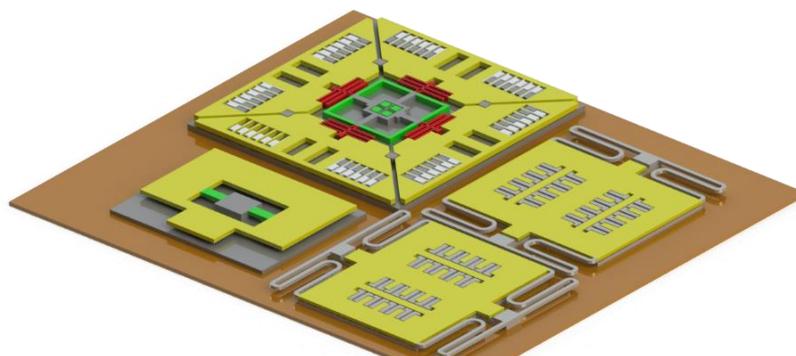


Рисунок 5 - Схема устройства гироскопа с акселерометром

Ориентировочные размеры представленной на рисунке 5 структуры составляют порядка 3,5x3,5x1,5 мм.

Патентный поиск

Анализ существующей патентной базы

При подготовке данного проекта был проведен поиск патентов, в которых рассмотрены как технологии изготовления МЭМС-акселерометров и гироскопов в целом, так и конструкции этих устройств в частности.

При анализе патентов, выданных на территории Российской Федерации, выявлено, что исследованиями и производством МЭМС-устройств в России занимается не более десяти предприятий. Данный факт следует учитывать в реалиях настоящего времени, когда политика импортозамещения вынуждает Правительство изыскивать дополнительные возможности и стимулировать развитие производств высокотехнологичных систем.

Наряду с указанным выше фактом было обнаружено, что подавляющее большинство патентов, связанных с МЭМС-гироскопами и акселерометрами, зарегистрировано на территории США различными университетами и предприятиями электронной промышленности. Поэтому при проведении патентного поиска внимание уделялось, в основном, именно зарубежным патентам.

Сравнение найденных патентов

Выбор патента, используемого в дальнейшем производстве, проходил в два этапа. Первый заключался в беглом просмотре всех патентов представленной тематики. Среди общего массива были выделены 11 самых современных и интересных с конструкторской точки зрения. Особое внимание уделялось патентам, включающим в себя совместное исполнение гироскопа и акселерометра, потому что наличие обоих этих устройств обязательно в изготовлении гаджетов, удовлетворяющих требованиям современной электроники.

Для более детального анализа и отбора патента, подходящего для производства, была использована техника бенчмаркинга. Отбор проводился по таким критериям, как:

- полнота описания; совместность исполнения гироскопа и акселерометра;
- простота конструкции;
- доступность технологии;
- точность работы устройства.

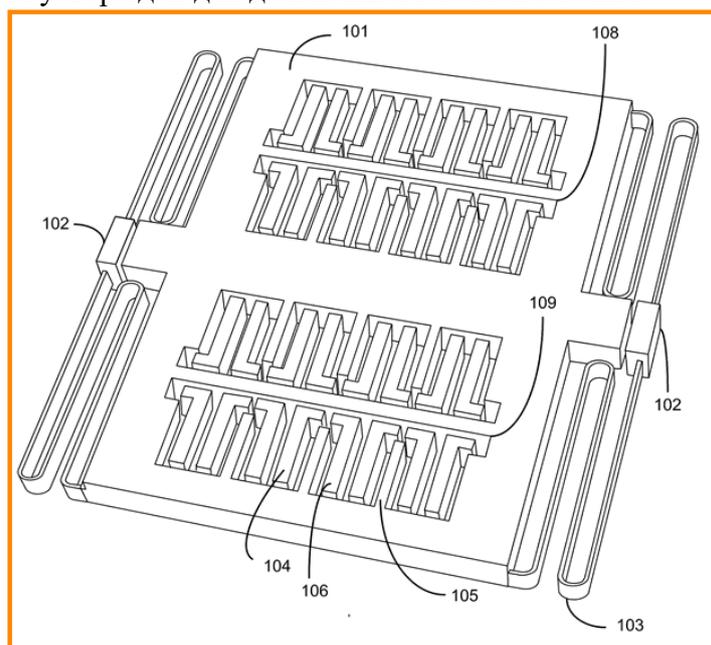
Каждому фактору был присвоен весовой коэффициент в соответствии с его значимостью в условиях мелкосерийного производства. Пример выбора патента на основе факторного анализа представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Пример факторного анализа патентов на МЭМС-гироскопы и акселерометры

