



МГТУ им. Н.Э. Баумана,
ООО «НПП Тачскрин технологии»



Устройство сенсорно- бесконтактного ввода информации на базе керамики для авионики

Д.С. Терентьев, В.А. Шахнов, А.И. Власов

Москва, сентябрь 2016

Анализируются проблемы в сенсорных экранах электронной бортовой аппаратуры авиатранспорта, исследуются недостатки оптических и резистивных технологий, потребности в бесконтактном вводе и в снижении себестоимости. Предлагается разрешение проблем посредством ёмкостной сенсорно-бесконтактной панели на основе матрицы DFM[®] и керамики. При этом её себестоимость меньше более чем в 4 раза по отношению к инфракрасным экранам, применяемым в летательных аппаратах. Описывается структура и функциональная модель разработанной панели, предложен её состав.

Благодаря не стандартной конструкции и топологии матрицы возможно расстояние распознавания объектов ввода до 100 мм от поверхности сенсора. Изготовлены образцы сенсоров на базе ИТСС-керамики и контроллеры. Обоснована необходимость перехода на ЛТСС-керамику и предложена структурная модель образца. У панели DFM[®] на подложке из ЛТСС-керамики максимальная рабочая температура +125 °С. Это почти в 2 раза больше чем у других ёмкостных сенсорных панелей. Толщина матрицы 0.65 мм на порядок тоньше по отношению к инфракрасным экранам, применяемым в авионике.



1. Введение



Появление в последние годы сенсорного интерфейса управления летательными аппаратами связано с внедрением графических цветных ЖК-индикаторов [1]. Впоследствии в электронную бортовую аппаратуру, например, вертолёт [2], стали внедряться сенсорные навигаторы.

Компанией Rockwell Collins была разработана первая в авионике интегрированная сенсорная система управления и интерфейса пилота/пассажира [3]. В ней инфракрасные устройства ввода 14" [4] применяются в информационно-измерительной аппаратуре пилота и в системе управления салоном посредством встроенных в кресла пассажиров сенсорных панелей 3,8" [5].

Curtiss-Wright Controls Defense Solutions разработала 21,5-дюймовое резистивное сенсорное устройство ввода информации с повышенными требованиями по устойчивости к внешним воздействующим факторам [6].



2. Формулировка проблемы и технико-экономических требований к разрабатываемому устройству ввода



Несмотря на то, что внедрённые в авионику сенсорные экраны позволяют осуществить интерфейс более интуитивным и сокращают размеры бортовой аппаратуры, они обладают множеством недостатков: у инфракрасных неудовлетворительные массово-габаритные и стоимостные характеристики для широкого применения в авионике,



Инфракрасные

у резистивных надёжные (35 млн. касаний, низкая устойчивость к механическим повреждениям), климатические (узкий диапазон температур: $-10...+60^{\circ}\text{C}$), оптические (светопропускаемость до 85%) и функциональные (отсутствие multi-touch) [7].



Резистивные

При использовании ёмкостных сенсорных панелей с multi-touch, распознаванием двумерных жестов, повышенными надёжными (200-1000 млн. касаний) характеристиками, возможно избежать перечисленных выше недостатков, что уже предложено в работе [8].



Multi-touch

2. Формулировка проблемы и технико-экономических требований к разрабатываемому устройству ввода



Тем не менее, применение ёмкостных сенсоров без существенных изменений не целесообразно из-за специфических требований в авионике помимо требований по надёжности. Например, температуры -40°C , $+200^{\circ}\text{C}$, чему не удовлетворяют традиционные материалы изготовления резистивных и ёмкостных сенсорных панелей на основе оксидов индия и олова (indium tin oxides, ITO), которые также хрупкие и дорогостоящие. Кроме того, качество изображения ухудшается, что может быть критичным для оперативного восприятия информации пилотом.



