

## **О возможности оперативного определения взлетной массы самолета**

**Хейн Тай Зар Тин\*, Мельников В. Е.\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [heintayzartin@gmail.com](mailto:heintayzartin@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [ve\\_melnik@mail.ru](mailto:ve_melnik@mail.ru)*

### **Аннотация**

Рассмотрена целесообразность обеспечения современных аэропортов средствами оперативного контроля взлетного веса авиалайнеров. Рассмотрены особенности организации метрологических зон, обеспечивающих весоизмерительные процедуры при маневрировании на рулежной дорожке на пути к взлетно-посадочного полосе.

**Ключевые слова:** взлетный вес самолета, метрологическая зона, сенсорная линейка, первичный сенсор, емкостный преобразователь, тензочувствительность, электронный блок.

### **Введение**

Знание фактического взлетного веса пассажирских и транспортных авиалайнеров, а также их центровки является одним из факторов гарантии безопасности и качества управляемости. В настоящее время современные аэропорты не располагают средствами оперативного контроля веса самолета в реальном масштабе времени, не нарушающими режим и график работы аэропортов. В данной

работе рассмотрена возможность создания весоизмерительного терминала, позволяющего определять вес самолета и его центровку непосредственно перед взлетом, в процессе его движения по рулежной дорожке (РД) на пути к взлетно-посадочной полосе (ВПП).

Для этого на ВПП должна быть метрологически оборудованная зона, содержащая сенсорные площадки, встроенные в подстилающую поверхность по числу опорных стоек ЛА, а также электронный блок для обеспечения работоспособности сенсоров, обработку информации и дистанционной передачи данных на центральный пост для принятия решений [1,2].

На рис.1 представлена условная схема участка аэропорта и движения ЛА на РД через метрологическую зону (МЗ) к ВПП.

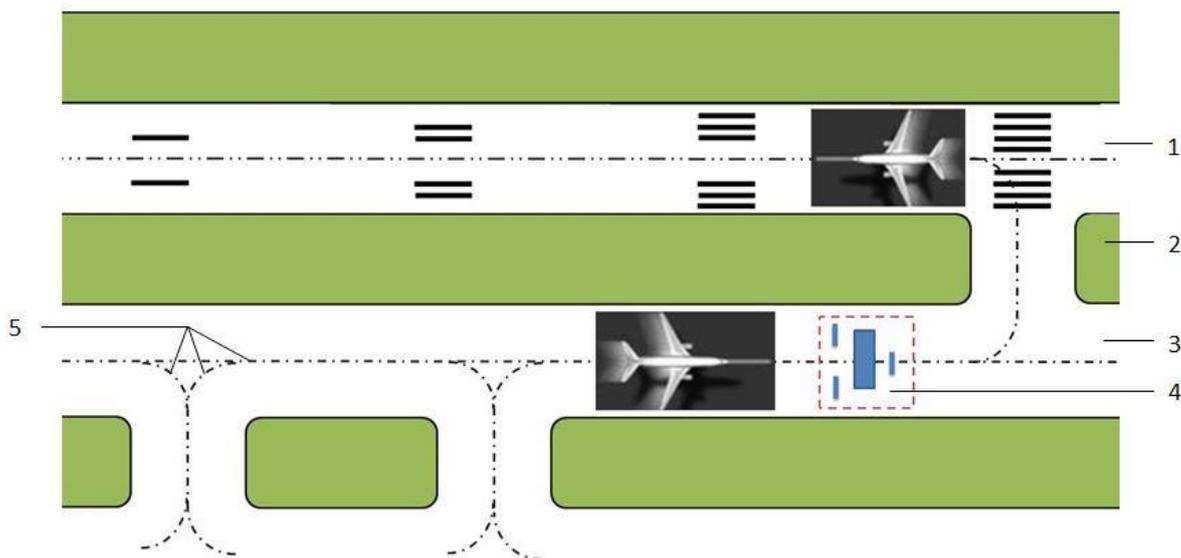


Рис. 1. Маневрирование ЛА на пути к ВПП

Позициями на рис.1 обозначено: 1 – стартовая зона ВПП; 2 – зона отчуждения, примыкающая к ВПП; 3 – рулежная дорожка; 4 – метрологическая зона на РД; 5 – траектории возможных движений при маневрировании по РД.

Возможность реализации такой программы зависит от наличия первичных измерителей сил давления, встраиваемых в подстилающую поверхность РД метрологической зоны 4 при наезде колес передней и задних стоек шасси ЛА на соответствующие участки.

На рис.2 представлена схема метрологической зоны весоизмерительного терминала.