Название патента	Весовой коэффициент	Критерий						Итог
		1	4	1	3	4	2	
Номер патента	Дата публикации	Полнота описания	Совместное исполнение	Простота конструкции	Доступность технологии	Точность работы устройства		
Multiple sense	US 2015	2013 (5)	8	0	7	6	8	98

axis mems gyroscope having a single drive mode	/0059473								
Method and structure for forming a gyroscope and accelerometer	US 2010/0109102	2010 (3)	9	10	8	9	7	<u>121</u>	
MEMS gyroscope	US 2015/0033853	2014 (5)	6	10	6	7	4	95	
Micro-electromechanical system inertial sensor	US 7,640,803	2004 (0)	7	10	8	8	6	106	

Первыми были отсеяны патенты, имеющие недопустимые значения каких-либо из параметров, так, один из патентов, набрав должное количество баллов, был отсеян из-за недостаточной точности. Патент, набравший наибольшее число баллов в ходе сравнительного анализа, был оценен как подходящий для использования в производстве и был утвержден для дальнейшего использования.



103 – пружина; 101 – колеблющаяся масса; 102 – жесткие элементы конструкции; 104, 106 – неподвижные зубцы; 105 – подвижные зубцы; 108, 109 - гребенка.

Рисунок 6 – Схема устройства, описанного в выбранном патенте

Номер выбранного патента – US 2010/0109102. Несмотря на то, что он не относился к числу новых, патент смог зарекомендовать себя доступностью изложенной в нем информации и технологией, не требующей многочисленного дорогостоящего оборудования.

Производство выбранных МЭМС-устройств

Ориентировочная программа выпуска – 500000 устройств/год. Пластины диаметром 100 мм. Площадь кристалла 20 мм². Количество кристаллов на подложке - 320.

Технология производства

Технология изготовления микроэлектромеханических устройств, согласно выбранному патенту, включает в себя семь основных этапов (рисунок 7) и является типовым для микроэлектронной промышленности.