Соотношение оптовых цен на экран 4", USD

Проекционно-ёмкостной экран 20-35

Резистивный экран 5-7

Управление жестами



Устранить эти проблемы возможно переходом к бесконтактному методу ввода, способностью бортовой панели к распознаванию жестов [8], поиску альтернативных конструкций и способов изготовления. При этом трёхмерное распознавание объектов ввода в пространстве должно обеспечиваться ёмкостными, а не оптическими технологиями, для снижения себестоимости, энергопотребления и массово-габаритных параметров.

3. Предлагаемое техническое решение и структурно-функциональное построение сенсорной панели управления летательными аппаратами



В качестве исходных данных выбрана проекционно-ёмкостная сенсорная матрица с бесконтактным вводом из толстоплёночных структур вместо ITO – панель DFM® с multi-touch [9], обладающая меньшей себестоимостью (в 2-3 раза при 10-15"), высокой надёжностью (500 млн. касаний, -40...+70 °C) и светопропускаемостью 98% вместо 90-92% за счёт иной конструкции технологии изготовления [9].

Для её применения в авионике, во-первых, необходимы подложки и компоненты, устойчивые к экстремальным температурам. Такими является LFC-материалы, представляющие собой многослойную стеклокерамику, обрабатываемую в сыром виде по LTCC-технологии, а затем после нанесения толстоплёночных паст и монтажа компонентов подвергаются термической обработке [10]. Рабочая температура устройств на её основе 350 °C [11], а толщина панели снизится с 0,9 до 0,65 мм. Это позволит интегрировать контроллер в матрицу и избавиться от печатных плат из стеклотекстолита, т.е. расширенный температурный диапазон, повышение надёжности и меньшие массово-габаритные показатели.

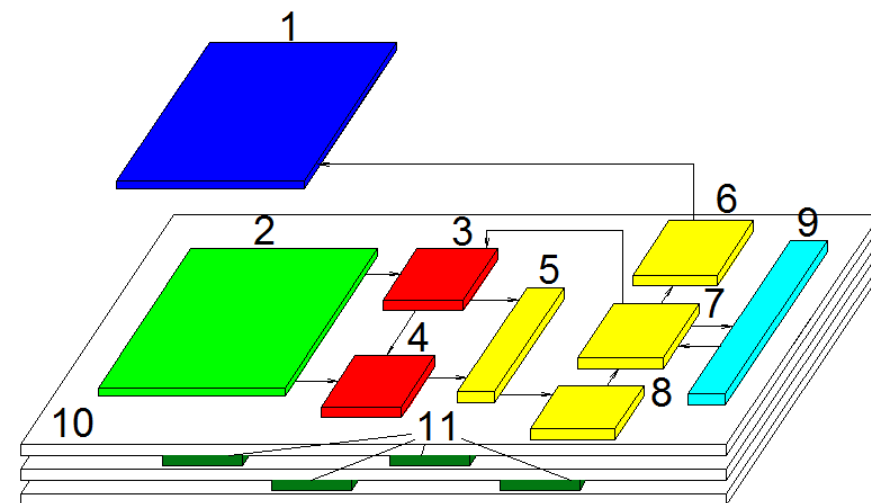
Во-вторых, материалы матрицы должны также функционировать в широком температурном диапазоне. Для этого используются толстоплёночные структуры различной степени проводимости: конденсаторные диэлектрические, изоляционные, резистивные, проводящие для формирования матрицы. При этом в них сочетаются высокие значения накапливаемой ёмкости за счёт большей площади образуемых электродами сенсорной панели конденсаторов (бесконтактный ввод) и температурный диапазон до 350 °C.