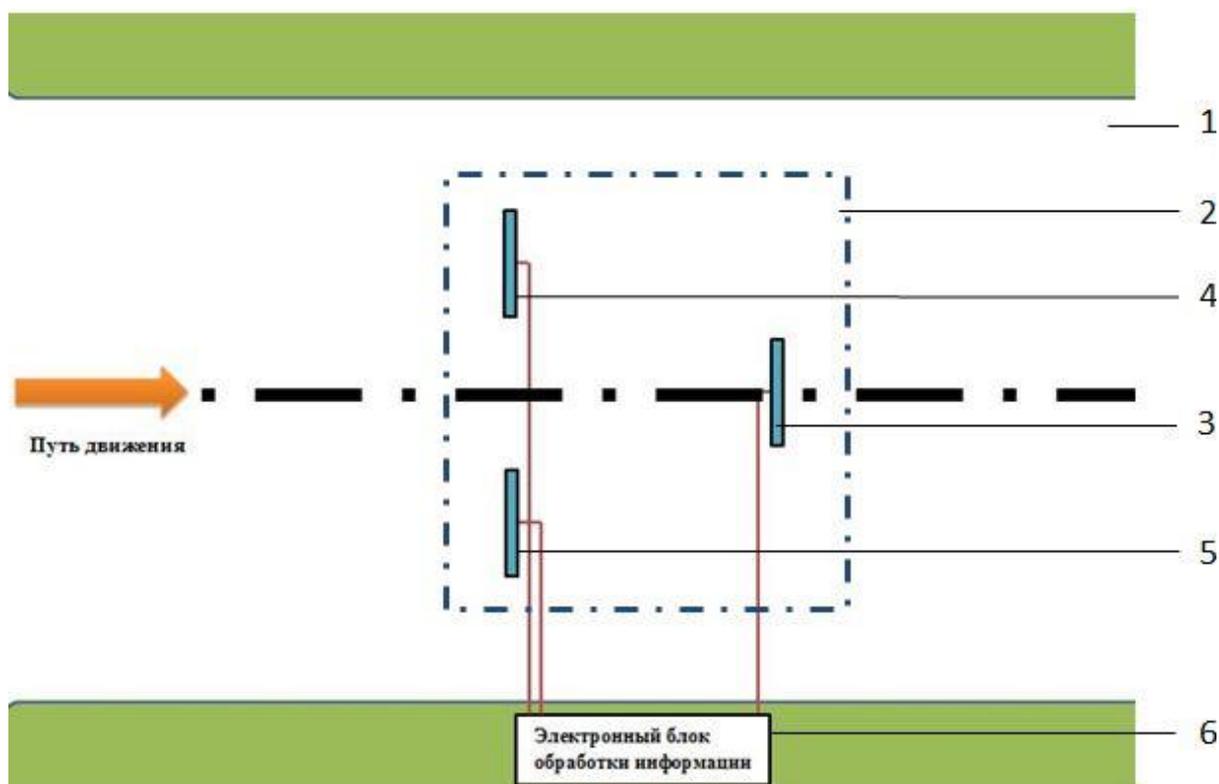


Рис. 2. Топология метрологической зоны весоизмерительного терминала

Позициями на рис.2. обозначены: 1 – рулежная дорожка (РД); 2 – метрологическая зона; 3, 4, 5 – сенсорные линейки (СЛ) для контроля сил давления на поверхность РД, соответственно передней 3 и задних 4, 5 стоек шасси; 6 – электронный центр обработки информации.

Важно сформировать требования к облику сенсорных линеек 3,4, 5, начиная с геометрии приемной зоны площадок, воспринимающих силы давления стоек шасси

ЛА на подстилающую поверхность РД. И далее к силовым элементам сенсоров СЭС и к первичным сенсорам (ПС), преобразующим силы давления в электрический сигнал для алгоритмической обработки и дистанционной передачи информации.

### Приемная зона сенсорных линеек

Оцениваются особенности переноса сил давления колес стоек шасси на воспринимающую площадку сенсорной линейки в зависимости от конфигурации и размеров контактной поверхности колеса. На рис.3 иллюстрируется процесс накатывания колеса на измерительную площадку СЛ.