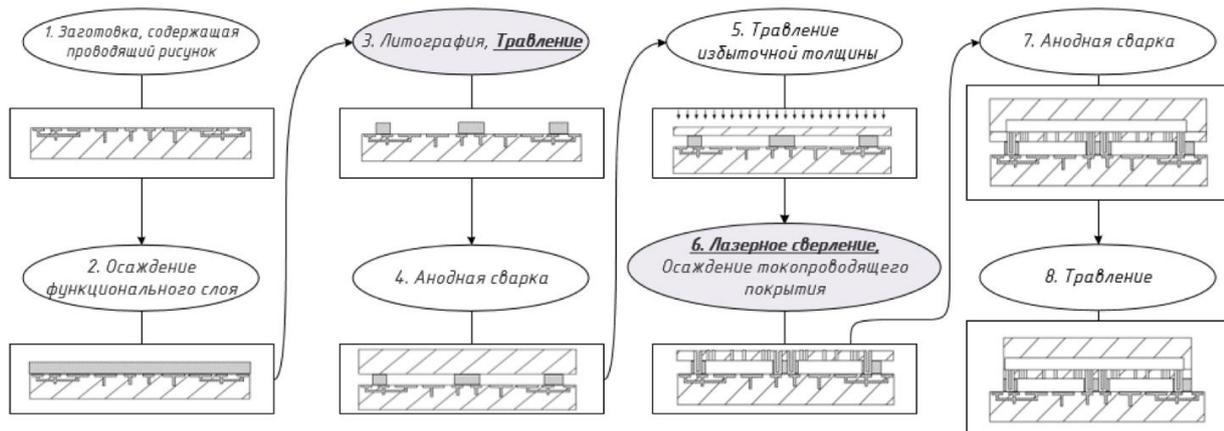


Рисунок 7 - Технологический маршрут производства

На первом этапе на исходную заготовку, представляющую собой кремниевую подложку, содержащую проводящий рисунок, производят процесс осаждения вакуумными методами медного функционального слоя. Следующий этап - нанесение фоторезистивной маски, литография и травление, в результате чего получается необходимая топологии проводящего слоя, соответствующая требованиям изготавливаемого изделия. Четвёртая стадия - методом анодной сварки соединяют второй кремниевой подложки с первой со стороны проводящего слоя. Далее проводят этап травления избыточной толщины второй подложки, в соответствии с техническими указаниями. После этого происходит лазерное сверление отверстий, служащих для установления электрического контакта двух слоёв платы. Затем соединяют самый верхний слой, также представляющий собой керамическая пластину, все той же анодной сваркой. Конечной операцией является совместное травление двух верхних пластин для удаления избыточности материала по ширине пластин.

Экономическое обоснование проекта

Анализ рынка

Потребность отечественного и мирового рынка в изделиях, изготовленных по технологии МЭМС, оценена на основе отчета Status of MEMS Industry компании Yole Développement.

В 2012 году МЭМС-промышленности, по данным отчета, удалось увеличить продажи на 10% (до 11 млрд. долл.). Аналитики компании ожидают дальнейшего роста за 2012–2018 годы с совокупными годовыми темпами роста, равными 12–13%. В результате в 2018 году будет продано 23,5 млрд. МЭМС-изделий на сумму в 22,5 млрд. долл. (рисунок 8).

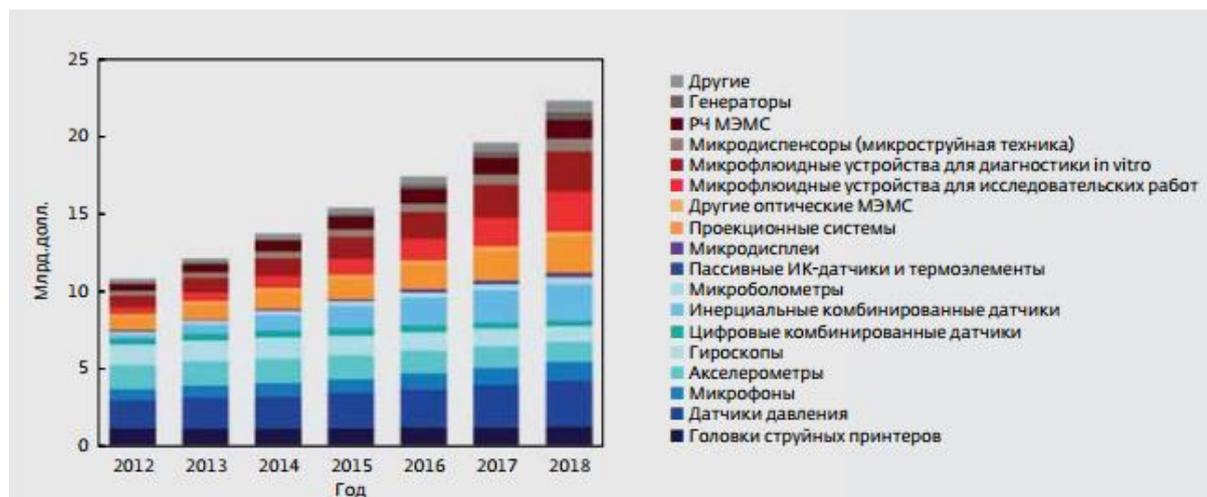


Рисунок 8 - Динамика рынка МЭМС

При более подробном анализе оказалось, что дешевые комбинированные инерциальные датчики быстрее заменяют дискретные датчики этого типа, сокращая рост доходов от их продаж. Расширяется применение комбинированных устройств в потребительских устройствах и автомобильной электронике, и на их долю приходится все больший объем продаж инерциальных датчиков. Акселерометр и гироскоп в одном корпусе, совместно использующие специализированную ASIC-схему в том же корпусе, лишь ненамного дороже одного гироскопа. Это существенно сократило продажи дискретных акселерометров.