3. Предлагаемое техническое решение и структурно-функциональное построение сенсорной панели управления летательными аппаратами



Разработанный сенсорный экран состоит из: средство отображения (1), сенсорная матрица (2), модуль АЦП и опроса сенсорной матрицы по трём координатам ввода (3 для X и Y, 4 для Z), модуль определения координат ввода (5), блок формирования изображения (6), устройство управления (7), блок цифровой обработки сигналов (ЦОС) (8), интерфейсный модуль (9), подложка LTCC (10) и пассивные компоненты (11). Координата Z (расстояние до матрицы) при помощи алгоритмов ЦОС сопоставляется с координатами X и Y для распознавания жестов в пространстве. Блок ЦОС также предназначен для фильтрации и выделения полезной объёмной области объектов ввода. Multi-touch реализуется при помощи устройства управления (7), АЦП (3) и (4), и включает также координату Z для трёхмерных жестов. Пассивные компоненты находятся между слоями LTCC в виде толстоплёночных элементов, а активные - навесных компонентов. По результатам теоретической оценки электрофизических параметров рассчитанные ёмкости равны 10 нФ с погрешностью 10%, что сопоставимо с ёмкостью человеческого тела 100..300 пФ. При этом геометрический параметр – толщина конденсаторного диэлектрика – после обработки должен быть равен 40 мкм. При изменении ёмкости в результате приближения тела напряжение должно изменяться с 3,3 В до 3,2 В. Следовательно, напряжение открытия компаратора выбрано 3,23..3,24 В. Проведён анализ эксплуатационных параметров: multi-touch равен количеству сегментов, т.е. в лабораторных образцах равно 64, в отличие от аналогов, где в основном 2..6, реже 10..32. В последующих образцах 4.3" разрядность матрицы планируется выбрать 16:9 сегментов размером 5.4*5.4 мм. Тогда multi-touch будет распознавать до 144 объектов.

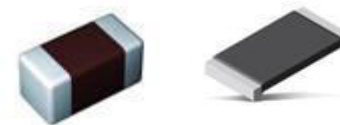


4. Обеспечение надёжности разработанной сенсорно-бесконтактной бортовой панели для авионики и её сравнение с аналогами



Проведём теоретическую оценку допустимых внешних воздействующих факторов (температура, влажность) и надёжностных параметров. Для высоких требований по надёжности предлагается применять ПЛИС Actel ProASIC3/E и SMD-компоненты с высокой степенью устойчивости: чип-конденсаторы Novasap класса 2 [12] и чип-резисторы Vishay [13], монтируемые на LTCC-подложку. В результате температурный диапазон от -40 до $+125$ °C исходя из заявляемых производителями вышеуказанных резисторов и конденсаторов параметров [12, 13] (у аналогов до $+70$ °C). Матрица функционирует до $+175$ °C в соответствии со спецификациями производителей применяемых материалов и подложек. Поскольку элементная база не коммерческого, а военного/космического назначения, то теоретически рассчитанная наработка на отказ увеличивается вдвое с 16 (по сравнению с панелью DFM® для мобильных устройств [9]) до 32 лет в соответствии со спецификациями производителей. Надёжность до 1 млрд. прикосновений, что не хуже аналогов.

Следует отметить, что размер сегмента не целесообразно выбирать менее 2.5×2.5 мм ввиду соответствующего значения площади подушечки пальца. При этом разрядность матрицы 16:9 сегментов возможно повысить до 32×18 для достижения виртуальных размеров сегмента со стороной 2.5 мм программными методами, т.е. алгоритмами постобработки в контроллере и драйвере, соответственно. В противном случае дальнейшее повышение количества мультиплексоров до 18 и компараторов до 5 значительно увеличит себестоимость и сложность устройства. Последнее уменьшит вероятность его безотказной работы, что для авионики является критичным фактором.