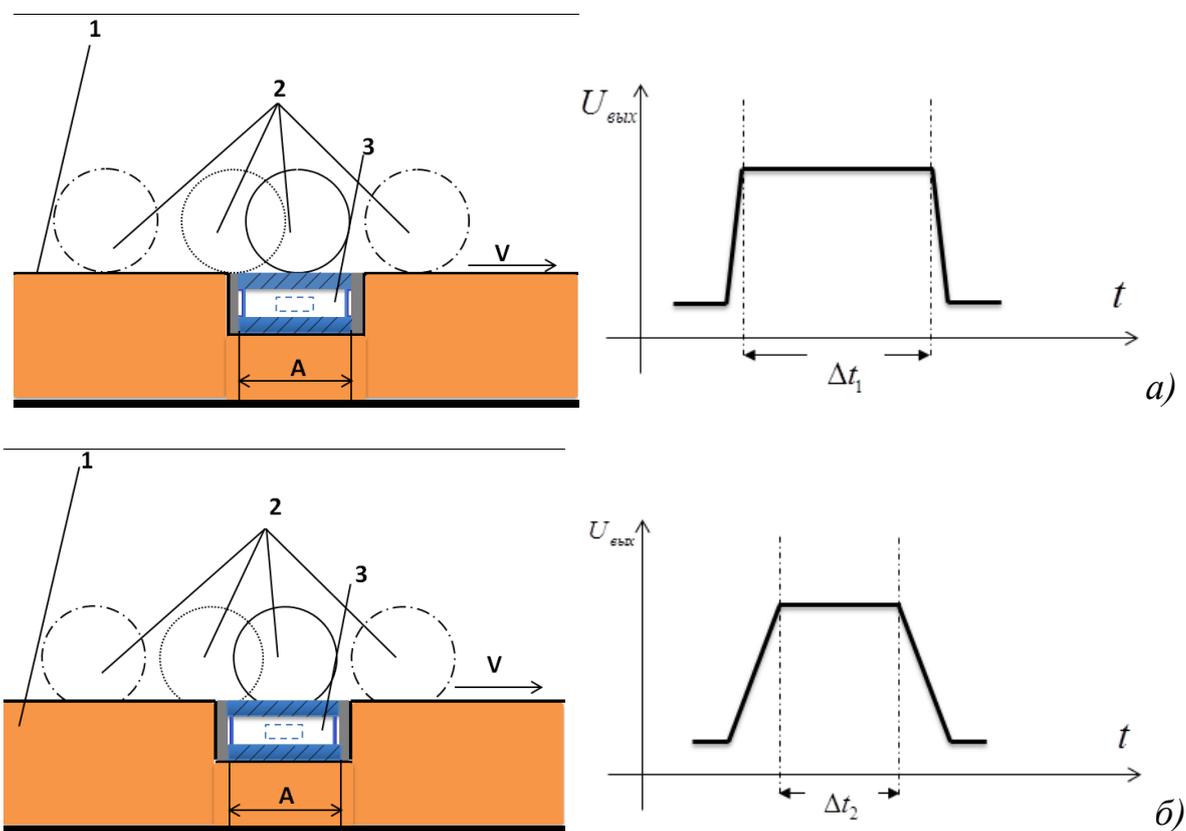


Рис.3. Процесс взаимодействия колеса с измерительной площадкой СЛ.

Рис. 3 а) - случай «точечного» контакта; рис. 3 б) - контактная поверхность соприкосновения.

Позициями на рис. 3 обозначены: 1 – подстилающая поверхность РД; 2 – колеса шасси; 3 – воспринимающая поверхность СЛ.

Представленная схема позволяет сформировать требования к конструктивным параметрам СЛ, чтобы в процессе измерения обязательно имели место фазы полного расположения контактного пятна на воспринимающей поверхности сенсора. Это условие предполагает наличие горизонтальной площадки в профиле выходного сигнала. Анализ этого сигнала позволяет извлечь дополнительную информацию, полезную для диагностики состояния колесных элементов шасси.

На рис.4 представлена картина распределения профилей выходных сигналов во времени при прохождении ЛА через метрологическую зону терминала.