О росте потребительского сектора рынка МЭМС свидетельствует следующее:

- в 2018 году на мировом рынке будет продано 17,5 млрд. МЭМС для сотовых телефонов (в 2012 – 4,5 млрд.) на сумму в 6,6 млрд. долл.;
- продажи инерциальных комбинированных устройств к 2018 году достигнут 2 млрд. долл.;
- наибольшие продажи прогнозируются для датчиков движения;
- лишь некоторые типы МЭМС близки к завершению развития;
- многие МЭМС-датчики и электромеханические преобразователи (актюаторы) формируют наиболее доходные сегодня сектора рынка;
- более 15 видов новых МЭМС появятся на рынке или будут разработаны.

Темпы роста рынка МЭМС для промышленных систем (от телекоммуникационных до аэрокосмических систем и систем военного назначения) составят 12%, МЭМС медицинского назначения – 22% [2, стр. 114].

По данным, приведенным на 2010 год, цена одного МЭМС-устройства составляет от 1 до 3 долларов [3, стр. 20].

Сетевое проектирование подготовки производства. Определение числа исполнителей

Для полноценной подготовки производства МЭМС-элементов требуется выполнить работы, представленные в таблице 2. Использование средств Microsoft Project позволяет значительно упростить организацию подготовки производства.

Таблица 2 - Список работ при технологической подготовке производства

Название работы	Продолжительность, дней	Предшествующие работы	Исполнитель
-----------------	-------------------------	-----------------------	-------------

Название работы	Продолжительность, дней	Предшествующие работы	Исполнитель
1. Разработка чертежа МЭМС элемента	13		Конструктор
2. Разработка чертежей подложкодержателя и кассет	14	1	Конструктор
3. Выбор пластин и элементов конструкции	7	1	Конструктор
4. Проектирование конструкции стенда для контроля	20		Конструктор
5. Изготовление стенда для контроля	18	4	Рабочий
6. Разработка топологии	7	1	Конструктор
7. Разработка чертежей фотошаблонов	6	6	Конструктор
8. Изготовление фотошаблонов	6		Рабочий
9. Выработка технологических условий	5		Технолог
10. Оформление заказа на пластины	2	9	Технолог
11. Поставка и получение кремния и расходных материалов	7	10	Технолог
12. Изготовление подложкодержателей и кассет	18	2	Рабочий
13. Разработка технологии нанесения функциональных слоев	14	6	Технолог
14. Разработка конструкторской документации на трафареты	8	13	Конструктор

Название работы	Продолжительность, дней	Предшествующие работы	Исполнитель
15. Изготовление трафаретов	6	14	Рабочий
16. Отработка процесса получения пассивной части по толсто пленочной технологии	4	15	Технолог
17. Разработка технологии травления	10	6	Технолог
18. Разработка технологии сварки и корпусирования	15	"16;17"	Технолог
19. Изготовление опытной партии плат МЭМС элементов	12	"12;5;18"	Рабочий
20. Контроль гироскопов/ акселерометров	12	19	Рабочий

Для наглядности порядок исполнения работ был представлен в виде диаграммы Ганта, состоящей из полос, ориентированных вдоль оси времени (рисунок 9). Каждая полоса на диаграмме представляет отдельную задачу в составе проекта (вид работы), её концы — моменты начала и завершения работы, её протяженность — длительность работы. Вертикальной осью диаграммы служит перечень задач.