4. Обеспечение надёжности разработанной сенсорно-бесконтактной бортовой панели для авионики и её сравнение с аналогами



Сравним разработанное устройство с аналогами. Аналоги можно разделить на три основные группы:

1. Аналогичные технические решения по снижению себестоимости за счёт изменения состава слоёв или толщины матрицы. Ёмкостные панели «in-cell» [14] (№2) имеют меньшую толщину, но чувствительные элементы из ИТО, и себестоимость выше в 3-4 раза. Несмотря на то, что их толщина 570 мкм, толщина панели DFM® на базе LTCC включает в себя также навесные компоненты для АЦП и контроллера. Ёмкостные панели «on-cell» (№3), интегрированные в AMOLED-матрицу [18], несмотря на гибкость, обладают слабой

Предлагаемое решение и аналоги	Цена (от 500 шт. 4"), USD	Толщина экрана, мм	3D жесты
1. Панель DFM® с LTCC-керамикой	12	0,65	+
2. «in-cell» AU Optronics	30..40	0,57 (матрица) [14]	-
3. «on-cell» Innolux, CPT [18]	7 (сенсорная панель) [15]	Нет данных	-
4. «GestIC» Microchip Technology [16]	54	Новизна в контроллере	+
5. Chirp Microsystems	1,5 (контроллер) [17]	Нет данных	+

чувствительностью сенсоров из-за одного слоя датчиков и имеют ещё большую толщину.

2. Аналоги по бесконтактному вводу и жестам в пространстве без оптических технологий. У GestIC (№4) отсутствие замены ИТО в датчиках не снижает себестоимость, которая больше в 5 раз, у панели DFM®, и не намного меньше инфракрасных экранов, применяемых в авионике. У решений №2, №3 и №4 надёжность, температурный диапазон и устойчивость к внешним факторам менее приемлемые для использования в экстремальных средах (авионика), чем у DFM®. Они применяются в мобильной (№2-№3) и портативной технике широкого потребления (№4). Решение от Chirp Microsystems [17] (№5) представляет собой распознавание жестов и состоит из двухмерной матрицы акустических датчиков с микросхемой контроллера малого энергопотребления. Однако энергопотребление матрицы 110 мВт [19], что в 3 раза больше, чем у предлагаемой сенсорной панели.

5. Практическая реализация и исследования прототипа сенсорной матрицы для бортовой панели в авионике на примере HTCC-керамики



Изготовление прототипа планировалось проводить в два этапа. Первый заключается в изготовлении и экспериментальных исследованиях матрицы 8*8 сегментов с высокотемпературной однослойной керамикой HTCC с АЦП на печатной плате из 2 мультиплексоров и 1 компаратора для проверки практической реализуемости и подтверждения функционирования (рис. 2, 3). Второй нужен для создания матрицы 16*9 с LTCC-керамикой и интегрированным АЦП для достижения конечного результата.

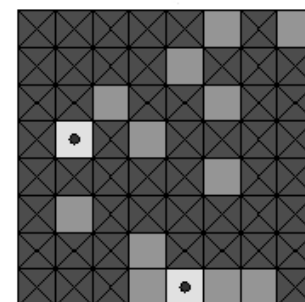
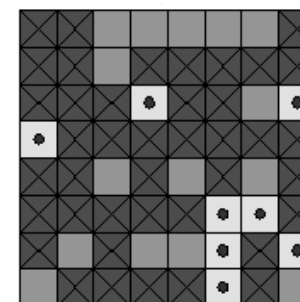
На рис. 2 видно 64 квадратных нижних обкладки, образующих столько же сенсорных сегментов. Фотография соответствует чертежу матрицы в работе [7]. Процент выхода годных матриц составил 80%. Однако после этого пробного термического воздействия был произведён подбор оптимальных параметров (температура, время, расположение подложки в печи). Кроме того, в каждой из матриц 24% рабочих сегментов, исходя из карты бракованных сегментов, где они обозначены крестами. После нанесения и термообработки завершающего резистивного слоя количество бракованных сегментов увеличилось на 7%. Это связано с ускорением процесса дальнейшей диффузии серебра при температуре 850 °С. Проведём и проанализируем практические оценки параметров устройства.

Измеренные электрические ёмкости не значительно отличаются от рассчитанной теоретически (10 нФ) - с погрешностью 10% при частотах выше 10 кГц. Отличие является следствием разброса толщины конденсаторного диэлектрика на 30..40 мкм, что является второй причиной добавления третьего слоя конденсаторного диэлектрика.