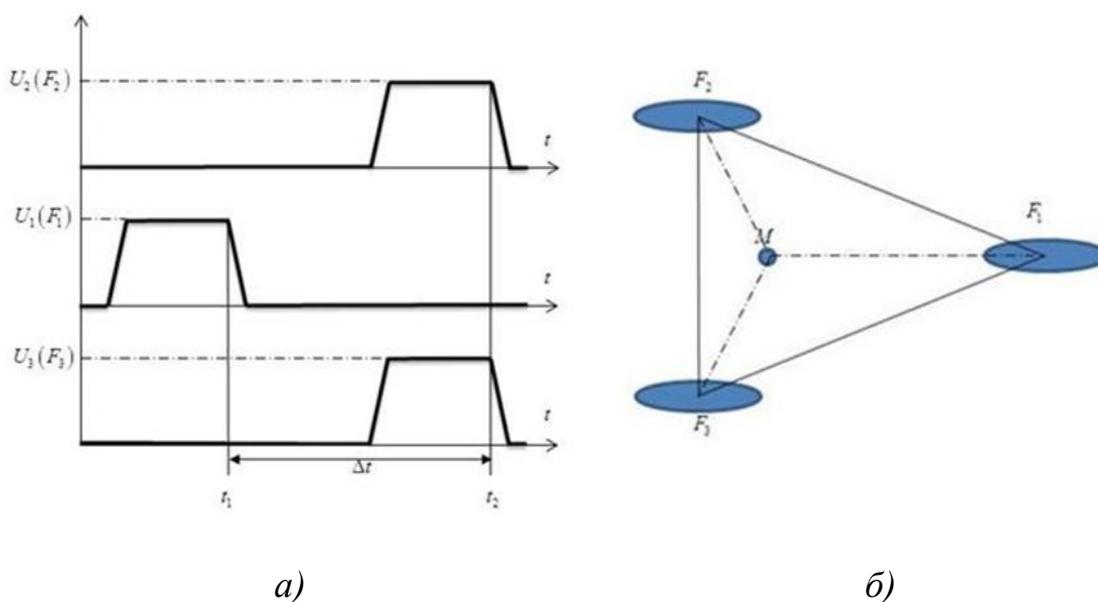


Рис. 4. Профиль выходного сигнала и распределение сил давления стоек на поверхность сенсорных линеек

Рис. 4 а) - распределение выходных сигналов во времени в масштабе сил давления каждой из стоек шасси. Сумма сигналов определяет суммарный вес ( $P$ ) ЛА:  $P=F_1+F_2+F_3$ .

Рис. 4 б) - «привязка» точек приложения сил давления к узловым точкам ЛА, по которым определяются координаты центра тяжести (масс). ЛА.

При проезде самолета через весоизмерительной терминал появляются сигналы в зависимости от сил  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ , действующих на соответствующие сенсорные линейки 3, 4 и 5 (рис.2), разнесенные по времени ( $t_1$ ,  $t_2$ ).

### Сенсорная линейка

Это один из основных узлов метрологической зоны, определяющий количественные и качественные показатели измерительных процессов. Каждая СЛ должна принимать на себя, как минимум, третью часть веса  $P$  ЛА, иметь приемную и опорную площадки, связанные эталонными упругими элементами соответствующей жесткости в их состав входят первичные сенсоры (ПС), воспринимающие деформацию эталонного элемента или её часть и трансформирует в электрический сигнал.

В составе СЛ может быть один или несколько ПС.

На рис.5 представлен элементный состав сенсорной линейки.

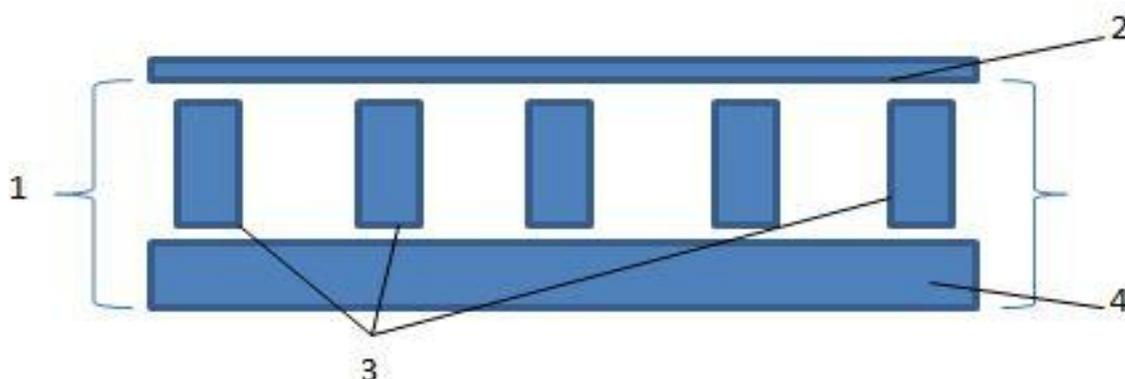


Рис. 5. Сенсорная линейка с функционально необходимыми элементами

Позициями обозначены: 1 – сенсорная линейка; 2 – верхняя приемная плита; 3 – эталонные упругие элементы, некоторые из которых могут совмещать функции первичных сенсоров ПС; 4 – нижняя опорная плита.

Представленная конфигурация должна быть функционально завершённой структурой, которыми комплектуются все измерительные зоны 3,4,5 по рис.2.

Возможны несколько вариантов реализации сенсорной линейки и их базовых сенсоров.

- Верхняя плита 2 и нижняя опорная плита 4 должны быть связаны между собой универсальными упругими элементами с первичными сенсорами.