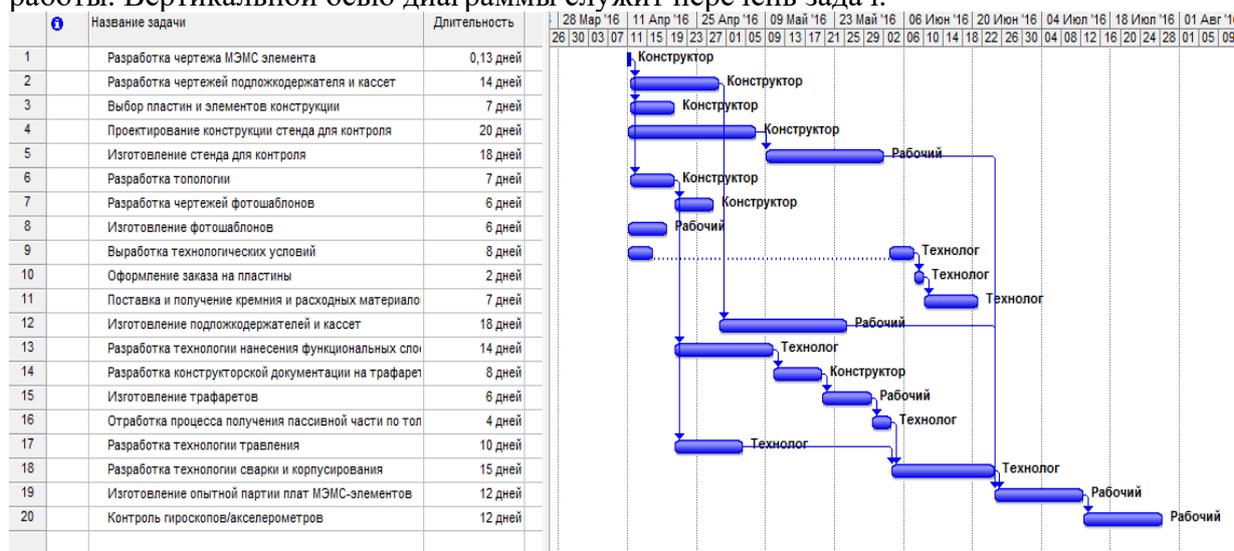


Рисунок 9 - Диаграмма Ганта

Сетевой график (рисунок 10) является незаменимым инструментом в управлении проектами. Он отражает технологическую зависимость и последовательность выполнения комплекса работ, связывает их свершение во времени

с учётом затрат ресурсов и стоимости работ с выделением при этом узких (критических) мест.

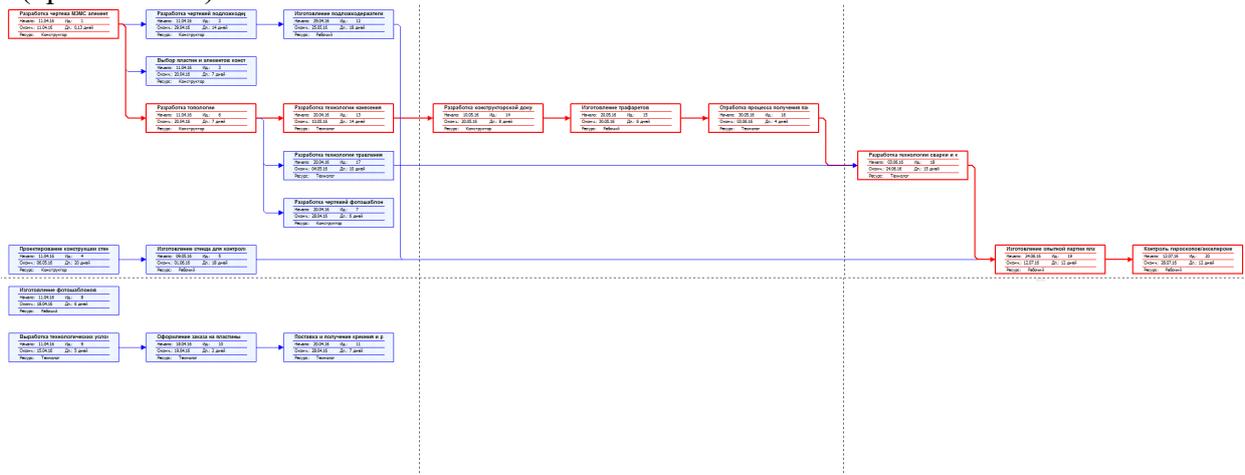


Рисунок 10 - Сетевой график исполнения работ

Исходя из сетевого графика был определен критический путь, то есть порядок выполнения работ, требующий наибольшего внимания и контроля.