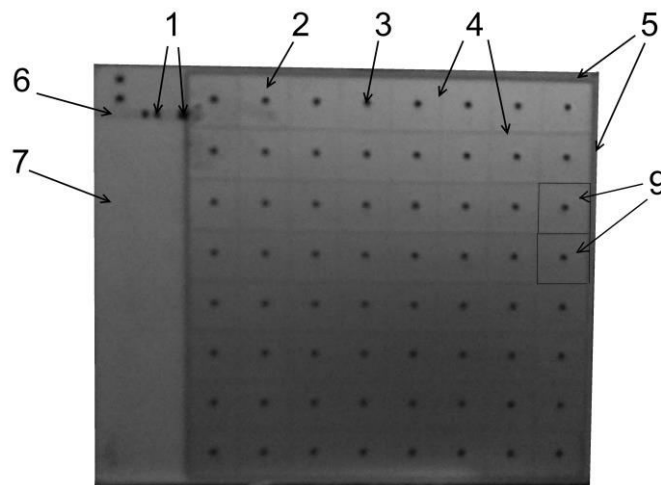
8 образцов



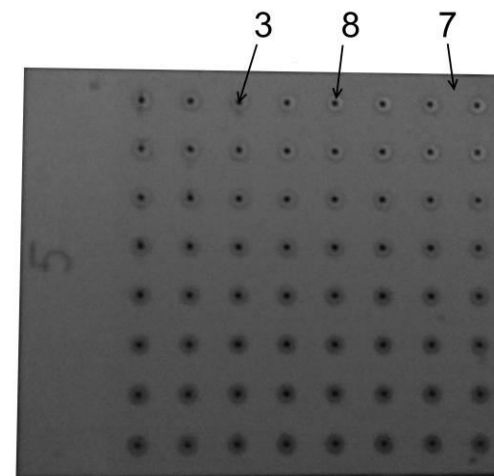
Карты бракованных сегментов



5. Практическая реализация и исследования прототипа сенсорной матрицы для бортовой панели в авионике на примере НТСС-керамики



Вид сверху прототипа ёмкостной сенсорной матрицы на базе НТСС для бортовой панели в авионике



Вид снизу сенсорной матрицы на базе НТСС

- 1 – переходы от проводящего слоя к резистивному, которые также являются контактными площадками для измерения параметров;
- 2 – верхний электрод - проводящий слой на основе серебра, растянутый на всю матрицу;
- 3 – отверстия в подложке, покрытые изнутри проводящим слоем;
- 4 – рельеф вследствие изоляционного слоя под верхним электродом, или границы сегментов;
- 5 – конденсаторный диэлектрик для слоя между 64 нижними электродами и верхним с коэффициентом диэлектрической проницаемости 800;
- 6 – проводники к матрице;
- 7 – керамическая подложка;
- 8 – проводящие обрамления отверстий;
- 9 – квадратные сегменты матрицы.

Устройство сенсорно-бесконтактного ввода информации на базе керамики для авионики

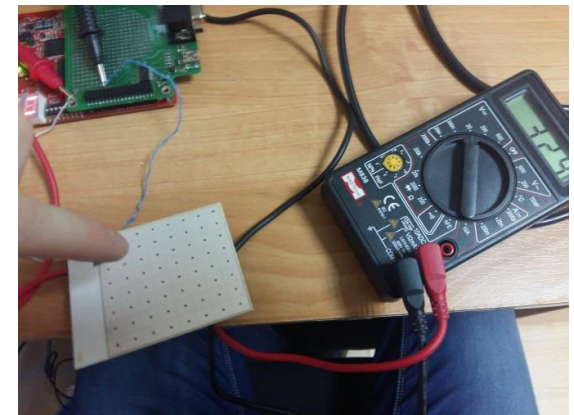
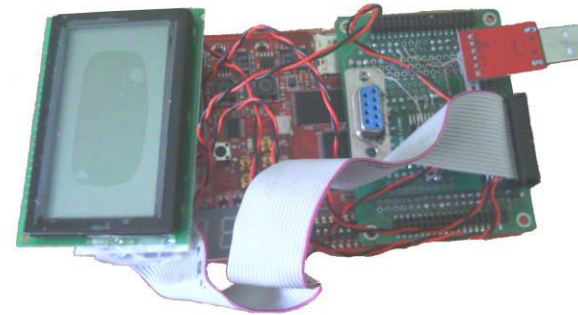
МГТУ им.Н.Э.Баумана