### **Первичные сенсоры**

Первичные сенсоры и эталонные упругие элементы определяют метрологические и эксплуатационные возможности весоизмерительного терминала. В отличие от известных решений [1,2] в работе предложено использовать ПС на базе комплексного использования в их составе кристаллического и аморфного кварца [3,4,5,6,7]. Это электрические измерительные преобразователи с частотозависимым выходным сигналом. В частности, это унифицированные кварцевые ёмкостные преобразователи в сочетании с пьезокварцевыми автогенераторами [3,4,5].

### **Ёмкостные преобразователи**

Рассмотрены базовые варианты ёмкостных преобразователей в виде плоского конденсатора с электрической ёмкостью  $C$ , площадью  $S$  электродов на расстоянии  $h$  между электродами и с межэлектродной средой либо газовой, либо диэлектрической (аморфный или кристаллический кварц). Показано, что такой элемент способен

нести силовую нагрузку и является емкостным силоизмерительным тензопреобразователем. Выбор такого материала обоснован тем, что он обладает набором уникальных электромеханических и технологических характеристик [3,4].

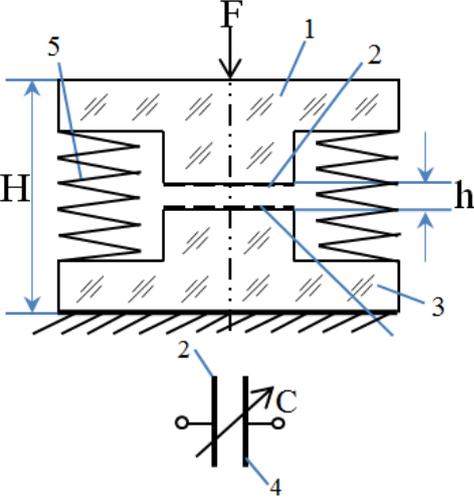
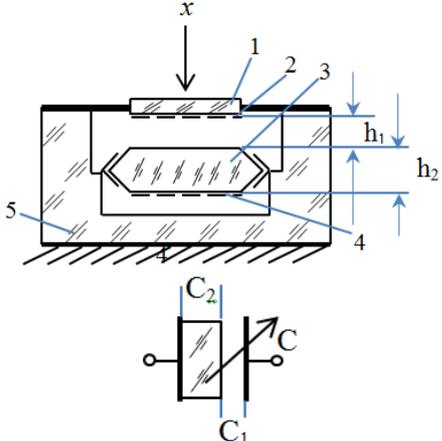
В табл. 1 представлены некоторые конфигурации таких параметрических преобразователей и приведены основные соотношения, отражающие их особенности.

Вариант 1 таблицы представляет собой твердотельный силовой сенсор 2, выполненный в виде плоского конденсатора, межэлектродное пространство  $h$  которого заполнено диэлектриком из аморфного кварца. Представлена конфигурация, электрическое обозначение конденсатора в схемах преобразования и основные соотношения, позволяющие оценить допустимые изменения ёмкости  $dC$  конденсатора  $C$ , исходя из упругих характеристик (предела прочности  $\sigma_b$ , модуля Юнга  $E$  и коэффициента  $k_s$ ) кварцевого стекла.

Таблица 1

Примеры кварцевых сенсоров

	Наименование и обозначение	Кинематическая схема	Основные соотношения
1	<p>Емкостный твердотельный силовой сенсор</p> <p>1,3 – электроды конденсатора 2 – диэлектрик (кварцевое стекло)</p> <p><math>F</math> – измеряемое усилие <math>h</math> – межэлектродное расстояние <math>D</math> – диаметр диэлектрика <math>C</math> – электрическая емкость <math>K_{тч}</math> – коэффициент тензочувствительности</p>		$C = \frac{\epsilon_a \epsilon_0 s}{h}; s = \frac{\pi}{4} D^2;$ $\frac{dC}{C_0} = \frac{dh}{h_0} - 2 \frac{dD}{D_0} = -\frac{dh}{h_0} (1 + 2\mu);$ $K_{тч} = \frac{dC/C_0}{dh/h_0} = -(1 + 2\mu);$ $\left(\frac{dh}{h}\right)_{\max} = \frac{\sigma_b}{k_s E};$ $\epsilon_a = 8,855 \times 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}};$ $\epsilon_0 = (3 \div 5)$ $\mu \approx 0,17$