Средства специализированного программного обеспечения Microsoft Project позволили также определить требуемое число исполнителей на каждом этапе подготовки производства и предоставить результаты в наглядной форме, как показано на 11.

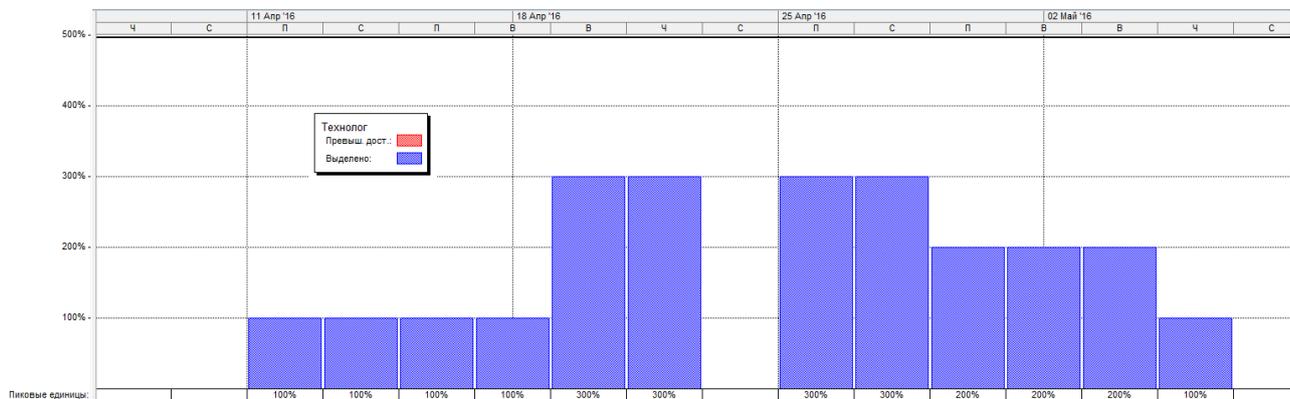


Рисунок 11 - Требуемое число технологов на каждом этапе подготовки производства

Заключение

В ходе выполнения данной работы были обозначены такие важные для организации производства МЭМС компоненты пункты, как:

- принцип действия устройства, представляющего собой совмещенные в одном корпусе гироскоп и акселерометр, основанного на технологии МЭМС;
- проведен патентный поиск, имевший цель найти наиболее технологичную и надежную конструкцию устройства;
- разработан технологический маршрут изготовления данного устройства;
- анализ рынка микроэлектронных устройств в России и мире показал, что предлагаемый проект по организации производства микроэлектромеханических устройств востребован, а продукция этого предприятия может занять свою нишу на рынке.

Литература

1. *Борисов Ю.* Электронная промышленность России: стратегия развития // Электронное издание «Электроника: наука, технология, бизнес». – 2006. – [Электронный ресурс]. – URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_807_105.pdf (дата обращения: 27.11.2016).
2. *Гольцова М.* Перспективы развития МЭМС. Интенсивный рост, новая движущая сила // Электронное издание «Электроника: наука, технология, бизнес». – 2013. – [Электронный ресурс]. – URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/3/article_3872_243.pdf (дата обращения: 27.11.2016).
3. *Сысоева С.* Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Акселерометры. // Электронное издание «Компоненты и технологии». – 2010. – [Электронный ресурс]. – URL: http://www.kit-e.ru/assets/files/pdf/2010_03_20.pdf (дата обращения: 27.11.2016).