5. Практическая реализация и исследования прототипа сенсорной матрицы для бортовой панели в авионике на примере НТСС-керамики



При частотах 1..10 кГц ёмкости имеют значения 13..14 нФ, а при частоте 100 кГц измеряемые ёмкости уменьшаются до единиц нФ. Это свидетельствует о том, что частоту опроса сенсорной матрицы контроллером следует выбирать в интервале от 10 до 50 кГц. Измеренное напряжение 3.22..3.24 В при приближении электропроводящего тела. При отсутствии электропроводящего тела напряжение больше на 2..8 мВ. Это соответствует теоретической оценке параметров напряжений. Вышеуказанные недостатки исправлены корректировкой технологического процесса, размеров и материалов изготовления диэлектрического и проводящего слоя. Например, нанесение трёх слоёв конденсаторного диэлектрика вместо двух. В проводящем слое частичная замена серебра на палладий. Планируется применить конденсаторную пасту с коэффициентом диэлектрической проницаемости 25 вместо 800, при котором накапливаемая ёмкость уменьшится прямо пропорционально в 32 раза с 10 000 пФ до 312,5 пФ.

Таким образом, она будет сопоставима с ёмкостью человеческого тела. Следовательно, ёмкость сегмента матрицы и напряжение после него тоже уменьшится в 2-3 раза. Такое существенное изменение напряжения будет проще зарегистрировать компаратором с уменьшением вероятности ложного срабатывания.



6. Практическая реализация и исследования прототипа сенсорной матрицы для бортовой панели в авионике на примере НТСС-керамики



Отличием предлагаемого решения от перечисленных во введении является новый функциональный уровень разработанного устройства ввода информации в авионике (распознавание жестов в пространстве, бесконтактный ввод). Также к преимуществу можно отнести не стандартную материально-техническую и технологическую базу ёмкостных сенсорных панелей. В результате у них появляется способность функционировать во внешних условиях, характерных для авиации. Особенностью ёмкостной сенсорно-бесконтактной панели DFM[®] помимо альтернативных материалов изготовления являются иная топология электродов матрицы и принцип функционирования контроллера. Возможность распознавания жестов без применения дорогостоящих, крупно-габаритных оптических технологий позволит повысить эксплуатационные характеристики и реализовать более эффективный интерфейс управления бортовой аппаратурой, удовлетворяющий требованиям авионики (высокие параметры износоустойчивости, качества изображения вследствие отсутствия контакта с механизмами управления и сенсорной панелью, возможность ввода в перчатке). Кроме того, предлагаемое решение конкурентноспособно и более эффективно по сравнению с аналогами.





Работа поддержана грантом Фонда Содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, результаты получены при выполнении НИОКР «Разработка и аппаратная реализация сенсорных технологий ввода информации ёмкостного типа».

МГТУ им.Н.Э.Баумана, ООО «НПП Тачскрин технологии»

Аспирант, Терентьев Дмитрий Сергеевич
(+7(915)199-40-44, d.terentyev@touchtechn.ru),

Д.т.н., член-корр. РАН, зав.кафедрой ИУ4, Шахнов Вадим Анатольевич,

К.т.н., зам.зав.кафедрой ИУ4, Власов Андрей Игоревич