2	<p>Кварцевый силовой элемент</p> <p>1,3 – верхнее и нижнее основание 2,4 – обкладки конденсатора 5 – кварцевый упругий элемент <math>h_1</math> – расстояние между электродами <math>H, S</math> – длина и сечение кварцевого упругого элемента</p>		$\frac{dH}{H} = \frac{\sigma_b}{\kappa_3 E}; dH = dh_1 = H \frac{\sigma_b}{\kappa_3 E};$ $\left(\frac{dC}{C_0}\right) = \frac{dH}{h_0};$ $\left(\frac{dC}{C_0}\right)_{\max} = \frac{H \sigma_b}{h_0 E \kappa_3};$ $K = \frac{F}{dH} = \frac{\sigma_b S}{H E \kappa_3} - \text{жесткость кварцевого упругого элемента 5.}$ $K = K_0(1 + \alpha t - \alpha_E t) - \text{температурная зависимость жесткости.}$ $C = C_0 \left(1 + \alpha t \left(2 - \frac{H}{h_0}\right)\right) - \text{температурная характеристика ёмкости.}$
3	<p>Кварцевый модуль для измерения смещений <math>x</math> подвижного электрода 2</p> <p>1 – жесткий центр кварцевой мембраны 2, несущей подвижный электрод 3 – кварцевый кристалл 4 – неподвижный электрод 5 – кварцевое основание</p>		$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ $C_1 = \frac{\varepsilon_a \varepsilon_{\text{воз}} S}{h_1}, C_2 = \frac{\varepsilon_a \varepsilon_{\text{кв}} S}{h_2}$ $\frac{dC}{dC_1} = \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^{-2}$ $C = C_0(1 + \alpha t), \text{ где } \alpha = 0.5 \times 10^{-6} 1^\circ\text{C}$

Представлено выражение для коэффициента  $K_{\text{тч}}$  тензочувствительности твердотельного ёмкостного сенсора. Приведенные соотношения позволяют определить силовые характеристики кварцевого сенсора в зависимости от его геометрических показателей и коэффициента  $k_3$  запаса прочности.

Предельно допустимое приращение емкости  $dC$  кварцевого элемента определится:

$$dC = -C_0 \frac{\sigma_b}{E k_3} (1 + 2\mu). \quad (1)$$

Предельно допустимое относительное изменение емкости такого преобразователя можно оценить по усредненным значениям упругих характеристик

кварцевого стекла:  $\sigma_b = 5.9 \times 10^8 \left[ \frac{\text{Н}}{\text{М}^2} \right]$ ;  $E = 7.36 \times 10^{10} \left[ \frac{\text{Н}}{\text{М}^2} \right]$ :  $\left( \frac{dC}{C_0} \right)_{\max} = \frac{1}{k_3} \cdot 1,07 \cdot 10^{-2}$ .

Здесь коэффициент  $k_3$  запаса прочности выбирается в пределах  $(1 \div 10)$  в зависимости от требований к условиям эксплуатации.

В варианте 2 таблицы представлена кинематическая схема кварцевого силового элемента с «воздушным», газовым или вакуумированным межэлектродным пространством. В нем силовой элемент выполнен в виде кварцевого кольца высотой  $H$ , наружным  $D_n$  и внутренним  $D_{вн}$  диаметрами соответственно и изображен как упругая пружина 5, жесткостью  $K$ . Тогда жесткость кварцевого силового элемента определится:

$$K = \frac{\pi}{4} \frac{Ek_3}{H} (D_n^2 - D_{вн}^2). \quad (2)$$

Измеряемое усилие  $F$ , определится:

$$F = \frac{\pi}{4} Ek_3 (D_n^2 - D_{вн}^2) \frac{dH}{H}. \quad (3)$$

В свою очередь максимально допустимое относительное изменение зазора конденсатора  $\frac{dh}{h}$ , следовательно, и предельно допустимое относительное изменение

$\frac{dC}{C}$  ёмкости  $C$  конденсатора лимитируется, в частности, требованиями к

линейности статической характеристики  $dC = C_0 \left( \frac{dh}{h} \right)$ .

Причем в данном варианте приращение длины  $dH$  упругого элемента равно приращению зазора  $dh$  конденсатора. Тогда для максимального относительного приращения ёмкости конденсатора  $dC/C_0 = -\frac{dH}{h}$ .

В варианте 3 табл.1 представлен эскиз кварцевого модуля измерителя смещения жесткого центра 1 мембранного узла с подвижным электродом 2 ёмкостного преобразователя  $C$ , состоящего из двух, последовательно соединенных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  с одинаковыми конфигурациями электродов диаметром  $D$  и протяженностью зазоров  $h_1$  для воздушного и  $h_2$  диэлектрического участков.

Суммарная ёмкость  $C$  определится:  $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ , где  $C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S_1}{h_1}$ ,  $C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 S_2}{h_2}$ .

Изменяемой частью суммарной ёмкости  $C$  является  $C_1$ .

Тогда относительное изменение ёмкости  $C$  определится:

$$\frac{dC}{dC_1} = -\left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)^{-1}. \quad (4)$$

В качестве диэлектрика 3 может использоваться как оптически чистый плавный кварц, так и кристаллические кварцевые резонаторы. В таком случае расширяются возможности схемотехнических способов построения преобразователей сил и смещений в частотозависимую форму выходного сигнала.

### Расчетные данные

Представим некоторые предварительные расчеты, дающие представление о метрологических возможностях кварцевых сенсоров.

- Нагрузочные характеристики. В соответствии с выражением (2) для коэффициента жесткости кварцевого упругого элемента можно определить предельно допустимую нагрузку на упругий элемент по вариант 2 табл.1 ( $D_n = 33\text{мм}$ ,  $D_{\text{вн}} = 22\text{мм}$ ,  $H = 1.5\text{мм}$ ,  $h = 10\text{мкм}$ ,  $k_s = 10$ ). Получено:  $F_{\text{max}} = (30 \div 50)\text{кН}$ .

- Температурные характеристики. Имеется в виду оценка зависимости основных характеристик сенсоров от эксплуатационного диапазона температур [8,9].

- Для коэффициента  $K(t)$  жесткости получим:

$$K(t) = K_0[1 + (\alpha_E + \alpha)t], \quad (5)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\alpha_E$  - температурные коэффициенты линейного расширения и модуля Юнга кварцевого стекла соответственно, где  $\alpha = 0.5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_E \approx 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ . Видно, что доминирующим является температурная зависимость модуля Юнга.

-Для «воздушного» конденсатора доминирующим фактором являются температурные изменения линейных размеров, образующих рабочий зазор измерительного конденсатора:  $C(t) = C_0(1 + \alpha t)$ .

### **Выходные характеристики**

Рассматриваемые кварцевые ёмкостные измерительные модули являются составными частями кварцевого генератора. Частотозадающими элементами являются: кварцевый резонатор  $f_k$  и присоединяемая ёмкость  $C(F, x)$ , функционально связанная с измеряемыми параметрами. Частота  $f_r$  на выходе кварцевого автогенератора определится [3,4,7]:

$$f_z = f_k \left( 1 + \sqrt{\frac{C_k}{C_0 + C(F, x)}} \right), \quad (6)$$

здесь  $C_k$ ,  $C_0$ ,  $C(F, x)$ , соответственно, эквивалентная динамическая, статическая и присоединяемая ёмкости.

Проведен расчет приращения частоты  $\Delta f_\Gamma$  относительно начальной частоты  $f_{\Gamma 0}$  автогенератора (при диаметре  $D_3=1\text{см}$ , начальном зазоре  $h=10\text{мкм}$  между электродами, начальная частота кварцевого резонатора  $f_k=10\text{МГц}$ , его эквивалентная емкость  $C_k=0,09\text{нФ}$ , статическая емкость  $C_0=1,5\text{нФ}$ ..). Получено, что максимальное приращение частоты  $(\Delta f_\Gamma)_{max}=616\text{ Гц}$  на верхнем пределе измерения ( $F_{max}=50\text{кН}$  или  $x_{max}=1\text{мкм}$ ).

Проведены расчеты температурных изменений приращений  $\Delta f_\Gamma(F, t)$  при изменении температуры от тарировочного значения ( $25^0\text{C}$ ). Установлено, что температурный коэффициент разности частот  $\alpha_{\Delta f_z} = 0,016$  при изменении температуры на  $\pm 100^0\text{C}$ .

### Электрическая схема

На рис. 6 представлен вариант принципиальной схемы возбуждения и обработки частотных сигналов сенсоров, включенных по дифференциальной схеме. Для каждого из двух сенсоров имеется своя схема возбуждения автоколебаний: микросхемы  $(D_{1.1} - D_{1.2})$  и  $(D_{2.1} - D_{2.2})$  с сигналами на их выходах на частотах  $f_{\Gamma 1}$  и  $f_{\Gamma 2}$  соответственно.

Микросхемы  $D_{1.3}$ ,  $D_{2.3}$  и  $D_{1.4}$  - согласующие.  $D_3$  реализует функцию вычитания частот:

$$f_{e1} = f_{e10} + \Delta f_1(x); f_{e2} = f_{e20} + \Delta f_2(x); f_{e1} - f_{e2} = \Delta f_1(x) + \Delta f_2(x). \quad (7)$$

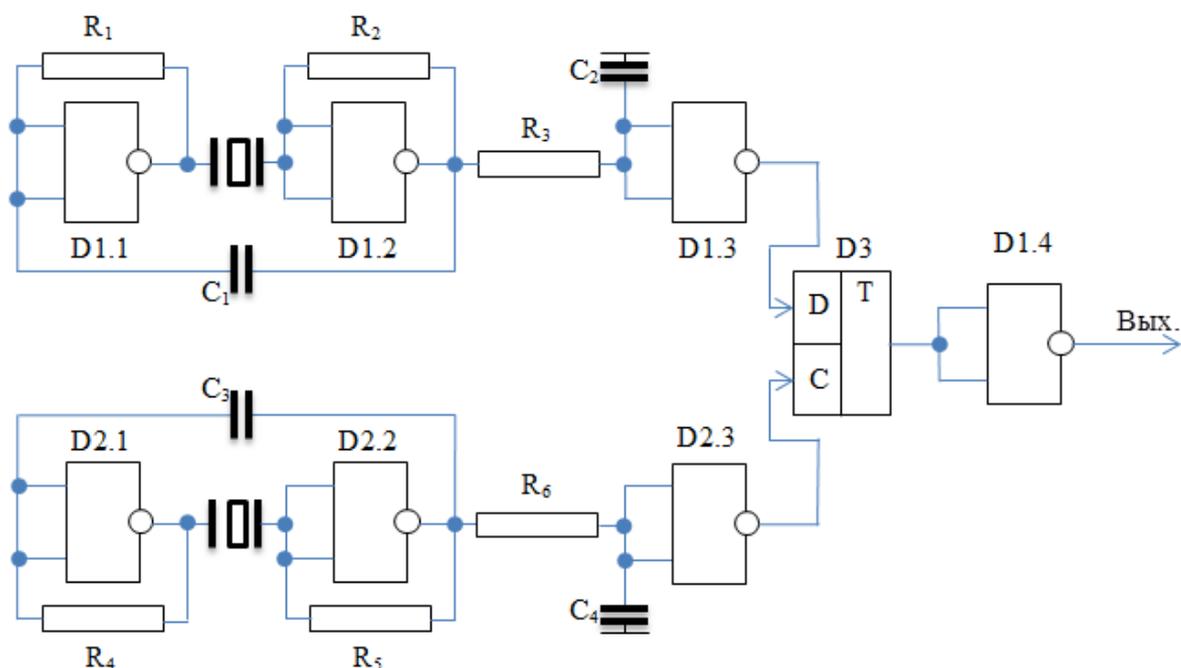


Рис. 6. Электрическая схема дифференциального сенсора

Выходной сигнал (7) пропорционален разности частот дифференциального преобразователя, трансформируется в дискретную последовательность импульсов, допускающих алгоритмическую обработку и необходимые коррекции.

### Выводы

В представленных материалах обоснована актуальность проблемы оперативного определения взлетного веса летательных аппаратов в момент их движения по РД к стартовой зоне ВПП. Определен облик измерительной зоны РД и сформированы требования к сенсорным элементам. В частности, к приемной области сенсорной линейки, непосредственно взаимодействующей с колесными элементами стоек шасси. Показано, что по профилю выходного сигнала определяется не только суммарный взлетный вес ЛА, но и дополнительно

определяется начальная «центровка самолета, и диагностируется техническое состояние колесных элементов.

Обоснованы требования к первичным сенсорам. Перспективными представляются емкостные сенсоры на базе кристаллического и аморфного кварца с частотозависимым выходным сигналом. Рассмотрены возможности ёмкостных тензопреобразователей. Представлены основные соотношения и предварительные оценки их основных характеристик.

### **Библиографический список**

1. Бродниковский А.М., Исаев В.А. Что WIM грядущий нам готовит? // Автомобильные дороги. 2014. №5. С. 10-14.
2. Сенянский М.В. Импортзамещение в весовом контроле // Дороги Евразии 2015. №1. С. 56-58.
3. Мельников В.Е. Унифицированные частотные преобразователи в акселерометрии // Труды МАИ, 2011, №49:  
[http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=27749&PAGEN\\_2=2](http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=27749&PAGEN_2=2)
4. Мельников В.Е. Электромеханические преобразователи на базе кварцевого стекла. – М.: Машиностроение, 1984 – 159 с.
5. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
6. Малов В.В. Пьезо-резонансные датчики. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 272 с.
7. Сергеев В.Ф. Основы расчета и проектирования навигационных

акселерометров на базе комплексного использования кристаллического и аморфного кварца: Учебное пособие. – М.: МАИ, 1988. – 48 с.

8. Бусурин В.И., Коробков В.В., Наинг Т.Л. Анализ погрешностей преобразователя ускорения, построенного на основе оптического туннельного эффекта // Труды МАИ, 2014, №75:

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49700>

9. Бусурин В.И., Коробков В.В., Казарьян А.В., Пашков С.П., Наинг Т.Л. Анализ влияния дестабилизирующих факторов на характеристики преобразователя ускорения на основе оптического туннельного эффекта // Труды МАИ, 2016, №89:

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=73390>